

Impacto de los vehículos eléctricos en condominios residenciales

Joseph Daniel Soto-Zúñiga,
jdsoto@cfia.or.cr, Colegio de Ingenieros de Costa Rica, San José, Costa Rica
Joel Alpízar-Castillo,
J.J.AlpizarCastillo@TUDelft.nl, Universidad Técnica de Delft, Delft, Países Bajos

Abstract

The number of electric vehicles in Costa Rica has increased steadily in recent years. If purchasing power is considered, the owners of electric vehicles likely live in horizontal or vertical residential condominiums, which have a single connection point to the electricity distribution network. For this reason, an uncontrolled increase of electric vehicles in a horizontal or vertical condominium can jeopardize the capacity of the circuit, especially the transformer and the protection. This article studies the impact that the installation of chargers for electric vehicles in a condominium can have. In addition, different strategies for minimizing the technical and user impact were compared. The results show that using renewable energies is not recommended given the probability distributions of charging time of electric vehicles. Instead, the use of energy management strategies is the most attractive alternative.

Keywords: distribution networks, electric vehicles, energy management systems, grid congestion, residential condominiums.

Resumen

El número de vehículos eléctricos en Costa Rica ha aumentado constantemente en los últimos años. Si se toma en cuenta la capacidad adquisitiva, es probable que los dueños de los vehículos eléctricos vivan en condominios residenciales horizontales o verticales, los cuales tienen un único punto de conexión con la red de distribución eléctrica. Por este motivo, un aumento significativo de vehículos eléctricos en un condominio horizontal o vertical puede poner en riesgo la capacidad del circuito, especialmente el transformador y las protecciones. Este artículo estudia el impacto que puede tener la instalación de cargadores para vehículos eléctricos en un condominio. Además, se compararon diferentes estrategias de minimización del impacto técnico y para el usuario. Los resultados demuestran que el uso de energías renovables no es recomendable dadas las distribuciones de probabilidad de tiempo de carga de los vehículos eléctricos. En cambio, el uso de estrategias de gestión de la energía resulta la alternativa más atractiva.

Palabras clave: condominios residenciales, congestión en la red, redes de distribución, sistema de gestión de energía, vehículos eléctricos

1. Introducción

El Gobierno de Costa Rica ha implementado importantes iniciativas para promover la descarbonización del sector transporte, ya que para 2017 concentraba el 82.6 % del consumo de combustibles fósiles, según el MINAE (2019). Dentro de los ejes de dichas iniciativas se encuentran el Plan de Descarbonización y la Ley 9518 que promueven la movilidad eléctrica privada, debido a que los vehículos eléctricos (VE) colaboran con la reducción de emisiones de CO₂, ya que el 50.4 % de consumo final de energía en transporte está asociado al transporte privado. Sin embargo, una adopción súbita de vehículos eléctricos podría afectar negativamente las redes eléctricas del país. En la literatura se pueden encontrar estudios que demuestran las consecuencias del aumento de VE en las redes de distribución eléctrica (RDE), resaltando la congestión en la red, sobrecargas y problemas de armónicos, condiciones que requieren reforzar las líneas y protecciones (Alpízar-Castillo, 2022). No obstante, en Costa Rica no existen suficientes investigaciones que puedan usarse como base para determinar el efecto de los vehículos eléctricos en el sistema eléctrico nacional.

Específicamente en los sectores residenciales, las consecuencias de implementar VE ya han sido reportadas. Como respuesta, a nivel público, la Compañía Nacional de Fuerza y Luz (CNFL) propuso un plan piloto en 2021 para instalar cargadores semirrápidos en condominios residenciales para recolectar datos que puedan ser usados en la toma de decisiones por parte de los

entes reguladores, como diseño de normas técnicas y leyes (Céspedes, 2021). Desde la perspectiva privada, las acciones se han centrado en la implementación de sistemas de gestión de red. Los fabricantes de estos sistemas requieren diseñar software que conectan o desconectan los VE durante el proceso de carga para reducir el efecto en la red.

Sin embargo, la implementación de estos sistemas de gestión de energía a nivel residencial ha encontrado barreras desde la perspectiva de legislación, debido a que en Costa Rica no está permitida la venta de energía a través de intermediarios, de modo que solo existen dos posibilidades para instalar estaciones de carga: 1) directamente en el sistema eléctrico de un edificio, en cuyo caso la energía utilizada para la carga no puede ser cobrada al usuario, o 2) por parte de las compañías distribuidoras de energía. Este artículo se centra en estudiar la primera posibilidad en el contexto de condominios residenciales verticales.

Desde el año 1980, Costa Rica ha experimentado una creciente urbanización horizontal, dispersa y desconcentrada en el Gran Área Metropolitana (GAM), ocasionando un aumento paulatino de la densidad poblacional (Programa Estado de la Nación, 2019). El incremento de las infraestructuras residenciales urbanas que se han concentrado en la GAM ha provocado una disminución de los terrenos aptos para la urbanización horizontal (Salas, 2018), concentrando proyectos inmobiliarios horizontales en el sector oeste del GAM, en distritos como Alajuela, Escazú y Santa Ana (Programa Estado de la Nación, 2019). Lo anterior, sumado a la carencia de planes de ordenamiento territorial, pone en riesgo a las RDE, así como a los operadores de red, ante un aumento súbito en la cantidad de vehículos eléctricos concentrados en condominios residenciales. Debido a su poder adquisitivo, los habitantes de estos proyectos inmobiliarios tienen una mayor probabilidad de adquirir VE que puede ser cargado directamente en su hogar, y los condominios tienen un único punto de conexión con la RDE. Razón por la cual entender el comportamiento de carga de los VE en los condominios residenciales es crucial para evaluar el riesgo que implican para las RDE.

Las contribuciones de este artículo se centran en:

- Determinar el impacto que tendrá la creciente demanda de vehículos eléctricos en la red eléctrica de condominios residenciales.
- Determinar las repercusiones que tendrá una demanda excesiva de potencia en los de condominios residenciales.
- Analizar diferentes alternativas para suministro de energía para la carga de vehículos eléctricos.

Estado de los vehículos eléctricos en Costa Rica

En Costa Rica, desde el año 2010, se ha dado una creciente demanda de vehículos eléctricos con el objetivo de disminuir la huella de carbono y de mostrar a nivel mundial al país como un país verde. Eso ha provocado que desde entonces, la importación de vehículos eléctricos tenga un crecimiento constante, como se observa en la Figura 1, el cual incrementó a partir de la promulgación de la ley 9518 en el año 2018, generando incentivos para la importación y compra de vehículos eléctricos en el país (Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica, 2018). Analizando la creciente demanda por vehículos eléctricos desde el año 2010 hasta julio de 2020, se hace necesario proyectar la demanda de vehículos para los próximos años como se observa en la Tabla 1, con el objetivo de relacionar la demanda de los vehículos eléctricos en Costa Rica con la demanda de la energía eléctrica para la carga de estos vehículos. Estas proyecciones permitirían anticipar sobrecargas de transformadores en redes de media y baja tensión, problemas de baja y alta tensión, así como alteraciones en la frecuencia de nuestro sistema eléctrico.

Figura 1. Crecimiento acumulado de la flotilla vehicular eléctrica en Costa Rica a octubre del 2023.

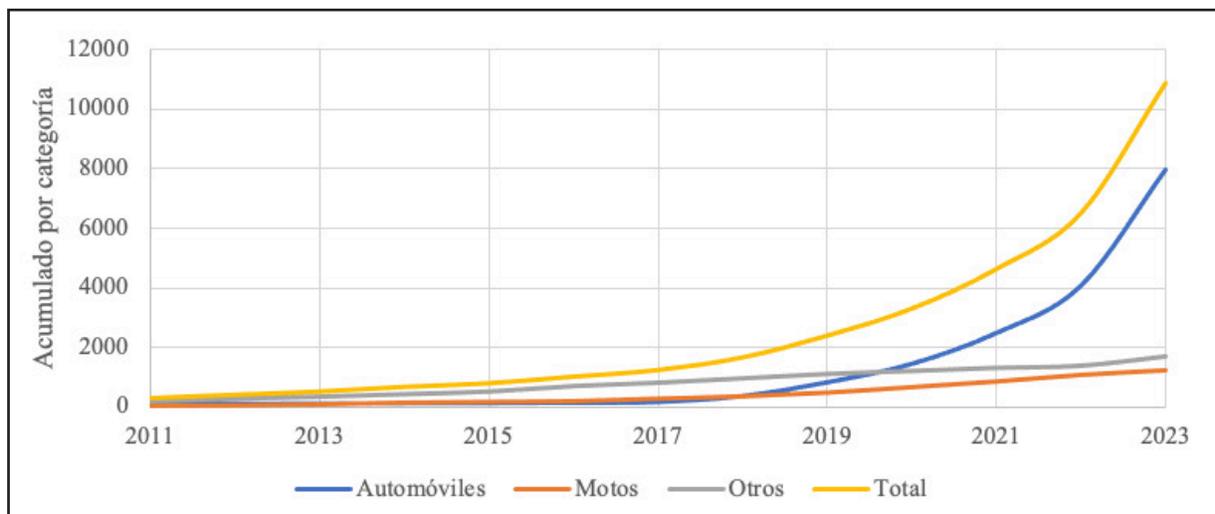


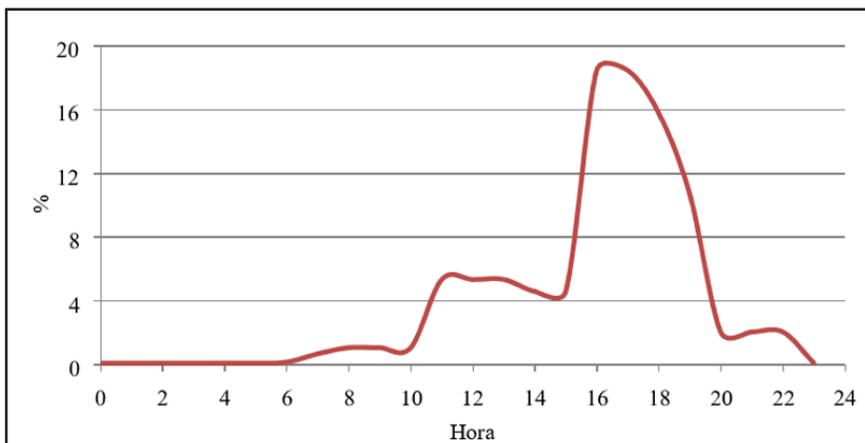
Tabla 1. Incrementos de la flotilla vehicular eléctrica acumulada en Costa Rica a octubre del 2023

Detalle	Año						
	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023
Nuevos automóviles eléctricos	25	199	460	624	1040	1593	3908
Nuevas motocicletas eléctricas	83	78	125	184	189	220	155
Nuevos vehículos especiales	115	149	149	103	106	72	317
Total de nuevos VE	223	426	734	911	1335	1885	4380

Fuente: Ministerio de Ambiente y Energía, 2023

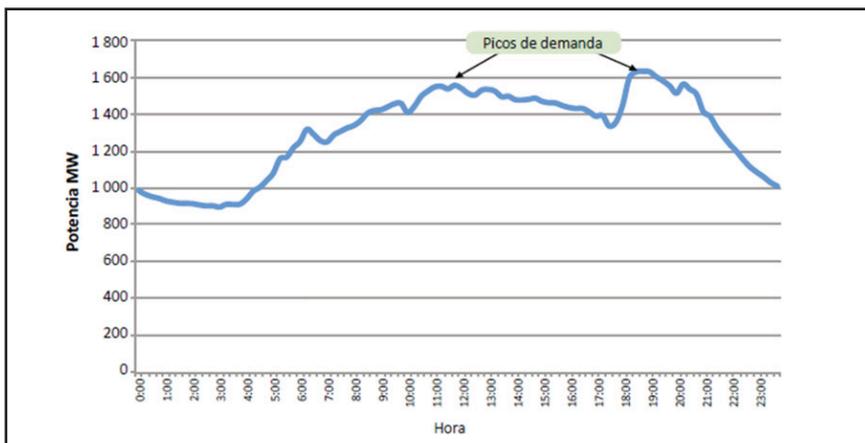
Un estudio realizado por Castro et al. (2007) muestra la probabilidad en la hora de llegada de la población a sus hogares. Como se muestra en la Figura 2, la mayoría de la población regresa a sus hogares esta entre las 4 p.m. y las 7 p.m. Dicha hora de llegada a los hogares es un indicativo crucial debido a la alta probabilidad de que los usuarios carguen el vehículo eléctrico al llegar al hogar (Brenes, 2016). Este comportamiento se ve reflejado en la curva de generación de energía en Costa Rica, que tiene dos picos principales, uno cerca de las 12:00 md, y otro alrededor de las 6:30 p.m., como puede verse en la Figura 3. Así mismo, tanto RITEVE (2018) como Brenes (2016) coinciden en que los habitantes de Costa Rica recorren, en promedio, entre 20 y 23 km por día, de modo que, conociendo la autonomía de la batería del EV, es posible crear modelos probabilísticos para estimar la hora de inicio de carga de los EV. La Tabla 2 muestra las características de los VE disponible para compra en concesionarios oficiales en Costa Rica para 2020.

Figura 2. Distribución de probabilidad de hora de regreso a los hogares en Costa Rica



Fuente: Castro, L, et al. (2007).

Figura 3. Curva de Potencia de la Generación Eléctrica de Costa Rica



Fuente: MINAE. (2019).

Tabla 2. Lista representativa de los tipos y características de las baterías de los vehículos eléctricos comercializados en Costa Rica

Marca	Modelo	Tipo Batería	Capacidad de la batería (kWh)	Potencia de la batería (kW)	Autonomía (km)	Eficiencia (kWh/100 km)
AUDI ¹	e-tron	Iones de litio	95	135-165	417	26
BMW ²	i3	N/I	N/I	42,2	300-350	N/I
BYD ³	e1	NCM	32,2	45	300 (NEDC)	N/I
BYD ³	e2 GL	NCM	47,3	70	402 (NEDC)	N/I
BYD ³	e3 G	NCM	35,2	70	300 (NEDC)	N/I
BYD ³	e5	Hierro-fosfato	60,5	160	400 (NEDC)	N/I
BYD ³	S1	NCM	53,2	70	400 (NEDC)	N/I
BYD ³	S2	NCM	40,6	70	300 (NEDC)	N/I
BYD ³	SONG PRO EV	NCM	59,1	120	400 (NEDC)	N/I
BYD ³	T3	NCM	50,3	100	300 (NEDC)	N/I
BYD ³	TANG EV	NCM		180	500 (NEDC)	N/I
HYUNDAI ⁴	IONIQ	Polímero de Ion litio	38,3	100	> 350	11,7
HYUNDAI ⁴	KONA	Polímero de Ion litio	39,2	100	312	13,9
MG ⁵	ZS EV	Iones de litio	44,5	111,8	263	13,8
NISSAN ⁶	Leaf	Iones de litio	40	110	389	13

Nota:

¹(Grupo Danissa, 2020)

²(Bavarian Motors S.A., 2020)

³(Cori Motors, 2020)

⁴(Grupo Q, 2020)

⁵(Morris Garages, 2020)

⁶(Grupo Danissa, 2020)

Fuente: Fichas técnicas de los VE, 2020.

Según menciona la Escuela de Ingeniería Eléctrica de la Universidad de Costa Rica (2019), una penetración de 25 % de VE podría generar problemas de sobrecarga y tensión en transformadores en las redes de distribución de baja tensión de Costa Rica. Como puede verse, la penetración de VE no afecta directamente las redes de media tensión, sin embargo, fallas en los transformadores de baja tensión afectarían las redes de media tensión. En otros países como Ecuador o España, se han realizado diversas investigaciones para determinar el impacto que tiene la introducción de VE en las redes eléctricas de consumo residencial. Los resultados demuestran que el ingreso masivo de los vehículos eléctricos en las redes de distribución puede generar incrementos no proyectados en la demanda de potencia, así como el aumento del consumo en las horas de demanda pico (Mena y Collaguazo, 2019). Los autores indican que un diseño adecuado de RDE considera un crecimiento en la carga, así como un margen de seguridad. No obstante, introducir VEs por encima de esta capacidad de potencia disponible comprometería las redes, disminuyendo su vida útil y adelantando la necesidad de refuerzos en la misma.

Otros autores, como Frías et al. (2011), mencionan que la recarga de los VE se hará en horas de demanda punta cuando las personas lleguen a sus trabajos u hogares en donde la demanda tendrá un crecimiento considerable. Considerando el impacto técnico y económico que esto conllevará, se necesitarán establecer estrategias que utilicen de manera eficiente las redes eléctricas con el menor costo posible. Una de las estrategias de carga de VE propuestas es el control de la carga, denominado recarga inteligente, de forma que los VE sean cargados en horas del día donde el consumo eléctrico sea menor y se encuentre en las horas fuera del pico de potencia. Esta estrategia mejoraría el factor de demanda en la red de distribución de baja tensión, distribuyendo el consumo energético durante el día, pero puede causar una operación continua de los transformadores y protecciones a una

demanda promedio más cercana a sus capacidades máximas. García, Alonso y Juárez (2009), en cambio, propone estrategias de intercambio de energía entre los VE y la red, denominadas “vehicle-to-grid”. Estas estrategias permiten optimizar el sistema eléctrico de manera tal que las baterías de los VE puedan ser almacenadores de energía cuando la red la necesite, así como la posibilidad de implementar energías renovables con mayor facilidad en los sistemas eléctricos, ya que el control de carga-descarga de las baterías permitirá suavizar la generación renovable. No obstante, debe asegurarse que el uso de las baterías de los VE no comprometa la capacidad disponible en el VE al momento que el usuario lo desconecte de la red.

En el mercado nacional, así como internacional, existen diversas normas que regulan el tipo de carga de los vehículos eléctricos. Entre estas normas, en Costa Rica, destaca el uso de las normas INTE N121:2020 (basada en las normas IEC 61851-1 y IEC 62196-2), así como el estándar SAE J1772 (Araya, 2018). Ambas organizaciones han procurado normar o estandarizar los tipos de carga para vehículos eléctricos en donde la SAE (*Society of Automobile Engineers*), con importante influencia en Japón y Estados Unidos, han establecido los diferentes niveles de carga para vehículos eléctricos, mientras que la IEC (*International Electrotechnical Commission*), con importante influencia en Europa, ha destacado por la incorporación de cargadores trifásicos (Vargas, 2012). En Costa Rica se utiliza la norma nacional INTE N121:2020, cuyos parámetros se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Parámetros de alimentación máximos en a.c de centros de recarga según norma INTE N121:2020

Modo de recarga	Tensión 1 fase (V)	Tensión 3 fases (V)	Corriente (A)	Potencia (kW)
1	250	480	16	4/13,3
2	250	480	32	8/26,6
31	250	480	80 (monofásico)	19,2 (monofásico)
41,2	-	480	-	-

Nota.

1El modo 3 (trifásico) y en modo 4 no se ha definido límite de corriente y potencia.

2La tensión monofásica en modo 4 no aplica.

Fuente: INTECO (2020).

Efectos de los vehículos eléctricos en las RDE y estrategias de mitigación del impacto

Los operadores de red enfrentan grandes desafíos debido a los diversos problemas que pueden surgir ocasionados por una fuerte penetración de VE en las redes eléctricas. Caicedo et al. (2014) menciona que los cambios en la demanda eléctrica producto de la penetración de VE afectan la planificación de los sistemas de generación, transmisión y distribución debido a la naturaleza estocástica de las horas de inicio y fin de carga, así como la energía requerida. Así mismo, el uso simultáneo de cargadores eléctricos puede generar problemas en las líneas de baja tensión, provocando congestión en la red y sobrecalentamiento de los conductores. Autores como Gómez (2003), mencionan que los cargadores eléctricos pueden generar altas corrientes distorsionadas por armónicos en los conductores eléctricos. Ambos efectos en los conductores aumentan las pérdidas, así como disminución de la vida útil de los transformadores y de la red eléctrica como tal. Maza et al. (2019) también menciona que los cargadores monofásicos utilizados a nivel residencial pueden generar aumento de pérdidas por desequilibrio de cargas. Pieltain et al. (2011), indica que a mayor penetración de vehículos eléctricos en las redes eléctricas existe un aumento de las pérdidas de energía en la red, debido a la densidad de carga presente en un área determinada de la red. Simultáneamente, los armónicos pueden generar diferentes problemas de capacidad interruptora en disyuntores, así como fusibles (Gómez, 2003).

Por otro lado, el aumento imprevisto de la demanda eléctrica genera caída de tensión, saturación de la red y aumento de las pérdidas (Giraldo, 2015). De la misma forma, la demanda eléctrica se verá afectada principalmente por el tipo de carga del vehículo eléctrico, donde la carga rápida puede significar para la red mayores niveles de distorsión armónica y sobrecargas de los transformadores (Bazurto et al. 2016). Adicionalmente, la carga descontrolada de vehículos eléctricos puede ocasionar desbalances en las redes trifásicas, debido a que los cargadores residenciales son monofásicos, generando disparo de protecciones, sobrecalentamiento del neutro, pérdidas en la red, calentamiento de equipos y disminución de la calidad del servicio (Bazurto et al. 2016).

Existen diversas estrategias que pueden considerarse para mitigar los efectos negativos de los VE en las RDE. Según menciona Meza et al. (2019), los administradores de las RDE pueden reforzar la red, siendo esta una solución sencilla pero costosa, la cual requiere aumentar la capacidad de los elementos de la red (líneas y transformadores), de modo que se evite sobrecargarlos. No obstante, esta posible solución necesita de una cuidadosa planificación de la red, proyectando el consumo, así como la penetración

de los vehículos eléctricos. Por otra parte, pueden implementarse tarifas horarias, de modo que se incentive la carga de los VE durante horas de bajo consumo mediante tarifas más bajas (Global EV Outlook, 2019). Sin embargo, la implementación de un esquema tarifario para la carga de vehículos eléctricos ayuda a disminuir los picos de la demanda eléctrica, no obstante, con el paso del tiempo, y una mayor penetración de vehículos eléctricos, puede generar nuevos picos en las redes eléctricas (Gómez et al. 2017).

Otra alternativa es acoplar sistemas de generación distribuida a través de energías renovables a las estaciones de carga. La carga de vehículos eléctricos con fuentes renovables de generación distribuida puede ayudar a reducir costos por energía, así como sobrecargas a la red (Bazurto et al. 2016). Esta opción está limitada a la disponibilidad instantánea de energía, no obstante, puede complementarse con sistemas de almacenamiento de energía, como baterías. De este modo, puede almacenarse la energía producida por las fuentes renovables en caso de no poder ser consumida inmediatamente, o en caso de una caída en la generación (Calvo, 2019).

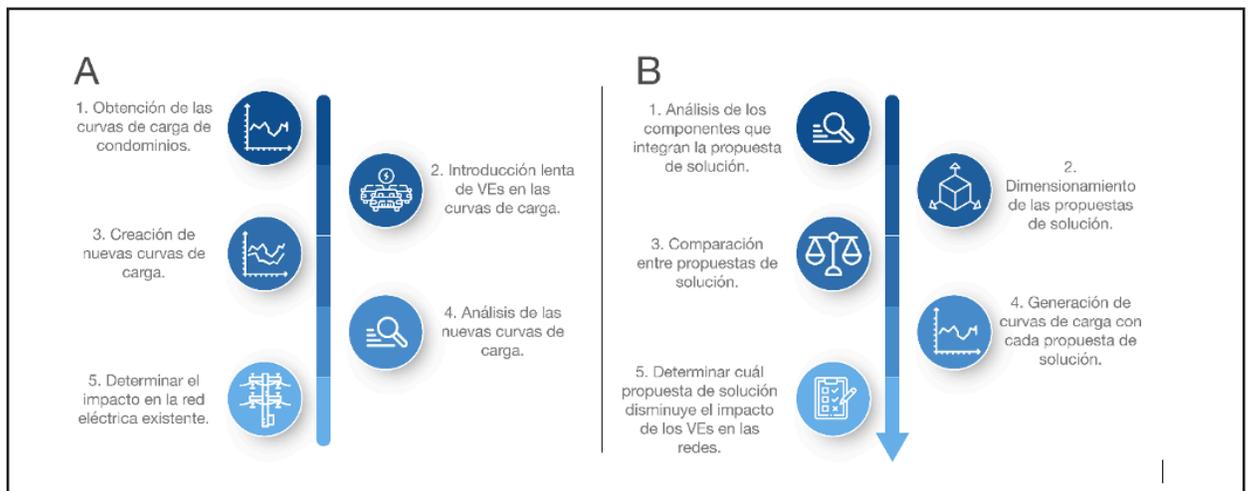
También es posible crear una relación bidireccional entre el VE y la red, denominada vehículo a la red (vehicle-to-grid), en donde el vehículo eléctrico no solo consume energía, sino que también almacena energía para entregarla al sistema cuando este la necesite (Albendea, 2011). Para que el efecto de los VE en la red sea útil, es necesario agrupar suficientes VE de modo que la capacidad de almacenamiento conjunta sea significativa con respecto a la demanda en la red, idealmente ubicando los cargadores en los alrededores de los centros de consumo (Albendea, 2011). Esta relación puede escalarse hacia sistemas más pequeños, como edificios, casas, o inclusive otros VE cercanos, surgiendo así los conceptos de vehículo al edificio (*vehicle-to-building*) (Bayram et al., 2017), de vehículo a la casa (*vehicle-to-home*) (Chen et al. 2020) y de vehículo a vehículo (*vehicle-to-vehicle*) (Bayram et al., 2017), respectivamente.

2. Metodología

Este artículo se orienta a la evaluación de diferentes soluciones que ayuden a minimizar la afectación en el sistema eléctrico de los condominios residenciales horizontales ante diferentes porcentajes de penetración de vehículos. Para esto, el estudio consta de tres etapas: 1) determinar los cambios en la carga eléctrica del condominio ante diferentes niveles de penetración de VE, 2) evaluar las distintas propuestas de solución para minimizar el impacto en el sistema eléctrico del condominio (ver Figura 4.a), y 3) evaluar distintas estrategias de carga (ver Figura 4.b).

Para cada una de las etapas propuestas en la metodología descrita, se propone una rúbrica que permita comparar las distintas alternativas de forma objetiva, según se muestra en las Tablas 4 y 5.

Figura 4. Esquema metodológico propuesto para determinar A) el impacto técnico de las propuestas de solución y B) el impacto al usuario de las propuestas de solución.



Tal y como se observa en la Figura 4.a, se propone analizar el impacto que tendrán la introducción de los vehículos eléctricos en las redes eléctricas de los condominios con el análisis de las curvas de carga de los condominios sin la introducción de VEs y con la introducción de estos, generando con ellos nuevos datos para el análisis del comportamiento que tendrá la red bajo cierta penetración de VEs, así como las posibles afectaciones que se puedan generar para su respectivo análisis.

A partir de los datos generados con base en la penetración de los VEs en la red del condominio, se determinarán alternativas que permitan minimizar dicho impacto en la red del condominio por medio del esquema metodológico propuesto en la Figura

4.b. Sin embargo, para evaluar el esquema metodológico propuesto en la Figura 4.b, se proponen las rúbricas de evaluación mostradas en la Tabla 4 y Tabla 5, las cuales ayudarán a establecer criterios de evaluación asignándosele un valor numérico a cada criterio donde la propuesta más favorable tendrá una puntuación de (3) y la menos favorable una puntuación de (1), teniendo como valor intermedio una puntuación de (2).

Tabla 4. Rúbrica de evaluación para determinar el impacto técnico generado en cada propuesta de solución de carga de VEs.

Rúbrica	3	2	1
Gestión de la red	La propuesta genera una excelente gestión de la red	La propuesta es una alternativa viable a cierta escala de introducción de VEs.	La propuesta no es viable ya que no se ve mejora en las curvas de carga.
Tiempo de implementación	Solamente implica instalación.	Implica estudios de red. e instalación.	Implica estudios de red, instalación y evaluación del desempeño posterior.
Impacto económico	De acuerdo con el impacto ocasionado en la red, se analizará la inversión necesaria, con el fin de amortiguar los efectos ocasionados en el sistema eléctrico, de manera tal que la opción que requiera la menor inversión se le asignará una puntuación de 3 puntos y a la inversión más alta se le asignará un puntaje de 1, asignándosele proporcionalmente a las opciones intermedias mediante interpolación.		

Tabla 5. Rúbrica de evaluación para determinar el impacto al usuario generado en cada propuesta de solución de carga de VEs.

Rúbrica	3	2	1
Hábitos de carga	La propuesta contempla los hábitos.	-	No contempla los hábitos de carga.
Métodos de cobro	No necesita un sistema de cobro adicional.	Se puede adaptar al sistema de cobro de las compañías distribuidoras.	Necesita un sistema de cobro interno.
Costo del sistema	De acuerdo con las soluciones planteadas, se analizará el costo total del sistema instalado, de acuerdo con la información disponible en el mercado, en donde se le asignará a la opción más barata una puntuación de 3 puntos, y a la más costosa una calificación de 1 punto, asignándosele proporcionalmente puntaje a las propuestas intermedias.		

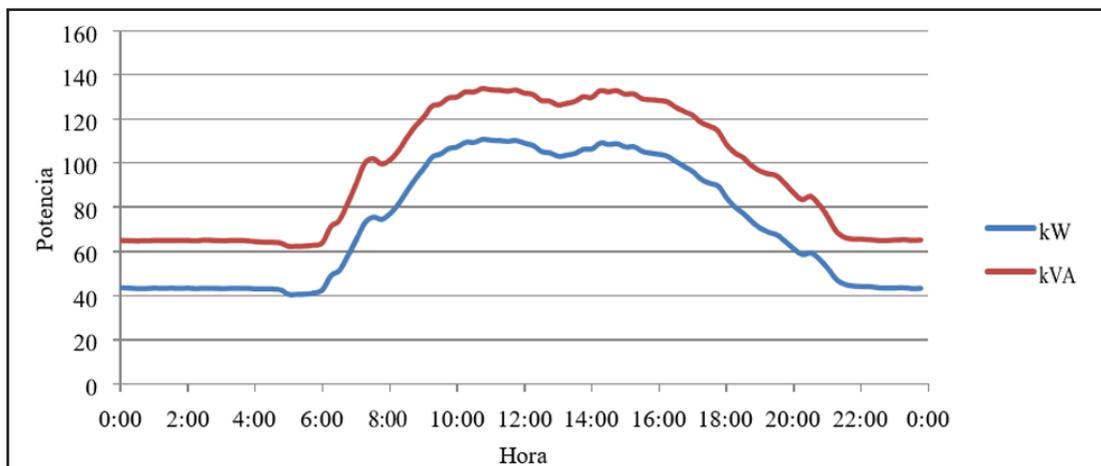
A partir de las rúbricas mostradas en la Tabla 4 y Tabla 5, se propone someter cada propuesta de solución descrita en el presente artículo a una evaluación, con el objetivo de determinar cuál es la solución óptima para su implementación.

3. Resultados

3.1. Obtención de la curva de carga del condominio

Mediante información suministrada por la CNFL de un condominio vertical, se generó la curva de carga representativa para un transformador de pedestal de 250 kVA que suple de energía a 119 casas. Como se observa en la Figura 5, la curva de carga presenta un consumo relativamente constante de 65 kVA a lo largo de la noche y madrugada. Este consumo puede ser generado por la iluminación del condominio, así como cargas misceláneas como bombas de recirculación de piscinas, entre otras. Sin embargo, se observan dos grandes picos de consumo durante el día, comenzado a las 9:00 a.m. y terminando a las 6:00 p.m.

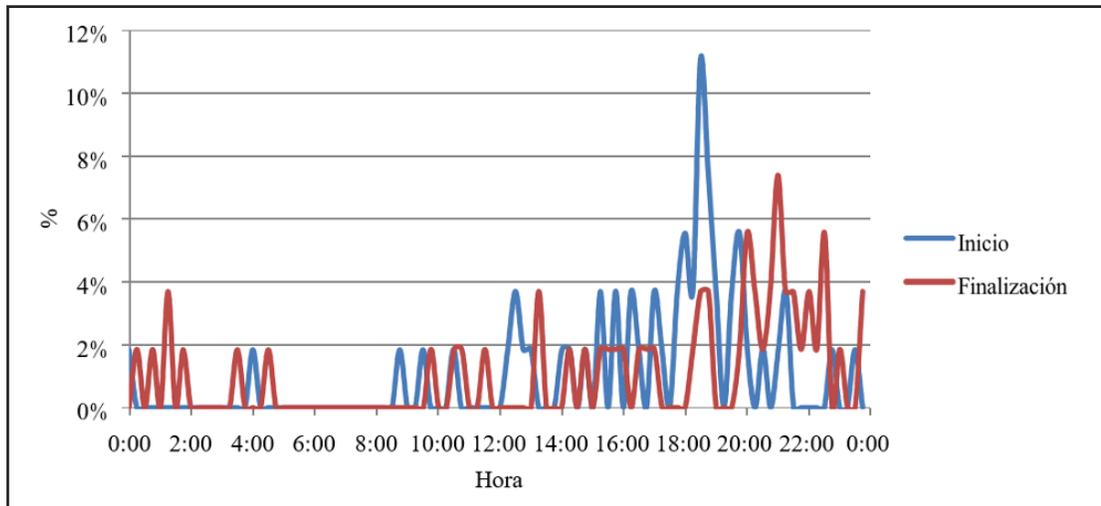
Figura 5. Curva de carga de un transformador de pedestal de un condominio vertical



Fuente: (CNFL, 2021).

Para obtener la distribución de probabilidad de inicio y fin de carga, se realizó un análisis de estaciones de carga semirápidas. De este modo, se puede estimar el patrón de consumo que tienen los usuarios de VEs, con el objetivo de analizar bajo qué horas de consumo el pico de demanda de vehículos eléctricos pueda ser mayor. Como se observa en la Figura 6, la densidad de probabilidad de que un usuario cargue su vehículo se centra después de las 4:00 pm, resultados consistentes con la hora de llegada al hogar planteada en la Figura 2. Así mismo, la probabilidad de que el proceso de carga de un vehículo eléctrico finalice se concentra después de las 6 p.m. hasta las 2 a.m. Sin embargo, los principales picos se observan desde las 8 p.m. hasta las 10:30 p.m.

Figura 6. Duración de tiempos de Carga de Vehículos Eléctricos



Fuente: (ELCO, 2021).

Considerando los resultados anteriores, es posible determinar las probabilidades de carga y sumarlas a la curva de carga del condominio presentada en la Figura 5. Considerando una carga de tipo 2, según lo mostrado en la Tabla 3, se utilizará una potencia de 7.2 kW con un factor de potencia de 0.99 (Ficosa, 2021). De este modo, se buscará estudiar cuántos vehículos eléctricos conectados simultáneamente se necesitan para que exista una afectación en el transformador del condominio, considerando un vehículo por apartamento como máximo. Teniendo en cuenta que la potencia del transformador es de 250 kVA y la potencia de los cargadores es de 7.2 kVA, la cantidad máxima de cargadores simultáneos necesarios para alcanzar el 80 % de la carga del transformador a las 6:00 p.m. es 13, lo que representa una penetración del 11 % en el condominio. Nótese que el problema en la carga de VEs no radica en la duración de la carga, sino en la potencia consumida de forma simultánea por varios vehículos eléctricos. Sin embargo, la duración de la carga toma relevancia en aquellos casos donde los vehículos son conectados a la red en cargas aleatorias, donde los usuarios conectan los VEs de acuerdo con sus necesidades, provocando una saturación de la red.

Estrategias de minimización del impacto del proceso de carga

Con la implementación de tarifas horarias se busca trasladar el consumo de los usuarios de los periodos punta a los periodos valle o nocturno, siendo el periodo nocturno a destacar en el presente estudio de alternativas carga de vehículos eléctricos. Un comportamiento constante desde las 10:00 p.m. hasta las 6:00 a.m. de aproximadamente 65 kVA permitiendo con esto poder trasladar la carga de vehículos eléctricos a dicha franja horaria, aumentando la penetración a un 16 % (19 VE cargando simultáneamente). Esta estrategia permite obtener un beneficio económico, así como impactar lo menos posible la red eléctrica del condominio.

Las energías renovables surgen como alternativa de carga cero emisiones en vehículos eléctricos, permitiendo durante el día poder cargar un vehículo eléctrico mediante paneles solares o bien generadores eólicos de acuerdo con las condiciones climáticas donde se ubique dicho condominio. Sin embargo, durante la noche donde no hay energía solar para ser aprovechada surge la necesidad de tener un sistema que almacene cierta cantidad de energía.

Los sistemas inteligentes que gestionen la carga de vehículos eléctricos permiten optimizar el uso de la red eléctrica, así como los recursos de los condominios, de modo que los VE se cargan tanto simultáneamente como de forma consecutiva. Tomando como base el pico de consumo a las 6:00 p.m., se tiene capacidad de carga de 13 VE simultáneamente, que puede distribuirse a lo largo del periodo nocturno, donde se pueden obtener tarifas más económicas y en tal caso optimizar la red. Para el caso mostrado se considera que los usuarios no cargan sus VEs todos los días, sino una vez que la batería alcance el 60 % de carga, el tiempo promedio, basado en capacidades mostradas en la Tabla 2, y una potencia de 7.2 kW del cargador, es aproximadamente 2 horas y 15 minutos. Así, pueden formarse 4 grupos de vehículos eléctricos que cargarían de forma consecutiva. De esta forma logrando con dicho sistema poder cargar un total de 76 vehículos eléctricos lo que significa una penetración de un 64 %.

4. Discusión

4.1. Estrategias de minimización del impacto del proceso de carga

Al evaluar la gestión de la red usando tarifas horarias se determina que dicha propuesta es capaz de generar una buena gestión de la red, aumentando el porcentaje de penetración de VEs pero bajo un límite de un 16 % de VEs cargando simultáneamente. A partir de lo anterior se le asigna una puntuación de (2) según la rúbrica de la Tabla 4. Así mismo, esta alternativa no requiere instalar ningún equipo ni dispositivo, por lo tanto, se asigna a este rubro una puntuación de (3) siendo el mejor escenario. No obstante, implica un impacto económico considerable, ya que, al no tener control de la carga de vehículos eléctricos, la carga puede sobrepasar la capacidad del transformador. Por tanto, esto puede conllevar a futuro reemplazos acelerados en el transformador, conductores y protecciones. Por lo tanto, dicha propuesta de solución se le asigna una puntuación de (1).

En cuanto al uso de energías renovables, se considera que la misma no genera una gestión de la red aceptable, ya que, por sí misma, no aumenta el porcentaje de penetración de VEs al caso base. En cambio, necesita un sistema de almacenamiento de energía para que el sistema se vuelva viable. Debido a lo anterior se le asigna una puntuación de (1). El tiempo de implementación para esta propuesta requiere análisis de carga para determinar la capacidad del sistema a instalar y cómo este sistema afectaría el sistema existente. Por tanto, la puntuación a asignar para este rubro será de (1). Por su parte, requiere inversiones adicionales considerables, asignándole a este rubro una puntuación de (1).

Por último, al analizar la carga inteligente se determina que esta genera una excelente gestión de la red, lográndose alcanzar la mayor penetración de VEs sin que la red se vea comprometida. Por tanto, a este rubro se le asigna una puntuación de (3). Al analizar el tiempo de implementación se determina que para implementar un sistema de estos se necesita primeramente conocer la curva de carga de ese condominio, con el objetivo de observar en que zonas horarias se tiene el menor consumo posible para colocar el consumo de VEs en dicha zona horaria. Debido a lo anterior, y a los estudios que conlleva se le asigna una puntuación de (2). El impacto económico que pueda generar para la red va a ser bajo debido a que no requiere refuerzos de red para soportar la carga de VEs, sino más bien por medio del sistema inteligente, se gestionara las cargas de acuerdo con la capacidad de la red logrando que nunca se sobrepase la capacidad de la red, maximizando su uso. Por tanto, a este rubro se le asigna una puntuación de (3). Un resumen de los resultados puede verse en la Tabla 6.

Tabla 6. Rúbrica de evaluación para determinar el impacto técnico generado en cada propuesta de solución de carga de VEs.

Rúbrica	Tarifas horarias	Energías renovables	Carga inteligente
Gestión de la red	2	1	3
Tiempo de implementación	3	1	2
Impacto económico	1	1	3
Total	6	3	8

4.2. Estrategias de minimización del impacto del proceso de carga para el usuario

El uso de tarifas horarias no contempla los hábitos de carga de los usuarios, debido a que esta propuesta de solución solo busca trasladar la carga de vehículos eléctricos para el período nocturno. Por tanto, se le asigna una puntuación de (1). Además, de utilizarse una estación de carga que no se encuentre directamente en la vivienda del usuario, se necesita un sistema de cobro debido a que dicha propuesta utilizará como fuente de energía lo entregado por la compañía distribuidora. Cabe mencionar que según el decreto ejecutivo 41642, se establece que solo debe existir una única plataforma pública que gestione los cobros por cargas de vehículos eléctricos a nivel de estaciones de carga públicas. Sin embargo, al no existir una tarifa para la carga semirápida, las compañías distribuidoras se ven limitadas de poder integrar esas estaciones de carga semirápidas localizadas en condominios a sus sistemas de cobro internos, razón por la cual la compañía cobrará la energía total al condominio y el mismo se debe de encargar de cobrarla a los usuarios de VEs, razón por la cual se le asigna una puntuación de (1). No obstante, la implementación del sistema puede resolverse de forma administrativa a lo interno de la regulación del condominio, de modo que existen alternativas de bajo costo por lo cual se le asigna una puntuación de (3).

El acople de estrategias de energías renovables a los cargadores no considera patrones de uso, al igual que el uso de tarifas horarias, por la cual se le asigna una puntuación de (1). Al contemplar los métodos de cobro esta estrategia es la más compleja ya que presenta flujos multi-direccionales de energía entre la fuente de energía renovable, el VE y la red (y la batería, en caso de que se incluya). Debido a lo anterior, el sistema planteado necesita de un sistema de cobro interno donde determine la energía consumida por los usuarios asignándole una puntuación de (1). Según información ELCO (2021), un sistema solar con una capacidad solar instalada de 3.6 kW, un banco de baterías de 17.3 kWh y un inversor de 6 kW tiene un costo promedio que ronda los \$8500, razón por la cual al ser una opción costosa se le asigna una puntuación de (1).

La carga inteligente de VE basa su modo de operación en los datos de uso de los usuarios, así como el estado de demanda de la red interna del condominio. De este modo, los algoritmos permiten hacer proyecciones, así como planificar la carga diaria, por tanto, la puntuación a asignar a este rubro es de (3). No obstante, este método requiere de un método de cobro, asignándosele a este rubro una puntuación de (1). Por último, al contemplar el costo de este sistema, según ELCO (2021) por ejemplo, un sistema de carga inteligente para cinco usuarios tiene un costo de \$2500, razón por la cual el costo unitario ronda los \$500. Aplicándose esta metodología paulatinamente resulta un costo intermedio entre las energías renovables y las tarifas horarias asignándole una puntuación de (2). Un resumen de los resultados puede verse en la Tabla 7.

Tabla 7. Rúbrica de evaluación para determinar el impacto al usuario generado en cada propuesta de solución de carga de VEs.

Rúbrica	Tarifas horarias	Energías renovables	Carga inteligente
Hábitos de carga	1	1	3
Métodos de cobro	1	1	1
Costo del sistema	3	1	2
Total	5	3	6

5. Conclusiones

Teniendo en cuenta los resultados mostrados, es posible concluir que:

1. La introducción de vehículos eléctricos de manera rápida y desordenada provocará cambios en la red, incluyendo el disparo de protecciones, calentamiento de conductores, así como posibles fallos en transformadores por sobrecarga, producto de un aumento no planificado de demanda.
2. Con la introducción de los vehículos eléctricos en las redes de los condominios, se demuestra que fácilmente se puede sobrepasar el 80 % de la capacidad de diseño de la red, siendo inminentes los problemas en media y baja tensión. Esto conlleva que los condominios tengan que mejorar su red eléctrica a un costo muy elevado, o bien, implementar sistemas inteligentes capaces de gestionar la red con el objetivo de optimizarla.
3. Se determina que el problema en la carga de VEs no radica en la duración de la carga, sino en la potencia consumida de forma simultánea por varios vehículos eléctricos. Sin embargo, la duración de la carga toma relevancia en aquellos casos donde los vehículos son conectados a la red en cargas aleatorias, donde los usuarios conectan los VEs de acuerdo con sus necesidades, provocando una saturación de la red.
4. El caso de estudio analizado en la presente investigación, demuestra una afectación en la red eléctrica del condominio con una penetración de vehículos eléctricos del 11 % a las 6 p.m., lo cual equivale a 13 vehículos eléctricos conectados simultáneamente. Lo anterior sucederá en aquellos casos donde los usuarios conecten los VEs al llegar a sus hogares, sin embargo, se puede aumentar la cantidad de VEs conectados bajo otras propuestas de solución como lo es las tarifas horarias donde se logra un 16 % de penetración de vehículos eléctricos lo cual equivale a 19 VEs cargando simultáneamente siempre y cuando la carga inicie después de las 11:00 p.m.
5. Se determina que no se necesita alto porcentaje de penetración de vehículos eléctricos para encontrar una afectación en la red, dependerá de la hora a la cual los vehículos eléctricos se conecten en la red, así como la simultaneidad en la carga, así como método de carga empleado.
6. Se determina que no se necesita alto porcentaje de penetración de vehículos eléctricos para encontrar una afectación en la red, dependerá de la hora a la cual los vehículos eléctricos se conecten en la red, así como la simultaneidad en la carga y el método de carga empleado.
7. La opción más viable a bajo porcentaje de penetración de vehículos eléctricos destaca la propuesta de tarifas horarias, logrando trasladar el consumo de los usuarios a la franja horaria nocturna donde el consumo del condominio es menor, buscando aplanar la curva de carga. Esto permitirá aumentar la cantidad de vehículos cargando a un 16 % de penetración lo cual equivale a 19 VEs, logrando cargar 6 vehículos más que si se cargarán a las 6 p.m. Sin embargo, implementando dicha propuesta de solución a un alto porcentaje de penetración de vehículos eléctricos, puede provocar problemas de simultaneidad en la red, ocasionando el disparo de protecciones.
8. La implementación de energías renovables en condominios no se presenta como una propuesta de solución viable, debido al alto costo del sistema versus el impacto positivo que pueda generar en la red.
9. Se determina que la mejor propuesta de solución la carga inteligente, la cual permite gestionar la carga de vehículos eléctricos con la opción de monitorear y optimizar la red, minimizando el impacto técnico y al usuario.

Adicionalmente, se recomienda:

1. Recopilar los perfiles de carga en etapas de poca penetración de vehículos eléctricos con el objetivo de realizar proyecciones de factor de uso de estaciones de carga y poder simular curvas de carga con diferentes escenarios para la toma final de decisiones.
2. Se debe estudiar acerca de los armónicos que puedan inyectar los vehículos eléctricos en las redes eléctricas de los condominios, ya que, a gran penetración de vehículos eléctricos, se pueden presentar problemas en las redes de baja tensión.
3. Se recomienda incluir a las compañías distribuidoras para buscar una regulación en este campo, en donde las mismas puedan instalar estaciones de carga semirápidas en condominios y puedan cobrar directamente la energía consumida a los usuarios.
4. Es importante desarrollar estudios para crear estrategias de carga de VEs, sin embargo, es de suma importancia crear simulaciones con el objetivo de analizar los desequilibrios en la red, la degradación y fallo de los transformadores y el fallo de protecciones. Esto podrá ayudar a la toma de decisiones ya que los vehículos eléctricos representan una nueva carga que hasta el momento no se sabe el comportamiento que tendrá a gran escala en las redes eléctricas de media y baja tensión.

6. Referencias

- Albendea, A. (2011). Estrategias de control para integración de vehículos eléctricos en la red de distribución (Proyecto Fin de Carrera, Universidad Carlos III de Madrid). Recuperado de: <https://e-archivo.uc3m.es/handle/10016/11616#preview>
- Alpizar-Castillo, J., Ramirez-Elizondo, L., & Bauer, P. (2022). Assessing the Role of Energy Storage in Multiple Energy Carriers toward Providing Ancillary Services: A Review. *Energies*, 16(1), 379. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/en16010379>
- Araya, G. (2018). Introducción de Vehículos Eléctricos de uso particular en Costa Rica: costo total de posesión e impacto en la red eléctrica de distribución. Recuperado el 7 de agosto del 2020, de UCR. Sitio web: <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/handle/123456789/5812>
- Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica (2018). Ley No. 9518. Ley de Incentivos y Promoción para el Transporte Eléctrico, Recuperado de http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?nValor1=1&nValor2=85810
- Asamblea Legislativa de la República de Costa Rica (2019). Reglamento para la construcción y el funcionamiento de la red de centros de recarga eléctrica para automóviles eléctricos por parte de las empresas distribuidoras de energía eléctrica N° 41642-MINAE, Recuperado de http://www.pgrweb.go.cr/scij/Busqueda/Normativa/Normas/nrm_texto_completo.aspx?param1=NRTC&nValor1=1&nValor2=89191&nValor3=116987&strTipM=TC
- Bayram, I. S., & Tajer, A. (2017). *Plug-in Electric Vehicle Grid Integration*. Artech House.
- Bazurto Cubillos, Á. J., Zúñiga Balanta, J., Echeverry, D. F., & Lozano, C. A. (2016). Perspectiva Del Transformador De Distribución en Redes Eléctricas Con Alta Penetración De Generación Distribuida Y Vehículos Eléctricos. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, 26(2), 35–48. <https://doi.org/10.18359/rcin.1710>
- Blanco, A. (2020). Vehículos eléctricos en Costa Rica. Recuperado el 8 de agosto del 2020, de MINAE Sitio web: <https://web.energia.go.cr/2020/06/09/movilidadelectrica-costarica/>
- Brenes, R. (2016). Ubicación y dimensionamiento de estaciones de recarga rápida de vehículos eléctricos en redes de distribución utilizando información GIS. Recuperado de <http://www.inii2.ucr.ac.cr/RIINII/pdf/IE/IE-7882.pdf>
- Caicedo, J., Mamani, M., López, S., Romero, A., Zini, H & Rattá, G. (2014). Impactos de la Conexión de Vehículos Eléctricos en Sistemas de Potencia. Recuperado el 29 de setiembre del 2020, de IEEE Sitio web: https://www.researchgate.net/publication/271456373_Impactos_de_la_conexion_de_vehiculos_electricos_en_sistemas_de_potencia_-_revision_literaria
- Calvo, R, J. (2019). Estudio de factibilidad, basado en el análisis de ciclo de vida, de un sistema de energía renovable para alimentar un punto de carga para recargar la batería de vehículos eléctricos en diferentes comercios de la zona de Monteverde (Tesis de Licenciatura). Instituto Tecnológico de Costa Rica, Cartago Costa Rica.
- Castro, L., Pereira, J., Castro, R., Moya, I. & Ramírez, F. (2007). Informe Final: Tomo I Modelo de demanda y oferta de transporte urbano en la GAM de Costa Rica. Recuperado de: <http://repositorio.sibdi.ucr.ac.cr:8080/jspui/bitstream/123456789/5812/1/43548.pdf>
- Chen, J., Zhang, Y., Li, X., Sun, B., Liao, Q., Tao, Y., & Wang, Z. (2020). Strategic integration of vehicle-to-home system with home distributed photovoltaic power generation in Shanghai. *Applied Energy*, 263, 114603. Doi:10.1016/j.apenergy.2020.114603
- Escuela de Ingeniería Eléctrica, UCR. (2019). Digitalización como herramienta de estudio de integración de los vehículos eléctricos en las redes de distribución y propuestas de reutilización de baterías–Informe Final. Recuperado de https://sepse.go.cr/documentos/InformeFinal_VE_Bater%C3%ADas_Digitalizaci%C3%B3n_v01.pdf
- Expósito, A. G., & Ortega, J. M. M. (2019). Sistema de recarga de vehículos eléctricos: revisión tecnológica e impacto en el sistema eléctrico. *Revista Economía Industrial*, (411), 35-44.
- Ficosa. (2021). Cargador a bordo AC / DC (potencia de 3,6 kW hasta 22 kW). Sitio web: <https://www.ficosa.com/es/productos/electromovilidad/bms-sistema-degestion-de-la-bateria/>
- Frías, P., Mateo, C. & Pérez, J. (2011). Evaluación del impacto de la integración del coche eléctrico en las redes de distribución de energía eléctrica. *Lychnos*, 06, 90. Recuperado el 27 de setiembre del 2020, De Fundación general CSIC Base de datos.
- García, F., Alonso, F. & Juárez, J. (2009). Guía del Vehículo eléctrico. Fundación de la Energía. Recuperado el 26 de setiembre del 2020 de <https://www.icmm.csic.es/es/divulgacion/documentos/Guia-del-Vehiculo-Elctrico-2009-fenercom.pdf?id=127>

- Giraldo, G. (2015). Estudio Del Impacto De Los Vehículos Eléctricos En Las Redes De Distribución De Energía Eléctrica (Tesis de grado). Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira Colombia.
- Global EV Outlook. (2019). Scaling up the transition to electric mobility, Sitio web: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2019>
- Gobierno de Costa Rica (2018). Plan de Descarbonización, Sitio web: <https://minae.go.cr/images/pdf/Plande-Descarbonizacion-1.pdf>
- Gómez, A, V., Hernández, C. & Rivas, E. (abril, 2018). Visión General, Características y Funcionalidad Eléctrica Inteligente (Smart Grid). Scielo, 29(90-91). DOI: <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642018000200089>
- Gómez, J. (2003). Impact of EV Battery Chargers on the Power Quality of Distribution Systems. Recuperado el 30 de setiembre del 2020, de IEEE Sitio web: <https://ieeexplore.ieee.org/document/1208386>
- Gómez, J., González, L., Vide, P., & Gameiro, N. (2017). Impacto de las estaciones de carga para vehículo eléctrico en la curva de carga de la Ciudad de Cuenca. Maskana, 8(1), pp. 239-246. Recuperado a partir de <https://publicaciones.ucuenca.edu.ec/ojs/index.php/maskana/article/view/1983>
- INTECO (2020). Norma N121:2020, Infraestructura de centros de recarga para vehículos eléctricos (VE). Requisitos.
- Mena, B. y Collaguazo, F. (2018). Integración de vehículos eléctricos en las redes modernas de energía (ResearchGate). Recuperado de https://www.researchgate.net/publication/331247275_Integracion_de_VE_en_las_Redес_electricas_modernas
- Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). (2015). VII Plan Nacional de Energía 2015-2030. Recuperado de: https://www.cambioclimatico.go.cr/wp-content/uploads/2018/08/VII_Plan_Nacional_de_Energia_2015-2030.pdf
- Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). (2019). Plan Nacional de Transporte Eléctrico 2018-2030. Recuperado de: <https://www.sepse.go.cr/documentos/PlanTranspElect.pdf>
- Ministerio de Ambiente y Energía (MINAE). (2023). Vehículos eléctricos en Costa Rica. Recuperado de: <https://energia.minae.go.cr/?p=5634>
- Pieltain, L., Gómez, T., Cossent, R., Domingo, C & Frías, P. (2011). Assessment of the Impact of Plug-in Electric Vehicles on Distribution Networks. Recuperado el 2 de octubre del 2020, de IEEE Sitio web: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5471115>
- Programa Estado de la Nación (2019). Informe Estado de la Nación 2019. Recuperado de: https://estadonacion.or.cr/wp-content/uploads/2019/11/informe_estado_nacion_2019.pdf
- Programa Estado de la Nación (2020). Estado de la Nación 2020. Recuperado de: <https://estadonacion.or.cr/informe/?id=2c63d393-6c6d-4a24-bfa0-a3facd5d0afb>
- RITEVE (2018). Anuario Revisión Técnica Vehicular. Recuperado de: <https://www.rtv.co.cr/wp-content/uploads/AnuarioRiteve2018.pdf>
- Salas, V. (2018). Creciente construcción de condominios y apartamentos en el Gran Área Metropolitana. Recuperado el 18 de setiembre del 2020, de Radioemisoras UCR Sitio web: <https://radioemisorasucr.atavist.com/crecienteconstruccion-de-condominios-y-apartamentos-en-el-gran-rea-metropolitana>
- Vargas, J. (2012). Conversión a auto eléctrico basada en un accionamiento trifásico: diseño, modelación e implementación (Tesis grado). Universidad de Chile, Santiago Chile