



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

Difusión a Largo Plazo del Vehículo Eléctrico en Asunción y el Área Metropolitana: un Análisis Basado en Dinámica de Sistemas

Noelia Larré, Daniel Ríos, Gerardo Blanco

**Grupo de Investigación en Sistemas Energéticos, Facultad Politécnica, Universidad Nacional de
Asunción**

Paraguay

Resumen

Actualmente, Paraguay es uno de los mayores productores de electricidad per cápita a nivel mundial. No obstante, aún existe una gran brecha entre la magnitud de producción y la demanda. Esto se explica debido a la estructura de la matriz energética paraguaya, en la cual predominan la biomasa y los combustibles fósiles. Atendiendo a que el principal consumidor de combustibles fósiles es el sector transporte, se supone que una transición energética hacia el uso de vehículos eléctricos es de gran interés nacional. Por lo tanto, este trabajo busca describir los patrones de largo plazo de la difusión de vehículos eléctricos entre los conductores particulares de Asunción y Área Metropolitana, siguiendo un enfoque elaborado con Dinámica de Sistemas (SD) y basado en una extensión del Modelo de Bass para analizar la difusión de nuevas tecnologías. En este caso, se emplea el Proceso de Análisis Jerárquico para capturar los patrones de adopción de los conductores. Los resultados muestran que, debido a que los vehículos eléctricos inicialmente son pocos, el patrón de reemplazo se desarrolla lentamente durante los primeros años, alcanzando el punto de inflexión recién en el año 75. No obstante, se verifica que la incorporación de vehículos eléctricos al sector público, gracias a la aplicación de la Política Energética Nacional, ayuda a adelantar el punto de inflexión en 25 años. Finalmente, la metodología propuesta pretende ser una herramienta útil para evaluar políticas relacionadas al transporte, energía y medio ambiente en países emergentes.

Palabras clave

Difusión de Innovaciones, Dinámica de Sistemas Proceso Analítico Jerárquico, Vehículo Eléctrico, Transición Energética.



XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

1. INTRODUCCIÓN

El sector energético paraguayo posee particularidades que lo diferencian de la mayoría de las economías emergentes a nivel mundial. En Paraguay, la producción de energía primaria está basada enteramente en fuentes renovables, tales como la hidráulica y la biomasa. [1]. Más aún, el país es actualmente el mayor exportador de energía hidroeléctrica per cápita a nivel mundial. En contraste, la demanda es suministrada principalmente por derivados de petróleo y biomasa no sostenible, con el 41,4% y el 40,6% de participación en la matriz energética nacional, respectivamente. Paradójicamente, la energía eléctrica representa apenas el 18% en el mix de consumo interno [2].

Con relación al consumo de hidrocarburos, la situación genera las siguientes consecuencias más relevantes. Primero, dado que la totalidad del volumen de derivados de petróleo es importado, una parte importante del suministro energético está supeditado a movimientos de los mercados internacionales, cuyos niveles de precios, o inclusive, disponibilidad, no pueden garantizarse de manera unilateral. Segundo, la necesidad de importar totalmente estos cuantiosos volúmenes de hidrocarburos afecta negativamente a la balanza comercial de la Nación. Tercero y último, la estructura del consumo nacional de energía, encabezada por el uso de los derivados de petróleo, en conjunto con la biomasa, genera importantes emisiones de gases de efecto invernadero que dañan al medio ambiente.

En Paraguay, el principal sector de consumo de los combustibles fósiles es el transporte [2]. La situación se sustenta en la existencia de un parque automotor nacional compuesto casi enteramente por vehículos cuyo mecanismo de propulsión se basa en la combustión interna de derivados de petróleo. Una parte importante del consumo pertenece a la flota de vehículos particulares, que se encuentra concentrada en Asunción, junto con su área metropolitana, que acumula el 54% de la flota vehicular nacional [14].

Históricamente, éste ha sido el paradigma predominante para el abastecimiento energético del parque automotor a nivel mundial. No obstante, los automóviles eléctricos se han consolidado en los últimos años como una alternativa a los vehículos tradicionales. Primordialmente, esto se debe a que los mismos son más amigables con el medio ambiente ya que no emiten gases de efecto invernadero. En el caso de Paraguay, los vehículos eléctricos poseen un atractivo adicional debido a la abundante disponibilidad de energía requerida para abastecerlos.

En ese contexto, este trabajo plantea que la participación de los derivados de petróleo en la matriz energética nacional puede ser disminuida aprovechando el exceso de disponibilidad de electricidad generada a partir de energía hidráulica. Por ello, se propone analizar la viabilidad de una transición energética en el sector transporte del Paraguay mediante la difusión de vehículos eléctricos entre los conductores particulares. Para lo cual, se desarrolla un modelo de Difusión de Innovaciones, basado en la metodología de Dinámica de Sistemas, que describe de manera rigurosa los canales por los cuales los usuarios adquieren información sobre los vehículos que pueden utilizar para satisfacer sus necesidades de movilidad particular. Una vez una opción de vehículo se incorpora a su conjunto de consideración, se define una decisión de compra para los usuarios, en base a la utilidad relativa de cada opción respecto a las demás disponibles. El modelo implementado también describe la actualización de las percepciones de los atributos a medida que la experiencia del mercado va madurando. Para captar los parámetros de adopción vigentes en Asunción y su área metropolitana se



XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

utilizó el Proceso de Análisis Jerárquico (AHP), que representa como como los usuarios, perciben la información acerca de las dos tecnologías disponibles: vehículos a combustión interna (ICE) y vehículos a batería eléctrica (BEV), y, en función a múltiples criterios, toman la decisión de compra.

En las siguientes secciones, se presenta una breve revisión de la literatura y se cometen los métodos más utilizados para estudiar la adopción del BEV. Luego se revisa el modelo de referencia utilizado, y la calibración a la realidad del mercado local. Luego, se presentan los resultados, en dos escenarios de simulación. Por último, se presentan las conclusiones más importantes del trabajo.

2. REVISIÓN DE LA LITERATURA

En [3] se describe la importancia del uso final de la energía como impulso de las Transiciones Energéticas a lo largo de la historia. Esto explica que las Transiciones en el sistema de suministro de energía son generalmente consecuencia de cambios tecnológicos que se producen en el uso final de la misma. El cambio en la demanda de energía, mediante la incorporación de una nueva tecnología o el mejoramiento de una existente en términos de costos y/o eficiencia, genera lazos de retroalimentación que derivan en última instancia en cambios al nivel del sistema de suministro de la energía. Según [3], aunque históricamente los cambios se han dado a una tasa relativamente lenta, lo cual implica el paso de décadas hasta que la transición se consolide, la difusión de nuevas tecnologías en uso final de la energía es más favorable para acelerar la transición que en el sistema de suministro de energía.

Según [4], el tiempo que conlleva una transición, depende, entre otras cuestiones, de: la complejidad de la tecnología; el período de la fase formativa del desarrollo de la tecnología y el tamaño del mercado; y, el tipo de decisiones de adopción, los esfuerzos de adopción y sus beneficios, y las políticas de apoyo.

Para estudiar las Transiciones Energéticas de largo plazo mediante la penetración de nuevas tecnologías, se recae en modelos matemáticos. Una referencia de la literatura que describe métodos para modelar la penetración de vehículos alternativos, entre los que se encuentran los vehículos eléctricos (BEV), es [5]. En ese sentido, los métodos mayormente aceptados en los últimos años para simular esta transición son Modelos Basado en Agentes (ABM), Modelos de Elección del Consumidor, y Modelos de Difusión y Series de Tiempo.

3. MÉTODOS

El Modelado Basado en Agentes permite simular mediante computadora un ambiente que estimula la acción e interacción de cada agente del ambiente (por ejemplo, consumidores, ensambladores, responsables de las políticas, y proveedores de combustible) [5]. Las ventajas del ABM es que las características individuales, las necesidades y las preferencias de los agentes son tomados en cuenta; mientras que la principal desventaja es la complejidad, lo que dificulta la validación de los modelos [5]. En el contexto de adopción de nuevas tecnologías vehiculares el ABM ha sido utilizado en los siguientes casos [6], [7], [8].

Los Modelos de Elección del Consumidor agrupan a Modelos de Elección Discreta y los Modelos Logit, que se han utilizado para describir la toma de decisión colectiva. Los modelos Logit son comúnmente utilizados para modelar la probabilidad de las preferencias de los consumidores, mientras que los Modelos de Elección Discreta calculan la probabilidad de que un producto específico sea elegido entre alternativas bajo la influencia de estas preferencias [5]. Las ventajas presentadas por estos modelos son que, debido a que se tiene una amplia base de datos de las preferencias de los consumidores, el modelo es menos complejo y más transparente que el ABM. La desventaja para el caso de los estudios del transporte, es que existen pocos datos de preferencias de sobre nuevas tecnologías de movilidad [5]. Estos modelos han sido utilizados en estos casos [9], [10], [11].



XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

Otra corriente de modelado de transiciones en el transporte está basada en la Teoría de Difusión de Innovaciones. Esta Teoría es descrita a fondo por E. Rogers en [12],[13], y explica los mecanismos que facilitan el descubrimiento de una innovación por parte de los potenciales adoptadores, y el proceso a través del cual el individuo pasa del reconocimiento de la nueva tecnología en cuestión a la toma de decisión para adoptarla o no, en base a sus ventajas comparativas con otras tecnologías predominantes del mercado.

Los modelos de tasas de difusión son útiles para evaluar la dinámica a nivel macroscópico teniendo en cuenta la toma de decisión colectiva. La difusión de innovaciones es frecuentemente modelada como la distribución normal. La población de adoptadores se divide en cinco tipos: innovadores, adoptadores tempraneros, mayoría tempranera, mayoría tardía, y rezagados. Esta clasificación está basada en el tiempo que requiere cada grupo para adoptar definitivamente la innovación en cuestión [12]. Los innovadores son los primeros adoptadores que están dispuestos a tomar riesgos al adquirir productos nuevos e innovadores [5]. Los adoptadores tempraneros, la mayoría tempranera y los rezagados, son todos adoptadores influenciados, de menor a mayor forma, respectivamente, por presiones del sistema social, que crece con el tiempo. La clave del uso de los modelos de difusión es la definición de la estructura de retroalimentación que determina las tasas de adopción de las nuevas tecnologías.

Algunos de los modelos de difusión son los de Fourt and Woodback [15], el de Masnfield [16], y el de Bass [17], [18]. Los modelos de series de tiempo y difusión han sido ampliamente utilizados para el análisis de la difusión de nuevas tecnologías en una variedad de mercados incluyendo telecomunicaciones, electrónica, energía y transporte. [5].

En ese sentido, para la difusión de automotores los modelos de difusión más utilizados son los modelos de Bass, Gompertz, y los modelos Logísticos [5], por ejemplo, en los siguientes casos [19], [20], [21], [22].

De entre estos modelos, el de Bass es el más difundido entre los investigadores debido a su simplicidad. En este caso, la adopción se determina a través de dos canales: *marketing* y boca en boca.

El Modelo de Bass agrega a los individuos en solamente en dos grupos: innovadores e imitadores. De forma similar a la Teoría de Difusión de Innovaciones, los innovadores aquí son descritos como seres aventureros y atrevidos, que interactúan únicamente entre sí, y adoptan la innovación gracias a los efectos de los medios de comunicación. Éstos no son influenciados al momento de compra de la innovación en cuestión por otros miembros del sistema social. Por lo tanto, la influencia principal que reciben para adoptar proviene de adquisición de información del propio mercado, es decir, del *marketing*. A diferencia de los innovadores, los parámetros temporales de adopción de los imitadores sí son influenciados por las decisiones de los otros miembros de su sistema social, es decir, adquieren la innovación mediante los efectos del “boca en boca”. El modelo de Bass se usa para analizar la difusión de una innovación bajo el supuesto de que no existen productos sustitutos en el mercado [17].

Extensiones del Modelo de Bass fueron utilizadas ampliamente en la literatura para analizar la difusión de vehículos alternativos a los vehículos con motores a combustión interna [5].

Por ejemplo, [23] examinó la penetración de vehículos alternativos hasta 2030 en los Estados Unidos. [24] analizó la tasa de adopción de vehículos eléctricos en dos escenarios distintos de precios de combustible, teniendo en cuenta el precio de compra del vehículo y sus costos de operación como determinantes de la toma de decisión de los usuarios. [25] utilizó un modelo de difusión de Bass para estimar la tasa de adopción de vehículos híbridos en Corea del Sur, mientras que en [26] utilizó el modelo de Bass para estudiar la penetración del vehículo a hidrogeno y la infraestructura requerida para que su adopción sea posible.



XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

Dos de los trabajos más referenciados en la literatura en cuanto al estudio de la difusión de vehículos eléctricos son [27] y [28], los cuales presentan un modelo basado en el modelo de difusión de Bass, teniendo en cuenta la preferencia de los usuarios, mediante el enfoque de simulación Dinámica de Sistemas (DS) [27]. El enfoque basado en DS es utilizado en varias disciplinas para representar la interacción de elementos que gobiernan la dinámica de los sistemas complejos. El enfoque combina dinámicas no lineales, modelos de difusión y controles de retroalimentación. Los procesos de retroalimentación están modelados con *stocks & flows* que simulan los procesos del mundo real en un intento de entender los impactos de las decisiones y las acciones, y permitir el análisis de los impactos de los parámetros endógenos y exógenos [29]. El modelado con DS ha sido aplicado extensivamente en administración de negocios, impulsado por Jay Forrester desde los años cincuenta. No obstante, en las últimas décadas su uso se ha ampliado para incluir otras áreas, incluyendo políticas gubernamentales, desarrollo de infraestructura, servicios de salud, e industria automotriz [30].

En base a la revisión discutida, se establece que este trabajo está inspirado en el modelo de incluido en [28] y [27], el cual estudia las interrelaciones y los efectos del *marketing*, la familiaridad de los usuarios con el vehículo eléctrico (BEV), la exposición social y los atributos de los vehículos. Se ha encontrado evidencia del desarrollo de modelos de análisis de la difusión de vehículos eléctricos en base a la propuesta incluida en [27]. Por un lado, en [29] se ha examinado la difusión de vehículos ante alternativas de subsidio por parte del Gobierno del Reino Unido. Por otro lado, en [31] se ha aportado parámetros de modelado en base a una comparación de resultados de simulación de difusión de vehículos diésel con datos del mercado en Europa.

El modelo propuesto [27], [28] debe ser adaptado para estudiar el caso de estudio dado la difusión de vehículos eléctricos entre los conductores de Asunción, Paraguay. Se ha verificado que existen diversos métodos para caracterizar la toma de decisión colectiva de los conductores. No obstante, en función a las premisas del modelo de referencia y a la limitación en los datos disponibles, se ha empleado un método de análisis multicriterio para caracterizar las preferencias de los usuarios del caso de estudio. El método empleado consiste en el Proceso de Análisis Jerárquico, el cual es un método intuitivamente simple para formular y analizar decisiones [32]. Fue desarrollado para resolver problemas que envuelven priorización de alternativas de solución. Esto se logra mediante la evaluación de un conjunto de criterios y subcriterios por medio de comparaciones pareadas [33]. El AHP ha sido aplicado en numerosos casos para replicar la toma de decisiones en movilidad alternativa. A modo de ejemplo, en [34] se ha utilizado para determinar los pesos relativos de los criterios de decisión para la adopción de buses alternativos en Taiwan. Asimismo, en [35] se ha utilizado para determinar los pesos relativos de los criterios de decisión de un modelo para vehículos alternativos. Por último, en [36] se ha empleado para analizar la decisión entre opciones ambientalmente amigables de movilidad en Delhi, India.

4. REVISIÓN DEL MODELO

El interés del trabajo es simular la adopción del vehículo eléctrico (BEV) en el largo plazo teniendo como alternativa predominante desde el inicio a los vehículos a combustión interna (ICE). El diagrama stock & flow de la Fig. 1 ilustra los principales lazos de retroalimentación del modelo. El modelo se basa en el Modelo de Bass, pero incorpora importantes modificaciones. El Modelo de Bass describe el proceso de adopción como resultado de la exposición y la familiaridad de un comprador con un bien tecnológico genérico. Sin embargo, cabe destacar que los vehículos son productos que envuelven atributos particulares que deben ser considerados dentro de la estructura de retroalimentación del proceso de decisión. Estos factores son determinantes a la hora de adquirir y utilizar el producto, y definen su nivel de exposición al público. En base a esto, se considera que la familiaridad de un comprador con un producto es consecuencia de su exposición. De forma a ganar familiaridad, se asume que la exposición debe prolongarse durante largo tiempo, ya que los vehículos son bienes con ciclo de vida relativamente largos, y los usuarios tardan en promedio una década para reemplazar sus vehículos. Por lo tanto, la estructura de los canales de exposición al producto debe ser detallada de forma precisa. [28].

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

Atendiendo a estos requerimientos, el modelo incluye algunos conceptos interesantes. El primero consiste en separar los conceptos la familiaridad de la adopción y las decisiones de reemplazo, que en Modelo de Bass son englobados dentro de una misma estructura de retroalimentación. En segundo lugar, se captura explícitamente los diferentes canales a través de los cuales es probable que los consumidores adhieran un producto a su conjunto de alternativas en consideración. Tercero, a raíz de la competencia por la atención de los usuarios, y en ausencia de compras subsecuentes en períodos cortos de tiempo, la consideración de una nueva alternativa crece lentamente; inclusive, dicha consideración puede decrecer hasta ser olvidada. Cuarto y último, el aprendizaje sobre los atributos de los nuevos vehículos es un proceso lento en comparación con la vida útil de los mismos [28].

Como este trabajo no presenta ninguna alteración al modelo base, se recomienda ahondar en más detalles, sobre todo respecto a la formulación del problema, revisando la literatura de referencia en [27], [28]. En ese contexto, el principal aporte del trabajo consiste en el análisis de largo plazo de la adopción de BEV para el caso de estudio dado por Asunción, teniendo en cuenta las preferencias de estos usuarios. Por lo tanto, la siguiente sección describe la propuesta de calibración del modelo, para luego incluir una discusión sobre las simulaciones realizadas para distintos escenarios.

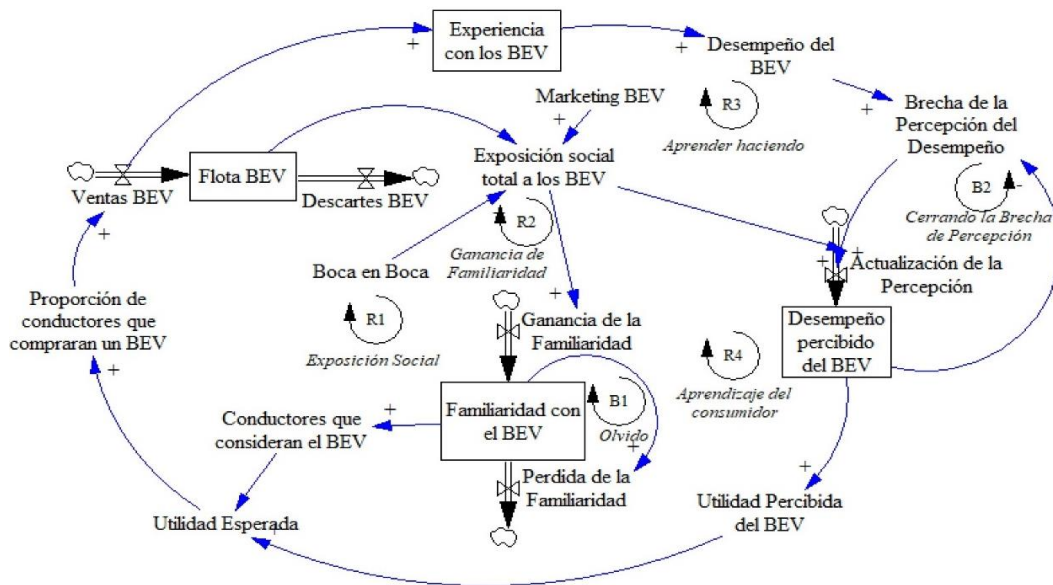


Figura 1: Principales lazos de retroalimentación del modelo de Struben

4. CARACTERIZACIÓN DEL MODELO

Se asume que los usuarios toman una decisión de compra de un vehículo considerando dos alternativas que agregan a todas las unidades disponibles: vehículo a combustión interna (ICE) o un vehículo eléctrico (BEV). Los criterios considerados para el modelo de toma de decisión son: precio de compra (p.c.) costos de operación (c.o.), autonomía (a.), velocidad máxima (v.m.) y emisiones (e.) [29]. El precio de compra comprende la inversión inicial para la adquisición del vehículo, y se mide en miles de guaraníes (miles de gs). Los costos de operación, incluyen los gastos de mantenimiento y de carga de combustible o energía eléctrica, según sea el caso, lo cual se mide en guaraníes por año (gs/año). La autonomía del vehículo se refiere a la cantidad de kilómetros que pueden ser recorridos con un tanque lleno o la batería totalmente cargada, según sea el caso, y se mide en kilómetros (km). Las emisiones incluyen la cantidad de gases de efecto invernadero emitidos por el vehículo en un año. Este último se considera como un criterio cualitativo y no fue incluido en el cuestionario, sino evaluado por los autores del trabajo, para reducir la complejidad de las preguntas, por lo tanto se utiliza

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

directamente la escala de Saaty [32], siendo 1 para la alternativa peor calificada (ICE) y 9 para la mejor calificada (BEV).

Para obtener información sobre las preferencias de los usuarios de Asunción para la toma de decisión de compra de vehículos, se aplicaron cuestionarios a 384 conductores ICE, de un total de 633.682 vehículos; y 20 conductores de BEV, de un total de 55 vehículos existentes [14].

En la Tabla I figuran los valores recopilados para describir los atributos de los vehículos que circulan por Asunción y el área metropolitana. También están expuestos los pesos relativos de cada alternativa según cada criterio, obtenidos mediante la aplicación de la metodología AHP. Todos los atributos fueron evaluados de manera cuantitativa, con excepción de las emisiones producidas por los vehículos, donde se calificó al BEV con 9 y al ICE con 1, ya que las emisiones de los vehículos dependen en su gran mayoría de la fuente de energía utilizada para su propulsión [7] En el caso de los vehículos BEV, como la fuente de suministro en Asunción sería la energía hidroeléctrica, las emisiones relacionadas se reducen casi a cero. [7]

Tabla I : Valores y Pesos Relativos de los Criterios

	A. (km)	C.O. (gs/año)	E.	P.C. (miles de gs)	V.M. (km/h)
ICE	432	9.655.272	1	70.782	169
	0,75	0,29	0,10	0,72	0,53
BEV	143	3.900.000	9	180.000	149
	0,25	0,71	0,90	0,28	0,47

Se observa que el ICE supera al BEV según autonomía, precio de compra y velocidad máxima; mientras que el BEV supera al ICE en costos de operación y emisiones.

Tabla II: Pesos Relativos de los Criterios para Cada Grupo de Usuarios

Atributos	Conductores ICE	Conductores BEV
A.	0,218	0,213
C.O.	0,232	0,250
E.	0,203	0,238
P.C.	0,222	0,188
V.M.	0,125	0,111

En la Tabla II, se observan los valores relativos de cada uno de los atributos o criterios de decisión para cada uno de los grupos de conductores. Esto se ha obtenido en base a las encuestas realizadas, a través de las cuales se ha caracterizado la preferencia de los conductores sobre cada alternativa en función a cada criterio. Se observa que el atributo más importante para ambos grupos de usuarios a la hora de tomar una decisión de compra son los costos de operación del vehículo.

Tabla III: Pesos relativos de las alternativas para cada grupo de usuarios

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

Alternativas	Conductores ICE	Conductores BEV
ICE	0,48	0,45
BEV	0,52	0,55

Por último, según la metodología AHP [32], se debe comparar la importancia relativa de las alternativas según cada criterio con el peso relativo de los criterios, para obtener el peso relativo de la alternativa. En la Tabla III figuran los pesos relativos de cada alternativa, para cada grupo de usuarios, que dentro del modelo dinámico, represente el desempeño percibido por el usuario. Este último dato trata de responder a la pregunta fundamental que guía el trabajo: ¿Serían los BEV elegibles frente a los ICE como alternativa para la movilidad eléctrica de los usuarios de Asunción y el área metropolitana? De acuerdo a los resultados obtenidos, se puede apreciar que ambos grupos de usuarios preferirían adoptar un vehículo BEV por encima de un vehículo ICE.

Con estos valores finaliza la caracterización del modelo y puede iniciarse la simulación a largo plazo del modelo dinámico.

5. RESULTADOS

Para la simulación del modelo dinámico se asume que la flota total del mercado se mantiene constante. Por lo tanto, se trata de un estudio de la dinámica del reemplazo de una flota principalmente propulsada a combustión interna a una principalmente propulsada a energía hidroeléctrica. Todos los parámetros utilizados se encuentran descritos en [28], con excepción de E_0 , que captura la experiencia de referencia del mercado con el BEV. En este caso se ha adoptado una proporción de flota BEV equivalente al de un mercado de referencia como lo es California, USA; cuya flota de BEV alcanza el 1,85% de su flota total [38]. No obstante, se incluye un análisis de sensibilidad considerando rango del 10% de desviación del valor de referencia.

Se simuló el modelo en dos escenarios: el caso base y la aplicación de la Política Energética Nacional.

5.1 Escenario Caso Base

Se implementa una campaña de marketing que dura todo el horizonte de simulación. En la Fig. 1, esto pone en marcha el lazo de retroalimentación positivo R1, aumentando la exposición social al BEV, con lo que se incrementa la familiaridad con el BEV (lazo R2). Esto finalmente permite que se incrementen las ventas y aumente el stock de vehículos eléctricos del mercado.

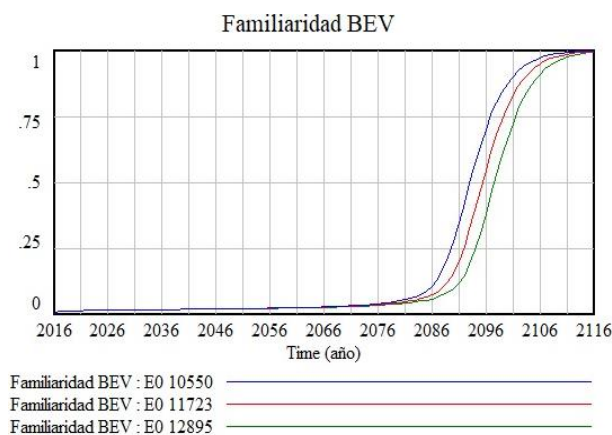
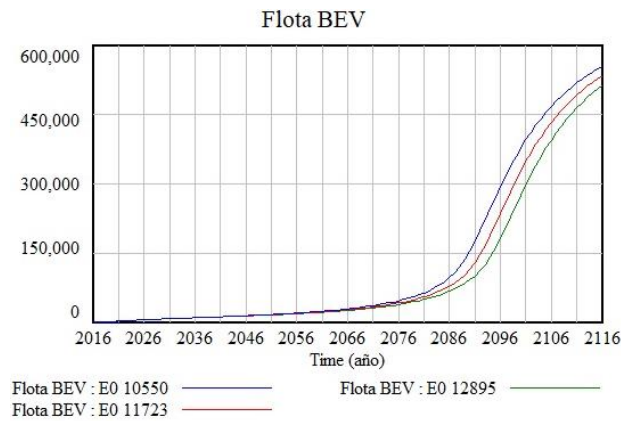


Figura 2. Evolución de la Familiaridad de los conductores ICE con el BEV en el Escenario Caso Base.**Figura 3. Evolución de la flota BEV en el Escenario Caso Base.**

La Fig 2 y la Fig. 3 muestran las dinámicas experimentadas por las variables de estado V_2 y F_{12} o Flota BEV y Familiaridad que tienen los conductores del ICE con el BEV, respectivamente. Como se ve en la Fig. 2, en los primeros años, el aumento de la Familiaridad es lento debido a que, durante el primer periodo de adopción, la exposición social proviene solamente del marketing y del boca en boca de conductores de ICE entre sí. A medida que la flota de BEV crece, se incrementa la exposición social gracias al contacto de boca en boca de conductores de BEV, en constante aumento, con conductores de ICE. Esto lleva a un crecimiento exponencial que permite alcanzar un punto de inflexión que representa la completa Familiaridad con la alternativa BEV, producto de una exposición social total, intensa y continua. La Fig. 3 expone como la flota de BEV reemplaza a la flota de ICE, en correspondencia con el crecimiento de la Familiaridad. En ese sentido, se observa que el crecimiento es lento al principio, y que, a medida que se crece la flota de BEV, el crecimiento se acelera, superando el punto de inflexión que se genera alrededor del año 2090 (año 75 de horizonte de simulación), alcanzando la saturación del mercado, en el año 2126.

Como resultado de lo que se aprecia en la Fig. 3, se estima una disminución en la importación de los derivados de petróleo a medida que la flota de vehículos ICE es reemplazada por vehículos BEV. Como se observa en la Fig. 4 la mayor disminución se debería al reemplazo de la nafta, ya que la mayoría de los vehículos de Asunción y su área metropolitana usan este combustible, según la información recabada con cuestionarios. En ese sentido, luego de 100 años se tendría una disminución del 75% de las importaciones de Nafta y 17% del Diesel. Esto naturalmente conllevaría a una disminución de las emisiones de CO₂. En la Fig. 5, se observa el gráfico de disminución de las emisiones de CO₂, el principal contaminante proveniente de los caños de escape de los vehículos a combustión interna, alcanzando una disminución del 53%. Esto fue calculado a partir de datos obtenidos en los cuestionarios, combinados con la información de viajes de los conductores de Asunción metropolitana encontrados en [39].

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

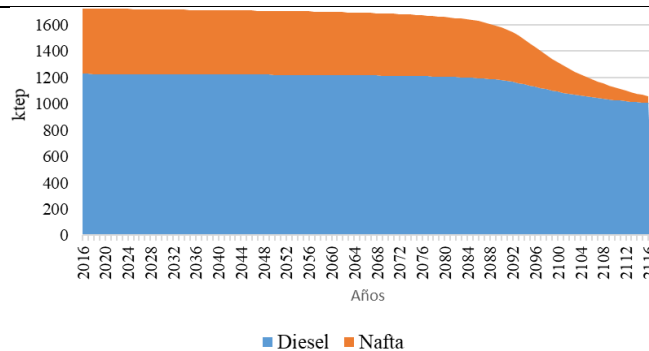


Figura4. Impacto en la importación de los derivados de petróleo.

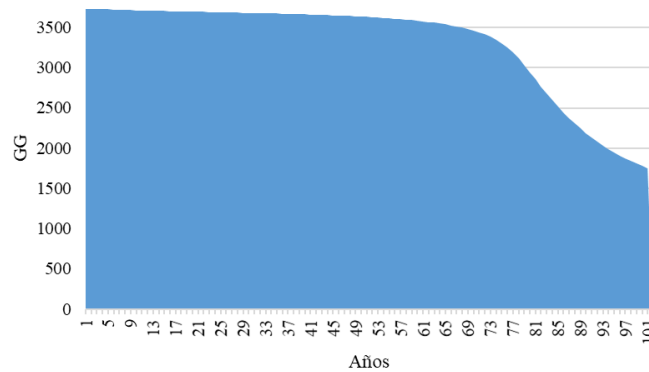


Figura 5. Evolución de la Familiaridad de los conductores ICE con el BEV en el Escenario Caso Base.

5.2 Escenario de Aplicación de las medidas de la Política Energética Nacional

En el 2016, fue decretada la Política Energética Nacional [40], que tiene como objetivo garantizar el uso eficiente de la energía en el país. En ella se contemplan planes de acción para llevar a cabo dicho objetivo, uno de los cuales consiste en un Programa de Movilidad Eléctrica en el Público, que tiene las siguientes metas:

- Que la flota vehicular de la Ande para uso en el área metropolitana de Asunción sea eléctrica (10% en el corto plazo, 50% en el mediano plazo, 100% en el largo plazo)
- Que las nuevos vehículos del sector públicos sean eléctricos (10% en el corto plazo, 20% en el mediano plazo, 50% en el largo plazo)

Como consecuencia de la aplicación de la Política Energética, existen más vehículos en el mercado, lo que hace que, se intensifique la exposición social y aumente la familiaridad. La evolución dinámica de la flota de vehículos eléctricos es altamente sensible a este hecho. En consecuencia, se hicieron simulaciones para evaluar cómo afecta la inyección de BEV que genera la aplicación de la Política Energética. Se utilizaron los parámetros expuestos al principio de la sección y además la flota de la ANDE y del Sector Público, presentados en la Tabla IV.

Tabla IV: Flotas de Entidades Públicas Paraguayas al 2016

XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

Entidad	Flota (vehículos)
ANDE [41]	836
Sector Público [42]	9757

En la Fig. 6, se observa la evolución de la familiaridad del BEV, entre los conductores de ICE. Se muestra que el punto de inflexión se presenta aproximadamente 25 años antes que en el caso base, alrededor del 2066. Esto se da porque la flota de autos públicos ha reforzado la exposición de los vehículos eléctricos entre conductores ICE y conductores BEV. En el caso base, esta exposición era débil hasta muy adelante en el tiempo.

En la Fig. 7 se muestra la evolución de la flota de BEV, como consecuencia de la mayor familiaridad, más personas consideran el vehículo eléctrico y existen más ventas. Al haber una inyección de vehículos también mejora la experiencia que se tiene con la tecnología (talleres, servicio al cliente, oferta de productos) y el desempeño del BEV crece, lo que también genera un incremento en las ventas. Mediante esto, se puede apreciar el notable impacto que podría tener la incorporación de vehículos eléctricos a la flota de las entidades públicas del país para acelerar la difusión de vehículos eléctricos entre la población.

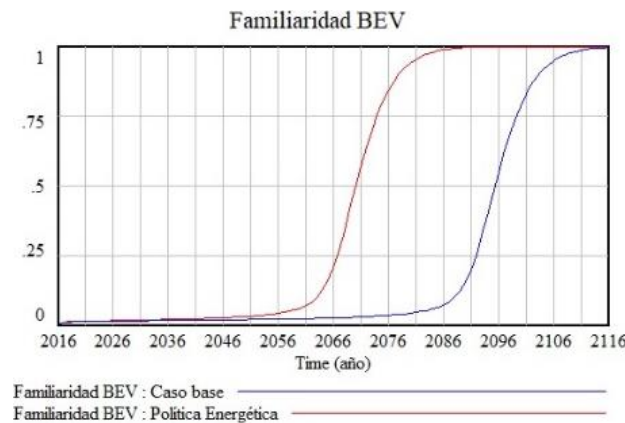


Figura 6. Comparación de la evolución de la Familiaridad de los conductores en los escenarios de simulación

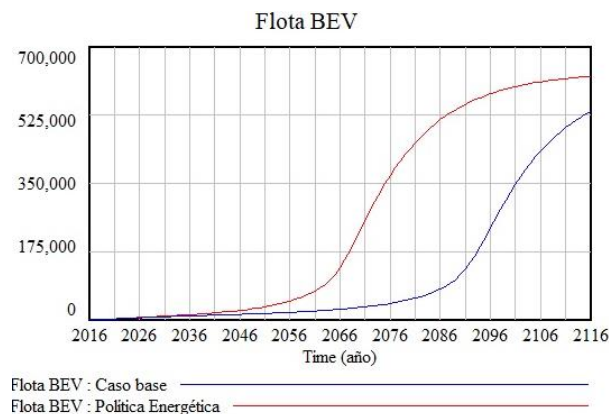


Figura 7. Comparación de la evolución de la flota BEV en los de simulación.

6. CONCLUSIÓN

En este trabajo se ha analizado las perspectivas de difusión de largo plazo de los vehículos eléctricos en Asunción, Paraguay. Para ello se ha implementado un método que describe la dinámica de difusión de vehículos en base a la toma de decisión de compra de los usuarios. Se ha utilizado el Proceso Analítico Jerárquico para reunir información sobre las preferencias de los usuarios a la hora de tomar la decisión de compra de nuevos vehículos, disponiendo de dos alternativas, ICE y BEV.

Con base en cuestionarios aplicados a los dos grupos de usuarios determinados para el experimento, los usuarios BEV y los ICE, se pudieron determinar los vectores de decisión para ambos grupos, donde, el peso relativo de la alternativa BEV, supero al peso de la alternativa ICE. Los criterios evaluados por los usuarios fueron: emisiones, autonomía, precio de compra, costos de operación y velocidad máxima. Los conductores BEV evalúan, al ICE en 45% relativo al objetivo y al BEV en 55% relativo al objetivo. Por otro lado, los conductores de ICE, valoran al ICE en 48% relativo al objetivo y al BEV en 52%.

Se hicieron simulaciones en dos escenarios: el Caso Base, donde se considera que se comienza una campaña publicitaria moderada que dura los cien años del horizonte de simulación; y la aplicación de las medidas de la Política Energética, dónde además se considera la inyección de vehículos eléctricos a la flota de las entidades públicas.

Los resultados de las simulaciones apuntan a que, al ser la flota inicial de BEV muy pequeña, el crecimiento en el escenario caso base se mantiene débil por un largo periodo de tiempo, ocurriendo el punto de inflexión recién alrededor del año 70 del horizonte de simulación. Luego, se ha verificado que, si se inyectasen vehículos al mercado en los primeros años mediante la aplicación de la PEN, se generaría más exposición social, lo que a su vez produciría más ventas de BEV, y el punto de inflexión se adelantaría sustancialmente.

Por último, se ha evidenciado que la transición de la flota a combustión interna a una flota a baterías eléctricas podría generar un favorable impacto en el balance energético, ya que podría causar la disminución de las importaciones de derivados de petróleo. Así también al tratarse de un reemplazo de energía contaminante por energía limpia, se podrían eliminar notables cantidades de emisiones de CO₂.

En base a todo lo anterior, y teniendo en cuenta las características actuales de la flota de vehículos eléctricos en Asunción y su área metropolitana y la energía eléctrica disponible por el Paraguay, se concluye que el presente trabajo ofrece una herramienta confiable para el análisis y la evaluación políticas relacionadas a transporte, energía y ambiente.

7. REFERENCIAS

- [1] G. Blanco, R. Amarilla, A. Martínez, C. Llamosas y V. Oxilia, “Energy transitions and emerging economies: A multi-criteria analysis of policy options for hydropower surplus utilization in Paraguay”, *Energy Policy*, vol. 108, pp. 312-321, Jun. 2017.
- [2] *Balance Energético Nacional 2016*, Ministerio de Minas y Energía, Asunción, 2016.
- [3] A. Grubler, “Energy transitions research: Insights and cautionary tales”, *Energy Policy*, vol. 50, pp. 8-16, Mar. 2012.
- [4] A. Grubler, C. Wilson y G. Nemet, “Apples, oranges, and consistent comparisons of the temporal dynamics of energy transitions”, *Energy Research & Social Science*, vol. 22, pp. 18-25, Ago. 2016.
- [5] B. M. Al-Alawi y T. H. Bradley, “Review of hybrid, plug-in hybrid, and electric vehicle market modeling Studies”, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 21, pp. 190-203, Ene. 2013.
- [6] M. J. Eppstein, D. K. Groover, J. S. Marshall y D. M. Rizzo, “An agent-based model to study market penetration of plug-in hybrid electric vehicle”, *Energy Policy*, vol. 51, pp. 789-802, Dic. 2012.



XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018

- [7] C. Stephan y J. Sullivan, "An agent-based hydrogen vehicle/infraestructure model", en *Conference on evolutionary computation*, 2004, p. 1774.
- [8] J. L. Sullivan, I. T. Salmeen y C. P. Simon, "PHEV market place penetration: an agent-based simulation", University of Michigan Transportation Research Institute, Ann Arbor, MI, Rep. 2009-32, 2009.
- [9] D. Brownstone, D. S. Bunch y K. Train, "Joint mixed logit models of stated and revealed preferences for alternative fuel vehicles", *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 34, pp. 315-338, May. 2000.
- [10] D. Diamond, "The impact of government incentives for hybrid-electric vehicles: evidence from US states", *Energy Policy*, vol. 37, pp. 972-983, Mar. 2009.
- [11] J. Axsen y K. S. Kurani, "Anticipating plug-in hybrid vehicle energy impacts in California: Constructing consumer-informed recharge profiles", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, vol. 15, pp. 212-219, Jun. 2010.
- [12] E. M. Rogers, *Diffusion of Innovations*, 1era edición, Ed. New York: Free Press, 1962.
- [13] E. M. Rogers, *Diffusion of Innovations*, 5ta edición, Ed. New York: Free Press, 2003.
- [14] (2016) Dirección del Registro de Automotores. [En línea] Disponible en: <http://www.ssme.gov.py>.
- [15] L. A. Fourt y J.W. Woodlock, "Early prediction of market success of new grocery products", *Journal of Marketing*, vol. 25, pp. 31-38. Oct. 1960
- [16] E. Mansfield, "Technical change and the rate of imitation", *Econometrica*, vol. 29, pp. 741-766, Oct. 1961.
- [17] F.M., Bass, "A new product growth for model consumer durables", *Marketing Science*, vol. 15, pp. 215-227, Jan. 1969.
- [18] F. M. Bass, T. V. Krishnan y D. C. Jain, "Why the Bass model fits without decision variables", *Marketing Science*, vol. 13, pp. 203-223, Ago. 1994.
- [19] P. K. Goldberg, "The regulation of fuel economy and the demand for light trucks", *Journal of Industrial Economics*, vol. 46, pp. 1-33, 1998.
- [20] Y. Feng , D. Fullerton y L. Gan, "Vehicle choices, miles driven and pollution policies", University of Texas at Austin, Austin, TX, Working Paper 11553, 2005.
- [21] P. J. Lamberson, "The diffusion of hybrid electric vehicles", Center of the Study of Complex Systems, University of Michigan Transportation Research Institute, Ann Arbor, MI, 2009.
- [22] W. McManus y R. Senter, "Market models for predicting PHEV adoption and diffusion", University of Michigan Transportation Research Institute, Ann Arbor, MI, Rep. 2009-37, 2009.
- [23] S. Y. Jeon, "Hybrid & electric vehicle technology and its market feasibility", M. Eng. tesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2010.
- [24] T. A. Becker, "Electric Vehicles in the United States: a new model with forecast to 2030", University of California, Berkeley, California, Rep. 2009.1.v.2.0, Ago. 2009.
- [25] J. R. Won, Y. B. Yoon y K. J. Lee, "Prediction of electricity demand due to PHEVs (plug-in hybrid electric vehicles) distribution in Korea by using diffusion model", en: Proceedings of the transmission & distribution conference & exposition, 2009, p. 1
- [26] P. E. Meyer y J. Winebrake, "Modeling technology diffusion of complementary goods: The case of hydrogen vehicles and refueling infrastructure", *Technovation*, vol. 29 .pp. 77-91, Jul. 2008.
- [27] J. Struben y J. Sterman, "Transition challenges for alternative fuel vehicle and transportation system", *Environment and Planning B: Planning and Design*, vol. 35, pp. 1070-1097, May. 2008.
- [28] J. Struben, "Essays on transition challenges for alternative propulsion vehicles and transportation systems", PhD. Management tesis, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, Set. 2006.
- [29] S. Shepherd, P. Bonsall y G. Harrison, "Factors affecting future demand for electric vehicles: A model based study", *Transport Policy*, vol. 20, pp. 62-74, Ene. 2012.
- [30] J. Sterman, *Business dynamics, systems thinking and modeling for a complex world*, S. Isenberg, Ed. Irwin McGraw-Hill: Boston, 2000.
- [31] Q. Zhang, "A Study of Diesel Vehicle Diffusion in Europe: Calibration and Analysis of a consumer acceptance and adoption model", Technology and Policy Program, Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, MA, 2007.
- [32] T. L. Saaty, How to make a decision: the analytic hierarchy process, *European Journal of Operation Research*, vol. 48, pp. 9-26, Set. 1990.
- [33] D. Byun, "The AHP approach for selecting an automobile purchase model", *Information & Management*, vol. 38, pp. 289-297, Oct. 2000.
- [34] G. Tzeng, C. Lin y S. Opricovic, "Multi-criteria analysis of alternative-fuel buses for public transportation", *Energy Policy*, vol. 33, pp. 1373-1383, Abr. 2004.



Comité Nacional Paraguayo



Unión de Ingenieros de ANDE

**XIII SEMINARIO DEL SECTOR ELECTRICO PARAGUAYO - CIGRÉ
06 y 07 de Setiembre de 2018**

-
- [35] P. Lanjewar, R. Rao y A. Kale, “Assessment of alternative fuels for transportation using a hybrid graph theory and analytic hierarchy process method”, *Fuel*, vol. 154, pp. 9-16, Abr. 2015.
 - [36] S. Yedla, R. Srestha, “Multi-criteria approach for the selection of alternative options for environmentally sustainable transport system in Delhi”, *Transportation Research part A*, vol. 37, pp. 717-729, Feb. 2003.
 - [37] J. Gomez, C. Mojica y K. Veerender, L. Isla “Incorporación de los vehículos eléctricos en América Latina”, Banco Interamericano de Desarrollo, Sep. 2016
 - [38] N. Lutsey, “Update: California’s electric vehicle market”, The International Council on Clean Transportation, San Francisco, CA, 2017.
 - [39] *Balance energético nacional en energía útil de la República del Paraguay, Estudio de Energía del Sector Transporte*, Itaipú Binacional, Asunción, 2013.
 - [40] Política Energética de la República del Paraguay, Decreto 10 octubre 2016, N° 6092/2016.
 - [41] [(2017), Administración Nacional de Electricidad. [En línea]. Disponible en: <http://www.ande.gov.py>.
 - [42] (2017), Dirección Nacional de Transporte. [En línea]. Disponible en: <http://www.dinatran.gov.py>.