



**DOI:** 10.26820/reciamuc/7.(2).abril.2023.375-389

**URL:** <https://reciamuc.com/index.php/RECIAMUC/article/view/1120>

**EDITORIAL:** Saberes del Conocimiento

**REVISTA:** RECIAMUC

**ISSN:** 2588-0748

**TIPO DE INVESTIGACIÓN:** Artículo de revisión

**CÓDIGO UNESCO:** 3310 Tecnología Industrial

**PAGINAS:** 375-389



## Prospectiva sobre la integración energética de sistemas de generación distribuida y vehículos eléctricos en Mendoza, Argentina

Prospective on energy integration of distributed generation systems and electric vehicles in Mendoza, Argentina

Perspectiva de integração energética de sistemas de geração distribuída e veículos elétricos em Mendoza, Argentina

**Andrés Osvaldo Benito<sup>1</sup>; Pedro Luis Castro Verdezoto<sup>2</sup>; Paula Daniela Rodríguez<sup>3</sup>**

**RECIBIDO:** 23/02/2023 **ACEPTADO:** 12/03/2023 **PUBLICADO:** 15/05/2023

1. Ingeniero Electromecánico; Universidad Tecnológica Nacional; Facultad Regional Mendoza; Mendoza; Argentina; andresbenito@frm.utn.edu.ar;  <https://orcid.org/0000-0003-4985-6582>
2. Master in Energy Planning; Universidad de Guayaquil, Ecuador; ing.pedrocastro@hotmail.com;  <https://orcid.org/0000-0002-2617-3781>
3. Doctora en Ingeniería; Universidad Tecnológica Nacional; Facultad Regional Mendoza; Mendoza, Argentina; danielarodriguez@gmail.com;  <https://orcid.org/0000-0003-0621-3763>

### CORRESPONDENCIA

**Andrés Osvaldo Benito**

andresbenito@frm.utn.edu.ar

**Mendoza, Argentina**

## RESUMEN

Con el fin de tomar decisiones sustentadas en evidencia, este trabajo presenta herramientas orientadas a evaluar las oportunidades y amenazas que enfrenta el sector energético. Su objetivo principal fue exhibir los desarrollos en el modelado prospectivo en LEAP (Low Emissions Analysis Program) de la integración de vehículos eléctricos (EV) e instalaciones fotovoltaicas de generación distribuida conectadas a la red en sistemas energéticos regionales como el de la provincia de Mendoza, en Argentina, a través del ejercicio de proposición de escenarios como posibles trayectorias a largo plazo y no como meros pronósticos azarosos. Los resultados indican que se produciría un cambio significativo en la configuración de la matriz eléctrica provincial como consecuencia de una alta penetración de este tipo de instalaciones de generación distribuida. Por otro lado, se evidencia que en una configuración Vehicle to Grid (V2G), la demanda de electricidad de los vehículos eléctricos será mayor que la cantidad de electricidad que inyectan a la red, lo que requiere la evaluación de estrategias adicionales que fomenten y regulen su uso. Además, se constata que la sustitución de vehículos de combustión interna por vehículos eléctricos como medida tendiente a la reducción de emisiones de Gases de Efecto Invernadero sería ineficaz actuando de forma aislada de una política de transformación de la matriz eléctrica con incorporación de generación de energía a partir fuentes renovables.

**Palabras clave:** Modelación de Sistemas Energéticos; Vehicle to Grid; Cambio Climático; Tecnología Fotovoltaica.

## ABSTRACT

With the aim of making evidence-based decisions, this work presents tools aimed at evaluating the opportunities and threats facing the energy sector. Its main objective was to exhibit developments in prospective modeling in LEAP (Low Emissions Analysis Program) of the integration of electric vehicles (EVs) and distributed photovoltaic generation systems connected to the utility grid in regional energy systems such as that of the province of Mendoza in Argentina, through the proposition of scenarios as possible long-term trajectories and not as mere random predictions. The results indicate that there would be a significant change in the configuration of the provincial electricity matrix as a result of a high penetration of this type of distributed generation systems. On the other hand, it is evident that in a Vehicle to Grid (V2G) configuration, the electricity demand of electric vehicles will be greater than the amount of electricity they inject into the grid, which requires the evaluation of additional strategies that promote and regulate their use. In addition, it is found that the substitution of internal combustion vehicles with electric vehicles as a measure to reduce Greenhouse Gas emissions would be ineffective if done in isolation from a policy of transforming the electricity matrix with the incorporation of energy generation from renewable sources.

**Keywords:** Energy Systems Modeling; Vehicle to Grid; Climate Change; Photovoltaic Technology.

## RESUMO

A fim de tomar decisões baseadas em evidências, este documento apresenta ferramentas destinadas a avaliar as oportunidades e ameaças que o setor da energia enfrenta. O seu principal objetivo foi mostrar os desenvolvimentos na modelação prospectiva LEAP (Low Emissions Analysis Program) da integração de veículos eléctricos (VEs) e instalações fotovoltaicas de geração distribuída ligadas à rede em sistemas energéticos regionais como o da província de Mendoza, Argentina, através do exercício de propor cenários como possíveis trajetórias a longo prazo e não como meras previsões aleatórias. Os resultados indicam que haveria uma mudança significativa na configuração da matriz eléctrica provincial como consequência de uma elevada penetração deste tipo de instalações de geração distribuída. Por outro lado, é evidente que, numa configuração Vehicle to Grid (V2G), a procura de electricidade por parte dos veículos eléctricos será superior à quantidade de electricidade que injectam na rede, o que exige a avaliação de estratégias adicionais para incentivar e regular a sua utilização. Além disso, verifica-se que a substituição de veículos de combustão interna por veículos eléctricos como medida de redução de emissões de Gases de Efeito Estufa seria ineficaz atuando isoladamente de uma política de transformação da matriz eléctrica com a incorporação de geração de energia a partir de fontes renováveis.

**Palavras-chave:** Modelagem de Sistemas Energéticos; Vehicle to Grid; Mudanças Climáticas; Tecnologia Fotovoltaica.

## Introducción

En la actualidad, a nivel mundial, los combustibles fósiles dominan como fuentes de energía tanto para el sector del transporte como para el sector de generación de energía. A nivel nacional, Argentina no escapa a esta realidad, y tampoco la provincia de Mendoza, la que cuenta con 1.440 MW de potencia instalada y 4.852.403 MWh de energía eléctrica generada en 2018. De estos, el 63,90% correspondió a procesos que utilizan combustibles fósiles (7,31% por Turbinas a Gas, 4,91% por Turbinas a Vapor, 49,38% por Ciclo Combinado, 2,29% por Motores a Combustión Interna), el 36,09% a procesos hidráulicos (31,9% no renovables y 4,12% renovables) y un 0,012% a generación distribuida (GD) con tecnología fotovoltaica (FV). Es importante destacar que para dicha producción de electricidad se utilizaron 521.260 TeP de gas natural y 9.347.576 TeP de fuel oil (CAMMESA, 2018; EPRE, 2019).

## Aspectos relativos al Sector Transporte

En el contexto actual de degradación ambiental, donde se destaca la problemática del cambio climático y la disminución de las reservas convencionales de combustibles fósiles, se han realizado diversos esfuerzos para reducir el consumo de estos combustibles. En el sector del transporte, los vehículos eléctricos (EV, por su sigla en inglés Electric Vehicles) son una solución prometedora, con un ritmo de crecimiento notable en el mercado y con la potencialidad de reemplazar a los vehículos con motor de combustión interna (International Energy Agency - IEA, 2019).

En este sentido, la Dirección Nacional de Escenarios y Planeamiento Energético de la Nación ha publicado proyecciones de la penetración de los vehículos eléctricos a nivel nacional, bajo cuatro escenarios proyectados para el año 2030. Los dos primeros escenarios, denominados Tendencial y Eficiente, no incluyen una promoción activa de la electromovilidad y consideran un 12%

de ventas de autos livianos eléctricos, lo que representa una participación menor al 2,5% de EV en el total del parque automotor. Los otros dos escenarios, denominados Electrificación y Gasificación, se basan en una estrategia de promoción de la electromovilidad y consideran que el 30% y el 50% de las ventas de autos livianos y de buses de corta distancia, respectivamente, sean eléctricos. Esto equivale a una participación de la electromovilidad del 5,6% en el parque automotor nacional (Secretaría de Energía de la Nación, 2019).

## La integración entre sistemas de generación distribuida con tecnología fotovoltaica y los EV

Además de ser una de las estrategias para dar solución a desafíos como el cambio climático, los vehículos eléctricos (EV) pueden considerarse como una fuente de generación distribuida (GD) de energía eléctrica, ya que la mayoría de los vehículos particulares están estacionados casi el 95% del tiempo de uso (Bull y CEPAL, 2003). Por tanto, podrían permanecer conectados a la red eléctrica de distribución para volcar energía almacenada en sus baterías, bajo el concepto de "Vehicle to Grid" (V2G) (Guille y Gross, 2009), y/o ser un elemento almacenador distribuido de energía (Ehsani et al., 2012).

En la provincia de Mendoza, es notoria la creciente penetración de sistemas de generación distribuida, con una participación dominante de la tecnología solar fotovoltaica. Esta penetración ocasiona cierto estrés en la red eléctrica de distribución como consecuencia de una inyección impredecible e intermitente de energía, asociada a la disponibilidad variable del recurso. Sin embargo, la mayoría de los estudios concuerdan en que es viable la integración de los sistemas fotovoltaicos a las redes de energía eléctrica, y que una solución para equilibrar la generación e inyección de energía de estas fuentes es la adopción de sistemas estacionarios o dinámicos de almacenamiento

de energía eléctrica que pueden absorber o volcar energía a la red en casos de exceso o déficit de oferta, respectivamente. En este caso, los EV, operando bajo una configuración V2G (Richardson, 2013), funcionarían como un moderador de energía para regular la operación de la red y para ofrecer funcionalidades auxiliares (Shafie-Khah et al., 2016), que no se exploraron en este trabajo.

Sin embargo, se requiere de un exhaustivo análisis multidimensional para enfrentar el desafío que presenta la integración de un gran número de EV en una red de distribución de energía eléctrica (Bessa y Matos, 2012). La realización de estos análisis se posiciona como un punto innovador dentro del marco de los estudios prospectivos energéticos regionales, tomando como supuesto que la mayoría de las estaciones de carga de EV serán instaladas a nivel domiciliario (Shaaban et al., 2012), sin considerar, en esta instancia, aquellas que puedan tomar lugar en espacios públicos (Tulpule, et al., 2013).

Por lo tanto, el objetivo de este trabajo es presentar los avances en materia de prospectiva energética a través del modelo LEAP (Low Emissions Analysis Program) sobre la integración de vehículos eléctricos y sistemas fotovoltaicos de generación distribuida conectados a la red en sistemas energéticos regionales, particularmente en la provincia de Mendoza, en Argentina. Al mismo tiempo, se busca estudiar el efecto de la sustitución de vehículos nafteros por eléctricos en relación al impacto potencial sobre el cambio climático. La importancia de este análisis radica en explorar la forma en que se planifica y organiza la integración de una cantidad creciente de dichas tecnologías, de manera que ambas cumplan con los requerimientos de operación y estabilidad de la red eléctrica de distribución al trabajar de forma complementaria, y aseguren una disminución del impacto sobre el cambio climático.

## Materiales y métodos

La metodología utilizada en este estudio se enfoca en la elaboración del primer análisis prospectivo subnacional a largo plazo de los sectores de oferta y demanda de electricidad en la provincia de Mendoza, utilizando el modelo LEAP (Heaps, 2021). En particular, se consideró la interacción entre el almacenamiento distribuido de energía, a través de baterías alojadas en vehículos eléctricos, y la generación distribuida de energía eléctrica proporcionada por sistemas basados en tecnología fotovoltaica. Ambas alternativas como opciones de flexibilidad en los sistemas eléctricos subnacionales con una alta participación de fuentes variables de energía renovable.

### Sobre el modelo utilizado

El modelo LEAP es una de las herramientas de modelado más ampliamente utilizada para el análisis de políticas energéticas y la evaluación de la mitigación del cambio climático (McPherson y Karney, 2014). Su objetivo es plantear diferentes escenarios de prospectiva energética a diversas escalas geográficas. Cada uno de los sistemas energéticos de las regiones que se modelan en LEAP, cualquiera sea su escala, debe estructurarse en tres ramas principales: demanda, transformación y recursos. Las dos primeras requieren una carga intensiva de información sobre el sistema modelado, mientras que la tercera se desprende principalmente de los requerimientos energéticos simulados.

### El sistema energético de Mendoza considerado para este estudio

Para modelar el sistema energético de Mendoza, se consideró que la rama de la Demanda está compuesta por los sectores de Demanda de Electricidad (agregada para todo el sistema energético de Mendoza) y Transporte de Pasajeros; y la rama Transformación, por el sector de Transporte y Distribución de Energía Eléctrica, y por el sector de Generación de Energía Eléctrica.

Además, la operación del sistema energético de Mendoza requiere la especificación de detalles técnicos y temporales, definidos para un conjunto de particiones temporales (Time Slices) que permiten detallar cómo varían las demandas y la oferta de energía. Para este propósito, se eligió en LEAP un enfoque detallado en el que cada año se divide en un número determinado de particiones basadas en grupos mensuales y grupos para las 24 horas del día. Esto conduce a 288 particiones temporales, equivalentes a: i) una división estacional, que contiene un grupo para cada mes del año, es decir, doce grupos estacionales; y ii) una agrupación por horas, que contiene un grupo para cada hora del día, es decir, grupos de 24 horas.

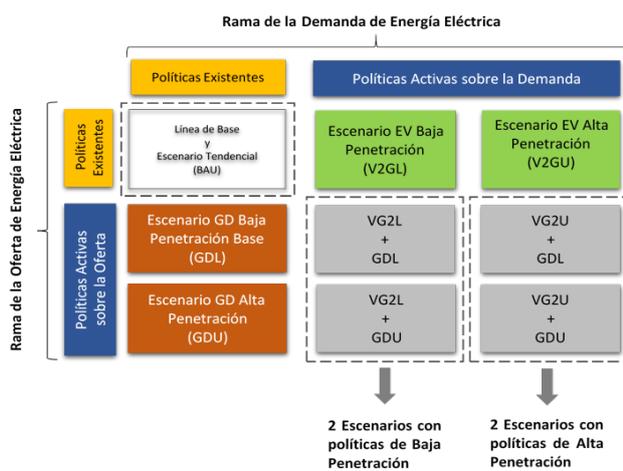
**Construcción de Escenarios**

Para llevar a cabo el análisis, se diseñaron una serie de escenarios que consideran proyecciones a largo plazo. Estos escenarios son explicaciones de cómo podría evolucionar el sistema energético de Mendoza bajo ciertos condicionamientos técnicos, socioeconómicos y políticos (Fig. 1). La línea de base o estado inicial común sobre la que se construyeron estos caminos energéticos corresponde a la situación energética de la provincia en 2018.

Para el sector de la Demanda de Electricidad, se consideró que la demanda bruta de electricidad fue de 5.927.452 MWh/año, de los cuales 1.075.627 MWh/año fueron importados mediante generación externa a la provincia, correspondiente al Mercado Eléctrico Mayorista (MEM) (CAMMESA, 2018). Además, la Curva de Carga correspondiente a este año, en forma de porcentaje de Carga Anual (% de Carga Anual) y para las particiones temporales mencionadas, presenta una carga pico de 0,47% de Carga Anual, equivalente a 565,939 MWh/Mes en enero.

Por otra parte, el sector de Transporte de Pasajeros se dividió en dos subsectores: Vehículos Privados (automóviles y livianos) y Autobuses Públicos. El primero de ellos está compuesto por las tecnologías: Nafta (con 429.190 vehículos y 284.341 TeP/Año de combustible consumido) y Diésel (con 241.419 vehículos y 145.283 TeP/Año de combustible consumido). El segundo subsector está compuesto por la tecnología Diésel (con 3.710 autobuses y 59.768 TeP/Año) (ADEFA, 2018).

En cuanto al subsector de Transformación, el subsector de Transporte y Distribución de Energía Eléctrica se definió para el año base con un valor medio de pérdidas, desde el año 2003 al 2017, de 9,8% (equivalente a 529.092 MWh) (EPRE, 2019). Por su parte, la caracterización del subsector Generación de Energía Eléctrica para el año 2018 se presenta en el apartado introductorio (sección 1) según la información reportada por CAMMESA (2018).



**Figura 1.** Configuración de escenarios propuestos para nuestro modelo. Elaboración propia

**Escenario Tendencial (BAU)**

En el escenario Tendencial o BAU (por sus siglas en inglés, Business As Usual) se asume que no habrá cambios significativos en la tecnología, economía o política en materia energética.

En la rama de la Demanda, se consideró que el sector Demanda de Electricidad evoluciona con una tasa de crecimiento lineal de acuerdo con la Tasa de Crecimiento del



Producto Bruto Geográfico Promedio (GGP) de Mendoza de los últimos quince años (2004-2018), medida en pesos argentinos constantes del año 1993, lo que representa un valor del 1,51% (DEIE, 2018).

Luego, en el sector Transporte de Pasajeros, y en particular en el subsector Vehículos Particulares, la proyección de la flota de autos y vehículos livianos (Automóviles Particulares en su conjunto) al 2050 se estimó a partir de la tasa de motorización (Jimmy Ferrer Carbonell y CEPAL, 2018) esperada para la flota de Vehículos Particulares de Mendoza, que es función de la tasa de crecimiento promedio del producto interno bruto per cápita (PIB per cápita) del año 1990 al 2018 de Argentina (CEPAL, 2018) y de la proyección poblacional de Mendoza (DEIE, 2018).

En cuanto a los vehículos pesados (camiones, buses de media y larga distancia y buses públicos), la evolución de la flota se estimó en función de la tasa de crecimiento del PIB promedio de Argentina (CEPAL, 2018). De allí, se asumió que el subsector de Autobuses Públicos mantendrá una participación constante del 11% del total de la flota de vehículos pesados, demostrando el valor de los 3.710 Vehículos antes mencionados para el año 2018. La demanda anual de combustibles del sector Transporte de Pasajeros se calculó con información de AFAC (2018), ajustada por la distribución de la flota de vehículos presentada por ADEFA (2018) y proyectada por la evolución de las ventas de vehículos según ACARA (2020) y DNRPA (2018).

Por su parte, la oferta tendencial de energía eléctrica del parque de generación actual se supuso sin cambios en la potencia instalada y en la energía generada. Sin embargo, en cuanto a la energía generada por instalaciones de generación distribuida, este escenario incorpora los resultados de la aplicación de la Resolución de Generación Distribuida de Electricidad de Mendoza, promulgada en 2015 por el Ente Provincial Regulador Eléctrico (EPRE) y su evolución

hasta el 2019 (Benito y Arena, 2019). Los valores de energía generada por los sistemas fotovoltaicos instalados para cada uno de los años del intervalo mencionado, se simuló mediante la herramienta System Advisor Model (SAM), Versión 2020.11.29 (SAM 2020.11.29), contemplando los equipos instalados con mayor frecuencia de todas las instalaciones operativas en Mendoza, utilizando la base de datos meteorológicos Meteororm, Version 7 (Remund et al., 2015). Para los años subsiguientes, se propuso una curva de penetración de instalaciones de generación distribuida con tecnología FV que persigue una función logística, la cual es una función exponencial de crecimiento limitado o amortiguado (Ecuación 1). Los valores que toman las variables y parámetros para la oferta por generación distribuida en este escenario se resumen en la Tabla 1.

$$N_{GD}(t) = \frac{M_{GD(t=2050)}}{\left(\frac{M_{GD(t=2050)} - N_{GD(t=0)}}{N_{GD(t=0)}}\right) \cdot e^{-ct} + 1} \quad (1)$$

Donde:

$N_{GD}$ : Energía generada por sistemas de generación distribuida

$M_{GD}$ : Cantidad máxima de energía generada por sistemas de generación distribuida incorporable al sistema energético de Mendoza en el año 2050

$c$ : Constante de crecimiento de la función logística

$t$ : periodo de tiempo considerado en años

### Escenarios de Generación Distribuida. Baja Penetración (GDL) y Alta Penetración (GDU)

En estos escenarios se consideraron cambios únicamente en la rama de la oferta de energía eléctrica, mientras que la caracterización de la demanda se hereda del escenario BAU. Así, en el escenario de baja penetración (GDL) se considera la propuesta de la Secretaría de Energía de la Nación

(2019), donde se espera que, para el año 2030 y en adelante, la generación distribuida de fuentes renovables tenga una tasa de penetración baja, equivalente al 10% de la

demanda de energía eléctrica en 2050. La forma de crecimiento limitado está dada por la función logística (Ecuación 1), que toma los valores consignados en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Valores de las variables y parámetros de la función logística para los escenarios con oferta de energía eléctrica por Generación Distribuida con tecnología Fotovoltaica.

Elaboración propia.

Variables y Parámetros	Nomenclatura	Unidades	Escenarios con Penetración de Generación Distribuida Fotovoltaica		
			BAU <sup>1</sup>	GDL <sup>2</sup>	GDU <sup>3</sup>
Energía Generada Total - Parque Generación - MZA 2018	$E_{GenTot\_2018}$	[MWh]		4.851.824	
Demanda de Energía Eléctrica - MZA 2018	$DEE\_2018$	[MWh]		5.927.452	
Energía Generada por Generación Distribuida (GD) - MZA 2018	$E_{GDFV\_2018}$	[MWh]		578,52	
Potencia Instalada en Corriente Continua Instalada en Generación Distribuida (GD) - MZA 2018	$P_{DC\_GDFV\_2018}$	[kWp] [MWp]		438,06 0,438	
Relación CC/CA Promedio Instalaciones en Operación	$R_{DC/AC}$	[adim]		1,2	
Potencia Instalada en Corriente Alterna Instalada en Generación Distribuida - MZA 2018	$P_{AC\_GDFV\_2018}$	[kW] [MW]		365,05 0,365	
Tasa de Participación de la GD a la Energía Generada Total - MZA 2018	$i_{GD\_E\_GEN\_2018}$	[%]		0,012%	
Tasa de Participación de la GD a la Demanda de Energía Eléctrica - MZA 2018	$i_{GD\_D\_EE\_2018}$	[%]		0,010%	
Tasa de Participación de la GD a la Demanda de Energía Eléctrica - MZA 2050 (límite de crecimiento)	$i_{GD\_D\_EE\_2050}$	[%]	0,010%	10,0%	30,0%
Cantidad Máxima de Energía por GD incorporable al Sistema - MZA 2050	$M_{GD\_2050}$	[MWh]	933,43	956.388,78	2.869.166,35
Periodo Inicial Considerado (t=0 ==> Año 2018)	t=0	[Años]	0	0	0
Periodo Incremental Considerado (t=1 ==> Año 2019)	t=1	[Años]	1	1	1
Energía Generada GD Total MZA para (t=0) ==> Año=2018	$N_{GD\_t(=0)}$	[MWh]	578,52	578,52	578,52
Energía Generada GD Total MZA para (t=1) ==> Año=2019	$N_{GD\_t(=1)}$	[MWh]	654,76	1.272,74	1.316,13
Constante c Función Logística	c	[adim]	0,20	0,50	0,60

<sup>1</sup>BAU: Escenario Tendencial (Business As Usual)

<sup>2</sup>GDL: Escenario Generación Distribuida de Baja Penetración

<sup>3</sup>GDU: Escenario Generación Distribuida de Alta Penetración

Por su parte, el escenario de alta penetración (GDU) se diseñó para contemplar una tasa mayor de penetración de generación distribuida fotovoltaica, alcanzando un 30% de la demanda de energía eléctrica en 2050. Se consideró la forma de penetración mencionada para el escenario GDL y los valores se pueden ver en la Tabla 1.

### Escenarios referidos a Vehículos Eléctricos conectados a Red (V2G). Consideraciones Generales

Se diseñaron dos escenarios referidos a EV conectados a la red (V2G): V2GL (Baja Tasa de Penetración) y V2GU (Alta Tasa de Penetración), que comparten algunas precisiones. En un primer lugar, los dos escenarios actúan sobre el subsector Vehículos

Privados, considerando una sustitución de los vehículos de combustión interna con tecnología a nafta por EV con tecnología de baterías Li-ion (iones de litio) (BEV, del inglés Battery Electric Vehicle) (Sanguesa et al., 2021). La función de sustitución para todos los escenarios plantea que la cantidad final de autos a nafta para un año en particular está dada por la diferencia entre la cantidad de vehículos a nafta del escenario BAU (ADEFA, 2018; DNRPA, 2020) y la cantidad de EV penetrados para el mismo año bajo análisis.

En cuanto a la cantidad de EV penetrados cada año, se consideró la función logística dada por la Ecuación 1, pero donde las variables y los parámetros toman las siguientes



tes acepciones: NEV: Cantidad de Vehículos Eléctricos ingresados al Sistema Energético de Mendoza; MEV: Cantidad Máxima de Vehículos Eléctricos incorporables al parque automotor de Mendoza en el año 2050; c: Constante de crecimiento de la función logística; t: periodo de tiempo considerado en años. Se consideró que el primer año que ingresarán vehículos eléctricos en el sistema energético de Mendoza, en una arquitectura V2G, será en el año 2022. Luego, la cantidad máxima de vehículos al año 2050 para cada escenario de baja y alta penetración se estimó a partir de las proyecciones de la Secretaría de Energía de la Nación (2019). Estas consideran que, para la situación de baja penetración, los EV tomarán el 0,5% de participación de ventas anuales (patentamientos) de vehículos (automóviles y livianos) del parque automotor y, para la situación de alta penetración, los EV tendrán el 30% de participación (Tabla 2).

El modelo LEAP de Mendoza utiliza un vehículo eléctrico típico obtenido de la base de datos Electric Vehicle Database (2020). Las características del vehículo se han obtenido considerando los segmentos de clasificación de los vehículos eléctricos del mercado europeo y estadounidense, y teniendo en cuenta la capacidad de compra de Mendoza (Gudiño et al., 2013). Estas características son las siguientes: Velocidad Máxima: 152,38 km/h; Rango Eléctrico: 274,2 km; Potencia Total: 119,16 kW; Capacidad de la Batería: 51,242 kWh; Capacidad Utilizable de la Batería: 47,53 kWh; Potencia de Carga: 9,52 kWac; Tiempo de Carga: 6,96 h; Energía Consumida en la Carga: 59,48 kWac-h; Velocidad de Carga: 47,18 km/h; Consumo Ciudad - Clima Templado: 116,02 Wh/km; Consumo Autopista - Clima Frío: 243 Wh/km; Promedio Consumo Real: 179,51 Wh/km.

**Tabla 2.** Valores de las variables y parámetros que toma la función logística para los escenarios con participación de oferta de energía por Vehículos Eléctricos conectados a la Red (arquitectura V2G). Elaboración propia.

Variables y Parámetros	Nomenclatura	Unidades	Escenarios con Penetración de Vehículos Eléctricos Conectados a Red	
			V2GL <sup>1</sup>	V2GU <sup>2</sup>
Tasa de Motorización - MZA 2018	$t_{MOT\_2018}$	[Vehiculos/1.000 hab.]		345
Tasa de Motorización - MZA 2050	$t_{MOT\_2050}$	[Vehiculos/1.000 hab.]		595
Cantidad Automóviles + Livianos Total - MZA 2018	$Q_{Autos\_Total}$	[Vehiculos]		670.609
Cantidad Automóviles + Livianos a Nafta - MZA 2018	$Q_{Autos\_Nafta}$	[Vehiculos]		429.190
Cantidad Automóviles + Livianos a Diésel - MZA 2018	$Q_{Autos\_Diésel}$	[Vehiculos]		241.419
Tasa de Participación en las Ventas de EV - MZA 2050	$i_{EV\_2050}$	[%]	0,50%	30,00%
Patentamientos Anuales - MZA 2050	$Q_{Pat\_EV}$	[Vehiculos]		19.161
Cantidad Máxima de EV <sup>3</sup> incorporables al parque automotor - MZA 2050	$M_{EV\_2050}$	[Vehiculos]	95	5.748
Periodo Inicial Considerado ( $t=0 \Rightarrow$ Año 2022)	$t=0$	[Años]		0
Periodo Incremental Considerado ( $t=1 \Rightarrow$ Año 2023)	$t=1$	[Años]		1
Cantidad de EV para ( $t=0 \Rightarrow$ Año=2022)	$NGD_{(t=0)}$	[Vehiculos]		59
Cantidad de EV para ( $t=1 \Rightarrow$ Año=2023)	$NGD_{(t=1)}$	[Vehiculos]	63	89
Constante c Función Logística	c	[adim]	0,17	0,42

<sup>1</sup> V2GL: Escenario Vehículos Eléctricos conectados a Red de Baja Penetración

<sup>2</sup> V2GU: Escenario Vehículos Eléctricos conectados a Red de Alta Penetración

<sup>3</sup> EV: Vehículo Eléctrico (Electric Vehicle)

## Análisis de impactos potenciales sobre el cambio climático

Para estudiar el efecto de la sustitución de vehículos a nafta por EV, se cuantificaron las emisiones de gases de efecto invernadero

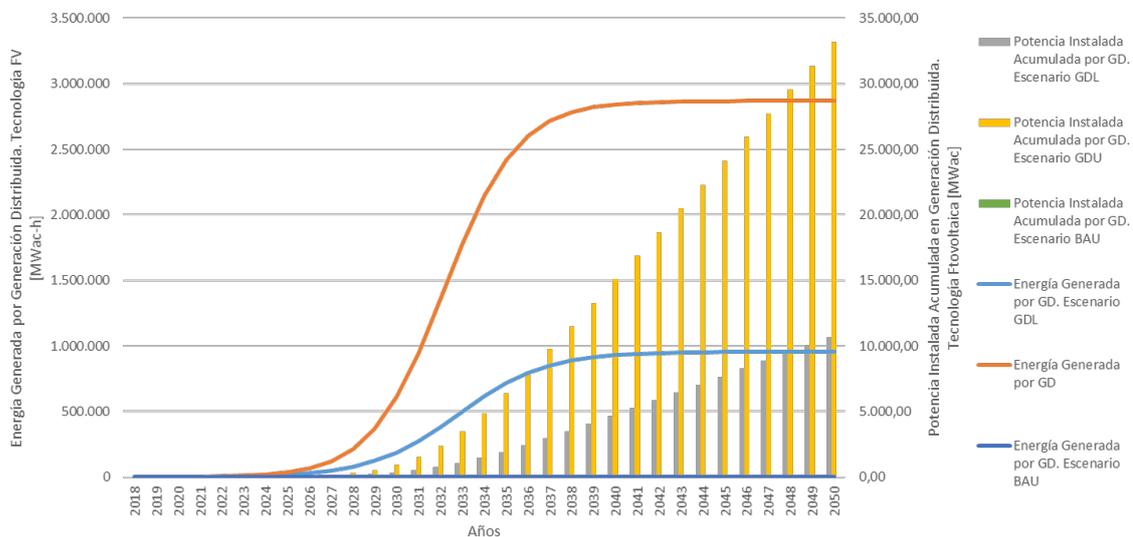
(GEI) provenientes de la combustión de nafta y de la generación de energía eléctrica necesaria para abastecer la demanda anual de energía de cada tipo de vehículo. Estos datos se obtuvieron del Inventario de Gases

de Efecto Invernadero de la República Argentina, Años 2010 y 2012 (Moreira, 2019). Luego, se calculó el impacto potencial sobre el cambio climático originado por estas emisiones, considerando los factores de caracterización (Potencial de Calentamiento Global a 100 años) publicados por el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Myhre et al., 2013). Los resultados se expresan en kg de CO<sub>2</sub> eq. Además, se tuvo en cuenta la diferencia de impacto entre la sustitución de un vehículo a nafta por un EV y la incidencia de la introducción de EV sobre el parque automotor total, según cada escenario de penetración.

## Resultados y discusión

### Resultados del modelado de la oferta de energía eléctrica en Mendoza

En la Fig. 2 se muestra la proyección de la oferta de energía eléctrica proveniente de instalaciones fotovoltaicas en generación distribuida con conexión a la red en la provincia de Mendoza. En el escenario tendencial (BAU), la energía aportada por GD es insignificante. Sin embargo, los escenarios GDL y GDU presentan un incremento relativo del 200,05% entre sí, con una potencia instalada acumulada de 10,67 GW y 33,16 GW respectivamente, al 2050.



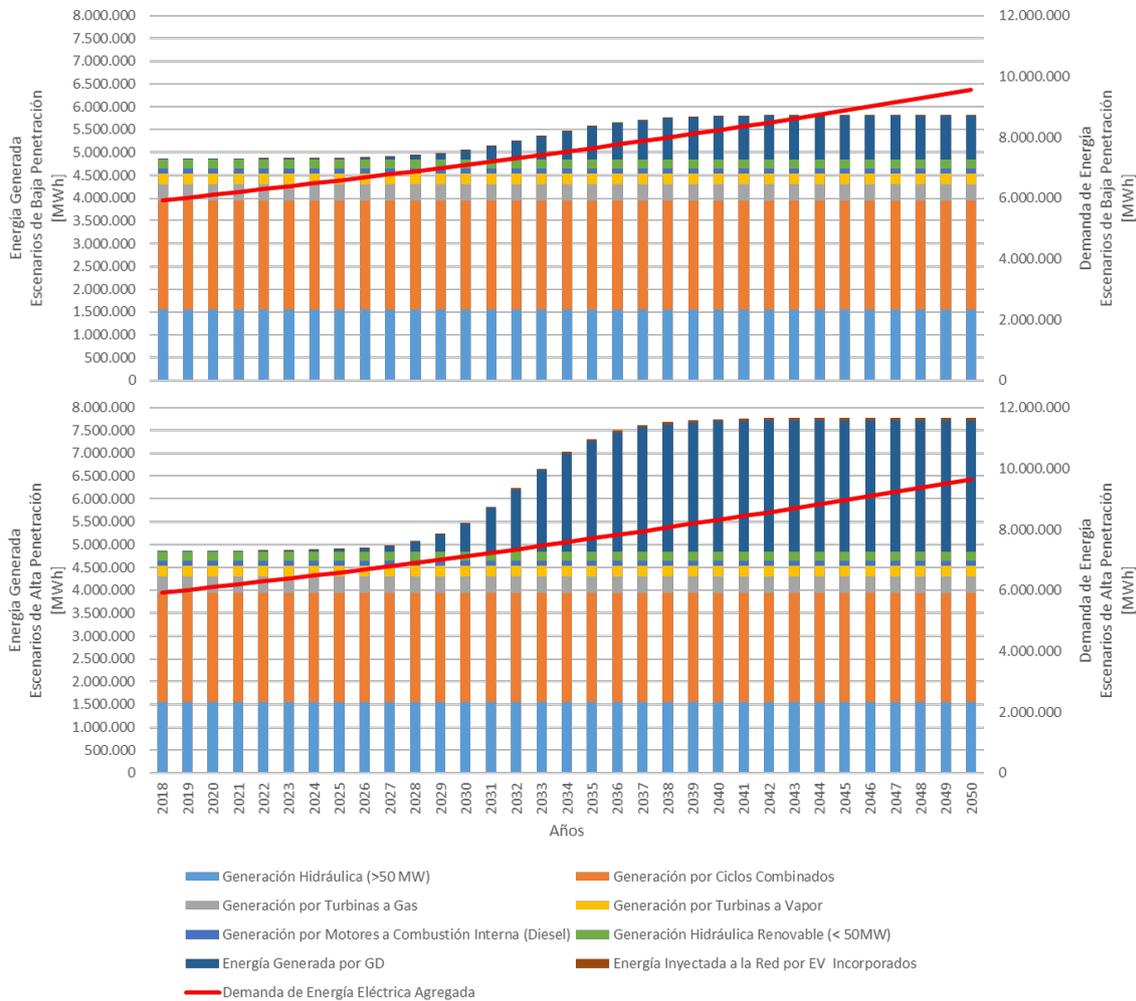
**Figura 2.** Oferta de energía eléctrica por penetración de instalaciones de generación distribuida con tecnología fotovoltaica con conexión a la red, escenarios GDL y GDU (gráfico de líneas, eje izquierdo) y su potencia instalada acumulada (gráficos de barras, eje derecho). Elaboración propia.

Por otro lado, la Fig. 3 detalla la contribución por tecnología a la generación de electricidad, contemplando la inyección de energía por generación distribuida (con tecnología fotovoltaica) y a partir de los EV incorporados al sistema en una arquitectura V2G, para los escenarios de baja y alta penetración. En ambos escenarios se observa que la generación hidráulica no renovable (centrales mayores a 50 MW) y la generación térmica (en particular por ciclos combina-

dos) son de gran relevancia para el sistema mendocino. No obstante, en el escenario de alta penetración de GD y V2G (sección inferior de la Fig. 3) se puede apreciar que el vuelco de energía a la red proveniente de instalaciones FV distribuidas tiene la misma magnitud que la energía generada por los ciclos combinados (manteniéndose estos en situación BAU). Por el contrario, se puede ver que la contribución de la energía volcada a la red desde los EV (sin contem-

plar distintas alternativas posibles de carga y descarga diaria de los EVs) no cobra significancia en ninguno de los escenarios, en relación a las otras tecnologías y a la de-

manda de energía eléctrica agregada de la provincia, contemplando la demanda que conllevará la carga propia de las baterías de los EV.



**Figura 3.** Contribución por tecnología a la generación de energía eléctrica de la matriz de Mendoza (eje izquierdo) y demanda de energía eléctrica agregada (eje derecho). Escenarios de baja penetración (sección superior) y escenarios de alta penetración (sección inferior). Elaboración propia.

### Resultados del modelado de la demanda de energía eléctrica en Mendoza

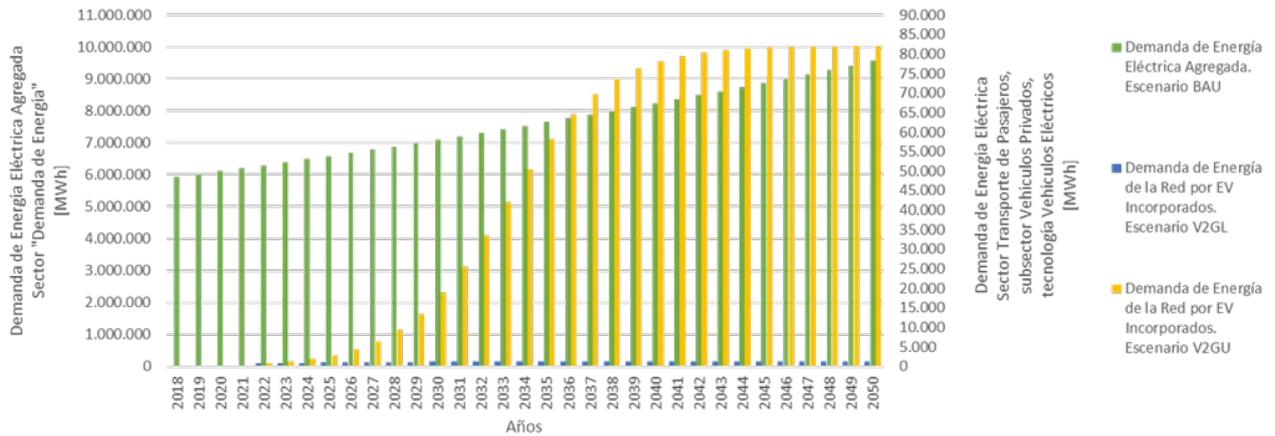
Al observar la Fig. 4, se evidencia que la demanda de electricidad acumulada desde el 2022 al 2050, proveniente de los vehículos eléctricos incorporados, representaría el 0,37% de la demanda agregada de electricidad en el 2050 para el escenario de V2GL, y el 13,12% para el escenario V2GU. Se debe aclarar que la demanda agregada de

electricidad para los escenarios GDL, GDU, V2GL, V2GU y sus combinaciones toma los valores proyectados para el escenario BAU.

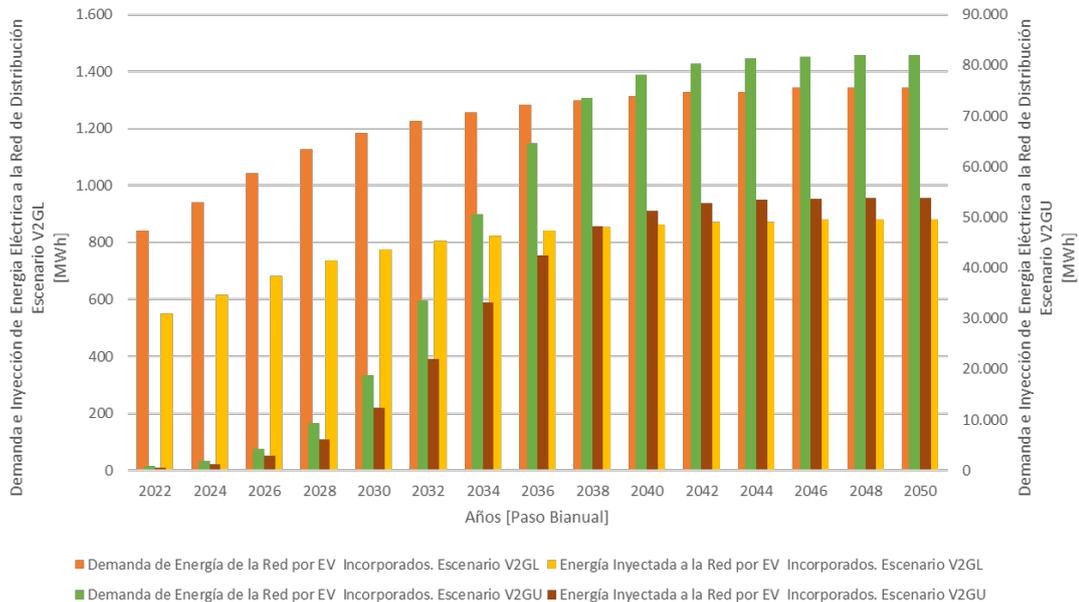
En cuanto a la oferta y demanda de energía eléctrica prospectada para el sistema energético de Mendoza a partir de los vehículos eléctricos incorporados, la Fig. 5 muestra que la demanda de electricidad, para ambas tasas de penetración, será mayor que la electricidad inyectada a la red por estos.

Este resultado enfatiza la necesidad de fomentar y valorar monetariamente el uso de los vehículos eléctricos, utilizando sus características auxiliares como un elemento

distribuido de almacenamiento de energía, para ayudar a la operación y seguridad de la red eléctrica de distribución a la que se conectan para su carga y descarga.



**Figura 4.** Demanda de energía eléctrica agregada (eje izquierdo) y demanda de energía eléctrica por penetración de vehículos eléctricos (escenarios V2GL y V2GU) (eje derecho). Elaboración propia.



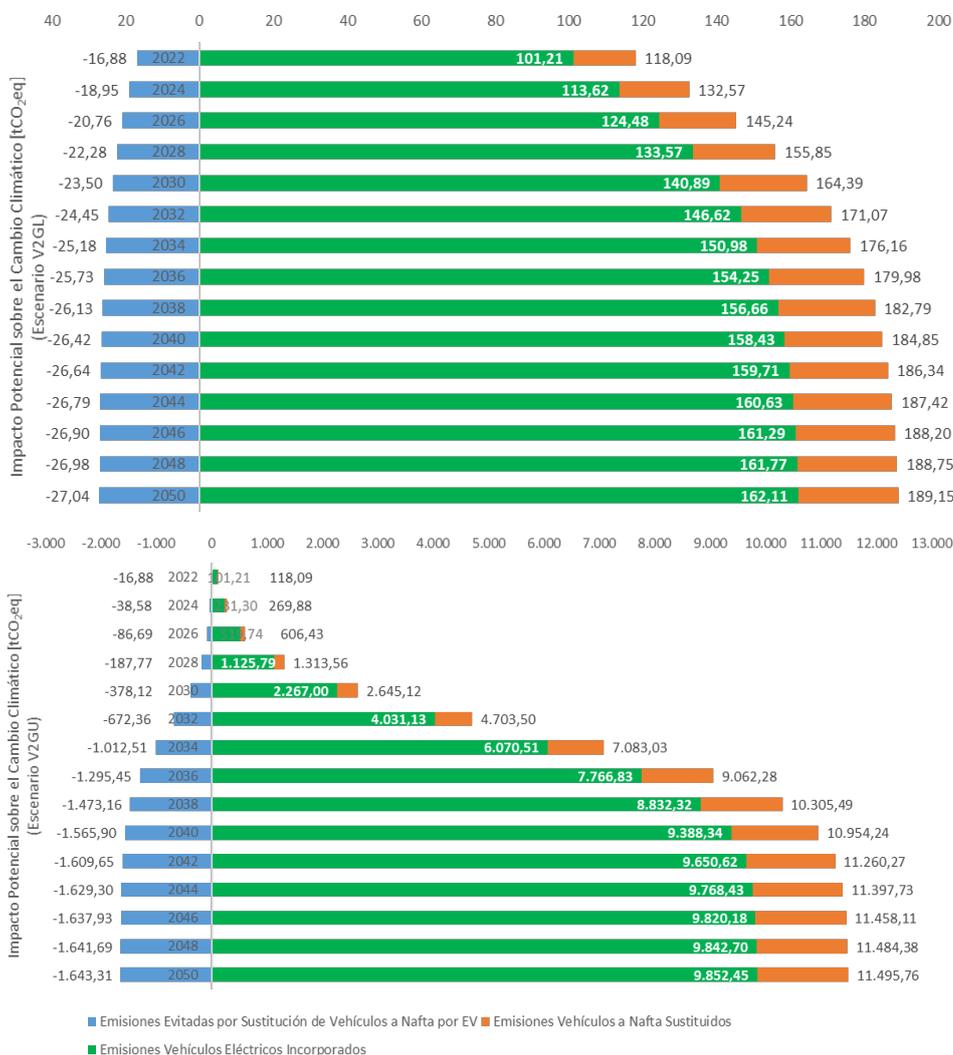
**Figura 5.** Demanda e Inyección de energía eléctrica a la red de distribución por los vehículos eléctricos incorporados al sistema energético de Mendoza. Escenario de baja penetración (V2GL) (eje izquierdo), escenario de alta penetración (V2GU) (eje derecho). Elaboración propia.

### Resultados del impacto potencial sobre el cambio climático

Finalmente, se analizó el potencial impacto en el cambio climático asociado a las emisiones de GEI en los escenarios V2GL y V2GU (Fig. 6). Al considerar la sustitución de vehículos de combustión interna por vehículos eléctricos (EV), se logra una reducción de emisiones de GEI que se traduce en un impacto evitado de aproximadamente el 14% por cada vehículo reemplazado en ambos escenarios. Sin embargo, esta dis-

minución del impacto es baja debido a la alta proporción de fuentes de energía fósil en la matriz eléctrica utilizada para cargar las baterías de los EV.

Además, al analizar la importancia de esta reducción del impacto en el parque automotor total, se observa que, para el escenario de baja penetración, la disminución representa un valor mediano del 0,081% para el período analizado (2018 a 2050), mientras que, para el escenario de alta penetración, este valor asciende a 4,28%.



**Figura 6.** Impacto potencial sobre el cambio climático asociado las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) de vehículos a nafta, vehículos eléctricos y emisiones evitadas por sustitución de vehículos nafteros por eléctricos. Escenario de baja penetración (sección superior) y escenario de alta penetración (sección inferior). Paso bianual. Elaboración propia.

## Conclusión

Los resultados presentados en este trabajo brindan información sobre la influencia de la introducción de vehículos eléctricos y sistemas fotovoltaicos de generación distribuida en el sistema energético de Mendoza. La consideración de varios escenarios permite obtener proyecciones que contemplan diferentes tendencias de evolución y demuestran la utilidad del análisis desarrollado para la toma de decisiones y la implementación de políticas. En este sentido, cualquier estrategia que se aplique conlleva decisiones técnicas y económicas en los sistemas de distribución de media y baja tensión cuyos efectos deben ser estudiados para incorporar soluciones a largo plazo que permitan la continua integración de generación distribuida basada en fuentes renovables de energía.

Se evidencia que la incorporación de sistemas fotovoltaicos de generación distribuida con baja penetración no supondría un cambio notorio en la configuración de la matriz de generación eléctrica provincial. No obstante, al considerar alta penetración de esta tecnología, el aporte de energía a la red se equipararía al generado por los ciclos combinados. Por su parte, la adición de energía a la red desde los vehículos eléctricos (EV) no sería significativa en ninguno de los escenarios analizados. Además, la incorporación de EV impulsaría la necesidad de tomar medidas en los sectores de mayor consumo para satisfacer la demanda de energía eléctrica para la carga de los EV.

Para asegurar el aumento sostenido del uso de estas tecnologías, es importante expandir las soluciones aplicables a las condiciones de operatividad y seguridad energética de las redes eléctricas de distribución. En este punto, se destaca la incorporación de tecnologías inteligentes que permitan la reducción de los posibles impactos técnicos de una gran penetración de instalaciones de generación distribuida y de vehículos eléctricos en arquitectura V2G, de manera de ampliar el límite técnico de penetración

máxima mediante técnicas como el control de demanda, el control de factor de potencia en inversores, entre otros.

En relación con la sustitución de vehículos de combustión interna por vehículos eléctricos como una medida tendiente a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), se constata que la aplicación efectiva de medidas de mitigación requiere una transformación de la matriz eléctrica, con la incorporación de energía de fuentes renovables, en lugar de promover disposiciones puramente cuantitativas, como podría ser una tasa de penetración de EV más agresiva.

Finalmente, se subrayan aspectos que no han sido presentados en este trabajo y que dan lugar a futuras investigaciones. En primer lugar, se reconoce la importancia de incluir otros parámetros que podrían influir en los resultados del modelo, entre los que se destacan: i) los patrones de manejo de los usuarios; ii) la difusión del mercado de EV a nivel nacional y provincial (impulsado o postergado); iii) los modos de carga y descarga (inyección) de energía eléctrica hacia y desde los EV; iv) el dimensionamiento de la capacidad de las baterías en relación con los patrones y preferencias de manejo de los usuarios particulares de EV; y v) la voluntad de los usuarios particulares de participar activamente en esquemas de vuelco de energía a la red desde sus vehículos (V2G).

Asimismo, es preciso realizar un análisis comparativo sobre la viabilidad de la funcionalidad V2G al considerar de forma individual cada vehículo o la conjunción de toda la población de estos como una única fuente distribuida de almacenamiento de energía. Este aspecto es de importancia, puesto que, en la modalidad individual, podría limitarse la aplicabilidad del V2G dada la baja capacidad de almacenamiento y la dispersión espacial que puede presentar cada vehículo, mientras que, en la modalidad grupal, podrían agruparse distintas cantidades

de vehículos eléctricos en función del esquema y objetivo de control que requiera la red para su propia regulación y estabilidad.

Finalmente, es necesario desarrollar estrategias que incentiven a los propietarios de EV a participar en un sistema V2G, considerando una compensación por la degradación de las baterías, ya que, al implementar una arquitectura de carga inteligente que contemple el V2G, es esperable que aumente la tasa de degradación de las baterías debido a la mayor frecuencia de los ciclos de carga-descarga.

## Bibliografía

- Asociación de Concesionarios de Automotores de la República Argentina – ACARA. (2020). Reporte mensual de patentamientos. Autos. Julio 2020. Sistema de Información Online del Mercado Automotor (SIOMAA).
- Asociación de Fabricantes de Automotores (ADEFSA). (2018). Reporte Anual 2018. Parque Automotor de la República Argentina.
- Asociación de Fábricas Argentinas de Componentes - AFAC. (2019). Flota Vehicular Circulante en Argentina.
- Benito, A. y Arena, P. (2019). Generación y almacenamiento distribuidos de energía eléctrica como herramientas de flexibilidad para el sistema energético de la provincia de Mendoza: análisis basado en el modelo LEAP. XLII Reunión de Trabajo de la Asociación Argentina de Energías Renovables y Medio Ambiente Vol. 7, pp. 05.71-05.82.
- Bessa, R. J., & Matos, M. A. (2012). Economic and technical management of an aggregation agent for electric vehicles: a literature survey. *European transactions on electrical power*, 22(3), 334-350.
- Boletines Estadísticos. Estadística Anual de Inscripciones Iniciales Nacionales e Importadas por Provincia. Dirección Nacional de Registro del Automotor y Créditos Prendarios (DNRPA).
- Bull, A., & CEPAL, N. (2003). Congestión de tránsito: el problema y cómo enfrentarlo. CEPAL.
- Comisión Económica para América Latina y el Caribe - CEPAL. (2018). Cuentas nacionales anuales en dólares. Tasa de crecimiento del producto interno bruto (PIB) total anual por habitante a precios constantes. Bases de Datos y Publicaciones Estadísticas: CEPALSTAT.
- Compañía Administradora del Mercado Mayorista Eléctrico S.A. (CAMMESA). (2018). Datos Síntesis Mensuales, BASE\_INFORME\_MENSUAL\_2018-12.
- Dirección de Estadísticas e Investigaciones Económicas (DEIE), Ministerio de Economía, Infraestructura y Energía, Gobierno de Mendoza. (2018). Mendoza en Datos, Datos Económicos: i) Producto Bruto Geográfico. Mendoza. Años 2004-2017; ii) Población estimada al 1° de julio de cada año calendario por sexo (ambos sexos), según departamento. Mendoza. Años 2010-2025.
- Dirección Nacional de Escenarios y Planeamiento Energético de la Subsecretaría de Planeamiento Energético, perteneciente a la Secretaría de Energía de la Nación. (2019). Escenarios Energéticos 2030. Documento de Síntesis.
- Ehsani, M., Falahi, M., & Lotfifard, S. (2012). Vehicle to grid services: Potential and applications. *Energies*, 5(10), 4076-4090.
- Electric Vehicle Database. (2020). Dirección URL: <<https://ev-database.org/>> [consulta: 7 de agosto de 2021].
- Ente Provincial Regulador Eléctrico de Mendoza (EPRE). (2019).
- Gudiño, M., Ghilardi, M. y Dalla Torre, J. (2013). "MENDOZA. Mapa social mediante puntaje z y análisis multivariado". En Buzai, G., Mapas Sociales Urbanos. II Edición. Buenos Aires: Editorial Lugar. ISBN 950-892-157-9.
- Guille, C., & Gross, G. (2009). A conceptual framework for the vehicle-to-grid (V2G) implementation. *Energy policy*, 37(11), 4379-4390.
- Heaps, C.G. (2021). LEAP: The Low Emissions Analysis Platform. [Software version: 2020.1.40] Stockholm Environment Institute. Somerville, MA, USA. <https://leap.sei.org>
- International Energy Agency - IEA. (2019). Global EV Outlook 2019. Scaling-up the transition to electric mobility.
- Jimmy Ferrer Carbonell y División de Desarrollo Sostenible y Asentamientos Humanos, CEPAL. (2018). Movilidad Urbana, Cambio Climático y Salud en América Latina y El Caribe, II Conferencia de las Ciudades Hacia Una Movilidad Segura, Asequible y Sostenible en ALC.
- McPherson, M., & Karney, B. (2014). Long-term scenario alternatives and their implications: LEAP model application of Panama's electricity sector. *Energy Policy*, 68, 146-157.

- Moreira, M. M., Gaioli, F., Galbusera, S. (2019). Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero: Argentina-2019. 1ra Ed. Ciudad Autónoma de Buenos Aires: Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación.
- Myhre, G., D. Shindell, F.-M. Bréon, W. Collins, J. Fuglestedt, J. Huang, D. Koch, J.-F. Lamarque, D. Lee, B. Mendoza, T. Nakajima, A. Robock, G. Stephens, T. Takemura and H. Zhang, 2013: Anthropogenic and Natural Radiative Forcing. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- Remund, J., Müller, S., & Kunz, S. (2015). Meteorolnorm. Global meteorological database. Version 7.
- Richardson, D. B. (2013). Electric vehicles and the electric grid: A review of modeling approaches, Impacts, and renewable energy integration. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 19, 247-254.
- Sanguesa, J. A., Torres-Sanz, V., Garrido, P., Martínez, F. J., & Marquez-Barja, J. M. (2021). A Review on Electric Vehicles: Technologies and Challenges. *Smart Cities*, 4(1), 372-404.
- Shaaban, M. F., Atwa, Y. M., & El-Saadany, E. F. (2012). PEVs modeling and impacts mitigation in distribution networks. *IEEE Transactions on Power Systems*, 28(2), 1122-1131.
- Shafie-Khah, M., Neyestani, N., Damavandi, M. Y., Gil, F. A. S., & Catalão, J. P. S. (2016). Economic and technical aspects of plug-in electric vehicles in electricity markets. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 53, 1168-1177.
- Tulpule, P. J., Marano, V., Yurkovich, S., & Rizzoni, G. (2013). Economic and environmental impacts of a PV powered workplace parking garage charging station. *Applied Energy*, 108, 323-332.

**CITAR ESTE ARTICULO:**

Oswaldo Benito, A., Castro Verdezoto, P. L., & Rodríguez, P. D. (2023). Prospectiva sobre la integración energética de sistemas de generación distribuida y vehículos eléctricos en Mendoza, Argentina. *RECIAMUC*, 7(2), 375-389. [https://doi.org/10.26820/reciamuc/7.\(2\).abril.2023.375-389](https://doi.org/10.26820/reciamuc/7.(2).abril.2023.375-389)



CREATIVE COMMONS RECONOCIMIENTO-NOCOMERCIAL-COMPARTIRIGUAL 4.0.