

# Análisis de los métodos implementados para el control de la gestión energética en vehículos eléctricos

## Analysis of the methods implemented to control energy management in electric vehicles

María Serrano-Márquez<sup>1</sup>, Edwin Collado<sup>1,2</sup>, Yessica Sáez<sup>1,2,\*</sup>

Universidad Tecnológica de Panamá, Centro Regional de Azuero, Facultad de Ingeniería Eléctrica, Panamá  
Centro de Estudios Multidisciplinarios de Ciencia, Ingeniería y Tecnología-AIP (CEMCIT-AIP), Panamá

**Fecha de recepción:** 9 de junio de 2022. **Fecha de aceptación:** 1 de marzo de 2023.

\***Autor de correspondencia:** [yessica.saez@utp.ac.pa](mailto:yessica.saez@utp.ac.pa)

**Resumen.** Las consecuencias de la contaminación ambiental causada por los gases de efecto invernadero son cada vez más notables a nivel mundial, las cuales son provocadas en gran medida por los vehículos de combustión interna. Esto ha llevado a que con el pasar de los años se desarrollen estrategias a fin de minimizar estos problemas, siendo una de las más prometedoras la implementación de vehículos eléctricos (VEs). Panamá cuenta actualmente con un plan de movilidad estratégica cuyo año meta es el 2030. Este plan tiene como objetivo que un porcentaje de vehículos eléctricos distribuidos en el sector público, privado y gubernamental entren en circulación, no obstante, para lograr esto el país debe estar preparado para afrontar las nuevas cargas que representan los vehículos eléctricos. En esta investigación se estudiaron técnicas de gestión energética de vehículos eléctricos como lo es el hosting capacity, en donde se concluyó que con la implementación de modelos matemáticos y softwares como OpenDSS es posible conocer el punto crítico de penetración que soporta el sistema eléctrico, lo cual es una información fundamental para este tipo de estudios. Además, en cuanto al análisis de la huella de carbono, se recomienda la evaluación del Indicador de Intensidad de Carbono (ACI) desde la perspectiva de las tecnologías de movilidad eléctrica, con el fin de obtener datos que verdaderamente sean de ayuda para solucionar este problema.

**Palabras clave.** Capacidad de alojamiento, estación de recarga, gestión energética, huella de carbono, vehículos eléctricos.

**Abstract.** The consequences of environmental pollution caused by greenhouse gases are increasingly noticeable worldwide, which are largely caused by internal combustion vehicles. This has led to the development of strategies over the years in order to minimize these problems, one of the most promising being the implementation of electric vehicles (EVs). Panama currently has a strategic mobility plan whose target year is 2030. This plan has as its objective that a percentage of electric vehicles distributed in the public, private and government sectors enter circulation, however, to achieve this the country must be prepared to face the new loads that electric vehicles represent. In this research, energy management techniques for electric vehicles were studied, such as hosting capacity, where it was concluded that with the implementation of mathematical models and software such as OpenDSS, it is possible to know the critical point of penetration that supports the electrical system, which It is essential information for this type of study. In addition, regarding the analysis of the carbon footprint, the evaluation of the Carbon Intensity Indicator (ACI) from the perspective of electric mobility technologies is recommended, in order to obtain data that is truly helpful in solving this problem.

**Keywords.** Hosting capacity, energy management, charging station, carbon footprint, electric vehicles.

## 1. Introducción

El aumento desmedido de vehículos genera la utilización de grandes cantidades de energía que comúnmente son de origen fósil, lo cual ocasiona dos grandes dificultades: necesidad de recursos energéticos y la contaminación ambiental que resulta de las emisiones de los vehículos [1].

Debido al aumento de la contaminación ambiental, en los últimos años se han tomado medidas en torno a minimizar este inconveniente de carácter mundial, siendo una de las más prometedoras y de mayor impacto la utilización de vehículos eléctricos (VEs). Esta solución tecnológica es la base de la estrategia de movilidad propuesta en Panamá para el año 2030, en donde se estima que del 10 % al 20 % de los vehículos privados, del 15 % al 35 % de autobuses y del 25 % al 50 % de las flotas públicas serán eléctricos [2].

Para lograr que los VEs cumplan con su objetivo es necesario tomar las medidas pertinentes en cuanto a este ámbito. Es por esto por lo que se han creado métodos de gestión energética que buscan hacer los procesos de producción de la energía más eficiente, de modo que impacten de la mejor manera sobre la competitividad, productividad y contaminación ambiental.

Con el pasar del tiempo los métodos de gestión energética han servido de ayuda a diversos países para afrontar la llegada masiva de VEs, razón por la cual en este artículo se realiza un análisis de los métodos y softwares que son útiles para el control de la gestión energética en VEs. El objetivo principal de este estudio es realizar una revisión del estado del arte en donde se planteen las mejores alternativas con el fin de proporcionar una gama de herramientas que se encarguen de producir simulaciones que permitan a futuro obtener resultados factibles en cuanto a la recarga de los VEs.

### 1.1 Antecedentes

Los vehículos eléctricos son considerados una de las vías óptimas para reducir la contaminación ambiental, sin embargo, para lograr que esta tecnología se desarrolle de una manera eficiente en nuestro país debemos hacer evaluaciones previas a su masificación.

En la actualidad, existe una gran incertidumbre por el aumento de la contaminación ambiental. Según el World Energy Outlook (WEO), que es considerado la fuente de análisis y proyecciones más autorizada del mundo energético, la temperatura aumentará 1.65°C si la infraestructura de energía actual continúa operando igual que en el pasado, o sea, sin cambios [3]. Además, el WEO también informa que las centrales energéticas, plantas industriales, edificios y vehículos existentes que continúen dependiendo de los combustibles fósiles generarán un nivel de emisiones considerables para el

futuro, aproximándonos a una cifra de 10 Gt de CO<sub>2</sub> para el 2050 [3].

Dentro de la inquietud por el crecimiento de la contaminación ambiental, algunos autores enfocan sus investigaciones en regiones específicas. Tal es el caso de [4] en donde se destaca que la matriz de la energía fósil es mucho más compleja para América Latina, ya que la mayoría de los países que la integran están en vías de desarrollo y, la superación de este tipo de urgencias depende de la explotación de sus recursos naturales. Por otra parte, los autores de [5] indican que la contaminación ambiental está relacionada en gran medida con las actividades económicas como la producción agrícola e industrial y el consumo de energía.

Si nos enfocamos directamente en Panamá varias investigaciones muestran que los principales contaminantes en el país son la falta de planificación urbana, los desperdicios sólidos como la acumulación de basura, la contaminación del aire en sus calles especialmente los provocados por los automóviles y la contaminación ocasionada por algunas industrias de refinación y fábricas de cemento. Además de toda esta serie de factores, según estudios científicos, Panamá padece de contaminación sonora [6]. Asimismo, Panamá no cuenta con una regulación para la salida de circulación de los vehículos según su vejez, lo cual provoca que la edad promedio del parque automotor aumente trayendo consigo un incremento significativo de la contaminación [2].

De acuerdo con el informe de situación nacional de Panamá [2], cuando se realiza un desglose en cuanto al consumo de combustibles en el país se establece que el 60 % de las emisiones correspondiente al sector de los hidrocarburos (compuestos orgánicos que contienen carbono e hidrógeno [7]) provienen del sector transporte, mientras que el 20 % restante se debe al sector de electricidad. Esta información indica lo esencial que es establecer acciones que ayuden a reducir la generación de estas emisiones.

Los combustibles fósiles que se utilizan en Panamá son gasolina (91 octanos y 95 octanos), diésel, bunker C, gas licuado de petróleo, av jet/ jet fuel, carbón, entre otros. Como se mencionó anteriormente, estos combustibles son utilizados en su mayoría para el sector transporte y la generación de electricidad.

De forma general, el vehículo eléctrico (VE) es definido como un vehículo impulsado por uno o varios motores eléctricos cuya característica principal es que puede alimentarse a través de una fuente externa que le suministre energía eléctrica [8]. En los últimos años los VEs se han ido popularizando debido a las múltiples ventajas que posee, no obstante, su primera aparición fue en el siglo XIX mucho antes

que los vehículos de combustión interna [9]. A pesar de que la implementación del VE se plantea como una vía óptima para la reducción de la contaminación ambiental, existen diversas barreras en cuanto a su autonomía porque la potencia de la carga y el tiempo que dura el proceso de recarga de las baterías son factores estratégicos que deben contemplarse en dichos vehículos, como indica [10]. Por otra parte, los autores en [11] consideran que además se debe tener en cuenta la hora de conexión, duración de conexión, distancia recorrida, lugar de conexión, entre otros.

En los últimos años los VEs se han ido popularizando debido a las múltiples ventajas que posee, entre ellas [1], [12], [13]:

- El costo en el mantenimiento y de recarga del VE es menor que un vehículo de combustión interna.
- La eficiencia del motor eléctrico presenta un elevado par.
- El VE funciona a pleno rendimiento sin necesidad de variar su temperatura.
- La utilización de VEs trae consigo múltiples ventajas medioambientales, principalmente la reducción de la huella de carbono.
- El proceso reversible o frenado regenerativo es una de las ventajas más significativas del VE.

Desde el punto de vista del consumidor, varias encuestas han demostrado que las personas tienen un interés particular por adquirir este nuevo tipo de vehículos, sin embargo, las principales barreras para su adquisición se basan en su costo y su poco rango de operación [14].

A nivel global, la penetración de VEs a pesar de haber partido de una base pequeña ha crecido significativamente con el tiempo debido al aumento de la producción de nuevos modelos, la disminución en el costo de las baterías eléctricas y la promoción de políticas públicas para promover el uso de este tipo de vehículos. Sin embargo, es bueno destacar que aún con todos los grandes avances que ha tenido el VE, el aumento en su utilización está concentrado en algunos países como: China, Estados Unidos, Japón y algunos países europeos [15]. En América Latina, el transporte por medio de VEs está en su etapa inicial, con algunos miles de vehículos en circulación. La mayoría de los VEs que circulan en esta área son de entidades gubernamentales, corporativas, taxis, transporte público y el resto vehículos privados [15].

La principal barrera que enfrentan algunos países para aumentar la cantidad de VEs en circulación radica en los altos costos de venta y la falta de infraestructuras de recarga, no obstante, podemos colocar de ejemplo a Colombia, el cual ha sido uno de los pocos países latinoamericanos que ha estado a la vanguardia para implementar este tipo de transporte sostenible. Por ende, ante la necesidad de abrir paso a este tipo de tecnologías los países deben buscar la manera de mejorar los métodos para la obtención de recursos naturales (energías

renovables) que faciliten la integración de los VEs en las distintas áreas tanto comerciales, privadas y públicas.

Varios de los factores antes mencionados van ligados directamente con la red eléctrica a la cual va dirigida dicha carga, esto genera una interrogante sobre la capacidad que puede soportar o no un sistema eléctrico con la llegada masiva de VEs en un entorno determinado. La recarga de los VEs puede afectar a las redes de distribución en diversos ámbitos, entre ellos: aumento en la caída de tensión en las líneas al recargar los VEs, aumento en el margen de tensión de funcionamiento al considerar la generación distribuida, aumento de desequilibrios en la recarga monofásica del VE, entre otros [16], [17]. Para reducir algunas de estas afectaciones, en [18] se propone un esquema con distintos pasos a seguir en donde se considera la información de la red de distribución, la caracterización del perfil de consumo de los clientes, la caracterización eléctrica y de la demanda de la red de distribución y otros aspectos de relevancia.

Para evaluar el impacto de los VEs en la red de distribución de Panamá debemos considerar un panorama a futuro con el objetivo de obtener una versión más realista al realizar las simulaciones, no obstante, antes de abarcar el proceso práctico debemos analizar distintos conceptos como lo son el hosting capacity y la huella de carbono.

Se decidió realizar este estudio enfocado en los VEs, ya que como se mencionó anteriormente, es un área en crecimiento en nuestro país, por ende, se considera que una investigación de esta magnitud puede proporcionar datos que generen aproximaciones al futuro próximo. Esto sin duda permitirá tomar acciones correctas en la red eléctrica, ya que el avance de este indicará si el sistema soporta una cantidad específica de VEs y, además, dará posibles soluciones para el porcentaje de VEs que no pueda añadirse la red.

Este tema de investigación es un complemento al proyecto macro titulado “Impacto de la Integración Masiva de Vehículos Eléctricos en el Sistema Eléctrico Nacional” financiado por SENACYT. En Panamá este estudio es llevado a cabo por los grupos de investigación para la Simulación, Modelaje y Análisis de Redes, Tecnologías y Sistemas Energéticos (SMARTS-E) e Ingeniería de Telecomunicaciones y Sistemas Inteligentes Aplicados a la Sociedad (ITSIAS), ambos de la Universidad Tecnológica de Panamá (UTP). La presente investigación se desarrolló dentro del Grupo de Investigación de Potencia y Energía de la Universidad De los Andes, Bogotá, Colombia.

## 2. Materiales y Métodos

Para la obtención de la información que se verá reflejada en el siguiente artículo se realizó una búsqueda científica a través de las bases de datos electrónicas de Google Scholar, el repositorio Séneca de La Universidad De Los Andes y la librería y biblioteca en línea e-cigre.org. Para conseguir los

documentos se hizo uso de términos de búsqueda como: hosting capacity, vehículos eléctricos, MATLAB, OpenDSS, huella de carbono y estación de recarga, como texto libre.

Los métodos estudiados se basan en la utilización de softwares que en conjunto con modelos matemáticos son útiles para el estudio de los parámetros necesarios para la implementación masiva de VEs. El principal software analizado fue OpenDSS el cual es un simulador de sistemas de distribución de energía eléctrica (DSS) diseñado para admitir la integración y la modernización de la red de recursos de energía distribuida (DER) [19]. Dicho software fue creado y es actualmente mantenido por EPRI (Electric Power Research Institute) y se ha convertido en una importante ayuda para las etapas de planeación, análisis, mantenimiento y actualización de redes de baja, media y alta potencia [20].

Por otra parte, OpenDSS permite a sus usuarios adherir otros softwares como lo es el caso de MATLAB que es una herramienta de programación y cálculos numéricos utilizado para crear algoritmos y modelos, dicho software también es examinado en este documento.

Una vez obtenida una cantidad significativa de documentos, se leyeron los resúmenes para determinar si la información que proseguía sería provechosa para el estudio, de ser así se complementaba la lectura y finalmente se incluían en el documento los estudios que involucraban parámetros factibles para determinar los resultados.

### 3. Metodología

A continuación, se muestran las distintas consideraciones que fueron tomadas en cuenta para el desarrollo de este artículo.

#### 3.1 Planteamiento de la problemática

El medio ambiente o entorno natural se define como el conjunto de componentes físicos, químicos y biológicos externos con los cuales interactúan los seres vivos, el cual se ha ido deteriorando con los años debido a la presencia de elementos nocivos que generan daños a niveles que suponen un perjuicio para los seres vivos que lo habitamos [21].

La contaminación ambiental es originada ante todo por causas derivadas de la actividad humana, como por ejemplo la explotación de los recursos naturales y la emisión a la atmósfera de gases de efecto invernadero (GEI) [21]. En este último se encuentran incluidos los vehículos de combustión interna, los cuales generan un porcentaje significativo de GEI que afectan considerablemente a la atmósfera.

Como solución a lo anterior, en [22] se indica que para antes del 2028 los vehículos de combustión interna deben salir

del mercado sustituyéndose por otros métodos de transporte como ciclismo, caminatas, práctica de transporte compartido, uso de transporte público e implementación de VEs.

Una rápida transición a la movilidad eléctrica puede contribuir en la forma en la que se usa la energía de las redes. Los datos proporcionados por la Asociación de Distribuidores de Automóviles de Panamá (ADAP) revelan que desde el año 2011 al año 2018 se registraron solo 186 VEs, los cuales en su mayoría eran híbridos enchufables.

Existen algunas barreras que impiden la introducción a mayor escala de VEs en Panamá [2], algunas de estas son:

- El costo inicial de los VEs es mucho mayor al de un vehículo de combustión interna. Esto se debe a que los VEs compiten en desigualdad de condiciones con los vehículos de combustión interna. Estos últimos poseen una amplia oferta para todo tipo de presupuestos, no obstante, dicho precio no incluye los costos e impactos negativos que se ocasionan con su uso.
- El vacío a nivel académico en las industrias y centros educativos panameños que se encargan de la formación de profesionales en carreras programadas y afines a este tema de movilidad eléctrica.
- La falta de estaciones de recarga para los VEs es uno de los principales problemas de este tipo de movilidad en Panamá.

Los autores de [22] detallan que, con una planificación adecuada, el VEs y las energías renovables pueden ir de la mano, sin embargo, para poder lograr que ambos se complementen se deben realizar estudios que respondan a preguntas como ¿Está preparado el sistema de distribución eléctrico para afrontar una recarga masiva de VEs?, ¿Cuál es la cantidad de VEs que pueden recargarse en una determinada zona?, ¿Es necesario establecer políticas o planes en donde se regule un horario para recargar los VEs?. Para responder a estas interrogantes se realizó una recopilación de información con la finalidad de obtener diversos caminos con los cuales se pueda evaluar desde diversas perspectivas la integración de VEs, para que de ser necesaria la adecuación de algunos parámetros se realice antes de la llegada masiva de VEs de modo que se presenten como ventajas a futuro.

### 3.2 Hosting capacity y vehículos eléctricos

El hosting capacity HC (traducido al español como capacidad de alojamiento) se define como la cantidad de generación distribuida o demanda concentrada que se puede conectar a un nodo de la red de modo que el punto de operación no se encuentre fuera de los límites normales de su funcionamiento [11]. En [23] se indica que los elementos esenciales para analizar el HC son establecer los límites con respecto al parámetro a evaluar y el índice que se comparará con dichos límites. Este concepto se originó aproximadamente en el año 2004, pero según los datos de [24] no fue hasta el año 2005 cuando los autores de [25] introdujeron un enfoque para determinar el impacto del aumento de la penetración del recurso energético distribuido (DER) en los sistemas de energía. La base del enfoque se basaba en recopilar las limitaciones técnicas impuestas tanto por los operadores de los sistemas como por los clientes.

En [25] se indicó que el HC no es una operación fija que genere un solo resultado, por ende, su cálculo debe ser para varios índices de rendimiento, por ejemplo: variaciones de voltaje y frecuencia, sobrecarga térmica, calidad de energía y problemas de protección.

Desde la perspectiva de los VEs, el HC nos permite conocer el punto crítico de penetración que soporta el sistema. El porcentaje dado respecto a la capacidad del sistema determina cuantos VEs nuevos pueden conectarse a la red sin afectarla [26]. Los autores de [24] describen dos formas en las que puede analizarse el HC, estas son:

- Hosting capacity estocástico (SHC): El proceso estocástico se basa en la utilización de un conjunto de variables aleatorias, las cuales dependen de un parámetro o argumento específico [27].
- Hosting capacity locacional (LHC): El HC depende de la ubicación debido a que el alojamiento de nuevas cargas puede aceptarse en algunas ubicaciones y quizás en otras no.

Una de las formas de análisis que integran este tipo de método se basa en la creación de mapas que se pueden implementar en diseños de enrutamiento o en los diagramas unifilares de la red.

Por otra parte, en [23] se identifican tres métodos bajo los cuales se puede obtener el HC: el modelo equivalente, la simulación sistemática y la solución analítica.

#### 3.2.1 Metodologías y softwares utilizados para el análisis del hosting capacity en vehículos eléctricos

Para realizar el análisis del hosting capacity en VEs existen diferentes metodologías y softwares, los cuales basados en

varios supuestos permiten obtener respuestas a las interrogantes antes expuestas.

Los autores en [11] utilizan el flujo de carga armónico con el objetivo de determinar si se puede o no aumentar el porcentaje de penetración de los VEs. Para la realización de las simulaciones utilizaron el software OpenDSS, junto al método de Montecarlo que es un método de simulación enfocado en la resolución de problemas de carácter matemático a través de un modelo estadístico que consiste en generar posibles escenarios basados en una serie de datos iniciales [28]. En la tabla 1 se describe con más profundidad las dos metodologías utilizadas.

**Tabla 1.** Metodologías utilizadas por [11] para el análisis del HC en VEs

Quasi-static time-series (QSTS)	Algoritmo de Montecarlo
El análisis QSTS captura aspectos del flujo de energía que dependen del tiempo, incluida la interacción entre cambios diarios de carga. Para el estudio, en [11] se hizo uso del software OpenDSS en donde trabajaron con distintos comandos como: stepsize, number, ControlMode con la finalidad de que el usuario dependiendo del estudio que desee pueda determinar el paso más apropiado para realizar la simulación.	Como ya se mencionó anteriormente, el método de Montecarlo es no determinístico, por lo cual su objetivo es estimar de manera estadística el comportamiento de la red de distribución eléctrica con la conexión de las cargas de los VEs. En este caso, la entrada aleatoria sería el comportamiento de la conexión y duración de la carga del VE y los datos o resultados a evaluar de manera estadística son el voltaje, cargabilidad, desbalance y distorsión armónica.

Con base a las metodologías expuestas en la tabla 1, los autores procedieron a realizar las simulaciones de flujo de carga en donde las variables observables después de cada iteración eran: voltaje máximo y mínimo, desbalance y cargabilidad de los elementos, las cuales se obtienen por medio de los monitores de OpenDSS. También evaluaron la distorsión generada por las cargas no lineales en los sistemas de distribución por medio del modo “HarmonicsT”. El algoritmo de HC en [11] tiene como finalidad encontrar un escenario de penetración que tenga ciertas características como, por ejemplo, cumplir con el criterio de parada tanto en

flujo de carga como en armónicos, no quebrantar los límites de voltaje, cargabilidad, etc.

También existen autores como en [26] que realizan sus análisis basados en modelos específicos de VEs (Renault Twizy, Mitsubishi iMiev, Renault Zoe) y que, además, utilizan metodologías que integran un conjunto de softwares como OpenDSS y MATLAB para obtener el HC (figura 1).



Figura 1. Implementación de *software* para cálculo del HC.

Para la determinación del hosting capacity, el trabajo presentado en [26] describe una serie de pasos de los cuales se compone la metodología implementada:

- Generar un vector de los valores que corresponden a los porcentajes de penetración de los VEs que serán evaluados con el objetivo de determinar cuál es el HC.
- Compilar el circuito del sistema base en OpenDSS desde MATLAB por medio del uso de la interfaz COM, luego de compilado el circuito se deben agregar los monitores los cuales permitirán medir los parámetros del sistema y por ende de los VEs.
- Conectar los elementos adicionales y fijar los valores correspondientes a los límites operativos del sistema de los voltajes de los nodos, así como para las cargabilidades de los elementos.
- Establecer los límites de operación del sistema y comenzar las simulaciones probabilísticas utilizando el método de Montecarlo, estableciendo el número de escenarios que se desean evaluar. El objetivo es crear un ciclo para calcular el flujo de carga durante todos los días en un año.
- Resolver el flujo de carga a través de OpenDSS, posteriormente almacenar los datos en los monitores y leerlos desde MATLAB para verificar las condiciones operativas del sistema.
- Almacenar temporalmente vectores de voltajes en por unidad y cargabilidades los cuales resultan de normalizar los flujos de corriente con los cuales se hacen evaluaciones en función de los límites establecidos previamente, si se llega a presentar la violación de alguna restricción se presenta una alerta.
- Contabilizar la cantidad de alertas ya sea de voltaje o cargabilidad que se presenten durante toda la simulación

para el nodo o elemento que tiene problemas operacionales frente al porcentaje de penetración.

- Evaluar las variables auxiliares y en caso de presentar un estado de alerta la simulación se terminará y el HC correspondería al porcentaje de penetración evaluado en la última iteración.

Cabe destacar que muchos autores incluyen el análisis de armónicos en este tipo de casos debido a que este es un fenómeno que se produce por la presencia de cargas no lineales en las redes de distribución [29]. Asimismo, en [23] se indica que existen factores que se deben tener en cuenta para el cálculo del hosting capacity como, por ejemplo, la topología del sistema, comportamiento de la demanda del sistema y características del comportamiento de la fuente de generación. De igual forma establece el siguiente procedimiento para calcular la capacidad de alojamiento HC:

- Elegir un parámetro a evaluar y el índice de desempeño.
- Determinar, seleccionar, o definir un límite adecuado.
- Calcular el índice de desempeño en función de la cantidad de generación distribuida.
- Obtener el HC.

Por lo regular, los problemas más comunes que pueden surgir en cuanto a la calidad de la energía como resultado de la recarga de VEs son la caída excesiva de voltaje y distorsión armónica de voltaje, no obstante, con un análisis correcto del hosting capacity se pueden integrar niveles altos de penetración de VEs sin violar los requisitos de calidad de la energía y se podrá observar una reducción del uso de la energía térmica y un aumento del uso de recursos renovables [14].

Para finalizar este subpunto se procederá a realizar una recopilación de datos en la cual se observa las distintas metodologías utilizadas por los autores de los documentos antes descritos, esto con el objetivo de identificar las diferentes variables de entrada que se deben tener en cuenta para obtener el hosting capacity.

El sistema se basa en dos de las metodologías más utilizadas, en la parte de la derecha se muestran las variables de entrada con las cuales se obtendrán los datos a la salida para analizar el HC, entre la entrada y la salida de las variables se encuentran las diferentes simulaciones que se deben realizar (figuras 2 y 3).

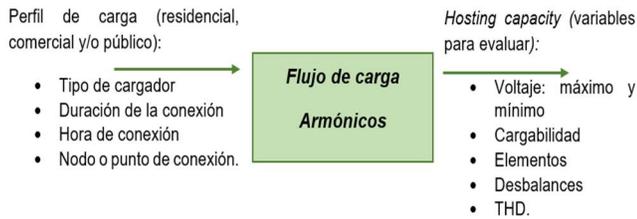


Figura 2. Metodología N°1 para la obtención del HC.

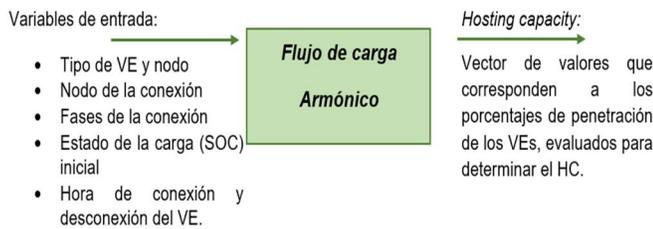


Figura 3. Metodología N°2 para la obtención del HC.

### 3.3 Análisis de la huella de carbono y los vehículos eléctricos

El CO<sub>2</sub> es uno de los principales causantes de los gases de efecto invernadero (GEI), el cual se produce al quemar combustibles fósiles [30].

La huella de carbono representa el volumen total de GEI que se producen por las actividades económicas y diarias del ser humano [31]. Es por esto por lo que la electrificación se perfila como un método factible para solventar este problema de carácter mundial [32]. Desde el enfoque de los VEs, la huella de carbono es examinada de forma directa por medio del porcentaje de emisiones durante su uso y de forma indirecta por el proceso de fabricación del vehículo y el tipo de energía que alimenta al vehículo en su proceso de recarga [33].

Los autores en [30] identifican algunas tecnologías asociadas a la movilidad sostenible como la intermovilidad (uso combinado del transporte público, autobús, metro, tren, tranvía, bicicleta) y movilidad eléctrica utilizada con el fin de minimizar la contaminación ambiental. Mientras que, los datos en [34] se apoyan en el seguimiento de algunos parámetros:

- Cambiar el modelo energético del transporte.
- Incentivar el uso de mecanismos limpios.
- Sustituir los vehículos que consumen diésel o gasolina por VEs.
- Usar biocombustibles.
- Ordenar el transporte.
- Iniciar campañas de ahorro y uso eficiente de la energía.
- Compensar a los usuarios con bonos de carbono.

Comúnmente, aunque se tome en consideración que los VEs son “cero emisiones” desde el contexto de su uso, al integrarlos como una carga que consume cierta cantidad de

energía eléctrica se incrementará la demanda, la cual debe ser suplida con mayor generación de energía eléctrica en el país. Esto puede ocasionar que haya un aumento indirecto en los gases contaminantes o viceversa, ya que dependerá del tipo de energía que se utilice para satisfacer la demanda de los VEs. En el caso de Ecuador, el trabajo presentado en [30] indica que manejan el sistema V2G (vehicle to grid), el cual es una tecnología que permite el abastecimiento desde las baterías de los VEs a la red en horas valle y la recuperación de la electricidad en las horas punta. En el caso de Uruguay, se aprovecha los excedentes de generación eléctrica de la madrugada [32]. Por esa misma línea, Uruguay ha avanzado fuertemente en la transformación de su matriz energética para orientar al sector del transporte hacia el uso de energías renovables [35], [36].

Existen diversos métodos para realizar el cálculo de la huella de carbono en un VE, no obstante, antes se debe considerar el ciclo de abastecimiento de la energía eléctrica, la cual se divide en tres fases: generación (fuentes renovables o no renovables), transmisión (realizada por medio de cables de alta tensión que recorren una distancia determinada) y distribución (transformación a media tensión y repartición a los usuarios finales hasta la baja tensión) para posteriormente utilizarla en la recarga de los VEs [37].

La metodología implementada por los autores en [37] está centrada en el seguimiento de los siguientes pasos:

- Determinación del periodo para el cálculo de la huella de carbono.
- Identificación de extensión y límites.
- Definición de las fuentes de energía: identificar las que producen emisiones.
- Determinación y análisis de los alcances para el cálculo.
- Búsqueda de los factores de emisión.
- Realización del cálculo de la huella de carbono.

Para poder obtener resultados en cuanto al cálculo de la huella de carbono se debe encontrar el HC de las centrales térmicas (las cuales hacen parte de las energías no renovables). Posteriormente, se hace uso del método de energía el cual se fundamenta en determinar las emisiones de dióxido de carbono en base al total de la energía eléctrica producida mensualmente en un lugar.

A su vez, los autores en [38] indican que para el cálculo de la huella de carbono se deben tomar dos unidades funcionales que son el porcentaje de CO<sub>2</sub> emitido en toda la vida del vehículo y el CO<sub>2</sub> por cada kilómetro recorrido a lo largo de su vida.

En cuanto al porcentaje de CO<sub>2</sub> emitido en toda la vida del vehículo se debe considerar primeramente los materiales con los cuales son realizados, con base a estos materiales se

procede a encontrar las emisiones realizadas en la extracción de cada elemento y su tratamiento para poder utilizarlo como componente en un vehículo. Sin embargo, a pesar del proceso que conlleva la fabricación de un vehículo, la utilización de este es una parte fundamental para el cálculo de las emisiones totales.

Lo antes descrito se enfoca en el análisis de la huella de carbono desde una perspectiva global (enfocándose en el costo), pero en este caso lo orientaremos a una visión energética o de externalidades considerando el efecto que tienen los VEs, específicamente su recarga en cuanto a la energía producida por los distintos tipos de centrales de energía eléctrica.

Para analizar el porcentaje de carbono por medio del método de externalidades se debe considerar la información de la figura 4.



**Figura 4.** Aplicación del método de externalidades para el cálculo de la huella de carbono.

La identificación de los factores técnicos que explican la evolución de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el sector eléctrico es de suma importancia para crear políticas energéticas a fin de contribuir con la estrategia global de mitigación de la contaminación ambiental [39].

Un punto clave para la aplicación del modelo de externalidades es considerar la intensidad agregada de carbono (ACI) que según [39] es un indicador de rendimiento útil para caracterizar el comportamiento del sector eléctrico desde un punto de vista medioambiental. La expresión para el cálculo de la ACI se muestra en la ecuación 1.

$$ACI = \frac{\text{gramos de CO}_2}{\text{kWh producidos}} = \frac{g \text{ CO}_2}{\text{kWh} + \text{kWh}_{Ext}} \quad (1)$$

Los gramos de CO<sub>2</sub> corresponden a la relación entre el dióxido de carbono emitido por las centrales térmicas, mientras que los kWh producidos son la energía total del sistema de generación, la cual equivale en este caso a la demanda diaria más la nueva carga que se integraría de los VEs.

En Panamá, según los datos presentados en [39] sobre el periodo comprendido desde el año 1990 al año 2017, la intensidad agregada de carbono (ACI) estuvo entre 150 g CO<sub>2</sub>/kWh a 200 g CO<sub>2</sub>/kWh, lo cual reflejó una tasa de cambio de  $\Delta V=0.57$  g CO<sub>2</sub> /kWh.

El objetivo del estudio de la ACI enfocado a los VEs es lograr establecer los  $\frac{g \text{ CO}_2}{\text{kWh}}$  que se producen normalmente sin su recarga y compararlos con los que se producirían con una cantidad determinada de VEs recargándose. Con esto, se podrá verificar si los VEs realmente contribuyen a la reducción de gases contaminantes desde el enfoque de su uso (directamente) y su recarga (indirectamente). Además, los datos serán de ayuda al momento de que los gestores quieran implementar políticas o normas para recargar los VEs en momentos en que la producción de energía eléctrica a través de fuentes de energía renovable cuente con una alta oferta.

## 4. Conclusiones

En presencia de los datos antes descritos, Panamá debe tomar medidas rápidas para que la implementación de los VEs a futuro de los resultados esperados. Para esto, se han investigado métodos de gestión energética destacando primeramente que el estudio de las redes de distribución eléctricas previo a la masificación de las cargas de los VEs es requerido para conocer el estado actual de las mismas, existen softwares que permiten realizar este tipo de estudios contemplando el sistema de distribución eléctrico sin la carga de los VEs y añadiéndole la carga de dichos vehículos, este análisis permite observar el porcentaje de penetración que puede ser admitido en una determinada zona del país, estudio conocido como hosting capacity.

El software más utilizado es OpenDSS quien en conjunto con MATLAB y algunos métodos no determinísticos como Monte Carlo permiten a sus usuarios hacer este tipo de análisis bajo los cuales se pueden tomar las medidas necesarias respecto a la distribución de las cargas de los VEs y las horas en las que es mejor recargarlo, considerando la implementación de políticas públicas que ayuden a regular estas situaciones.

Por otra parte, en cuanto al estudio de la huella de carbono, a pesar de que existen diversas formas de evaluarla, se concluyó en que la mejor forma de analizarla desde el enfoque de los VEs es por medio del método de externalidades ya que desde allí es posible identificar el porcentaje de CO<sub>2</sub> emitido por las centrales de energía eléctrica sin la recarga de VEs y compararlo con el CO<sub>2</sub> que sería producido con la recarga de los VEs. Este tipo de estudios es indispensable para ver si verdaderamente el VE representaría un cambio en la matriz. Además, es de suma importancia el estudio de la integración masiva de VEs y de los indicadores de sostenibilidad como la intensidad de carbono desde la visión de las distintas partes interesadas:

- Usuarios: Los usuarios son una pieza clave para incitar a la realización de estudios para garantizar factibilidad en los VEs mediante la adecuación de estaciones de recargas.
- Generadores de electricidad (térmicas y renovables): Esta parte es la interesada en que la demanda aumente para generar más ganancias.
- Empresas distribuidoras: Por ser la conexión entre el productor y el consumidor deben estar anuentes a los estudios que se realicen en cuanto a esta nueva tecnología.
- Estado: El objetivo principal del gobierno es aumentar la flota vehicular eléctrica para así cumplir con las metas a nivel ambiental y a su vez obtener financiamiento internacional por medio de las entidades/promotores renovables.

Finalmente, como trabajo a futuro se espera la implementación de los métodos estudiados en esta investigación en el proyecto macro “Impacto de la Integración Masiva de Vehículos Eléctricos en el Sistema Eléctrico Nacional” con el objetivo de poder evaluar el estado de la red de distribución eléctrica de Panamá frente a las próximas cargas de los VEs.

## AGRADECIMIENTOS

María Serrano agradece a la Universidad De Los Andes (Bogotá, Colombia) por todos los conocimientos impartidos en la pasantía internacional bajo la cual se realizó el tema de investigación del presente artículo científico. De igual forma se agradece a SENACYT por proporcionar el estipendio económico para la movilidad internacional UTP-SENACYT 2022-I. Yessica Sáez y Edwin Collado agradecen al Sistema Nacional de Investigación (SNI) de Panamá por proporcionar financiamiento parcial para este trabajo.

## CONFLICTO DE INTERESES

Los autores declaran no tener algún conflicto de interés.

## REFERENCIAS

- [1] M. García. “Pasado, presente y futuro de vehículos eléctricos”, 2015. [En línea]. Disponible: <https://core.ac.uk/download/pdf/71398996.pdf>. [Último acceso: 30 Marzo 2022].
- [2] Gaceta Oficial (República de Panamá). “Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica de Panamá”. Panamá. 2019.
- [3] World Energy Outlook. “World Energy Outlook (resumen ejecutivo)”. Iea. 2020.
- [4] A. Cubillos y F. Estenssoro. “Energía y medioambiente. Una ecuación difícil para América Latina”. CLACSO. Santiago de Chile. 2013.
- [5] P. Guerrero y Y. Pinzón. “Relación entre la contaminación ambiental y consumo de energía no renovable e implementación de políticas de eficiencia energética en Ecuador: un análisis de cointegración con series de tiempo, periodo 1970-2015”. Loja. 2021.
- [6] C. Morales. “Contaminación ambiental y educación”. Panamá América. Panamá. 2014.
- [7] Secretaria de Energía (México). “¿Qué son los hidrocarburos?”. 2015. [En línea]. Disponible: <https://www.gob.mx/sener/articulos/que-son-los-hidrocarburos#:~:text=Los%20Hidrocarburos%20son%20un%20grupo,todos%20los%20dem%C3%A1s%20compuestos%20org%C3%A1nicos>. [Último acceso: 20 Abril 2022].
- [8] M. García, «Estudio sobre la viabilidad del vehículo eléctrico», Bilbao, 2016.
- [9] F. Martín Moreno. “Vehículos Eléctricos. Historia, Estado Actual Y Retos”. *European Scientific Institute, ESI*, pp. 129-142. 2016.
- [10] P. Olivella. “Modelado de la demanda de carga lenta y rápida de vehículos eléctricos para el estudio de impacto en la red de distribución”. Barcelona. 2012.
- [11] C. Dimas. ““Hosting Capacity” y Calidad de la Potencia para la penetración de vehículo eléctrico en redes de Distribución”. Bogotá. 2018.
- [12] J. M. Hernández y N. González. “Las infraestructuras de recarga y el despegue del vehículo eléctrico”. *Observatorio medioambiental*. vol. XVIII, pp. 57-85. 2015.
- [13] L. Roás. “Los vehículos eléctricos”. Madrid. 2011.
- [14] J. Pecos. “Integration of Electric Vehicles”. *ELECTRA*, n° 283, pp. 47-57. 2015.
- [15] E. Marchán y L. Viscidi. “Transporte verde: perspectiva para vehículos eléctricos en América Latina”. 2016.
- [16] R. Hermana. “Estrategias de gestión de flotas de vehículos eléctricos”. [En línea]. Disponible: [https://oa.upm.es/47670/1/ROBERTO\\_ALVARO\\_HERMANA.pdf](https://oa.upm.es/47670/1/ROBERTO_ALVARO_HERMANA.pdf). [Último acceso: 10 Noviembre 2021].
- [17] O. D. Chacón Herrera. “Análisis del impacto de la carga de vehículos eléctricos en transformadores de distribución”. Quito, 2021.
- [18] J. Ceballos, E. Caicedo y S. Ospina, «Una Propuesta Metodologica para Dimensionar el Impacto de los Vehículos Electricos sobre la Red Electrica,» *Revista Ingenieria*, vol. XXI, n° 2, pp. 154-175, 2016.
- [19] Instituto de Investigación de Energía Eléctrica. “¿Qué es OpenDSS?”. 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.epri.com/pages/sa/opendss>. [Último acceso: 4 Noviembre 2021].

- [20] T. Castillo. “Software para simulación de Sistemas de Potencia”. 2014. [En línea]. Disponible: <http://tuesman.blogspot.com/2014/06/openss.html>. [Último acceso: 6 Abril 2022].
- [21] Ayuntamiento de Huelva, “¿Qué es la contaminación ambiental?,” 2018. [En línea]. Disponible: <http://www.lineaverdehuelva.com/lv/consejos-ambientales/contaminantes/Que-es-la-contaminacion-ambiental.asp>. [Último acceso: 5 Abril 2021].
- [22] Greenpeace. “Fin de los combustibles fósiles en los coches: ¿Podemos cambiar a tiempo a una movilidad baja en carbono?,” 2018. [En línea]. Disponible: [https://es.greenpeace.org/es/wp-content/uploads/sites/3/2018/09/POD-Media-Report\\_ES.pdf](https://es.greenpeace.org/es/wp-content/uploads/sites/3/2018/09/POD-Media-Report_ES.pdf). [Último acceso: 5 Abril 2022].
- [23] V. Quintero. “Aplicación del concepto de Capacidad de Atención (Hosting Capacity) a la valoración del efecto de inclusión de fuentes renovables en la confiabilidad de sistemas de distribución”. Bogotá. 2017.
- [24] I. Sherif, A. Shady, A. Almoataz y Z. Ahmed. “State-of-the-art of hosting capacity in modern power systems with distributed generation”. *Renewable Energy journal an international journal*, pp. 1002-1020. 2019.
- [25] M. Bollen y M. Häger. “Calidad de la energía: interacciones entre los recursos de energía distribuida, la red y otros clientes”. *Calidad de potencia útil*, vol. I, pp. 51-61. 2005.
- [26] D. Sierra. “Determinación metodológica del hosting capacity de vehículos eléctricos en sistemas de distribución considerando la relación THD-SOC de las baterías”. Bogotá. 2019.
- [27] Software DELSOL. “Simulación de Montecarlo”. 2020. [En línea]. Disponible: <https://www.sdelisol.com/glosario/simulacion-de-montecarlo/>. [Último acceso: 22 Febrero 2022].
- [28] M. Reno. “Quasi-Static Time Series (QSTS) simulations for distribution system analysis”. 2017. [En línea]. Disponible: <https://www.osti.gov/servlets/purl/1431692>. [Último acceso: 22 Febrero 2022].
- [29] L. M. Caro. “Análisis de calidad de la potencia en una estación de carga de vehículos eléctricos”. Bogotá. 2019.
- [30] J. Vélez. “Análisis y Estimación de la Demanda Eléctrica con la Implementación de Vehículos Eléctricos conectados a una Red de Distribución en Cuenca y El Ecuador”. Cuenca. 2017.
- [31] IBERDROLA. “¿Qué es la huella de carbono y por qué es vital reducirla para frenar el cambio climático?,” 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.iberdrola.com/sostenibilidad/huella-de-carbono>. [Último acceso: 1 Marzo 2022].
- [32] C. Correa y L. Di Chiara. “Beneficios de la electrificación: Estudio del caso del transporte colectivo eléctrico en Uruguay”. Uruguay, 2020.
- [33] J. Majdalani. “¿Más respetuosa? Esta la huella de carbono de los eléctricos”, 2021. [En línea]. Disponible: <https://www.adslzone.net/e-movilidad/coches/huella-carbono-electricos/>. [Último acceso: 1 Marzo 2022].
- [34] H. Guevara. “Huella de carbono del parque automotor de Ica 2019, propuesta para su mitigación”, Ica. 2019.
- [35] BID (mejorando vidas). “MoviBlog: Ideas de transporte y movilidad para América Latina y el Caribe”. 2018. [En línea]. Disponible: <https://blogs.iadb.org/transporte/es/que-esta-haciendo-uruguay-para-que-el-transporte-sea-electrico/>. [Último acceso: 10 Marzo 2021].
- [36] Ministerio de Industria, Energía y Minería De Uruguay. “Informe sobre el Status Quo de la Movilidad Urbana Sostenible en Uruguay” Montevideo. 2020.
- [37] C. Murillo y D. Murillo. “Estudio de la huella de carbono generado durante el funcionamiento de un vehículo eléctrico”. Cuenca. 2019.
- [38] C. Quintana. “Cálculo de la huella de carbono de vehículos utilitarios mediante el análisis del ciclo de vida”. Cantabria. 2018.
- [39] P. De Oliveira, J. Galvis, D. Rojas y J. Yusta. “Multitemporal LMDI Index Decomposition Analysis to Explain the Changes of ACI by the Power Sector in Latin America and the Caribbean between 1990–2017”. *energies*, vol. XIII, n° 9, 2020.