E2BIZ INVESTIGACION

# INFORME FINAL

## Licitación ID: 608897-98-LE19

"Consultoría para el análisis de modelos de cambio tecnológico para la proyección de emisiones de GEI en escenarios de electrificación vehicular"

---


**POR:**

**E2BIZ**

**INVESTIGACIÓN APLICADA EN LAS ÁREAS DE ENERGÍA, MEDIO AMBIENTE, ECONOMÍA Y TERRITORIO**


**PARA:**

**SUBSECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE**

**Santiago – 2019**

1 Objetivos 3

1.1 Objetivo General 3
1.2 Objetivos Específicos 3

2 Introducción 4

3 Metodologías de Proyección de Penetración de Electromovilidad 9

3.1 Introducción 9
3.2 Modelos Clásicos de Difusión 11

3.2.1 Modelo de Bass ..... 13

3.2.2 Modelo logístico ..... 18

3.2.3 Otros modelos de difusión ..... 21

3.2.4 Estimación de modelos de difusión ..... 24

3.3 Modelos de Elección Discreta 26
3.4 Modelos de Comportamiento de Agentes (“Agent Based Modelling”) 27

4 Revisión de Experiencia Internacional 32

4.1 Proyecciones internacionales de penetración de electromovilidad 33
4.2 Metodologías de proyección de la experiencia internacional 39
4.3 Experiencia nacional 42

5 análisis crítico de los modelos disponibles de proyección de cambio tecnológico aplicados a vehículos eléctricos. 48

6 Análisis de información requerida y estrategias de su proyección 51

7 Aplicación de un modelo para la proyección de la participación de vehículos eléctricos en el parque/ventas de vehículos livianos totales 57

7.1 Modelo de Bass propuesto 57
7.2 Datos y supuestos utilizados para la proyección 58
7.3 Resultados del Modelo de Proyección 60
7.4 Consideraciones económicas 62

8 Bibliografía 64

[Esta página fue dejada intencionalmente en blanco]

# 1 OBJETIVOS

## 1.1 Objetivo General

Analizar las opciones metodológicas para proyectar a largo plazo (2050) la participación de vehículos eléctricos en el mercado de vehículos livianos.

## 1.2 Objetivos Específicos

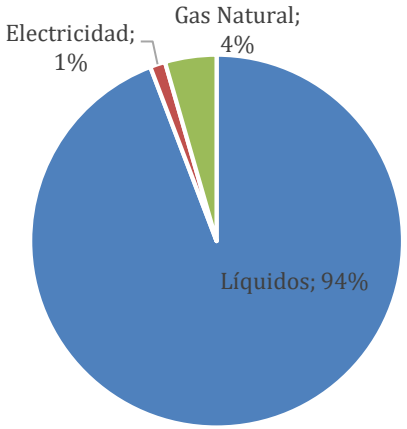
- Revisar la bibliografía relevante asociada a análisis y proyección de cambios tecnológicos del mercado de vehículos livianos.
- Revisar los modelos nacionales considerados en los pronósticos de participación de vehículos eléctricos a nivel de ventas o parque.
- Revisar las metodologías en los pronósticos de participación de vehículos eléctricos a nivel global o internacional.
- Análisis de fuentes de información requerida y estrategias de proyección de la información previa.
- Elaborar un análisis crítico de los modelos disponibles de proyección de cambio tecnológico aplicados a vehículos eléctricos.
- Levantar la información necesaria y aplicar un modelo para la proyección de la participación de vehículos eléctricos en el parque/ventas de vehículos livianos totales del país hasta el año 2050.

# 2 INTRODUCCIÓN

El transporte juega un rol crucial en la vida moderna y su servicio está directamente relacionado con el bienestar social: nos transportamos para trabajar, estudiar, ir al hospital, visitar familiares y amigos. Es también un catalizador indispensable de desarrollo y crecimiento económico. Sin embargo, se asocia a externalidades- o costos que su actividad impone en otros- que hacen que su actividad y crecimiento esté sujeto a políticas y regulación que debieran apuntar al bienestar y desarrollo sustentable. Muchos de estos costos se relacionan con el consumo de combustibles fósiles.

En efecto, uno de los principales problemas del transporte es la intensidad de su consumo de energía: el transporte es uno de los principales consumidores de energía a nivel mundial, representando más del 19% del consumo total (primario) de energía (EIA, 2019) Este consumo es especial porque, a diferencia de lo que ocurre con otros sectores de demanda final, éste se realiza en movimiento y no en una ubicación específica. Como consecuencia, la mayor parte, por sobre el 90%, se satisface tradicionalmente con derivados de petróleo fáciles de transportar, relativamente económicos; pero que contaminan nuestras ciudades y contribuyen significativamente al fenómeno del cambio climático.

Figura 1: Composición del consumo de energía del sector transporte a nivel mundial

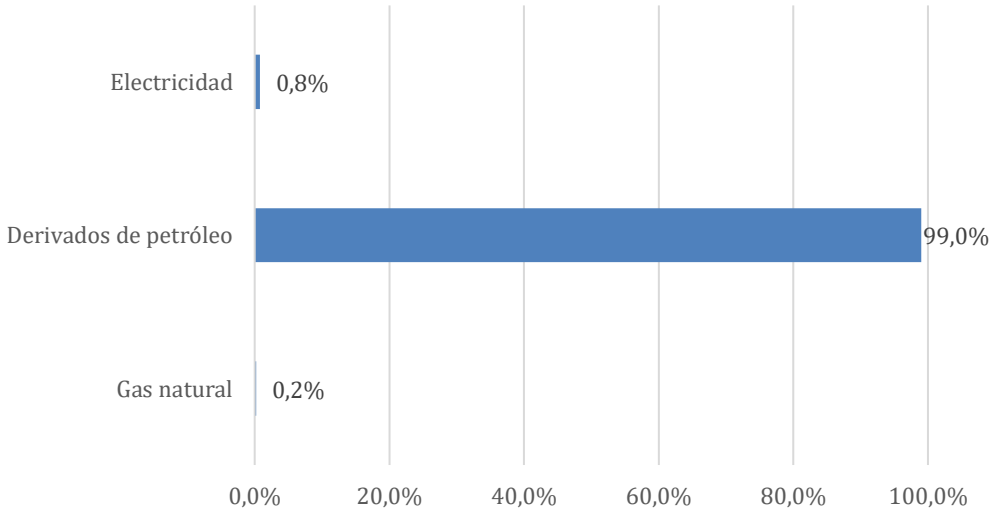



Fuente: (EIA, 2019)

En efecto, a nivel global, el sector transporte es una de las principales fuentes de gases efecto invernadero (GEI). Según antecedentes del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), el sector es responsable del 14% del total de estas emisiones

En Chile, las cifras revelan una estructura de consumo similar a la del mundo, e incluso son más preocupantes: el consumo del sector transporte es importante y se satisface principalmente con derivados del petróleo, el cual se importa desde los países productores. De acuerdo al Balance Nacional de Energía de 2017, este sector totalizó un consumo energético de más de 104 mil Teracalorías (Tcal) representando un 36% del consumo final de energía en el país. Por su lado, el 99% de la energía usada en transporte provino de derivados del petróleo.

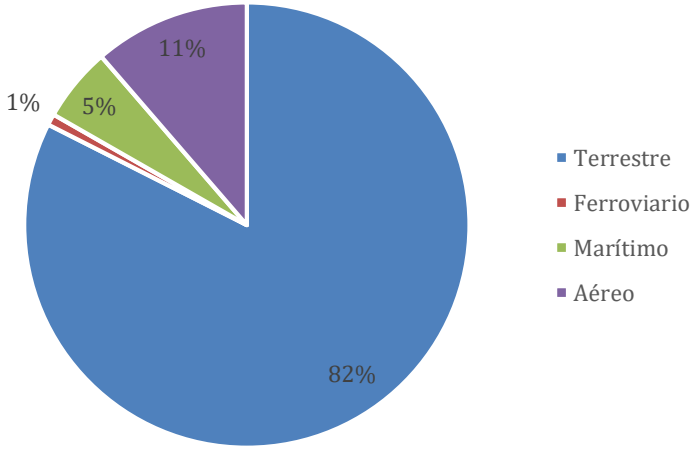
Figura 2: Consumo de energía del sector transporte en Chile




Fuente: Elaboración propia en base a antecedentes del Balance Nacional de Energía 2017 (Ministerio de Energía, 2018)

Al desagregar el consumo energético del sector transporte nacional, se aprecia que el transporte terrestre es responsable de la mayor parte de este consumo (82%) seguido por el transporte aéreo (11%) y marítimo (5%).

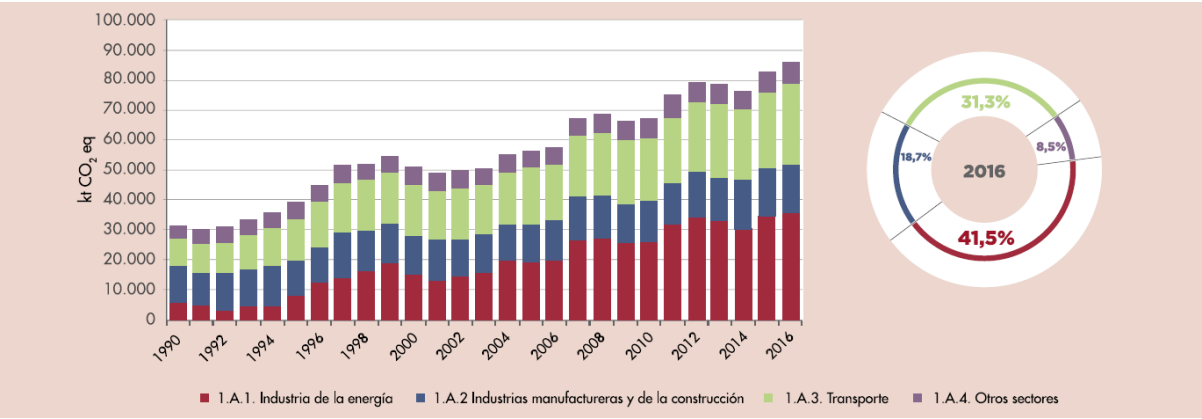
Figura 3: Consumo de energía por subsector de transporte  en 2017




Fuente: Elaboración propia en base a antecedentes del Balance Nacional de Energía 2017 (Ministerio de Energía, 2018)

Respecto de las emisiones nacionales de gases efecto invernadero (GEI), de acuerdo al Inventario Nacional de Emisiones el sector transporte es una fuente relevante de emisiones, ya que es responsable del 31% del total de emisiones contabilizadas en el sector energía. El nivel de emisiones de cada subsector del sector energía (de acuerdo a la categorización del IPCC) se muestran en la figura siguiente.

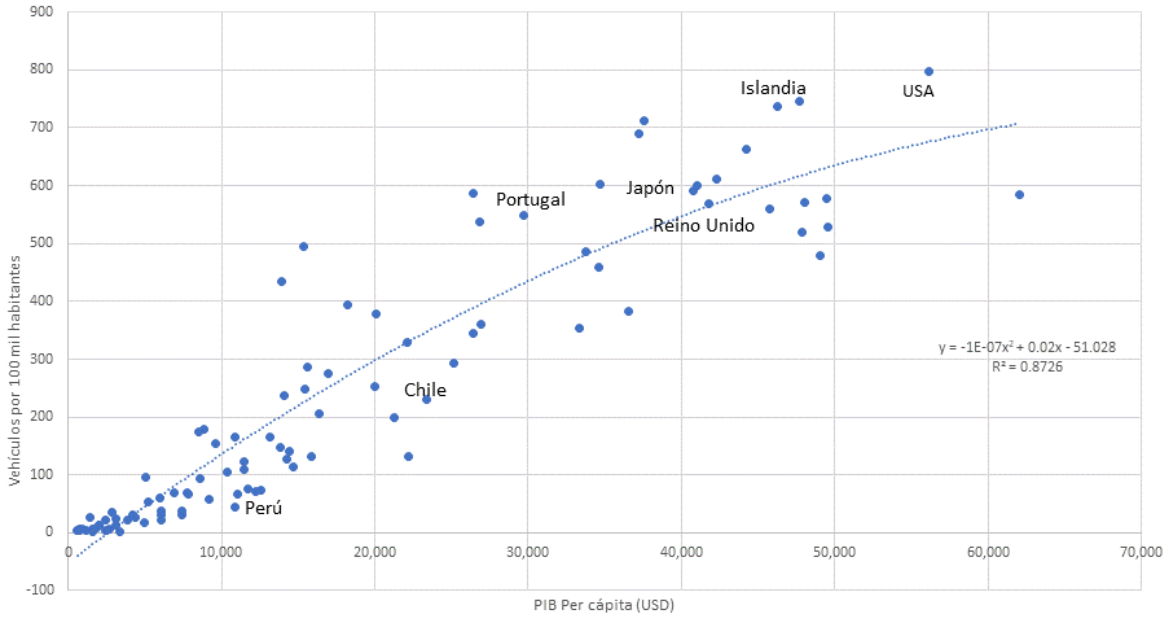
Figura 4: Emisiones GEI del sector Energía de Chile por sector , MM tCO2e




Fuente: Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero de Chile 1990-2013 (MMA, 2018)

A futuro se espera el transporte siga dominando los consumos de energía del país de continuar su senda favorable de crecimiento. Por décadas muchos estudios han intentado explicar la evolución de la demanda por transporte y del número de vehículos de países y ciudades. Estos estudios han concluido que el ingreso económico de las personas y el crecimiento del país son los determinantes fundamentales del tamaño de la flota vehicular. La evidencia empírica internacional sugiere que los países en crecimiento tenderán a aumentar la tenencia de vehículos- principalmente particulares- en desmedro del uso del transporte público. La figura siguiente revela una relación significativa entre la tasa de motorización (vehículos por cada 1000 habitantes) de vehículos livianos y medianos y el PIB per cápita corregido por paridad de poder de compra.

Figura 5: Consumo per cápita (PPP) versus vehículos por mil Habitantes en 2014




Fuente: Elaboración propia en base a de datos del Banco Mundial

Las metas del país en materia energética, ambientales y de cambio climático exigen reducir el consumo de fósiles y, particularmente de petróleo. La experiencia internacional revela cómo, desde hace años, distintos países han definido estrategias para reducir los consumos de petróleo y han levantado la necesidad de alternativas- particularmente para el transporte. Las motivaciones son diversas: seguridad energética al reducir la dependencia de recursos externos, la volatilidad de precios, eficiencia económica, motivaciones ambientales y cambio climático.

La reducción de gases de efecto invernadero y la creciente demanda por transporte son desafíos importantes de la movilidad.  Los vehículos eléctricos en combinación con energías renovables son una posible solución para estos desafíos. Sin embargo, el éxito de la penetración de vehículos eléctricos en el mercado depende de varios factores técnicos como el avance de la tecnología de baterías; factores económicos como la evolución de los precios del petróleo o la electricidad, factores organizacionales como la disponibilidad de infraestructura de carga, y factores de comportamiento del usuario como la aceptación del consumidor de esta nueva tecnología o comportamiento de conducción individual. El efecto de estos y otros factores en la evolución futura del mercado resultante es incierta. Por ello el análisis empírico y de escenarios de penetración de la tecnología ofrece oportunidades de planificación que permitan una transición eficiente hacia la carbono neutralidad.

# 3 METODOLOGÍAS DE PROYECCIÓN DE PENETRACIÓN DE ELECTROMOVILIDAD

## 3.1 Introducción

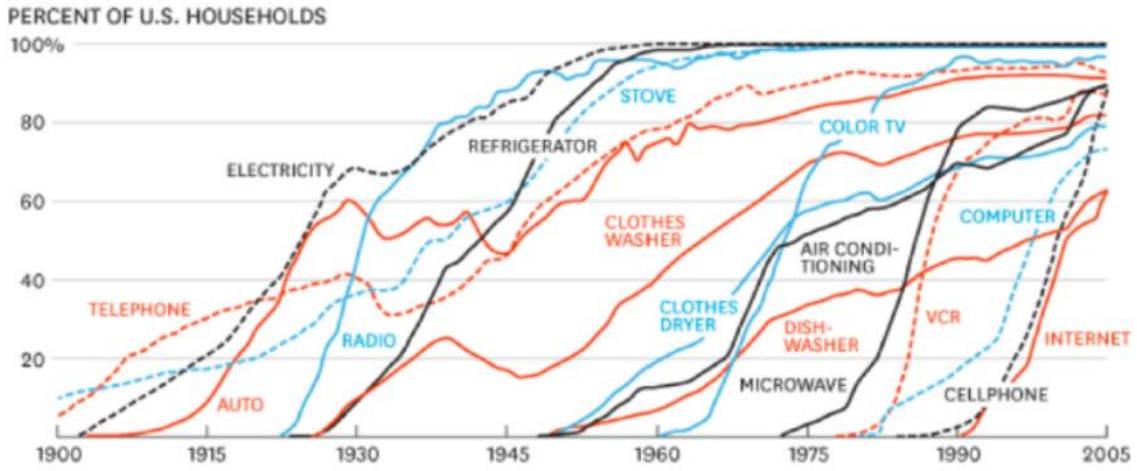
La innovación tecnológica es un insumo clave en el proceso de crecimiento económico tal como ha sido planteado por Schumpeter o Solow. En el enfoque neoclásico, la innovación se trata como un factor productivo junto con capital y trabajo, y se asume que es exógeno al proceso de crecimiento. Sin embargo, corrientes de economía del comportamiento o economía de la evolución han puesto el foco de su investigación en el nivel micro considerando la innovación un factor endógeno del proceso económico.

La teoría de innovación suele basarse en(Rogers, 1962). Según él, en un sistema social interactúan influencias externas (medios de comunicación, normativas) e influencias internas (relaciones sociales, atributos personales). La decisión de adoptar una nueva tecnología suele estar influenciada por las decisiones del resto de miembros del sistema. Cuanta más gente adopte una innovación menor será el riesgo y la dificultad percibidos, y más se acelerará la tasa de adopción.

La difusión caracteriza la adopción tecnológica y se relaciona con el proceso en que una innovación es comunicada y aceptada entre los miembros de un sistema social. El proceso de difusión de innovaciones suele seguir una curva definida y común a las industrias y tipos de tecnología, denominada Curva S, y que es una medida de la velocidad de adopción de una innovación. El proceso de expansión descrito mediante la Curva S ha sido propuesto como el ciclo de vida estándar de adopción de nuevas tecnologías y producto.

La figura siguiente presenta para Estados Unidos distintas curvas reales de adopción tecnológica.

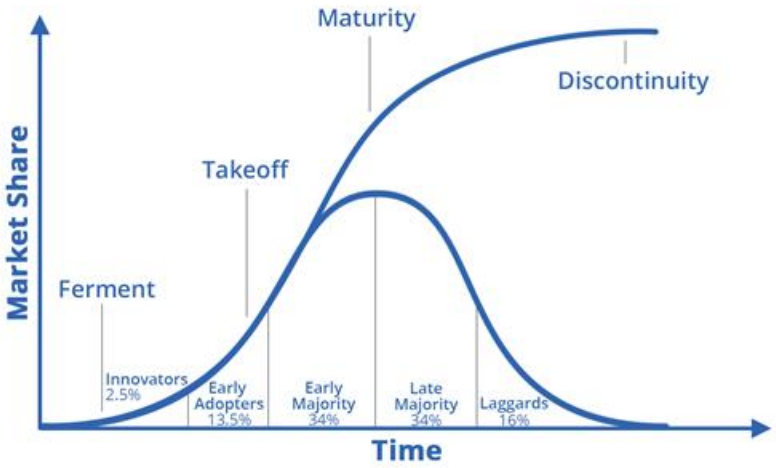
Figura 6: Curvas empíricas de penetración tecnológica de Estados Unidos




Fuente: Sanwal, 2017

Rogers caracteriza los adoptantes innovación en cinco categorías de adoptantes: Innovadores; adoptantes tempranos; adoptantes tardíos; mayoría tardía y rezagados. Estas categorías surgen a partir de la desviación estándar de la distribución normal. La figura siguiente presenta la curva de innovación de Rogers y su relación con las categorías de adopción.

Figura 7: Curva de Innovación Rogers y categorías de adopción




Fuente: (Sunol, 2018)

Cada transición de un grupo al siguiente supone un salto o discontinuidad porque cambia el perfil del consumidor. Sin embargo, según la evidencia empírica alcanzar la fase de "early majority" es fundamental para la sobrevivencia del producto. De hecho, la mayor parte de innovaciones fracasan no logrando alcanzar la masa crítica del mercado (15-18%) que les permita hacer la transición y que la pendiente de adopción se acelere. Moore (Moore, 2006) propone una clasificación actualizada de las categorías de Rogers y enfatiza la dificultad de la transición entre el grupo de "early adopters" (visionarios) y "early majority" (pragmáticos) porque ambos grupos no están en contacto y tienen expectativas distintas sobre el valor que les entregue el producto.

## 3.2 Modelos Clásicos de Difusión

Las primeras investigaciones sobre la difusión tecnológica e innovación se basan en modelos que se utilizaron en epidemiología para describir el contagio de enfermedades infecciosas. La literatura muestra que, los modelos de difusión utilizados comúnmente se pueden anidar en la siguiente ecuación diferencial (Kijek, 2010):

$$\frac{dN(t)}{dt} = r(t) \cdot (m - N(t))$$

Donde $N(t)$ es el número acumulado de adoptantes en tiempo t, $\frac{dN(t)}{dt}$ es la tasa de difusión, m el potencial de adoptantes y r(t) el coeficiente de difusión.

El coeficiente de difusión puede ajustarse y representa la interacción entre las fuerzas de innovación e imitación. A partir de la forma del coeficiente de difusión los modelos de difusión pueden clasificarse en tres categorías:

- **Modelo de influencia externa**

En los modelos de influencia externa, $r(t) = \mathrm{p}$ constante, por lo que la ecuación diferencial que representa la adopción es:

$$\frac{dN(t)}{dt} = p \cdot (m - N(t))$$

En esta categoría, la velocidad de difusión no depende del número de adoptantes anteriores sino que es impulsada solo por la innovación intrínseca (o actitud de riesgo) y no por imitación. En general, el modelo de influencia externa sería adecuado cuando los adoptantes potenciales están relativamente aislados en el sistema social y donde la comunicación es predominantemente formalizada y jerárquica, es decir, el impacto del boca a boca es bajo (Kijek, 2010).

- **Modelo de influencia interna**

En este caso, el coeficiente de difusión $r(t) = q \cdot N(t)$, por lo que la ecuación diferencial que representa la adopción es:

$$\frac{dN(t)}{dt} = q \cdot \mathrm{N(t)} \cdot (m - N(t))$$

En un modelo de influencia interna, la tasa de adopción depende directamente del número de adoptantes anteriores, es decir, es un modelo de imitación puro. La innovación intrínseca no juega rol alguno. La interacción directa entre potenciales adoptantes y los adoptantes anteriores (a través del boca a boca, por ejemplo) ingresan a la ecuación a través del coeficiente de imitación, q. Cabe señalar que el efecto del boca a boca es una función de los adoptantes anteriores, N (t), y por lo tanto aumenta con el tiempo (Wright et al, 1997)

El modelo de influencia interna es adecuado cuando el grupo de potenciales adoptantes es relativamente pequeño y homogéneo, o cuando la legitimación de la información previa es importante para la adopción (Kijek, 2010). Esta forma del modelo de influencia interna toma la forma de la función de crecimiento de Gompertz, ampliamente utilizado.

- **Modelo de influencia mixta**

En el modelo de influencia mixta, el coeficiente de difusión es $r(t) = p + qN(t)$, por lo que la ecuación diferencial que describe la trayectoria de adopción es:

$$\frac{dN(t)}{dt} = (\mathrm{p} + q\mathrm{N(t)}) \cdot (m - N(t))$$

El modelo fue introducido por Bass (1969), y es una generalización que acomoda tanto la influencia interna y los modelos de influencia externa como casos especiales. Esta especificación permite tanto la innovación intrínseca (a través del coeficiente de innovación, p) y un efecto de boca en boca (imitación) (a través del coeficiente de imitación, q). Su flexibilidad ha hecho que el modelo de influencia mixta sea, el más utilizado entre los tres modelos de difusión basados en ecuaciones diferenciales (Kijek, 2010)

### 3.2.1 Modelo de Bass

#### Ecuación e interpretación

El modelo de Bass es una aplicación directa del modelo de influencia mixta:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \left(\mathrm{p} + \frac{q}{m}\mathrm{N(t)}\right) \cdot \left(m - N(t)\right)$$

$$= qN(t)\left(1 - \frac{N(T)}{m}\right) + p\left(m - N(t)\right)$$

En esta última ecuación, el primer término representa la influencia de la imitación mientras que el segundo de la innovación.

Notar que el parámetro de difusión pasa de $\mathrm{p} + q\mathrm{N(t)}$ a $\mathrm{p} + \frac{q}{m}\mathrm{N(t)}$ para poder construir una función distribución de la forma $F(t) = \frac{N(t)}{m}$ y que permitirá la resolución de una ecuación diferencial sencilla. F(t) se interpreta como la fracción de adoptantes potenciales que adoptó la tecnología en t. En consecuencia, el modelo Bass se puede replantear en función de F como:

$$m\frac{dF(t)}{dt} = \left(\mathrm{p} + \mathrm{qF(t)}\right) \cdot \left(m - mF(t)\right)$$

Es decir, la ecuación diferencial queda:

$$\frac{dF(t)}{dt} = \left(\mathrm{p} + \mathrm{qF(t)}\right) \cdot \left(1 - F(t)\right)$$

Esta ecuación puede interpretarse fácilmente. La proporción de innovadores crece a tasa p para los innovadores (del total de aún no ha innovado) y a una tasa $\mathrm{qF(t)}$ caracterizando la imitación (también del total que aún no ha innovado). Otra forma de interpretar la ecuación es a partir de tasa de riesgo ("hazard rate"). Para ello se define $f(t) = \frac{dF(t)}{dt}$ y se reescribe la ecuación diferencial como[1]:

$$\frac{f(t)}{1 - F(t)} = p + qF(t)$$

Es decir, se asume que esta probabilidad es lineal afín en los que ya han adoptado la innovación.

Al resolver la ecuación diferencial se obtienen formas funcionales explícitas para F(t) y f(t).

$$\frac{dF(t)}{dt} = (\mathrm{p} + \mathrm{qF(t)}) \cdot (1 - F(t))$$

Para su resolución, la EDO suele reescribirse de la forma siguiente lo que permite su estimación por separación de variables:

$$\frac{dF}{p + (q - p)F(t) - qF^2(t)} = dt$$

La solución de esta ecuación es considerando la condición inicial $F(0) = 0$ es:

$$F(t) = \frac{1 - e^{-(p+q)t}}{1 + \frac{q}{p}e^{-(p+q)t}}$$

De la forma funcional de F es directo que:

[1] En este caso puede ser conveniente recordar la fórmula de probabilidades condicionales $P(A \,/\, B) = \frac{P(A \cap B)}{P(B)} = \frac{f(t)}{1-F(t)}$. En este caso A es la probabilidad instantánea de adoptar en t y P(B) la probabilidad de no haber adoptado.

$$\lim_{t\to\infty} F(t) = 1$$

Derivando se obtiene:

$$f(t) = F'(t) = \frac{(p+q)^2}{p}\frac{e^{-(p+q)t}}{(1+\frac{q}{p}e^{-(p+q)t})^2}$$

Por propiedades de la exponencial se aprecia que para todo instante $f(t) > 0$, por lo que F es estrictamente creciente.

Para examinar la convexidad de F, se obtiene su segunda derivada:

$$F''(t) = \frac{(p+q)^3}{p}\cdot\frac{(\frac{q}{p}e^{-(p+q)t} - 1)e^{-(p+q)t}}{(1+\frac{q}{p}e^{-(p+q)t})^3}$$

El punto de inflexión se obtiene cuando $F''(t_I) = 0$ es decir cuando $t_I = \frac{1}{p+q}\ln(\frac{q}{p})$.

El máximo valor de f también se da en el instante $t_I$, y tiene el valor:

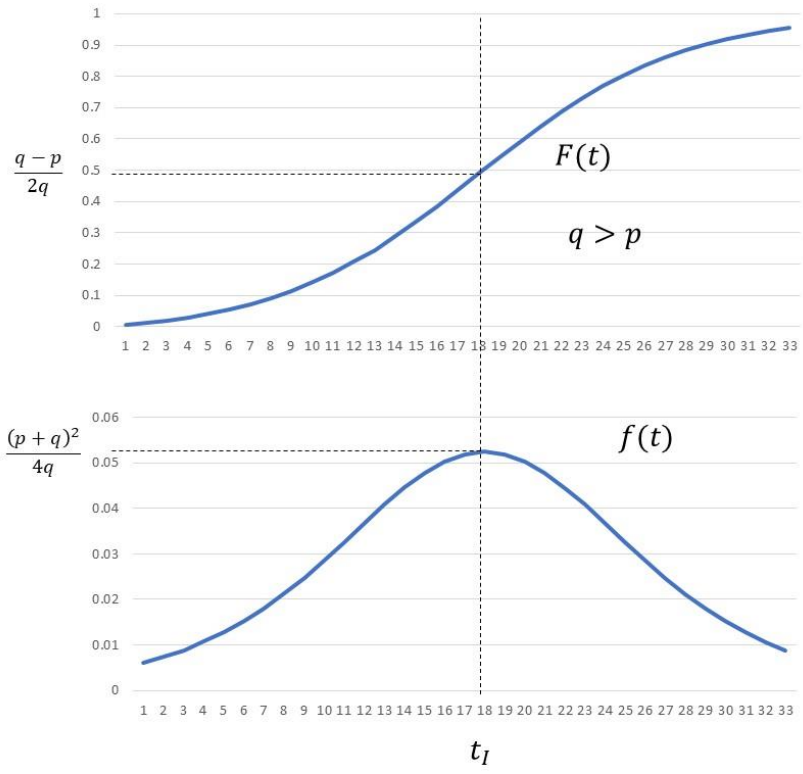
$$maxf(t) = f(t_I) = \frac{(p+q)^2}{4q}$$

El valor de la función de Bass en su punto de inflexión es:

$$F(t_I) = \frac{q-p}{2q}$$

La figura siguiente caracteriza las formas típicas de las funciones F y f cuando q>p. Para ello se toman valores p=0,005 y q=0,2.- Estos valores fueron seleccionados para que $t_I$ fuese lo suficientemente cercano a un entero. Los cálculos y las curvas de esta figura se incluyen en archivo Excel adjunto para este estudio donde se comprueban las fórmulas del máximo de la función f(t) e inflexión de F(t).

Figura 8: Representación gráfica modelo de Bass




Fuente: Elaboración propia

Finalmente, las ventas pueden aproximarse como:

$$Ventas(t_1,t_2) = N(t_2) - N(t_1) \approx (t_2 - t_1)N'(\frac{t_1 + t_2}{2})$$

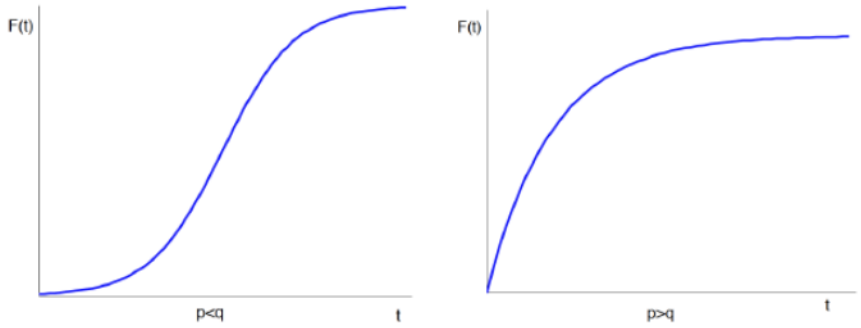
Donde es directo que $N(t) = mF(t)$ y $N'(t) = mF'(t)$. En este caso m se expresa en unidades de producto[2].

[2] En las aplicaciones del modelo de Bell, y en general, en cualquier modelo de difusión se puede considerar también que m es la participación máxima (porcentual) del mercado por lo que las ventas estimadas serían respecto a la fracción del mercado que adopta en el periodo.

La forma de las curvas de Bass depende de los valores relativos de los parámetros p y q. En la literatura empírica el valor promedio de p es 0,03 y es generalmente menor a 0,01. El valor medio de q es 0,38 y su rango esperado se encuentra entre 0,3 y 0,5 (V. K. Nārāyaṇan, 2010).

La figura siguiente presenta las formas típicas de estas curvas para los casos p<q (baja innovación, alta imitación) y p>q.

Figura 9: Curvas de Bass para distintos valores de parámetros




Fuente: elaboración propia

Cuando $q < p$, el punto de inflexión de F y máximo de f ocurren antes de la entrada del producto ($t < 0$) y el valor de la función de Bass es negativa en ese punto. Por tanto el máximo de f, para $t \geq 0$, se da precisamente para $t = 0$ siendo una solución esquina. En el caso $q = p$, el máximo de f se da para $t_I = 0$, es decir, el máximo de ventas se produce justo al entrar el producto al mercado. Para el caso $q > p$ se obtiene una curva S convencional y $t_I > 0$. Lo anterior se resume en la relación siguiente:

$$maxf(t) = \begin{cases} \dfrac{(p+q)^2}{4q} \Leftrightarrow q > p, t = t_I \\ p \Leftrightarrow q \leq p, t = 0 \end{cases}$$

### 3.2.2 Modelo logístico

El modelo logístico describe el crecimiento en el número de usuarios observados a lo largo del tiempo en un mercado cerrado, sin el impacto de ningún otro producto. El modelo logístico es el caso particular del modelo de Bass para p=0. El modelo logístico se representa por la ecuación diferencial de un modelo de influencia interna[3]:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \mathrm{N(t)}\frac{q}{m} \cdot \big(m - N(t)\big)$$

$$= qN(t)(1 - \frac{N(t)}{m})$$

En adelante q se representará por "a" como es usual en la notación de la función logística (es decir, q=a).

La solución de la ecuación diferencial con condición inicial $N(0) = 0$, entrega la función logística:

$$N(t) = \frac{m}{1 + e^{-a(t-b)}}$$

El modelo se define entonces por tres parámetros: m el potencial de mercado, a un parámetro de tasa de crecimiento y b un parámetro de desplazamiento temporal.

De la ecuación anterior es directo que:

$$F(t) = \frac{N(t)}{m} = \frac{1}{1 + e^{-a(t-b)}}$$

Para caracterizar el comportamiento asintótico es directo que:

$$\lim_{t \to \infty} F(t) = \begin{cases} 1 \Leftrightarrow a > 0 \\ 0 \Leftrightarrow a < 0 \end{cases}$$

[3] Análogamente a como se hizo en el modelo de Bass se divide por m para poder formar una ecuación diferencial sencilla para F.

Al diferenciar F se obtiene f:

$$f(t) = F'(t) = \frac{a \cdot e^{-a(t-b)}}{[1 + e^{-a(t-b)}]^2}$$

El valor máximo de f y el punto de inflexión de F se obtiene de la condición $F''(t) = 0$.

$$F''(t) = \frac{-a^2 \cdot e^{-a(t-b)}[1 - e^{-a(t-b)}]}{[1 + e^{-a(t-b)}]^3}$$

El punto de inflexión se da para $t_I = b$. Cuando $a > 0$ esto corresponde a un máximo de f, y el valor máximo es:

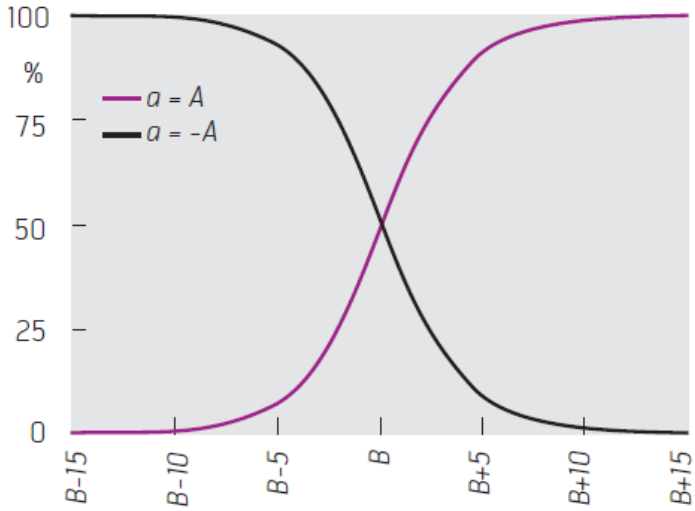
$$maxf(t) = \frac{a}{4} \Leftrightarrow a > 0; t = b$$

La función logística es simétrica lo que se deduce del valor de la función logística en el punto de inflexión:

$$F(b) = \frac{1}{2}$$

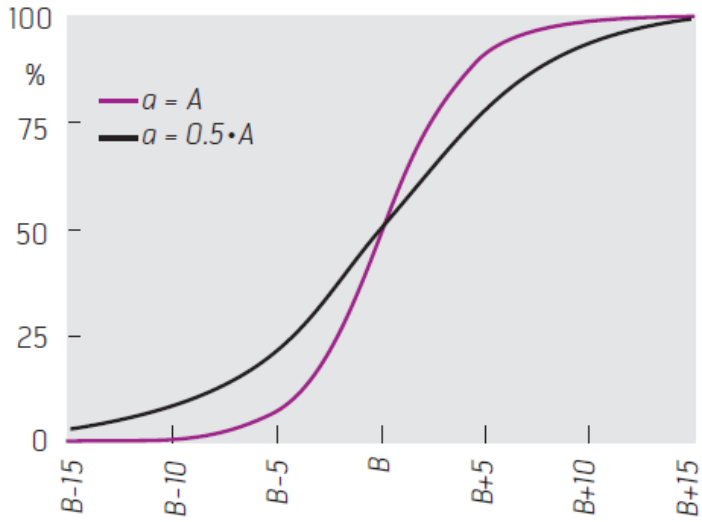
Las figuras siguientes presentan impactos en la función logística al variar los parámetros:

Figura 10: Impacto de Parámetro de crecimiento positivo y negativo



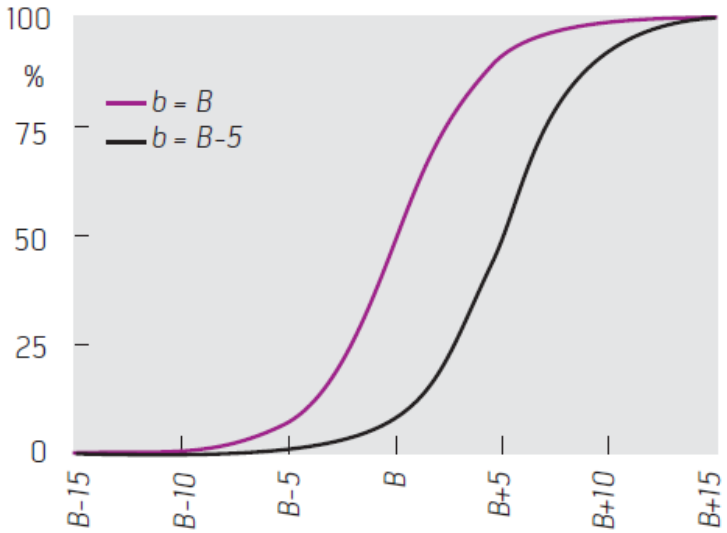

Fuente: (Sokele, 2009)

Figura 11: Impacto de reducir 50% parámetro de crecimiento




Fuente: (Sokele, 2009)

Figura 12: Impacto de reducir en 5 unidades parámetro de desplazamiento temporal




Fuente: (Sokele, 2009)

Aunque el modelo logístico es ampliamente utilizado para pronosticar la innovación, no es adecuado para modelar la adopción de productos cuando el número de usuarios aumenta rápidamente justo después de la introducción del producto. Esta deficiencia se resuelve con el modelo Bass. Otra deficiencia del modelo es que el punto de inflexión siempre ocurre en (b, 1/ 2) lo que limita la modelación.

### 3.2.3 Otros modelos de difusión

A continuación se presentan otros modelos identificados en la literatura internacional para modelar la difusión de innovaciones.

#### Modelo de Gompertz

El modelo de difusión de Gompertz es otro modelo de influencia interna que se representa por la siguiente ecuación diferencial[4]:

$$\frac{dN(t)}{dt} = aN(t) \cdot (m - N(t))$$

En este caso, el modelo de Gompertz I es:

$$N(t) = me^{-e^{-a-bt}} \quad y \quad F(t) = e^{-e^{-a-bt}}$$

Los parámetros tienen la misma interpretación que un modelo logístico. Más aún, las curvas de Gompertz y logísticas son muy similares. La diferencia es que el punto de inflexión de la curva logística se da en el 50% de la curva mientras que la Gompertz en el 37% respecto del nivel de saturación del mercado. Por lo anterior, la curva de Gompertz no es simétrica.

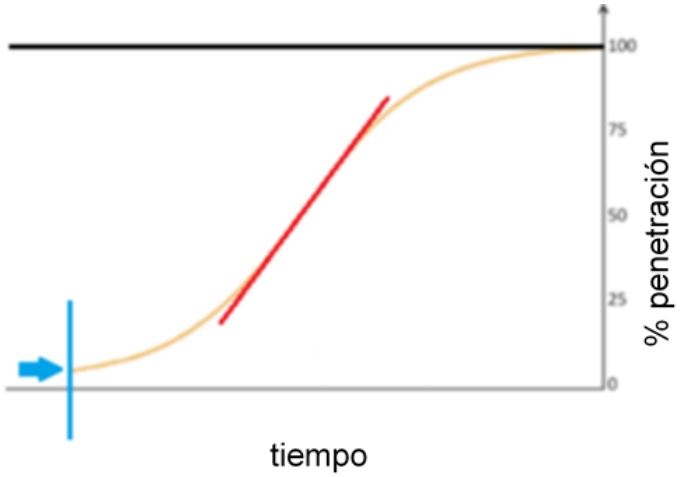
El modelo Gompertz II surge de sustituir $e^{-a}$ por una constante ($A = e^{-a}$). Es decir, el modelo queda:

[4] En este caso la diferencia con el modelo logístico el parámetro de difusión es a/m mientras que en el caso Gompertz simplemente a.

$$N(t) = me^{-e^{-a-bt}} = me^{-Ae^{-bt}}$$

La figura siguiente explica la intuición de los parámetros. S describe el límite asintótico superior que representa el límite del mercado (línea negra). Es decir, $\lim_{t\to\infty} N(t) = m$. A representa el desplazamiento horizontal de la curva sobre el eje de las abscisas (o rezago de adopción en celeste) y b representa la tasa de adopción (pendiente de la curva en rojo)

Figura 13: Interpretación de Parámetro Modelo de Gompertz II




Fuente: (Sokele, 2009)

## Modelo de Nourai

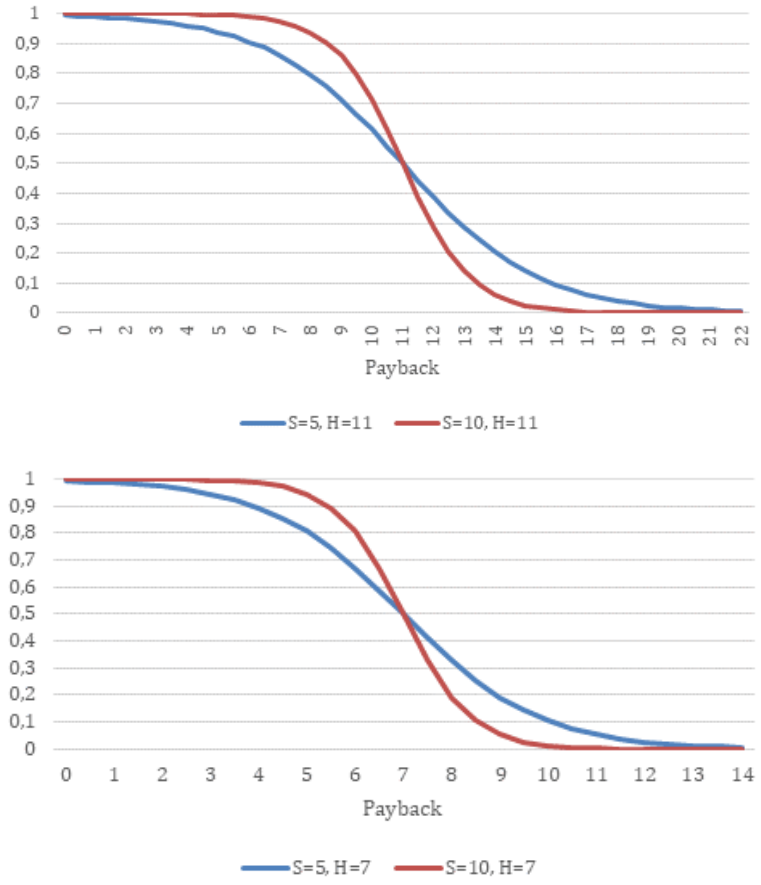
El modelo matemático para la curva S que representa la penetración en el mercado se ha expresado en muchas formas y ecuaciones para adaptarse a diferentes productos y mercados. En (Ali Nourai, 2008) se presenta una simplificación a los modelos de difusión tradicionales y que depende explícitamente de la tecnología. A continuación se muestra la ecuación simplificada:

$$N(x) = \frac{m}{1 + \exp\left(S\left(\frac{x}{H} - 1\right)\right)} \; y \; F(x) = \frac{1}{1 + \exp\left(S\left(\frac{x}{H} - 1\right)\right)}$$

Donde m es el tamaño potencial del mercado, $S \in [5, 10]$ un parámetro de sensibilidad, H el punto medio de la curva y x el periodo de recuperación de capital (payback). Notar que siempre cuando x=H siempre se cumple que $F(H) = 1/2$.

Las figuras siguientes presentan curvas típicas para distintos valores de S y H.

Figura 14: Formas de curvas de penetración en función de payback para distintos parámetros




Fuente: Elaboración propia

## Modelo de Bass Generalizado

El modelo de difusión de Bass es el más empleado pero no incorpora factores externos que pudiesen afectar la difusión tecnológica. Por este motivo, se desarrolló el modelo de Bass generalizado que busca superar esta limitación. En este caso la ecuación diferencial a resolver es:

$$\frac{f(t)}{1-F(t)} = \big(p + qF(t)\big)x(t)$$

Donde $x(t) = t + \ln\left(\frac{\Pr(t)}{\Pr(0)}\right)$ y Pr(t) representa un precio relevante de la tecnología. En el caso de vehículos eléctricos, por ejemplo, se ha utilizado directamente el precio de las baterías.

La solución de la ecuación es entrega la solución del modelo de Bass generalizado:

$$F(t) = \frac{1 - e^{-x(t)(p+q)}}{1 + \frac{q}{p}e^{-x(t)(p+q)}}$$

### Modelo de Sharif y Ranannathan

Los modelos revisados hasta ahora han asumido un potencial de mercado m constante. Sharif y Ranannathan asumen trayectorias exógenas de crecimiento de este potencial en un contexto de Bass. El modelo es entonces dinámico y queda representado por las ecuaciones:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \left(\mathrm{p} + \frac{q}{m(t)}\mathrm{N(t)}\right) \cdot \big(m(t) - N(t)\big)$$

$$m(t) = m_o e^{gt} \text{ con } m(0) = m_0$$

Este es el modelo más complejo presentado en este estudio y requiere la estimación de p, q, g y $m_0$. No existen numerosas aplicaciones de esta metodología según ha podido constatar en la revisión de bibliografía realizada.

## 3.2.4 Estimación de modelos de difusión

Para estimar empíricamente los parámetros del modelo de difusión, Bass utilizó una discretización de la ecuación diferencial:

$$\frac{dN(t)}{dt} = \left(\mathrm{p} + \frac{q}{m}\mathrm{N(t)}\right) \cdot \big(m - N(t)\big)$$

La discretización es la siguiente:

$$N(t) - N(t-1) = pm + (q-p)N(t-1) - \frac{q}{m}N^2(t-1)$$

De donde la ecuación a estimar es:

$$x(t) = \alpha_1 + \alpha_2 N(t-1) + \alpha_3 N^2(t-1)$$

Donde $\alpha_1 = p \cdot m;\ \alpha_2 = q - p;\ \alpha_3 = q/m.$

Bass realizó la estimación utilizando mínimos cuadrados. Si bien la estimación por MCO es atractiva debido a su simplicidad, está sujeta a problemas. Si se estima con pocos datos, las estimaciones tienden a ser inestables y pueden tener errores en los signos de los parámetros debido a la posible colinealidad entre los regresores (N y $N^2$). Por otra parte, la discretización del proceso continuo de Bass (1969) para utilizar la regresión introduce un sesgo de intervalo de tiempo (Kijek, 2010).

Por lo anterior, la literatura empírica recomienda esta estimación a partir de métodos de estimación no lineales o de máxima verosimilitud. En estos casos se han tomado otros supuestos que no necesariamente requieren de la discretización anterior.

**De todas formas es importante recalcar que la evidencia empírica suele estimar simultáneamente valores para p, q y m.** Sin embargo, existen múltiples ejercicios empíricos donde se asume un potencial de mercado (m) exógeno estimando solo los parámetros p y q. En (Massiani, 2015) se muestra que en este último caso, la estimación de p es sensible al supuesto del tamaño del mercado. En efecto, para un rango amplio de potenciales de mercado (entre 0,5 y 20 millones) se encuentra una relación inversa entre el supuesto de m y la estimación de p. Esta sensibilidad haría difícil inferir respecto de los valores de p a emplear. Con q no ocurriría lo mismo y su estimación sería más estable.

La tabla siguiente muestra valores de p y q encontrados en estudios de transporte indicando explícitamente si el potencial de mercado (m) se estima o se asume exógenamente.

Tabla 1: Valores de p y q de la literatura de transporte

Available literature estimates for p and q parameters.

| Source technology | Method | Innovation coefficient p | Imitation coefficient q | Market potential |
|---|---|---|---|---|
| Becker, Sidhu et al. (2009) | Authoritative sources | 0.01<br>0.02<br>0.025 | 0.4 | Exogenous: 70% or 90% of the light-vehicle market in each year. |
| Electric cars | | | | |
| Davidson et al. (2013) | Authoritative sources, but eventually refers to Becker et al. (2009) | Idem | Idem | Exogenous: Number of Household are "0.03, 0.25, and 0.7 in the low, medium, and high growth scenarios" |
| Electric cars | | | | |
| Gross (2008) | Authoritative sources | 0.01 | 0.1 | |
| Li (nd) | Based on "a statistic model of EVs in US from 1999 to 2008" | 0.0000365 | 0.447 | Exogenous: "At most half of the vehicles in market can be EVs, the ultimate market potential is calculated as 2.5 million". |
| Electric cars | | | | |
| Cordill (2012) | Calibration on US market data 2000–2010 | | | Estimated |
| Prius Hybrid | | 0.0016 | 1.45 | 2.87 million |
| Civic Hybrid | | 0.00343 | 0.631 | 3.68 million |
| Ford Escape Hybrid | | 0.036 | 0.432 | 0.36 million |
| Steffens (2003) | First car purchase (not specifically AFV) in Australia 1966–1996 | 0.0076 | 0.0905 | Exogenous: 91% of the population would finally purchase the technology. |
| Conventional cars | | | | |
| Shoemaker (2012) [a] | Calibration on AFV monthly sales in the US Dec 1995 (Oct 2004 for utility AFV) Dec 2011 in the US | | | Estimated |
| Passenger vehicles | | 0.0912 | 0.4692 | 436 000 |
| Utility vehicles | | 0.008124 | 0.4632 | 2 300 000 |
| Lamberson (2008) [a] | Calibration on US monthly sales (Feb. 2001–Oct. 2007) | | | Estimated |
| HEV | | 0.000618 | 0.8736 | 1.6 million veh. |
| Park et al. (2011) | HEV sales in Japan (1997–2006) parameterized to Korea[b] | | | |
| HEV | | 0.0037 | 0.3454 | 10,2 million veh. |
| Jensen, CherchiMabit, and Ortúzar (2014) | Norwegian new electric car registration data from (Jan. 2003–Jun. 2013) | | | Exogenous: Result of a Discrete Choice Model |
| Electric cars | | 0.002 | 0.23 | |
| McManus and Senter (2009) | HEV annual Data in the US. (1999–2008) | 0.0026 | 0.709 | Estimated: 1.9 million veh. |
| HEV | | (0.00124 generalized Bass) | (0.77922 generalized bass) | |
| Cao (2004) | Calibration on annual sales in the US 1993–2002 | | | |
| E85 | | 0.00441 | 0.491 | E85: 245971 |
| CNG | | 0.0210 | 0.265 | CNG: 100000 |
| Hybrids | | 0.000446 | 0.4788 | Hybrid: Exogenous. Based on EIA scenario of 19 million HEV sold until 2025, subsequently varies in function of HEV awareness and (lagged) fuel price |

[a] Monthly coefficients are annualized by multiplication with factor 12.
[b] Imitation factor modified based on comparison of parameters across several Pacific Rim countries for previously introduced products (see Takada, H. and D. Jain (1991). "Cross-National Analysis of Diffusion of Consumer Durable Goods in Pacific Rim Countries." Journal of Marketing 55(2): 48–54.)

Fuente: (Massiani & Gosh, 2016)

## 3.3 Modelos de Elección Discreta

Este método es una mezcla de modelo logit y un modelo individual. Los modelos discretos permiten determinar la probabilidad de una nueva tecnología a elegir entre las tecnologías antiguas y nuevas. Los modelos logit se han empleado para modelar la preferencia o probabilidad de los consumidores de escoger una u otra tecnología en función de distintos atributos. Se distinguen atributos de los consumidores (ingreso, nivel educacional, etc.) con aquellos de las tecnologías.

Los modelos generalmente tienen dos etapas:

- Etapa 1: Modelo de variable latente (LVM), que permite la caracterización de actitudes mediante una lista de características socioeconómicas. Por ejemplo, se determina qué tipo de individuos pueden preferir nuevas tecnologías o estar abiertas a créditos en función de variables socioeconómicas.
- Etapa 2: Un modelo logit con múltiples alternativas, que integra las actitudes caracterizadas por el LVM para explicar las opciones de vehículos individuales.

En el capítulo 5 se discute respecto de las dificultades de levantar información para poder desarrollar este tipo de modelaciones.

## 3.4 Modelos de Comportamiento de Agentes ("Agent Based Modelling")

Gestionar la demanda y/o oferta energía, incluyendo patrones de consumo y adopción de tecnologías, requiere establecer la respuesta a distintos instrumentos de política energética y ambiental. Los consumidores y empresas pueden invertir en tecnologías que les permitan reducir su demanda de energía suministrada por fuentes tradicionales, o incluso convertirse en productores de energía en sí mismos. Tales tecnologías de "lado de la demanda" incluyen sistemas solares fotovoltaicos (PV), vehículos eléctricos, sistemas de gestión de energía en el hogar o las empresas, adopción de tecnologías más limpias y/o eficientes. El aprovechamiento exitoso de tales oportunidades requiere una mejor comprensión de cómo el comportamiento de los agentes económicos impacta el sistema de energía global. Se requiere entender por qué los agentes usan energía de la manera en que lo hacen, cómo responden a la información sobre los costos y beneficios de las elecciones de energía, y cómo las políticas energéticas y de cambio climático afectan su comportamiento individual y agregado. Responder estas preguntas es crucial para desarrollar políticas y programas que facilitan el desarrollo de sistema energético global y que contribuya a lograr mayor bienestar y menos dependencia de combustibles fósiles.

En esta perspectiva, resultan útiles los modelos basados en agentes o "*agent based modelling*" (ABM) para representar las complejidades del comportamiento de los agentes económicos. Aplicaciones relevantes en la experiencia internacional han utilizado estos métodos para modelar la inversión y cambio tecnológico del sector eléctrico, transporte o los impactos de instrumentos de precio al carbono como los sistemas de permisos transables "*emission trading systems*" (ETS).

En este sentido, los mercados son sistemas complejos y dinámicos, por lo que los métodos tradicionales de modelación económica han sido incapaces de analizar los comportamientos complejos de los agentes individuales. Sin embargo, la modelación basada en agentes es una manera eficiente para analizar de este tipo de sistemas con numerosos factores, niveles importantes de heterogeneidad, interacciones complejas y diversas reglas.

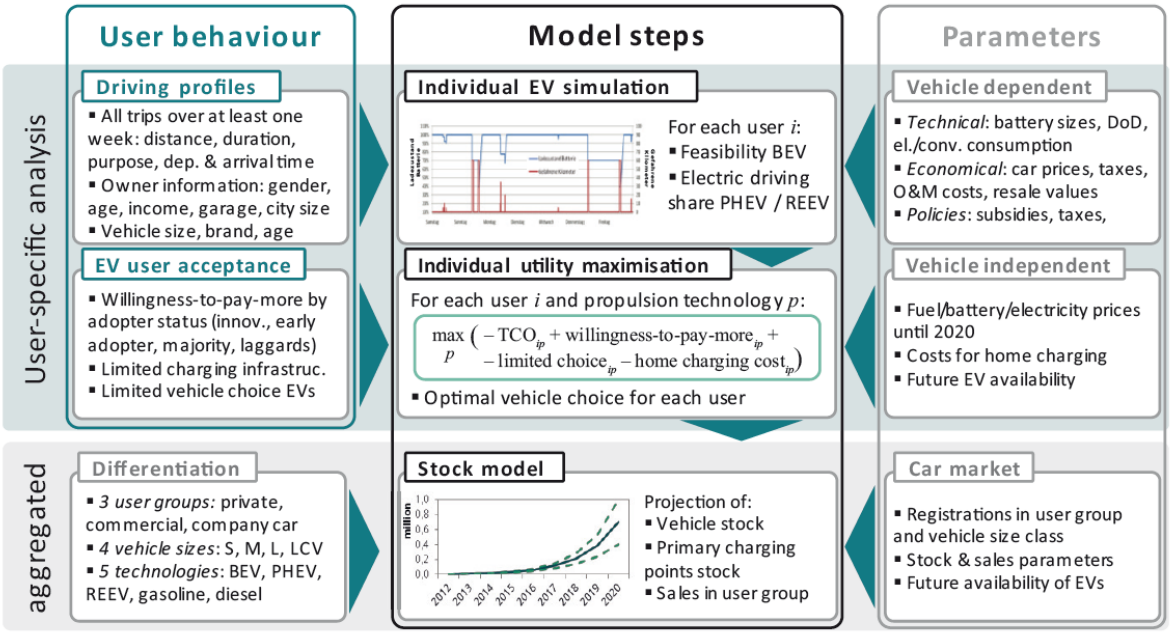
Un modelo típico basado en agentes tiene tres elementos:

1. Agentes, sus atributos y comportamientos.
2. Relaciones del agente y sus métodos de interacción. Una topología define permite especificar qué agente está, o podría estar, conectado con otro y las dinámicas que rigen los mecanismos de las interacciones.
3. Entorno de los agentes. Los agentes viven e interactúan con su entorno además de otros agentes.

Para ejemplificar la naturaleza de un modelo ABM se sigue a (Plötz, 2015). Se utiliza un modelo de difusión del mercado para simular la penetración en el mercado de vehículos eléctricos (EV) utilizando un conjunto de datos que caracteriza el comportamiento de los usuarios. El modelo consta de dos pasos: (1) cada vehículo se simula individualmente como eléctrico híbrido enchufable (PHEV) y eléctrico a baterías (BEV) basado en la infraestructura de carga existente. (2) Basado en una simulación de la batería, se determina la mejor opción de vehículo para cada perfil de conducción y en caso de un vehículo eléctrico este se agrega al stock.

La Figura siguiente ofrece una visión general del modelo en tres columnas: (1) la inclusión del comportamiento del usuario; (2) los pasos del modelo en la segunda y (3) los parámetros necesarios para realizar las simulaciones.

Figura 15: Modelo ABM de Plötz




Fuente: (Plötz, 2015)

La simulación de la batería para cada perfil de conducción es la siguiente: la batería se descarga cuando el vehículo opera según su perfil de conducción. Después de cada viaje se determina si cargar o no y si es así, el vehículo se recarga hasta el siguiente viaje. La decisión de cargar depende de la ubicación del vehículo estacionado que se deriva de los perfiles de conducción y de la disponibilidad de infraestructura en esta ubicación. Los vehículos que son de uso privado, siempre se pueden recargar en paradas domésticas si la infraestructura de carga está disponible allí. Lo mismo vale para paradas por trabajo si la carga está permitida en el escenario de carga. Los vehículos de flotas comerciales pueden cargar en su empresa u organización.

En lo que sigue la densidad de carga se refiere a tener puntos de carga públicos cercanos. Si los vehículos requirieren cargar en un punto de recarga público (la parada no es doméstica, ubicación comercial o de trabajo), el tipo de vehículo eléctrico y la necesidad de carga determinan la posibilidad de recargar: si el estado de carga de la batería (SOC) está por debajo del 50%, en caso de que el vehículo fue cargado completamente antes del último viaje, el camino de regreso a la última instalación de carga no sería posible, por lo que si la densidad de carga del punto de destino es lo suficientemente alta, un BEV será cargado. Para un PHEV, el SOC debe ser inferior al 50%, la densidad del punto de carga debe ser lo suficientemente alta y el costo de conducir en modo de agotamiento de carga (charge-depleting model) debe ser menor que conducir en el modo de mantenimiento de carga (charge-sustaining mode). De lo contrario, un PHEV también podría usar su motor de combustión interna.

Con estas reglas de decisión, se puede determinar qué consumos de electricidad necesitaría cada vehículo eléctrico en cada ubicación e incluir esto en la decisión de compra. La capacidad de los BEV para completar todo el perfil de conducción, así como la fracción de consumo eléctrico de PHEV son salidas de este paso del modelo. Además de los perfiles de conducción como entrada principal, también se requieren varios parámetros del vehículo, como consumos de electricidad o combustible, lugares en que se permite cargar así como el stock de infraestructura de carga inicial.

El segundo paso del modelo es la determinación del stock de vehículos eléctricos (PEV). Dado que la decisión de compra de un vehículo se basa en una variedad de factores, la mejor opción de vehículo se obtiene por la maximización de utilidad:

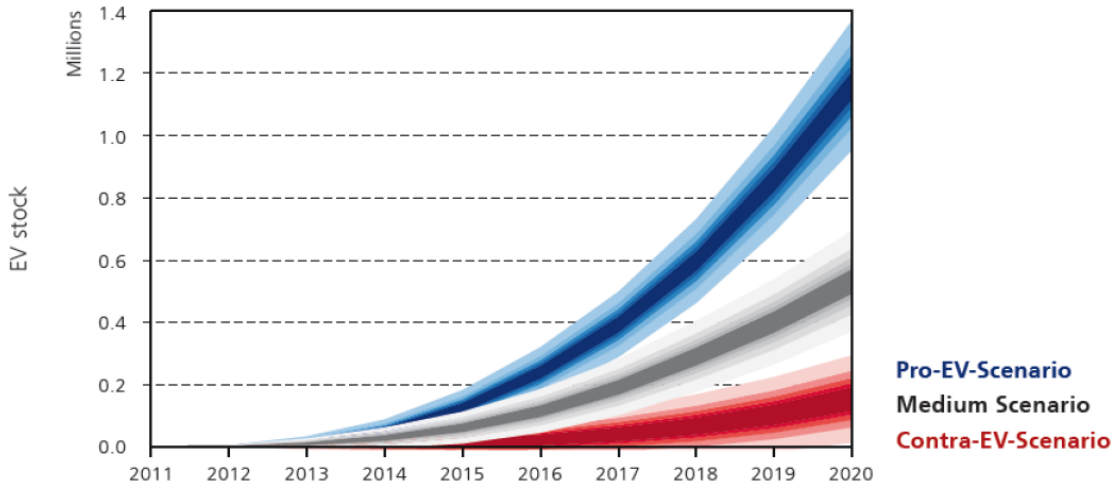
$$u_{im} = -TCO_{im}^{veh} - TCO_{im}^{CI} + wtpm_{im}$$

La función de utilidad incluye el costo total de posesión de un vehículo (total cost of ownership, $TCO_{im}^{veh}$), el costo de carga ($TCO_{im}^{CI}$) y la disposición a pagar más por un vehículo eléctrico ($wtpm_{im}$). De esta forma se va contabilizando el stock de vehículos eléctricos que se van comprando.

Para realizar las simulaciones se requieren bases de datos robustas. Por una parte, se utiliza una encuesta de transporte (tipo encuesta origen destino) que caracteriza viajes particulares y comerciales.  Los perfiles de conducción se obtienen por estudios de GPS de muestra de viajes reales. Se cuenta también con datos de caracterización socioeconómica de los individuos juntos con estudios de encuestas de disposición a pagar más.

Para realizar las simulaciones, consideran tres escenarios con condiciones más/menos favorables vehículos eléctricos. Variables son: precios de electricidad; de combustibles, subsidios a la compra, condiciones favorables de compra, entre otros. La figura siguiente muestra resultados obtenidos para los tres escenarios:

Figura 16: Resultados del modelo de difusión de ABM




Fuente: (Plötz, 2015)

# 4 REVISIÓN DE EXPERIENCIA INTERNACIONAL

En la experiencia internacional, el uso de vehículos eléctricos en el transporte ha pasado a ser una estrategia fundamental para conseguir sistemas de transporte sustentables. Por supuesto, esto junto con otras políticas que buscan aumentar la partición modal del transporte público o bicicletas, incrementar las tasas de ocupación, optimizar la planificación de las ciudades, entre otras que buscan revertir el crecimiento del transporte de vehículos particulares.

Barreras tradicionales a la adopción de vehículos eléctricos han sido su mayor costo -respecto de tecnologías convencionales- y baja autonomía; además del requerimiento de instalaciones para carga (rápida) y la confianza por la tecnología. El costo de las baterías tiene una estrecha relación con el costo inicial de los vehículos. El reemplazo de las baterías tiende a ser un factor menos relevante por el aumento de la vida útil de las baterías. En Estados Unidos las garantías aseguran 100 mil millas (161 mil kilómetros) (My EV, 2019). Esta tendencia perdura y Tesla ha anunciado que pronto contará con baterías que superen el millón de millas de vida útil (Wired, 2019)

Los beneficios de la electricidad en cuanto a contaminación local, seguridad energética y mitigación de emisiones de gases efecto invernadero han motivado e incentivado el desarrollo y adopción de vehículos eléctricos. Los apoyos han sido en investigación, en facilitar condiciones habilitantes para la tecnología (instalación de puntos de carga), distintos incentivos económicos (subsidios, reducción de impuestos), e incentivos de uso y acceso. Esto ha reducido de manera importante las barreras y la tecnología ya está mostrando ser competitiva frente a las tecnologías convencionales.

El resultado es que en los últimos años el desarrollo de la tecnología de vehículos eléctricos ha sido vertiginoso. El aumento de las ventas está directamente ligado a la disminución del precio de estos vehículos -consecuencia del desarrollo tecnológico- y del impacto sobre éstas de una mayor participación en el mercado como es usual de un proceso de adopción tecnológica.

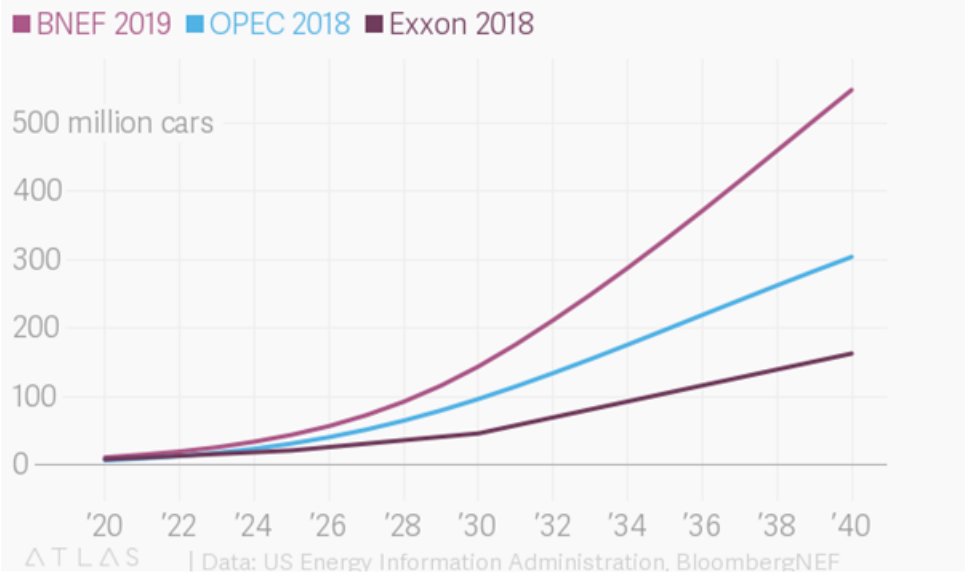
## 4.1 Proyecciones internacionales de penetración de electromovilidad

Existe consenso en que los días de los vehículos de combustión interna están contados y que las tecnologías eléctricas dominarán el futuro. Sin embargo, no hay consenso respecto de cuándo esto ocurrirá. A continuación se presentan y discuten algunos puntos relevantes identificados en la revisión internacional:

- **Existe gran divergencia entre proyecciones**

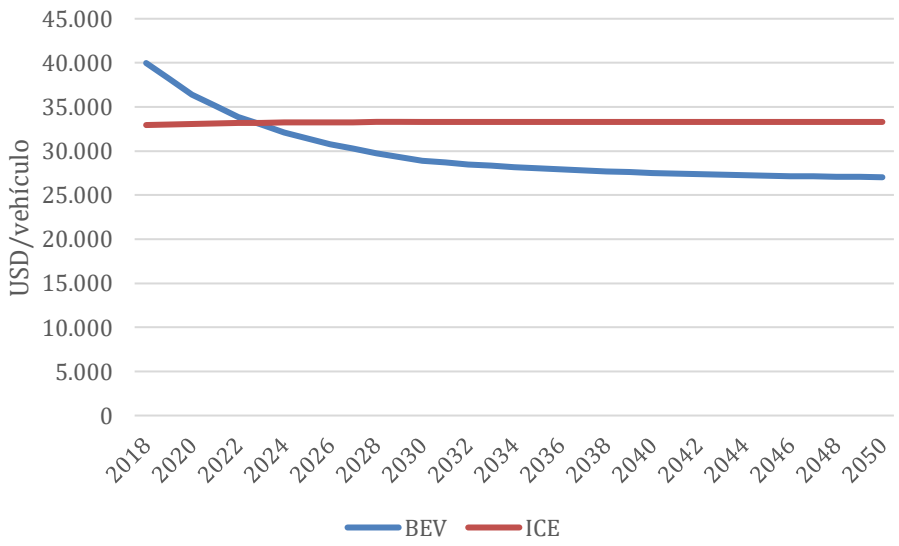
La figura siguiente presenta proyecciones tres proyecciones de ventas en análisis de mercado.

Figura 17: Proyecciones de ventes en análisis de mercado



Según Bloomberg, dos son los principales factores que explican las diferencias entre proyecciones. El primero es la paridad de precios. El precio de los vehículos eléctricos será uno de los principales determinantes de la rapidez en su adopción futura. Actualmente, los vehículos eléctricos son más caros principalmente por los altos costos de las baterías y bajas economías de escala. En este sentido, uno de los componentes tecnológicos claves son las baterías. A pesar de que distintas fuentes presentan cifras diferentes, el precio de las baterías ha caído de valores en torno a US$ 1.000/ kWh en 2009 a valores cercanos a los US$ 200/ kWh en la actualidad. Se espera que esta tendencia a la baja continúe. Se espera que el precio de un vehículo eléctrico supere a los automóviles convencionales hasta mediados de 2020. En efecto, según Bloomberg en Estados Unidos y Europa el precio de venta de los vehículos eléctricos será menor al de un vehículo convencional antes de 2025[5].

Figura 18: Proyección de Precios de Venta de Vehículos en Estados Unidos




Fuente: Elaboración propia en base a base de datos de Bloomberg

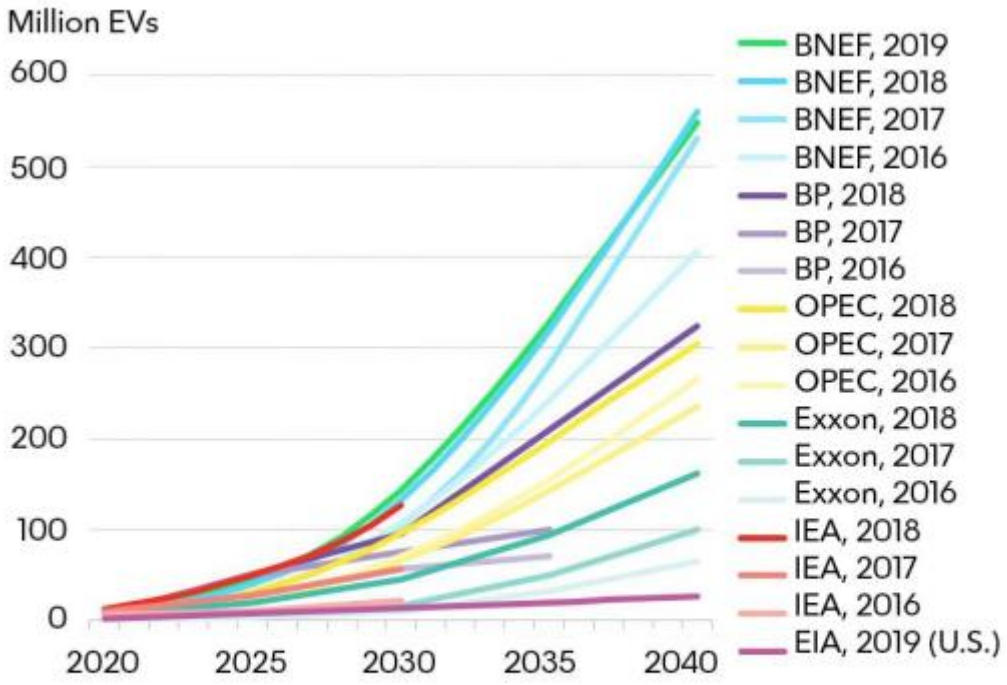
[5] Actualmente ya hay usuarios con altos niveles de actividad para los cuales resulta conveniente utilizar vehículos eléctricos pero deben realizar una inversión mayor en la compra inicial que será recuperada por ahorros de consumo energético.

El segundo factor es la demografía de la demanda. El mercado de vehículos eléctricos está altamente segmentado. Los primeros en adoptar tienden a ser propietarios adinerados y, a menudo, poseen un segundo (o tercer) automóvil. Después de que la demanda en este grupo demográfico está saturada, no está claro qué tan rápido se moverá hacia abajo en la escala de ingresos. Para que los vehículos eléctricos se masifiquen se necesita también nueva infraestructura de carga, educación pública y ahorro de costos. Muchos de estos están solo parcialmente bajo el control de los fabricantes de automóviles.

- **Proyecciones son más optimistas cada año**

Las proyecciones de una misma institución suelen ser más optimistas en cada actualización. Esto se puede apreciar en la figura siguiente:

Figura 19: Proyecciones EV Outlooks (antes y ahora)



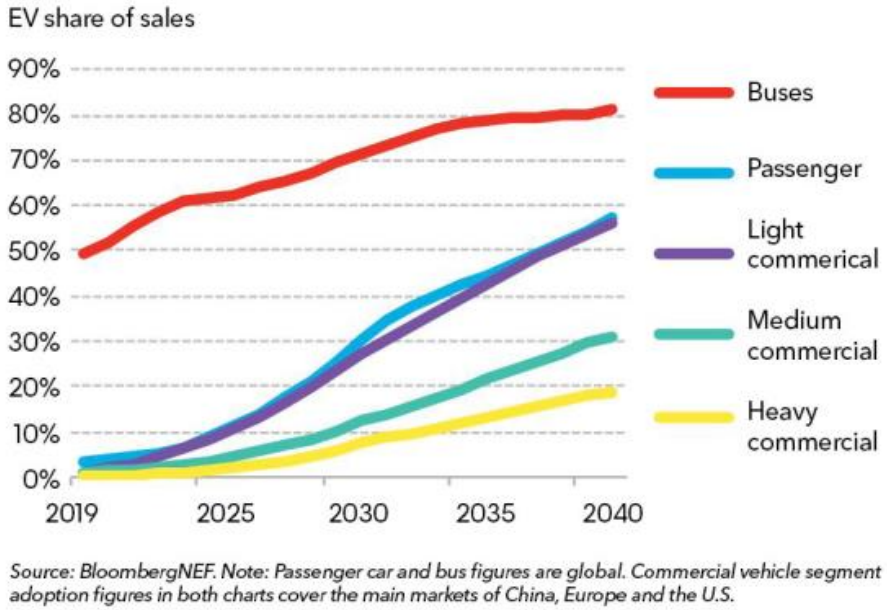

*Source: BloombergNEF, organization websites. Note: BNEF's 2019 outlook includes passenger and commercial EVs. Some values for other outlooks are BNEF estimates based on organization charts, reports and/or data (estimates assume linear growth between known data points). Outlook assumptions and methodologies vary. See organization publications for more.*

Fuente: (Bloomberg, 2019)

- **Proyecciones por categoría vehicular**

Según Bloomberg, en 2040 los buses eléctricos, autos privados y camiones pesados sobrepasarán el 80% 57% y 19% de las ventas respectivamente.

Figura 20: EV participación de ventas anuales de vehículos por segmento



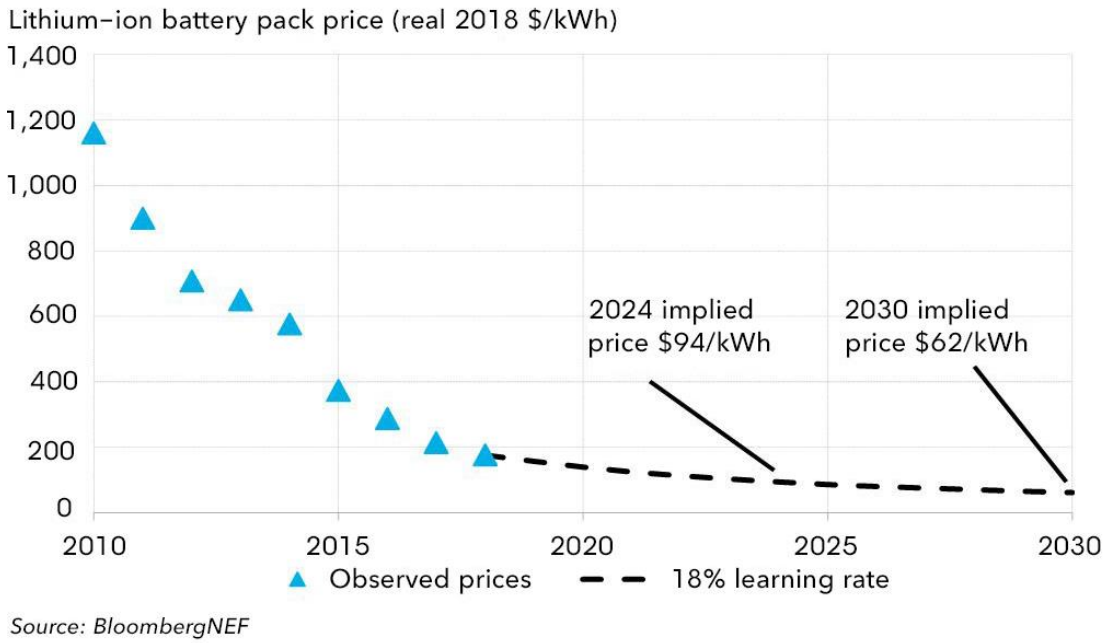

*Source: BloombergNEF. Note: Passenger car and bus figures are global. Commercial vehicle segment adoption figures in both charts cover the main markets of China, Europe and the U.S.*

Fuente: (Bloomberg, 2019)

- **Incertidumbre sobre el precio futuro de las baterías**

Las proyecciones suelen ser optimistas respecto de la evolución del precio de las baterías. Este es el caso de Bloomberg como se presenta en la figura siguiente.

Figura 21: Precio baterias ion-litio (outlook)




Fuente: (Bloomberg, 2019)

Sin embargo, dos argumentos advierten que los precios de las baterías pueden aumentar: (1) la sensibilidad a los precios subyacentes de los metales; (2) incremento de márgenes de fabricantes de baterías. Según Bloomberg, la sensibilidad de los precios de la batería a los precios de los productos básicos es relativamente baja. Un aumento del 50% en los precios del litio aumentaría, por ejemplo, el precio de la batería de una batería 811 de níquel-manganeso-cobalto (NMC) en menos del 4%. Del mismo modo, una duplicación de los precios del cobalto daría como resultado un aumento del 3% en el precio general del paquete.

- **Regulaciones internacionales**

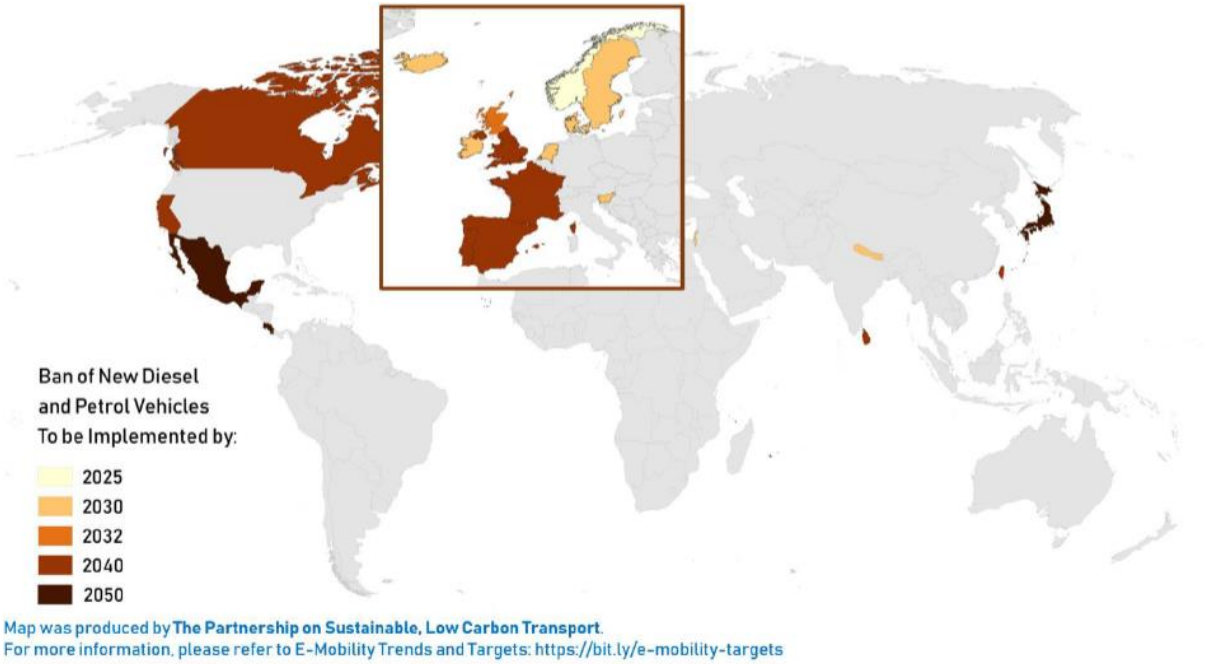
Las regulaciones que implementen al incrementar la demanda por vehículos eléctricos presionarán la oferta y su tamaño viabilizando mayores economías de escala.

Importantes anuncios sobre prohibición de comercializar vehículos a combustión interna se han producido en:

- 2025: Noruega

- 2030: Dinamarca, Irlanda, Israel, Nepal, Holanda, Eslovenia, Suecia-
- 2032: Escocia
- 2040: British Columbia, California, Francia, Portugal, España, Sri Lanka, Taiwán, Reino Unido.
- 2050: Cabo Verde, Costa Rica, Japón, México.

Figura 22: Iniciativas de política sobre la eliminación de vehículos de combustibles fósiles

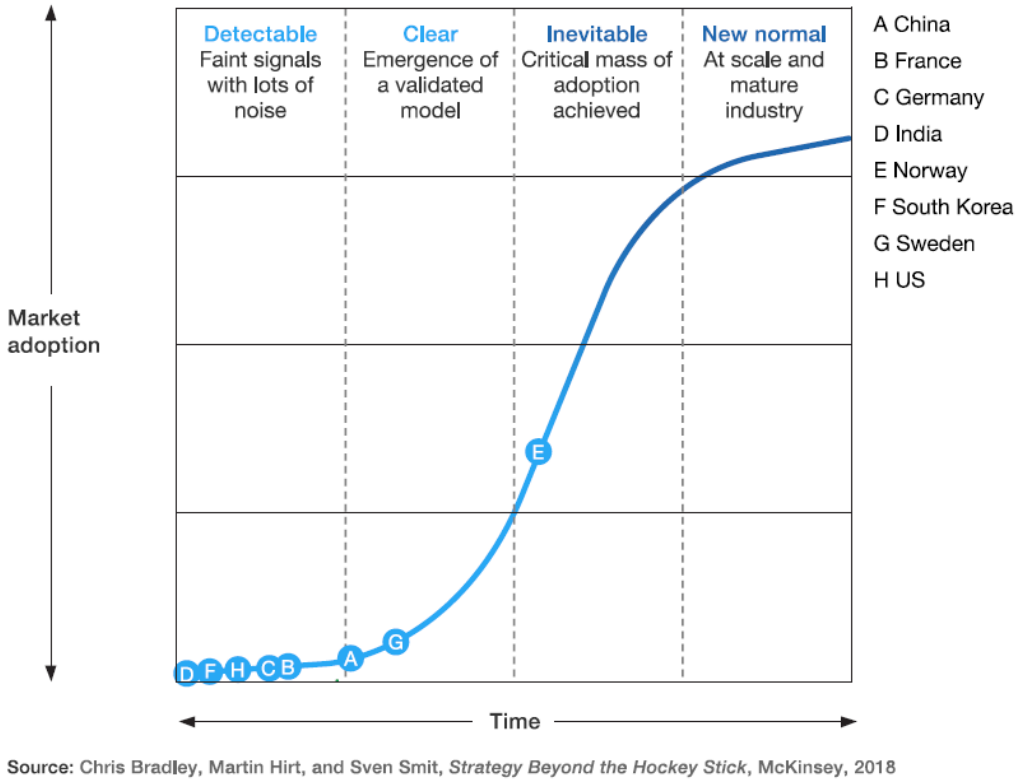



Fuente: (Partnership on Sustainable Low Carbon Transport, 2019)

A pesar de que China no ha hecho un anuncio oficial sobre la prohibición de utilizar vehículos de combustión interna, entre muchos otros, definió la meta de incorporar 2 millones de vehículos eléctricos al mercado en 2020 lo que actualmente lo convierte en el principal consumidor de vehículos eléctricos en el mundo.

La figura siguiente muestra el avance de la electromovilidad en una curva S de las principales experiencias y mercados internacionales.

Figura 23: Las 4 etapas de la tendencia disruptiva – centradas en la adopción del mercado de vehículos eléctricos




Fuente: (McKinsey and Company, 2019)

## 4.2 Metodologías de proyección de la experiencia internacional

En base a una revisión de proyecciones de penetración de experiencia internacional, se confirma que las metodologías dominantes corresponden a métodos de difusión tradicionales, modelos de elección discreta y modelos de modelación de agentes (ABM). La tabla siguiente resume los presenta los principales estudios y publicaciones revisadas en la revisión bibliográfica.

Tabla 2: Revisión de bibliografía internacional

| País | Metodología | Fuente |
|---|---|---|
| Alemania | Función Gompertz | Tom Greoeneweg (2016) *Electric vehicle adoption and its impact on 2035 German power demand.* |
| Australia | Elección discreta | Fakhra Jabeen (2016).*The Adoption of Electric Vehicles: Behavioural and Technological Factors* |
| China | Elección discreta | Qian Zhang, Xunmin Ou, Xiaoyu Yan, Xiliang Zhang (2017) "Electric Vehicle Market Penetration and Impacts on Energy Consumption and CO2 Emission in the Future: Beijing Case" |
| Marruecos | Bass, Gompertz | Soumia Ayyadi y Mohamed Maaroufi (2019). "Diffusion Models For Predicting Electric Vehicles Market in Morocco" |
| Suiza | Elección discreta | Aurelie Stankovikj, Themans, Bierlaire (2013) "Forecasting the demand for electric vehicles: accounting for attitudes and perceptions". |
| Holanda | ABM | Auke Hoekstra, Peter Hogeveen (2017) "Agent-based Model for the Adoption and Impact of Electric Vehicles in Real Neighbourhoods" |
| Estados Unidos | ABM | Kangur, A., Jager, W., Verbrugge, R., Bockarjova, M. (2017) "An agent-based<br><br>model for diffusion of electric vehicles" |
| Corea del Sur | Elección discreta | Dongnyok Shim et al (2018). Key Features of Electric Vehicle Diffusion and Its Impact on the Korean Power Market |

Fuente: Elaboración propia.

Algunos de los modelos aplicados en la experiencia internacional corresponden a los presentados en la tabla a continuación. Hay modelos cuyo alcance va más allá de la proyección de parque de vehículos.

Tabla 3: Modelos de pronóstico o impacto de participación de EV

| Modelo | Descripción |
|---|---|
| ***Plexos Integrated Energy Model***[6] | Modelo eléctrico de alta capacidad y gran despliegue territorial, utilizado para simular el impacto en la red en Europa a nivel general.<br><br>El modelo fue elaborado en 2000 y corresponde a un sistema de simulación robusto y de alto rendimiento para la energía eléctrica, es abierto y transparente. Permite analizar la expansión de la capacidad de la red eléctrica, el modelo de despacho de generación de energía, los servicios auxiliares, la integración renovable, la transmisión, las redes inteligentes y el transporte. |
| ***Plug-In Electric Vehicle Infrastructure Model (PEVI)***[7] | Modelo desarrollado por la Humboldt State University, para la región del Noroeste de los EE.UU, específicamente para simular la introducción masiva de Vehículos Eléctricos.<br><br>El modelo PEVI puede ser utilizado por planificadores y autoridades para una variedad de propósitos:<br><br>• EVSE (infraestructura de carga) puede ser optimizado para maximizar el servicio a los conductores de PEV bajo un presupuesto fijo.<br>• Pueden analizarse alternativas de política que compiten entre sí, como por ejemplo un subsidio a baterías más grandes versus la instalación de más EVSE.<br>• Las tecnologías de vehículo a red (V2G) pueden evaluarse antes de su despliegue.<br><br>Un modelamiento en esta línea corresponde a la Evaluación de Electrificación de Transporte de California, la cual analiza los probables impactos de varios escenarios de adopción de EV sobre las actualizaciones requeridas de la infraestructura de red y los costos en California. |
| ***Modelo BLAST-V***[8] | Modelo del *National Renewable Energy Laboratory* (NREL) que permite evaluar la longevidad y rendimiento de las baterías de EV en varios contextos, incluso con la tecnología de V2G[9] habilitado o con el uso frecuente de carga de alta velocidad. La herramienta se puede utilizar además para modelar ubicaciones óptimas de |

[6] https://energyexemplar.com/solutions/plexos/
[7] http://schatzcenter.org/docs/Zoellick-2014-UpstatePEV.pdf
[8] https://www.nrel.gov/transportation/blast.html
[9] *Vehicle To Grid*

| Modelo | Descripción |
|---|---|
| | puntos de carga. |
| ***Singular Spectrum Analysis (SSA)***[10] | Modelo Univariado de Series de Tiempo, evaluado en China, para pronosticar la demanda de vehículos eléctricos. El principal objetivo del modelo es descomponer las series originales en una suma de series. Por ello, cada componente puede identificarse como una tendencia, periódica, cuasi periódica o ruido. Considera cuatro pasos de desarrollo: transformación, descomposición, agrupación y reconstrucción. |
| ***Vector Autoregressive Model (VAR)***[10] | Modelo multivariable evaluado en China para pronosticar la demanda de vehículos eléctricos. El modelo comprende parámetros exógenos relacionados con el mercado en una base mensual y permite identificar los acoplamientos dinámicos entre las ventas de EV y los indicadores económicos.<br><br>El modelo VAR se ha aplicado ampliamente en diferentes campos, como por ejemplo la predicción de ventas de bienes inmuebles, la participación en el mercado del automóvil, los indicadores económicos y los patrones de lluvia. |

Fuente: Elaboración propia

## 4.3 Experiencia nacional

Tras la revisión de estudios nacionales se encuentran tres estudios que consideran penetraciones explícitas de electromovilidad.

1) Estudio de Electromovilidad en Chile (2018) de la Agencia de Sostenibilidad Energética y EBP. El objetivo de este estudio es dar recomendaciones para avanzar en la adopción costo efectiva de la electromovilidad. Para ello realizan múltiples entrevistas a actores incumbentes, realizan una encuesta de decisión de compra y utilizan metodologías de análisis estratégico.

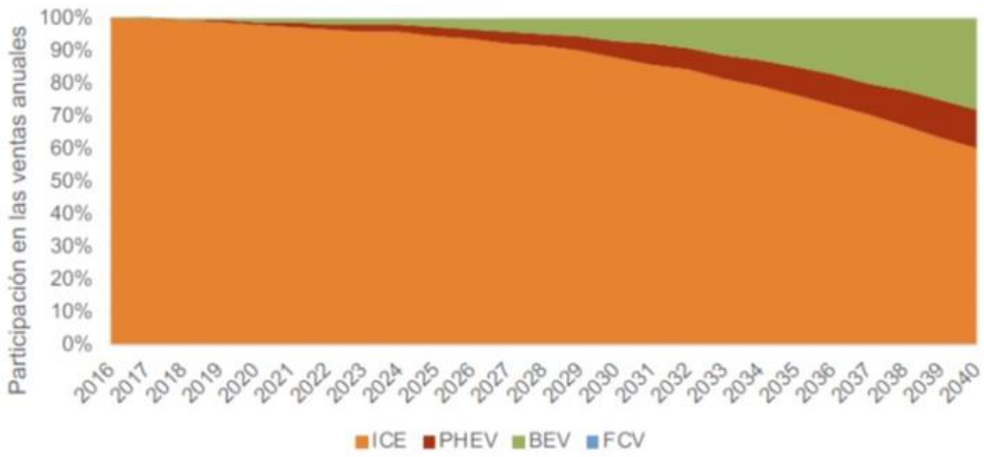
[10] https://journals.plos.org/plosone/article/file?id=10.1371/journal.pone.0176729&type=printable

Para la estimación del parque utilizan un modelo ADRL. Con estos escenarios se predice que, para el año 2040, el parque automotriz del país será del orden de 14 millones de vehículos. Un valor extremadamente alto a juicio del consultor.

Los escenarios se construyen sobre la base de (a) datos históricos de mercado hasta 2017; y (b) un punto "objetivo" como "40% de los autos nuevos en 2040 será EV"; tal punto objetivo es deducido ex machina por expertos en base a lista de medidas de políticas que pertenecen al escenario. Por lo tanto, se utiliza solo una interpolación entre (a) y (b).

La figura siguiente presenta los principales supuestos de penetración tecnológica del parque.

Figura 24: Participación de las ventas anuales




Fuente: Estudio de Electromovilidad en Chile (2018)

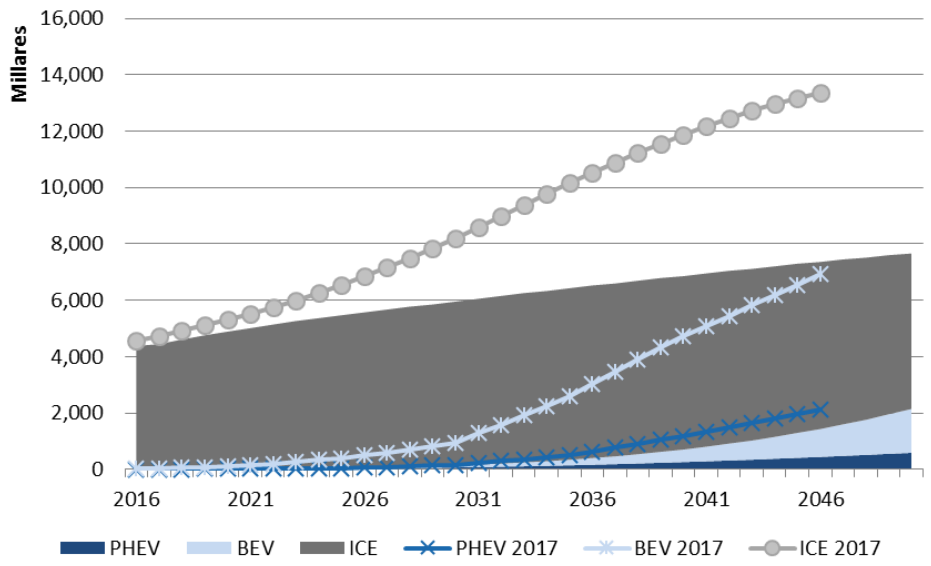
2) Planificación Energética de Largo Plazo (Escenarios PELP) del Ministerio de Energía. En el contexto de la planificación energética (con foco en transmisión), el Ministerio de Energía estima escenarios de consumo eléctrico futuro. En la elaboración de estos escenarios se estiman distintos escenarios que se desagregan por región y sector de consumo final.

Para estimar la participación de la electromovilidad:

- Crecimiento del parque de acuerdo al crecimiento económico (PIB per-capita y distribución de ingresos)
- Supone participación en ventas de vehículos eléctricos de estudio de electromovilidad de Agencia de Sostenibilidad Energética (2018)
- Retiro de automóviles viejos del 2% anual

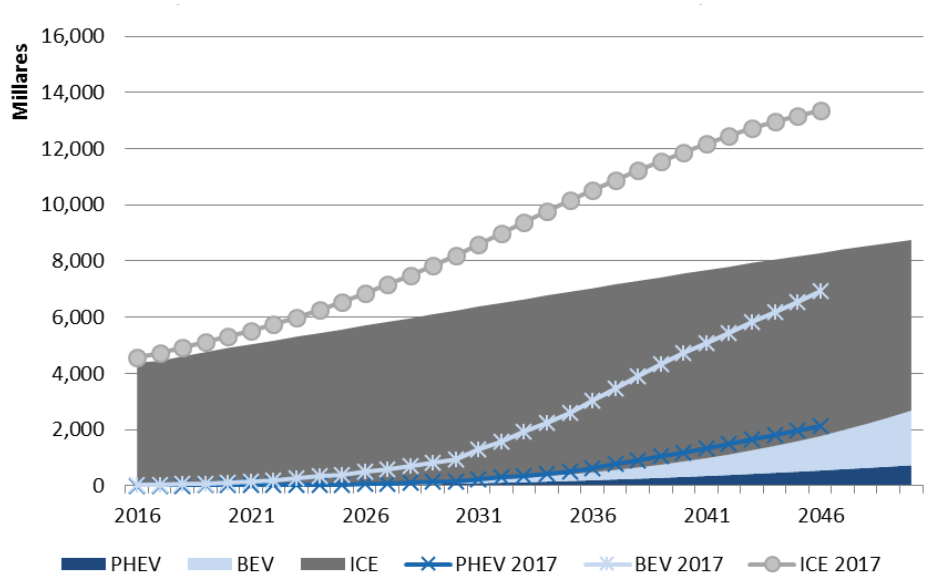
Los escenarios consideran que el parque automotriz en 2050 estará entre **7,7 y 9 millones** de vehículos. Las figuras siguientes resumen los principales resultados:

Figura 25: Parque Automotriz Crecimiento económico conservador




Fuente: (Ministerio de Energía, 2019)

Figura 26: Parque Automotriz crecimiento económico optimista




Fuente: (Ministerio de Energía, 2019)

3) Estudio Análisis Prospectivo de Consumo de Energía Eléctrica (Asociación de Generadoras, 2017)

Con el propósito de examinar el crecimiento posible del consumo eléctrico en los sectores de demanda final, se estima la penetración esperada de vehículos eléctricos. Interesa determinar qué fracción de las ventas corresponderá a vehículos eléctricos para definir cada escenario. La ecuación que rige la evolución del parque vehicular es:

$$s_t = v_t + s_{t-1} - \delta \cdot s_{t-1}.$$

Donde $s_t$ es el stock de vehículos en un año t, $v_t$ las ventas de nuevos vehículos y $\delta$ la tasa de obsolescencia. En esta sección se presentan los supuestos y metodología para estimar la penetración de las ventas de vehículos eléctricos en los tres escenarios.

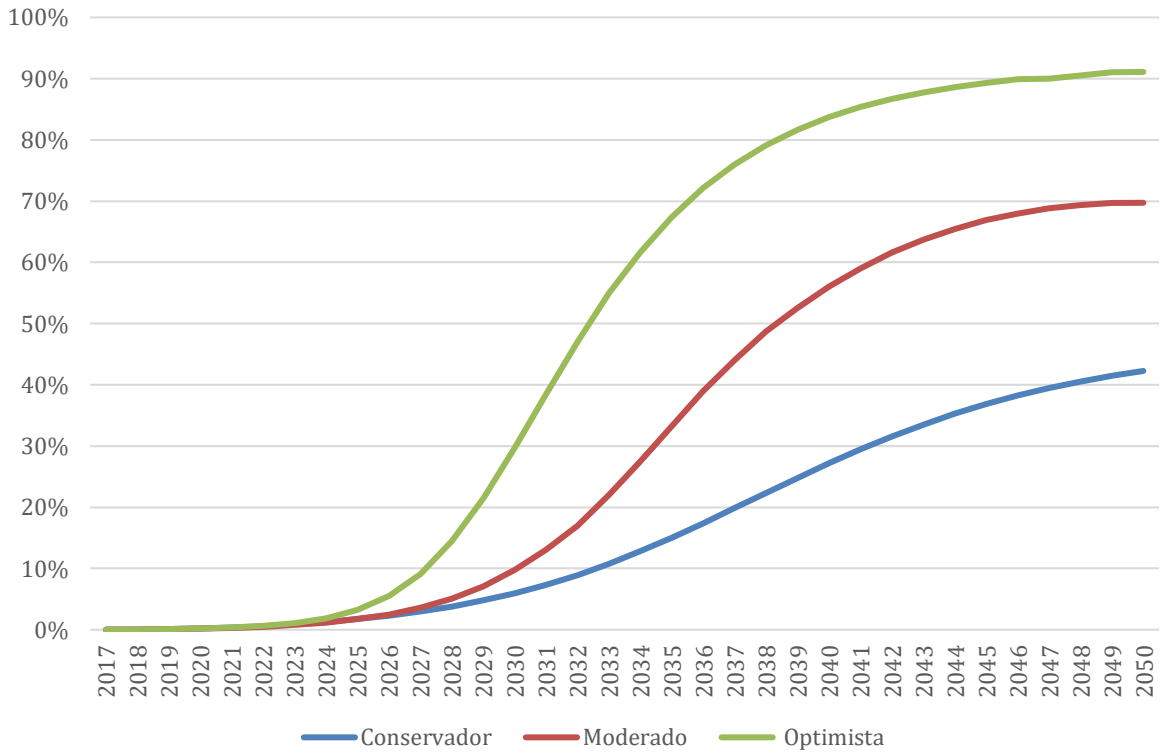
Para construir escenarios de ventas- y posteriormente parque de vehículos- se desarrolla un modelo de adopción tecnológica: una curva tipo S. Por lo tanto, la penetración de las tecnologías eléctricas en transporte dependerá de la competitividad de las tecnologías. Una métrica para ello es el periodo de recuperación del capital o *payback*. Actualmente comprar un vehículo eléctrico es más caro que comprar uno convencional (sea $\Delta I$ la diferencia de precios o de la inversión adicional); pero su uso conlleva ahorros de costos en la operación anual ($\Delta c$) que se asumen constantes en el tiempo. De esta manera, un indicador simplificado del periodo de recuperación del capital es:

$$P = \frac{\Delta I}{\Delta c}$$

Por su lado, la curva S -participación de los vehículos eléctricos de las ventas cada año- depende del periodo de retorno, el que variará en el tiempo según la inversión adicional. La metodología requiere entonces: (1) los pronósticos de la inversión adicional, para luego obtener (2) el periodo de retorno cada año, y finalmente (3) la curva de adopción- representada por la fracción de las ventas de la tecnología eléctrica cada año. El modelo considera en los escenarios el recambio de baterías y una tasa social de descuento de 6% definida por el Ministerio de Desarrollo Social.

La figura siguiente presenta el porcentaje de ventas que representa la tecnología eléctrica en las ventas de vehículos particulares. Estos corresponden a los resultados de la modelación de la adopción de la tecnología para tres escenarios que varían **endógenamente** según los supuestos de precios de los vehículos y combustibles.

Figura 27: Porcentaje de ventas de autos particulares eléctricos




Fuente: (E2BIZ, 2017)

# 5 ANÁLISIS CRÍTICO DE LOS MODELOS DISPONIBLES DE PROYECCIÓN DE CAMBIO TECNOLÓGICO APLICADOS A VEHÍCULOS ELÉCTRICOS.

En función de la revisión nacional, internacional y metodológica se presenta un análisis crítico breve de las alternativas de modelación. Criterios de comparación son:

- Disponibilidad de información actual y proyectada
- Requerimientos de información y análisis de compatibilidad con las distintas metodologías
- Condiciones regulatorias esperadas (por ejemplo, si se espera que las ventas de vehículos convencionales se prohíban en 2040, o se imponga un impuesto al carbono en transporte).
- Plazo de la proyección. En el caso de este estudio 2050. En general, los modelos basados en encuestas toman una foto y se establecen proyecciones mediante "elasticidades" de corte transversal (no de serie de tiempo).
- Factibilidad de generar nueva información.

La tabla siguiente resume aspectos críticos de las distintas metodologías a analizar:

Tabla 4: Comparación general de categorías de modelos

| Modelo | Información requerida | Requerimientos de software | Plazo de proyección | Factibilidad de nuevos escenarios | Instrumentos de mitigación |
|---|---|---|---|---|---|
| ***Modelos de Agente*** | Datos económicos y detallados por agente, datos de conducción, oferta de infraestructura de carga, (tipo encuesta) | Software con simulación compleja: R, Python, softwares específicos para ABM | Mediano plazo (preferencias son fijas) | Sí. Directamente en software (R o Python) | Amplia gama. Precio al carbono, restricciones de zonas de uso, etc. |
| ***Modelos de*** | Datos económicos y | Softwares econométricos y | Mediano Plazo (preferencias | Sí. Directamente de los resultados de las | Amplia gama según atributos |

| Modelo | Información requerida | Requerimientos de software | Plazo de proyección | Factibilidad de nuevos escenarios | Instrumentos de mitigación |
|---|---|---|---|---|---|
| ***elección*** | detallados por agente (tipo encuesta) | otros programas (eviews, stata, R, Matlab, python etc). | son fijas) | regresiones logits (cambios en atributos). No se requiere nuevas modelaciones necesariamente. | del modelo latente y logit. Precio al carbono modifica precio de los combustibles y electricidad. |
| ***Modelos de difusión*** | Ideal datos de ventas. Alternativa usar parámetros internacionales. | Econométricos si se cuenta con datos (para estimar parámetros); excel si se usan parámetros internacionales | Largo plazo (basado en evidencia empírica pero no tiene relación con preferencias) | Sí. Modificación de parámetros críticos (particularmente aquellos que modifican payback). | Precio al carbono modifica precio de combustibles y electricidad (modificando payback) y por tanto la penetración. No otras medidas como zonas de prohibición de uso de ICE. |

Fuente: Elaboración propia

Del cuadro anterior se deprende que resulta infactible aplicar en el corto plazo los métodos de elección discreta y ABM. La posibilidad de aplicar un método de elección discreta podría examinarse en función de la información disponible (encuestas origen destino disponibles, CASEN, entre otras), analizando su calidad y compatibilidad.

Del cuadro anterior se desprende que existen numerosas dificultades para poder aplicar modelos de elección discreta y ABM en el corto plazo. Los principales obstáculos se refieren a la cantidad y calidad de información que estos requieren para poder inferir respecto de las preferencias de los usuarios por una tecnología u otra. En particular, se requieren bases de datos robustas de transporte (base tipo encuesta origen destino) que caracterice los viajes. Se requieren además datos de caracterización socioeconómica compatibles con la encuesta de transporte. Estos antecedentes suelen complementarse con encuestas respecto de las preferencias o disposición a pagar de los individuos por vehículos eléctricos, o bien, como los usuarios valoran los atributos de la electromovilidad. Los modelos ABM presentan además el desafío de definir reglas de elección que efectivamente representen las preferencias y comportamiento de los usuarios.

Sin embargo, se recomienda analizar exhaustivamente y en detalle los datos que deben levantarse para poder implementar estas modelaciones en el mediano plazo. La ventaja de estos enfoques de modelación es que son micro fundados. Es decir, dependen de las elecciones de los individuos en función de sus características personales, de los atributos de las tecnologías y del entorno. Este tipo de modelaciones permite establecer como políticas distintas o condiciones de mercado pueden impactar en la adopción tecnológica. Por ejemplo, los modelos pueden ser sensibles a precios, ingresos de los individuos, facilidades de carga de vehículos, autonomía, entre otros atributos. Por lo anterior, este tipo de modelos permite identificar los principales gatillantes de la adopción. Por el contrario, los modelos tradicionales de difusión simplemente se asocian un análisis tendencial que suele basarse en la adopción de otros productos o contextos internacionales.

# 6 ANÁLISIS DE INFORMACIÓN REQUERIDA Y ESTRATEGIAS DE SU PROYECCIÓN

La literatura distingue entre distintos elementos que pueden afectar la adopción de nuevas tecnologías, y en particular, electromovilidad. Una forma de agrupar estos factores es distinguiendo entre factores de oferta y demanda.

Factores que afectan la demanda son:

- Características individuales, sociales, económicas, sicológicas del adoptante.
- Rentabilidad de la inversión asociada a la tecnología.
- Tamaño de la inversión necesario.
- Complejidad tecnológica de la innovación
- Vida útil de la tecnología
- Estado general de la economía y su crecimiento
- Interacción de la innovación con otras (por ejemplo, sustitutos o complementos).
- Ambiente de toma de decisiones
- Número de adoptantes previos.

Factores que afectan la oferta son:

- Acciones públicas o privadas que afecten precios o infraestructura
- Acciones sobre segmentación y promoción

En esta etapa se identifican los requerimientos de información y su proyección para utilizar los distintos métodos de proyección. Como criterio general se propone- de existir- utilizar información de organismos públicos consistentes con el horizonte de evaluación.

En particular, es necesario contar con información de:

1) ***Variables transversales a todos los métodos.*** *Estas variables se utilizan en todas las categorías de modelos. Es claro que los modelos clásicos de difusión no permiten caracterizar las decisiones individuales.*

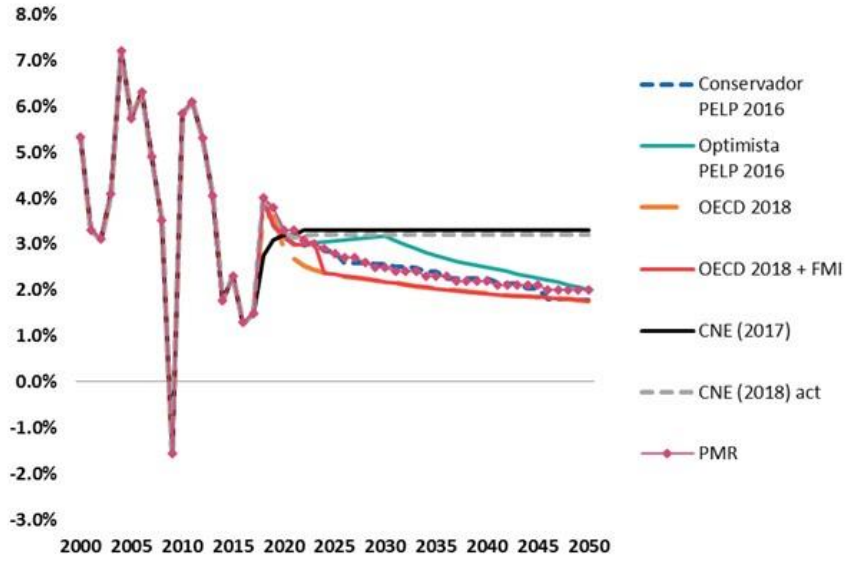
   a) Precios de los vehículos eléctricos versus convencionales.

El precio de los vehículos eléctricos será uno de los principales determinantes de la rapidez en su adopción futura. Se recomienda escenarios en función de revisión internacional que permitirán establecer rangos de la evolución de precios y la competitividad de esta tecnología frente a vehículos convencionales. Existen numerosas fuentes como Bloomberg, entre otros que cuentan con tales proyecciones.

b) Crecimiento económico.

El crecimiento económico es uno de los principales “drivers” que impulsa la compra de vehículos y determina el nivel de actividad (pasajero kilómetros por ejemplo). Para dar cuenta de la variabilidad e incertidumbre del crecimiento del parque, se propone utilizar las tasas empleadas en los escenarios PELP actualizadas del Ministerio de Energía que consideran para sus estimaciones distintas trayectorias de crecimiento económico. Los escenarios se construyen a partir de proyecciones de crecimiento de organismos nacionales e internacionales que permiten establecer un rango esperado de crecimiento en el horizonte de evaluación. La OECD (2018) estima el crecimiento de largo plazo (2050), en tanto el Fondo Monetario Internacional estima proyecciones a corto plazo (2030). La metodología empleada por la CNE considera la utilización de los valores que el Banco Central de Chile estima en el Informe de Política Monetaria (IPoM) en el corto plazo (2021), y para el largo plazo considera el producto tendencial que estima el Ministerio de Hacienda.

Figura 28: Tasas de crecimiento proyectadas por distintos organismos nacionales e internacionales



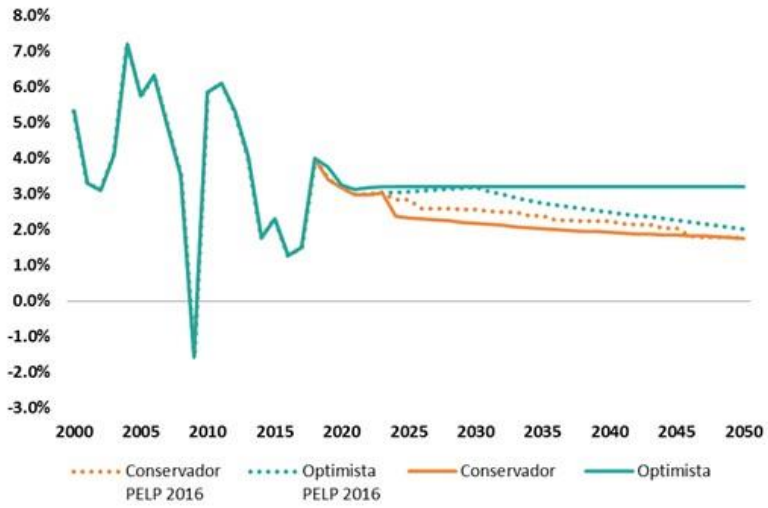

Fuente: Ministerio de Energía (2018)

A partir del análisis de las proyecciones nacionales e internacionales de crecimiento se establece entonces un rango potencial de crecimiento. La

Figura 29 presenta el rango de crecimiento económico considerado para construcción de los escenarios de planificación de largo plazo. En el escenario de más alto crecimiento (optimista) el producto interno bruto crece a una tasa que se estabiliza en 3,2% desde el año 2022. El escenario de más bajo crecimiento (conservador) presenta una trayectoria de crecimiento económico ligeramente decreciente alcanzando una tasa de 1,8% en 2050. Considerando tales rangos, el PIB crece 108-287% en 2050 respecto de 2017 mientras que el PIB per-cápita aumenta en 77-144% a 2050.

Se recomiendan los distintos escenarios de crecimiento de la PELP por ser proyecciones explícitas hasta 2050 en un contexto de planificación de suministro eléctrico.

Figura 29: Rango de crecimiento económico esperado 2018-2050




Fuente: Ministerio de Energía (2018)

A pesar de la importancia del crecimiento del producto, resulta difícil su inclusión directa en los modelos de difusión tradicionales por ser estos enfoques tendenciales.

c) Crecimiento demográfico.

d) La construcción de escenarios por parte del Ministerio de Energía considera el crecimiento demográfico a nivel regional según proyecciones elaboradas por INE y utilizando tasas de crecimiento tendencial. El número de hogares es uno de los principales “drivers” que gatilla el consumo del sector residencial. Este se estima a partir de la población y se ajusta de forma tal de incorporar cómo el número de habitantes por hogar se reduce de acuerdo al crecimiento económico según indica la experiencia internacional.Precios de combustibles y electricidad

Se propone utilizar precios del Ministerio de Energía utilizados en las modelaciones PELP en sus escenarios bajo, medio y alto.

e) Variables de nivel de actividad.

El nivel de actividad de los usuarios es una variable necesaria para la estimación de la rentabilidad de los vehículos eléctricos respecto de los convencionales. En general, para el sector transporte de pasajeros el nivel de actividad se mide mediante los kilómetros que un vehículo recorre al año. Esto permite estimar consumos costos de consumo de energía para establecer la conveniencia de una tecnología sobre otra. En este estudio, se utiliza un valor de nivel de actividad constante y que se toma del proyecto MAPS[11] por no existir mejor información disponible.

### *2) Variables específicas a los métodos ABM y de elección*

La elaboración de modelos ABM y de elección discreta requieren importantes niveles de parametrización. Además de los antecedentes comunes a todos los métodos antes presentados, estos modelos requieren la utilización de un conjunto de datos que dé cuenta de las conductas y preferencias de los usuarios de los vehículos. Los datos provienen de encuestas o cuestionarios a gran escala. Las encuestas suelen incluir características individuales de los encuestados, su vehículo actual, y su comportamiento de conducción, así como las percepciones y evaluaciones de diversos atributos de los autos eléctricos, actitudes hacia la tecnología eléctrica completa, la probabilidad de adoptar un auto eléctrico completo, y el tipo de adoptante con respecto a innovar. Estos métodos permiten profundizar además en preferencias según aspectos como puntos de carga y otros atributos difíciles de cuantificar. Por lo anterior, no parece factible realizar un modelo de ABM que permita estimar de manera comprehensiva la penetración de la electromovilidad.

[11] https://mma.gob.cl/cambio-climatico/proyecto-maps-chile/

### *3) Variables específicas a los métodos de difusión*

Para obtener los parámetros de los modelos de difusión (como Gompertz, Logístico y Bass), que se utilizan para pronosticar la difusión de vehículos eléctricos, se debe contar condatos de ventas de este tipo de vehículos. Sin embargo, la tecnología eléctrica en vehículos aún no ha penetrado en el mercado nacional lo suficiente. Por esta razón, se debe elegir un producto alternativo- o bien considerar un mercado internacional- que tenga suficiente pasado y que pueda parecerse. En general esto se hace tomando parámetros de la experiencia internacional.  Este método ha llamado predicción por analogía, y ha sido ampliamente utilizado en la literatura (Park et al.)

# 7 APLICACIÓN DE UN MODELO PARA LA PROYECCIÓN DE LA PARTICIPACIÓN DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN EL PARQUE/VENTAS DE VEHÍCULOS LIVIANOS TOTALES

Para proyectar la participación de las ventas de vehículos eléctricos se recomienda la utilización de un modelo de difusión tecnológica basado en Bass. La flexibilidad de este modelo ha hecho que el modelo de influencia mixta (Bass) sea, el más utilizado entre los modelos de difusión basados en ecuaciones diferenciales (Kijek, 2010).

Por otra parte, la elección se justifica en la simplicidad del enfoque de proyección, la factibilidad de su aplicación considerando la información la información disponible y la existencia de numerosos estudios internacionales que avalan la aplicación de esta metodología. Sin embargo, para relacionar la curva de adopción con los costos de las tecnologías la curva de Bass se complementa para considerar el payback en la estimación del potencial del mercado.

## 7.1 Modelo de Bass propuesto

Para proyectar la participación de las ventas de vehículos eléctricos se utiliza un modelo de difusión tecnológica basado en el periodo de retorno de los costos adicionales necesarios respecto de un vehículo convencional. Este modelo se basa en (NREL, 2016). La ecuación básica que rige la adopción es:

$$S(P,t) = M(P)F(t)$$

En donde:

$P$ : Periodo de retorno ("*payback*") en el año $t$. $P$ varía en el tiempo y depende de $\Delta I$.
$S(P,t)$ : Participación en las ventas totales en el año $t$ dado el periodo de retorno $P$.
$F(t)$ : Tasa de adopción de la tecnología al año $t$ (ecuación de Bass).
$M(P)$ : Participación máxima en las ventas dado el periodo de retorno $P$

La tasa de adopción se calcula utilizando un modelo de difusión de Bass que se expresa como:

$$F(t) = \frac{1 - e^{-(p+q)(t-t_0)}}{1 + \frac{p}{q} e^{-(p+q)(t-t_0)}}$$

Donde $t_0$ representa el año que se considera inicial para el ingreso de la tecnología, p representa el coeficiente de innovación caracterizando los usuarios que adoptan la tecnología tempranamente y q un coeficiente de imitación que caracteriza los usuarios que adoptan la tecnología más tarde.

La participación máxima de mercado se estima como:

$$M(P) = e^{-s \cdot P}$$

Donde $s \geq 0$ es una medida de la sensibilidad del *payback*. Mientras más alto es el parámetro de sensibilidad menor es la adopción de la tecnología. Esta sensibilidad puede interpretarse como la resistencia de adoptar una nueva tecnología y que puede depender de condiciones habilitantes como la autonomía o facilidad de carga del vehículo. En el caso $s = 0$, se cumple que $M(P) = 1$.

La estimación del modelo de difusión requiere entonces estimar distintas trayectorias de *payback* que dependen de la proyección de inversión incremental. Estas varían según la categoría vehicular: vehículos privados y taxis. Los valores de p, q y $s$ se toman de la literatura internacional.

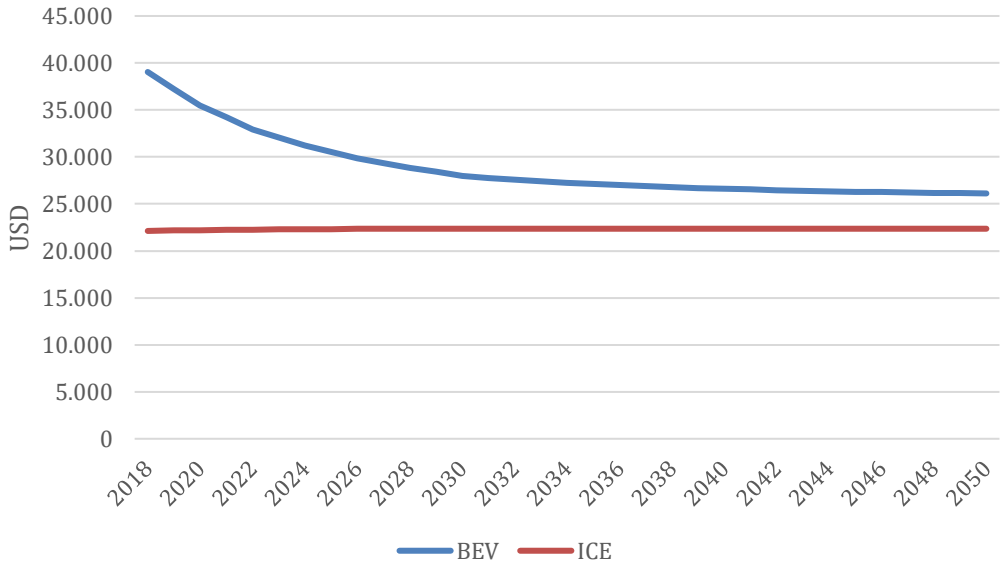
## 7.2 Datos y supuestos utilizados para la proyección

Para estimar el modelo se utilizan los siguientes datos:

- Trayectorias de precios de gasolina y electricidad de los escenarios PELP entregados por el Ministerio de Energía.

- Precios de vehículos eléctricos (BEV) y convencionales (ICE) basados en proyección de Bloomberg. Se asume que los precios de los vehículos eléctricos en Chile corresponderán a los promedios anuales proyectados entre Estados Unidos y Europa. Para el caso de vehículos convencionales, se asume que el precio promedio en Chile es menor por lo que al precio medio entre Estados Unidos y Europa se le descuenta un factor de 30%. Esto se justifica al considerar que en Chile el vehículo convencional tipo es más barato que en los países desarrollados.

Figura 30: Precios de Vehículo Medio considerados para Chile




Fuente: Elaboración propia

- Dado que existen consenso que la vida útil actual de las baterías es de más de 160 mil kilómetros, considerando un nivel de actividad medio anual de 15.000 kilómetros por vehículo, una batería duraría al menos 10 años. Por lo anterior, no se considera el costo de reemplazo de la batería.
- La elección de valores de p y q se toman de la literatura internacional. En particular, se utilizan valores que se hayan estimado para el mercado de vehículos eléctricos y en cuya estimación el potencial de mercado se haya definido exógenamente.
- Las curvas de penetración de vehículos eléctricos se estiman para tres valores de s (1,2 y 3) por el impacto de sensibilidad de este parámetro. La fuente original utiliza un valor de s=2 (NREL, 2016).

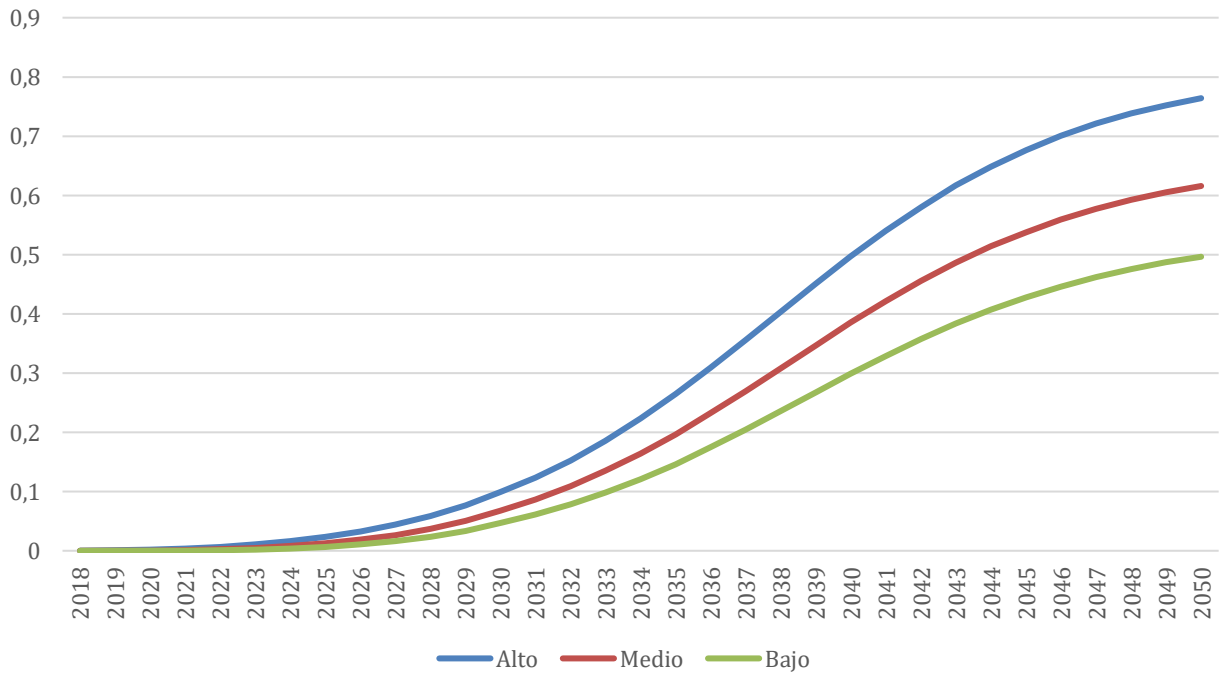
- Las curvas se estiman considerando tanto para la métrica tradicional de payback como para payback descontado.

Todos estos supuestos y otros parámetros se presentan en detalle en el archivo Excel adjunto al estudio junto con todos los cálculos de la curva de difusión. En esta planilla es posible sensibilizar los distintos parámetros que alimentan las estimaciones.

## 7.3 Resultados del Modelo de Proyección

La figura siguiente resume los resultados de las curvas de adopción considerando una estimación de payback descontado (con una tasa de descuento de 6% que puede sensibilizarse en la planilla). La penetración llega a 76% en el caso alto (s=1); 62% en el caso medio (s=2) y 50% en el caso bajo (s=3). Por lo anterior, se desprende que el parámetro de sensibilidad afecta enormemente los resultados de penetración por lo que se sugiere su sensibilización.

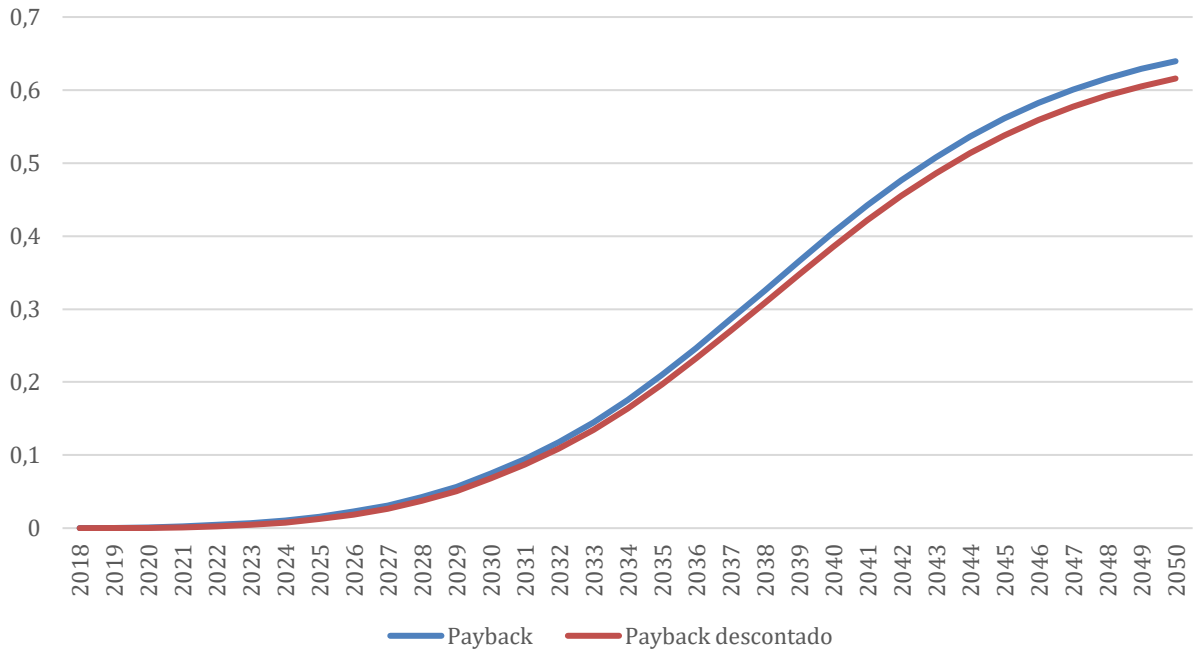
Figura 31: Curvas de penetración de vehículos eléctricos para distintos parámetros de sensibilidad




Fuente: Elaboración propia

Al analizar el uso del payback o payback descontado, se puede inferir que los resultados no presentan grandes variaciones. La figura siguiente presenta la curva de penetración para el caso medio (s=2) considerando ambos indicadores de payback. En 2050 la penetración llega a 64% usando el payback tradicional y 62% usando la métrica de payback descontado. Por lo anterior, y dado el alto nivel de incertidumbre que conlleva el uso de estas curvas se recomienda el uso de cualquiera de los dos indicadores financieros[12].

Figura 32: Comparación de curva de penetración con métricas payback y payback descontado



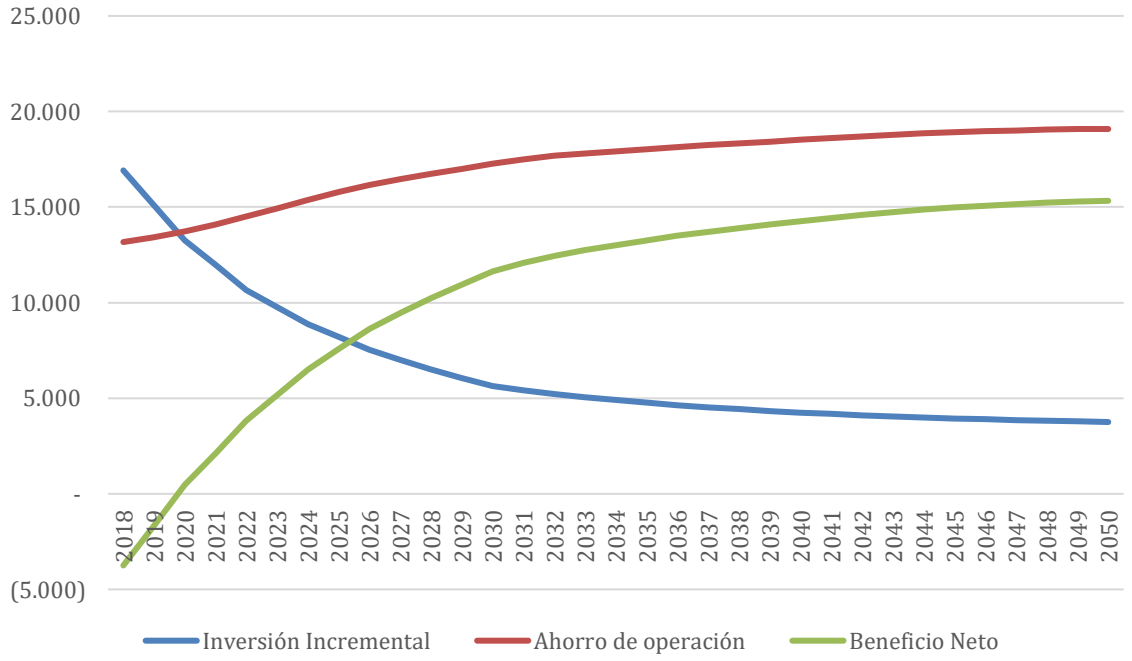

Fuente: Elaboración propia.

[12] Ciertamente las curvas divergerán más en la medida que

## 7.4 Consideraciones económicas

La modificación del enfoque de Bass para incluir la métrica de payback brinda consistencia entre la curva de adopción básica de Bass y la rentabilidad de la tecnología eléctrica. La figura siguiente presenta la inversión incremental (delta inversión) asociada a la compra de un vehículo eléctrico respecto de un convencional; el valor presente de costos de operación a 10 años (en este caso asumiendo una tasa de descuento r=0% consistente con la estimación del indicador de payback tradicional); y los beneficios netos (la diferencia entre ahorros de operación y la inversión incremental).

Figura 33: Costos y Beneficios de la Electromovilidad para un vehículo promedio según su año de venta

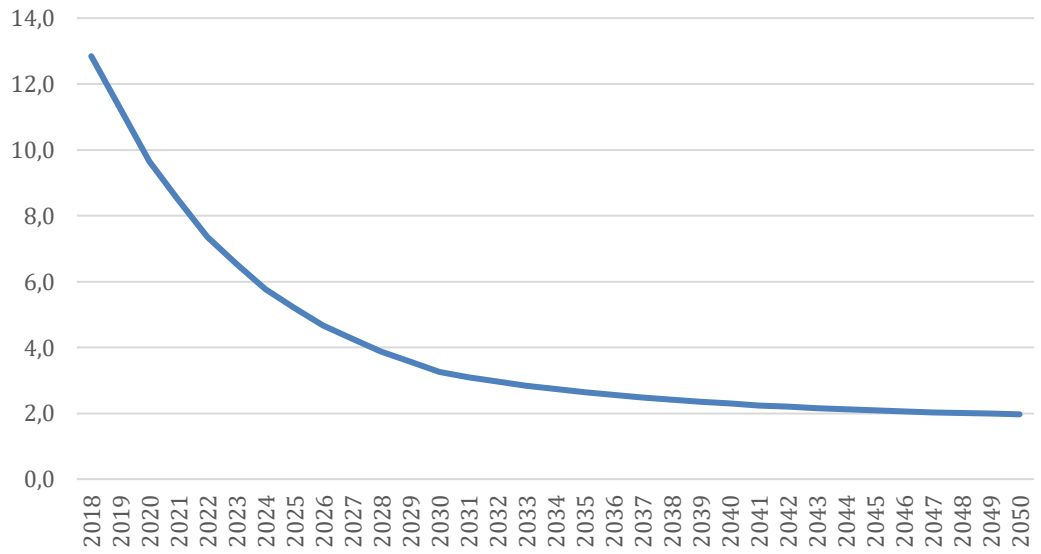



Fuente: Elaboración propia

Los resultados anteriores revelan que a pesar de que el precio de compra de los vehículos eléctricos es mayor a los convencionales en todo el horizonte de evaluación, ya en 2020 la alternativa eléctrica resulta rentable pues los ahorros operaciones permiten recuperar los costos de inversión en un plazo de 10 años.

Los resultados anteriores son consistentes con la estimación de payback para los parámetros económicos y técnicos utilizados. Después del 2020 el payback de la compra de un vehículo eléctrico es menor a 10 años lo que comprueba que desde entonces la venta de vehículos eléctricos resulta rentable frente a un vehículo convencional.

Figura 34: Estimación de  Payback




Fuente: Elaboración propia.

# 8 BIBLIOGRAFÍA


(1962)., R. E. (1962). *Diffusion of Innovations (1st edition).* London: The Free Press. .

Ali Nourai, W. Z. (2008). PRICING ENERGY STORAGE FOR A BALANCED MARKET PENETRATION.

Banco Central. (s.f.). *Banco Central.* Obtenido de https://si3.bcentral.cl/estadisticas/Principal1/Excel/CCNN/regional/excel.html

Bloomberg. (2019). Obtenido de https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/

Center for Entrepreneurship and Technology, University of California. (2009). *Electric Vehicles in the United States: A New Model with Forecasts to 2030.*

CONAF. (2019). *Catastro Vegetacional*. Obtenido de http://www.conaf.cl/nuestros-bosques/bosques-en-chile/catastro-vegetacional/

CONAF. (2019). *Explorador de Biomasa*. Obtenido de https://sit.conaf.cl/

CR2 y MMA. (s.f.). *Plataforma de Simulaciones Climáticas.* Obtenido de http://simulaciones.cr2.cl/

E2BIZ. (2016). *Elaboración e implementación de herramientas prospectivas de Largo Plazo.*

E2BIZ. (2017). *Escenarios Prospectivos de Consumo Eléctrico.* Desarrollado para Generadoras de Chile.

E2BIZ. (2017). *Inventarios regionales de gases de efecto invernadero y otra información pertinente.*

E2BIZ. (2017). *Plan de mitigación de energía.*

EIA. (2019). *International Energy Outlook.*

Energía, M. d. (2017). *Balance Nacional de Energía.*

Fundación Friedrich Ebert (FES). (03 de 2014). *Library FES.* Obtenido de Library FES: https://library.fes.de/pdf-files/bueros/fesamcentral/10781.pdf

GORE Atacama. (2019). *Gobierno Regional Región de Atacama*. Obtenido de https://goreatacama.gob.cl

Grupo de Cambio Climático DGOAT. (2018). *Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca –CAR.* Obtenido de 3. Orientaciones para la Inclusión del Cambio Climático en los Planes de Ordenamiento Territorial. : https://www.car.gov.co/uploads/files/5b070c9370ad3.pdf

INE. (2017). *Resultados Censo 2017*. Obtenido de http://resultados.censo2017.cl/Home/Download

Kijek, T. K. (2010). Modelling of innovation diffusion. *Operations Research and Decisions*.

Massiani, & Gosh. (2016). The choice of Bass model coefficients to forecast diffusion for innovative products: An empirical investigation for new automotive technologies. *Research in Transportation Economics*.

Massiani, D. P. (2015). The choice of Bass model coefficients to forecast diffusion for innovative products: An empirical investigation for new automotive technologies.

McKinsey and Company. (2019). Obtenido de https://www.mckinsey.com/industries/automotive-and-assembly/our-insights/the-global-electric-vehicle-market-is-amped-up-and-on-the-rise

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Colombia. (2018). *Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible .* Obtenido de http://www.minambiente.gov.co/images/cambioclimatico/pdf/desarrollo_y_planificacion/Consideraciones_de_Cambio_Climatico_para_el_Ordenamiento_Territorial_VF.pdf

Ministerio de Energía. (2018). *Balance Nacional de Energía.*

Ministerio de Energía. (2019). *PELP.*

MMA. (2018). *Tercer Informe Bienal de Actualización de Chile sobre Cambio Climático.*

Moore. (2006). *Crossing the Chasm: Marketing and Selling High-Tech Products to Mainstream Customers.*

My EV. (2019). Obtenido de https://www.myev.com/research/ev-101/how-long-should-an-electric-cars-battery-last

National Climate Change Adaptation Research Facility. (2018). *Adapting to long term coastal climate risk through planning approaches and instruments.* Obtenido de https://coastadapt.com.au/sites/default/files/information-manual/IM05_Planning_instruments.pdf

NREL. (2016). *The Solar Deployment System (SolarDS) Model: Documentation and Sample Results.*

ONEMI. (2019). *Visor Chile Preparado.* Obtenido de Visor Chile Preparado: http://geoportalonemi.maps.arcgis.com/apps/webappviewer/index.html?id=5062b40cc3e347c8b11fd8b20a639a88

Partnership on Sustainable Low Carbon Transport. (2019). E-Mobility Trends and Targets.

Plötz, P. &. (2015). How to Foster Electric Vehicle Market Penetration? – A Model based Assessment of Policy Measures and External Factors.

Rogers. (1962). *Diffusion of Innovations (1st edition).* London: The Free Press.

Sokele. (2009). Growth Models for the Forecasting of New Product Market Adoption.

Sunol. (2018). *When to Invest in Warehouse Technology*. Obtenido de https://articles.cyzerg.com/when-to-invest-in-warehouse-technology

United Nations Human Settlements Programme (UN-Habitat). (2014). *Planning For Climate Change: A Strategic, Values-based Approach for Urban Planners.* Obtenido de https://www.uncclearn.org/sites/default/files/inventory/planning_for_climate_change.pdf

V. K. Nārāyaṇan, G. C. (2010). *Encyclopedia of Technology & Innovation Management.* United Kingdom: Wiley & Sons.

Weissmann, V. (2008). Difusión de nuevas tecnologías y estimación de la demanda de nuevos productos: Un análisis comparativo entre Argentina y EUU. *Palermo Business Review*.

Wired. (2019). Obtenido de https://www.wired.com/story/tesla-may-soon-have-a-battery-that-can-last-a-million-miles/