

Restricciones técnicas a considerar en el dimensionamiento y ubicación de estaciones de recarga para vehículos eléctricos en una red de distribución local en el contexto colombiano

Wilmer Enrique Rangel Rodríguez

Jhonny Andrés Turizo Garizado

Monografía presentada como requisito para optar al título de Especialista en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica

Director:

Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga

Dr. En Tecnología

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas

Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones

Especialización en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica

Bucaramanga

2023

Contenido

	Pág.
Introducción	6
1. Normas para el dimensionamiento y ubicación de estaciones de recargas para vehículos eléctricos	8
1.1 Normatividad colombiana para la construcción de estaciones de recarga.....	12
1.1.1 Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas. RETIE 2013, Artículo 20.7.	12
1.1.2 Norma Técnica Colombiana. NTC 2050, sección 511 y 625.	12
1.1.3 Norma técnica EPM capitulo EPM RA8-031.....	13
1.1.4 Lineamientos UPME sobre Infraestructura de recarga para la movilidad eléctrica en Colombia.....	13
1.2 Características de las estaciones de recarga que se están desarrollando en Colombia.	14
1.2.1 Parqueadero de vivienda unifamiliar.	14
1.2.2 Edificaciones de propiedad horizontal con medida centralizada.	15
1.2.3 Edificaciones de propiedad horizontal con medida descentralizada.....	15
1.2.4 Instalación de estaciones de recarga pública para vehículos eléctricos.	16
2. Métodos para el dimensionamiento para estaciones de recarga	17
3. Métodos de ubicación de una estación de recarga	25
4. Conclusiones y recomendaciones	34
Referencias Bibliográficas	38

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1. Infraestructuras de recarga para vehículo eléctrico.	14
Tabla 2. Resumen artículos de dimensionamiento	17
Tabla 3. Resumen de artículos Ubicación.....	25

Resumen

Título: Restricciones técnicas a considerar en el dimensionamiento y ubicación de estaciones de recarga para vehículos eléctricos en una red de distribución local en el contexto colombiano*.

Autores: Wilmer Enrique Rangel Rodríguez y Jhonny Andrés Turizo Garizado**

Palabras Clave: Vehículos eléctricos, estaciones de recargas.

Descripción:

La implementación masiva de los vehículos eléctricos a Colombia tiene grandes barreras a vencer y una de ellas radica en las capacidades limitadas del sistema de distribución local, debido a que la infraestructura eléctrica no está diseñada para abastecer a gran escala la demanda de los vehículos eléctricos. Por tanto, los operadores de red e inversionistas asociados deberán gestionar y planificar los sistemas de distribución identificando los puntos estratégicos donde se ubicarán las estaciones de recarga y dimensionándolas apropiadamente en función de factores, técnicos, económicos, sociales, normativos y ambientales que posibiliten la implementación adecuada de esta nueva tecnología, la cual es una gran apuesta en la lucha contra el calentamiento global.

Esta monografía se enfoca en documentar las restricciones técnicas a considerar en un escenario de dimensionamiento y ubicación de estaciones de recarga para vehículos eléctricos dentro de una red de distribución local. Se revisa inicialmente la normativa existente tanto a nivel nacional como algunos referentes internacionales sobre dimensionamiento y ubicación de las estaciones de recarga. A si mismo se identifican distintos métodos para dimensionar la capacidad de una estación de recarga, así como métodos para estimar la ubicación óptima de una estación de recarga. Por último, se hace un análisis conjunto de los métodos identificados y las normas revisadas, para formular recomendaciones aplicables para el desarrollo y expansión de las redes de distribución eléctrica en el entorno local considerando un escenario de alta penetración del vehículo eléctrico.

* Monografía

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Especialización en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica Director: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga Dr. En Tecnología

Summary

Title: Technical restrictions to be considered in the dimensioning and location of charging stations for electric vehicles in a local distribution network in the colombian context. *

Authors: Wilmer Enrique Rangel Rodríguez y Jhonny Andrés Turizo Garizado**

Keywords: Electric vehicles, charging stations.

Description:

Several obstacles stand in the way of Colombia's widespread adoption of electric vehicles. One is the local distribution system's constrained capacity because the country's electrical infrastructure was not built to meet the demand for such vehicles on a broad scale. As a result, network operators and associated investors must manage and plan distribution systems, identifying strategic points where storage facilities will be located and appropriately dimensioning them in light of technical, economic, social, regulatory, and environmental factors that enable appropriate implementation of this new technology. The aspects mentioned earlier make this option potentially significant in the global fight against global warming.

This monograph focuses on documenting the technical constraints to be considered in dimensioning and locating charging stations for electric vehicles within a local distribution network. Initially, the existing national and some international standards on the dimensioning and location of refueling stations are being reviewed. There are various methods for measuring the capacity of a storage facility, in addition to methods for estimating the optimal location of a storage facility. Finally, a comprehensive analysis of the identified methods and revised standards is performed to formulate recommendations for developing and expanding electric distribution networks in the local environment, considering the high penetration of electric vehicles.

* Monography

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Eléctrica, Electrónica y de Telecomunicaciones. Especialización en Sistemas de Distribución de Energía Eléctrica Director: Oscar Arnulfo Quiroga Quiroga Dr. En Tecnología

Introducción

Uno de los mayores contaminantes y que aportan altas cantidades de CO₂ a la atmosfera son los automotores de combustión interna, los cuales solo en América Latina y el Caribe aportan más del 20% del total de las emisiones. Dada esta problemática, se han impulsado diferentes políticas públicas sobre el tema, pero desafortunadamente, el transporte es uno de los sectores en el mundo donde las emisiones de gases de efecto invernadero todavía están en crecimiento (Greepeace, 2018).

Globalmente aun predomina la adopción del vehículo a combustión interna, esto debido a los altos precios de los vehículos eléctricos, la baja implementación de infraestructuras de recarga, el elevado costo de la batería de reemplazo y la limitación de autonomía que estos vehículos poseen. En Colombia se estableció la Ley 1964 de 2019 (Ley 1964, 2019), la cual fue la primera en imponer y regular el uso de la implementación de vehículos eléctricos en el país, con el fin de aportar en la movilidad sostenible y la reducción de gases contaminantes al medio ambiente. Esta ley establece descuentos en los impuestos de los vehículos eléctricos, reducción en las tarifas de la revisión técnico-mecánica y seguro obligatorio, descuentos en la tarifa de parqueo y excepción de las restricciones vehiculares como pico y placa y día sin carro. A partir de acá, se involucra de forma directa e indirecta a entidades públicas y privadas para el desarrollo de infraestructuras de estaciones de recarga, por tanto, la ley garantiza que exista por lo menos 5 estaciones de recarga en condiciones funcionales dentro de los 3 años siguientes de entrada en vigencia de la misma (2019). También establece unas disposiciones urbanísticas en cabeza de las autoridades de planeación de los municipios de categoría especial, e impone una serie de lineamientos técnicos

que garanticen que toda edificación nueva residencial y comercial cuenten con las condiciones adecuadas para tener instalado un punto de recarga para vehículos eléctricos (Ley 1964, 2019).

Con base en la ley (Ley 1964, 2019), es indispensable acondicionar el sistema de distribución local para suplir eficientemente las necesidades que el consumidor del vehículo eléctrico demandara, por tal motivo, estos puntos de recarga deberán dimensionarse y ubicarse convenientemente, siguiendo criterios técnicos, sociales y económicos que den viabilidad al uso masivo del vehículo eléctrico. Una acertada planificación permite reducir costos, tanto para el operador de red (OR) como para empresas privadas responsables de la infraestructura a implementar, manteniendo los estándares normativos y técnicos que la red de distribución necesite para salvaguardar la vida útil de los elementos que componen las estaciones de recarga y el sistema de distribución. Hay que destacar que cuando el diseño implementado es inapropiado, este puede llegar a generar sobrecargas en la red de distribución, pérdidas por regulación, aumento de los problemas técnicos y reducción de la confiabilidad de la red de distribución (Narvaez Enriquez, 2019).

Para esta monografía se propone como objetivo general el de identificar las restricciones técnicas para el dimensionamiento y ubicación de electrolineras en una red de distribución local en el contexto colombiano.

Como objetivos específicos se espera:

- Documentar y revisar la normativa vigente alrededor del dimensionamiento y ubicación de la infraestructura de las estaciones de recarga.
- Describir los principales métodos para el dimensionamiento de las estaciones de recarga

- Describir los principales métodos para determinar la ubicación de las estaciones de recarga de vehículos eléctricos.
- Realizar recomendaciones sobre las restricciones y métodos aplicables para el dimensionamiento y ubicación de estaciones de recarga en el contexto colombiano

El documento está organizado de la siguiente manera: en el capítulo 2 se aborda el tema de la revisión de normas en torno a la temática, en el capítulo 3 se muestran algunos métodos propuestos para el dimensionamiento de las estaciones de recarga, en el capítulo 4 se describen métodos para la ubicación de las estaciones de recarga, en el capítulo 5 se plantean algunas recomendaciones para tener en cuenta en el caso colombiano y finalmente se cierra con las conclusiones y la bibliografía.

1. Normas para el dimensionamiento y ubicación de estaciones de recargas para vehículos eléctricos

Para determinar la ubicación óptima de las estaciones de recarga en escenarios de masificación del vehículo eléctrico existen algunas propuestas a nivel de investigación y recomendaciones que se han desarrollado para localidades específicas de un país o región. Sin embargo, en términos de normas establecidas, aún no existe una norma universalmente aceptada que especifique la ubicación óptima de las estaciones de carga para vehículos eléctricos.

No obstante, varios países han desarrollado estudios y guías para la planificación, diseño y despliegue de estaciones de carga para vehículos eléctricos. Por ejemplo, en España la consultora

Transport & Environment desarrollo en 2021 un estudio en donde señalan medidas para impulsar la adopción de la electromovilidad en carretera incluyendo vehículos eléctricos, motos, scooters, bicicletas, taxis, furgonetas y camiones (Ruíz Barrientos, Gámiz Martínez, Aspiazu Pérez, Román Calvo, & Sallent Bayo, 2021). En ese estudio también hacen una recopilación de las experiencias de otros países de Europa en el despliegue de infraestructura de recarga, resaltando los casos de Alemania, Portugal, Francia, Holanda e Italia.

En los Estados Unidos, el departamento de transporte que proporciona pautas para la planificación y la ubicación de estaciones de carga para vehículos eléctricos en todo el país (U.S. Department of Transportation, 2023). En su sitio web recopilan recursos y herramientas para la planificación e implementación de esa infraestructura. Los recursos están organizados por área temática y están etiquetados con el tipo de recurso, como calculadoras y software, conjuntos de datos y mapas, y orientación y referencia adicionales. Destacan las herramientas desarrolladas para planificar infraestructura de recarga en lugares de trabajo. Así mismo, el departamento de energía de los Estados Unidos ha financiado estudios para unificar lineamientos en cuanto a ubicación y diseño de infraestructura de recarga (Clean Cities, U.S. Department of Energy, 2012). Allí se ha considerado que la ubicación y la instalación de estaciones de recarga depende de varias consideraciones que incluyen: proximidad a la red eléctrica, tamaño y orientación del espacio de estacionamiento, tráfico de peatones, iluminación y visibilidad. Muchas de estas consideraciones aún no están estandarizadas en términos de funcionalidad, y otros quedan fuera del ámbito del sistema de normas y códigos, como lo es la estética.

Se puede indicar que cada instalación de recarga es en general diferente, por lo que esas pautas que se generan a nivel país buscan principalmente dar consideraciones de referencia

partiendo de instalaciones tipo para diferentes lugares como pueden ser, áreas urbanas densas, estacionamientos de centros comerciales y oficinas, y en las rutas de viaje principales.

Por su parte, en Colombia, la UPME publicó en el año 2019 la Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica (Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2019) en donde se propone un Mapa de ruta para la transición hacia vehículos de bajas y cero emisiones, con metas a corto, mediano y largo plazo. Allí se reconoce que el país tiene retos frente al desarrollo de infraestructura, planificación y ordenamiento territorial, destacando entre otras las siguientes necesidades:

- Desarrollo de infraestructura de carga pública y privada
- Ordenamiento territorial para la instalación de infraestructura de recarga asociada a la movilidad eléctrica.
- Modelos de negocio alrededor de la instalación y prestación de servicios en estaciones de carga, entre otros
- Definición de instrumentos técnicos, financieros y normativos para la instalación de la infraestructura requerida para la carga, y mecanismos suficientes que faciliten la entrada al mercado de estas tecnologías en segmentos como los taxis y la flota del sector oficial.

Como acciones puntuales a desarrollar, en esa hoja de ruta se plantean las siguientes:

- Formular los lineamientos técnicos necesarios para la seguridad, estandarización e interoperabilidad de los puntos de carga públicos y privados, a través de los instrumentos que se estimen convenientes, tanto en zonas urbanas como interurbanas. Responsables: Minenergía en coordinación con Mintransporte, Minvivienda y DNP.

- Revisar la infraestructura existente y la promoción de una infraestructura moderna que permita garantizar la oferta de energía destinada a la carga de vehículos eléctricos. Responsable: Minenergía, Prestadores de energía y Gobiernos locales.
- Desarrollar la red de puntos de carga con ubicaciones óptimas accesibles para el transporte público de pasajeros urbano e interurbano, de carga y particular. Responsable: Gobiernos locales articulados con operadores de red, estaciones de servicio, entre otros.
- Expedir la reglamentación necesaria para el desarrollo de la infraestructura de carga en las zonas residenciales y comerciales. Responsables: Minvivienda con el apoyo de las autoridades territoriales.
- Evaluar la ampliación de esta estrategia a los modos de transporte fluvial, cable y férreo, incluyendo su infraestructura. Responsable: Mintransporte con el apoyo de Minambiente, Minenergía, DNP, UPME y la academia.
- Incluir en sus planes de ordenamiento territorial y planes de movilidad, lineamientos y elementos normativos de infraestructura que permitan la promoción y desarrollo de la movilidad eléctrica en los territorios. Responsable: Gobiernos locales con el acompañamiento de Minvivienda y DNP.

Los puntos anteriores muestran que en Colombia tampoco hay una normativa consolidada para el desarrollo de la infraestructura de recarga en lo que corresponde al dimensionamiento y ubicación de las estaciones de recarga para vehículos eléctricos, pero si se ha desarrollado normativa para la construcción de esa infraestructura.

1.1 Normatividad colombiana para la construcción de estaciones de recarga.

En cuanto a normatividad técnica para la construcción de las instalaciones eléctricas de las estaciones de recarga, se destaca el RETIE, la NTC 2050 y normas de operadores de red como CELSIA o EPM, como se destaca a continuación:

1.1.1 Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas. RETIE 2013, Artículo 20.7.

Dentro del RETIE, en el artículo 20.7, se habla de los aspectos generales de los cargadores de baterías según el modo de recarga, esto acorde a lo especificado en la IEC 61851-1, se describen las características y condiciones del funcionamiento de cada uno de los métodos de carga, la conexión entre sistemas de recarga y red, los requisitos de seguridad que deben tener los elementos que componen la unidad de abastecimiento y lo requisitos de conformidad de productos para los equipos que componen los cargadores de batería.

1.1.2 Norma Técnica Colombiana. NTC 2050, sección 511 y 625.

En la NTC 2050 sección 511 y 625, describen la forma de cómo deben ser construidas las estaciones de recargas en un nivel de baja tensión, enfatizando en los métodos de alambrado, equipos, ubicación de los equipos de alimentación, control, protecciones y restricciones de los sistemas de carga de los vehículos eléctricos.

1.1.3 Norma técnica EPM capítulo EPM RA8-031.

La Norma Técnica EPM en el capítulo EPM RA8-031, establece los requisitos generales para instalar cargadores de baterías en diferentes modos de carga y en diferentes puntos de ubicación públicos y privados.

1.1.4 Lineamientos UPME sobre Infraestructura de recarga para la movilidad eléctrica en Colombia

La Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME) en 2019 lidero un proyecto para establecer lineamientos y condiciones para desarrollar la infraestructura de recarga para la movilidad eléctrica colombiana (Minergia, UPME, 2019). Dentro de este estudio se estableció una proyección de infraestructura de carga en Colombia en seis ciudades principales, donde se estimó que se debe contar con un cargador por cada 26 vehículos eléctricos si son con cargadores de 11 kW, un cargador de 22 kW por cada 56 vehículos y un cargador por cada 117 vehículos eléctricos, si los cargadores son de carga rápida a 50 kW. También se establece una infraestructura de recarga en vías nacionales, obteniendo del análisis en Colombia que la distancia máxima entre electrolinerías, en el peor de los casos, debe ser de 90 km.

De la misma propuesta se hace un análisis de del costo de la infraestructura de recarga, se estableció que el costo normal de una estación de recarga para vehículo eléctrico de carga rápida esta alrededor de 167 millones de pesos colombianos, con sistemas básicos de control y una infraestructura eléctrica de bajos requisitos. Y el costo de una electrolinería con funciones de

comunicación, control y con una red eléctrica de que requiera una buena inversión, puede estar alrededor de 250 millones de pesos colombianos.

1.2 Características de las estaciones de recarga que se están desarrollando en Colombia.

En Colombia se promueven principalmente tres tipos de recarga acorde con el lugar de la instalación de las estaciones (CELSIA, 2018):

Tabla 1.

Infraestructuras de recarga para vehículo eléctrico.

Lugar de recarga	Tipo de recarga
Viviendas o edificaciones	Lenta
Parqueaderos públicos y privados	Semi- Rápida
Electrolineras	Rápida

Nota. Tomado de: (CELSIA, 2018)

Los lineamientos para la construcción de estas estaciones acorde con la normatividad colombiana son los siguientes:

1.2.1 Parqueadero de vivienda unifamiliar.

En este tipo de propiedad se debe dejar un circuito exclusivo que vaya desde el tablero multibreaker hasta el lugar donde quede el parqueadero de la vivienda, y que cumpla con las protecciones y conductores apropiados, establecidos en el RETIE artículo 20.7 y NTC-2050 (EPM RA8-031, 2018)

1.2.2 Edificaciones de propiedad horizontal con medida centralizada.

En el caso de construcciones como lo son edificios residenciales, urbanizaciones, establecimientos comerciales o industriales, ubicados en propiedades horizontales y que cuenten con parqueaderos privados, deberá instalarse un circuito exclusivo por cada unidad de vivienda o comercio, alimentado desde el tablero de medida centralizada de la edificación, hasta la zona de parqueadero individual de cada vehículo. Y debe cumplir con los conductores y protecciones establecidos en el RETIE artículo 20.7 y NTC-2050 (ICONTEC, 1998). También es posible facilitar la conexión de los equipos de suministros para vehículos eléctricos, dejando en el tablero de medida, protecciones de reserva para la movilidad eléctrica, las cuales deben concordar con la cantidad de vivienda o parqueaderos. De la misma forma, es posible dejar un tablero multibreaker con las protecciones disponibles de acuerdo al número de viviendas, y este tablero se debe alojar dentro de la subestación eléctrica o en un cuarto técnico disponible. Se considera un factor de 15% de la capacidad instalada para la carga de los suministros de movilidad eléctrica. (EPM RA8-031, 2018)

1.2.3 Edificaciones de propiedad horizontal con medida descentralizada.

En este tipo de edificación donde cuente con un tipo de medida descentralizada, no se puede instalar un circuito exclusivo directamente desde el tablero multibreaker de cada vivienda, debido a las distancias que existen entre el la unidad de vivienda y la medida asociado. Por consiguiente, se debe emplear alimentadores o electroductos desde el Tablero General de Alimentadores (TGA), hacia cada tablero de medidores ubicado en los niveles de parqueadero.

También es necesario contar con un espacio disponible en los niveles de parqueaderos para la instalación del tablero de medidores asociado a cada suministro de carga. Es opcional también la instalación de un sistema de medida centralizada, y este tablero se debe alojar dentro de la subestación eléctrica o en un cuarto técnico disponible. Se considera un factor de 15% de la capacidad instalada para la carga de los suministros de movilidad eléctrica. (EPM RA8-031, 2018)

1.2.4 Instalación de estaciones de recarga pública para vehículos eléctricos.

Este tipo de suministros de recargas para vehículos eléctricos se establecen en los espacios de cargas publica internas, en centros comerciales, y estaciones de recargas públicas externas como lo son parqueaderos públicos o electrolinerías. Generalmente el servicio de recarga para vehículos eléctricos públicos son tipos de cargas semi-rápida o rápidas. (EPM RA8-031, 2018)

De acuerdo a las características del tipo de carga, y a las diferentes opciones donde puede ser instalado un sistema de recarga público, es necesario asignar un punto de conexión y un transformador exclusivo, con la capacidad de potencia necesaria que requiere el equipo de recarga. Es importante mencionar que para una carga publica en AC, los puntos de carga se establecen desde los 7,2 kVA hasta los 43 kVA, y tensiones de 208-240V o 400V trifásica. Para los puntos de carga de tipo DC por lo general se establece una carga de 50kVA y una tensión de 400V trifásica.

2. Métodos para el dimensionamiento para estaciones de recarga

El dimensionamiento de las estaciones de recarga dependerá de cuantas se instalarán en un área o localidad determinada, cuantos serían los cargadores que tendrán cada una de las estaciones, los modos de carga que manejaría las electrolineras y que capacidad de potencia se requerirán en cada punto. Se debe tener en cuenta que estos análisis dependen de las proyecciones de crecimiento en la adquisición del vehículo eléctrico, lo cual agrega bastante incertidumbre en las estimaciones. No obstante, en este capítulo se realiza una revisión de varias investigaciones que desarrollan métodos para el dimensionamiento de estaciones de recarga.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de cinco artículos revisados, en donde se destaca el método propuesto por cada uno:

Tabla 2.

Resumen artículos de dimensionamiento

	Método	Autores	Título	Función objetivo	Publicación
1	Utilizaron una distribución de probabilidades para definir el nivel de carga de la batería, seguidamente se le aplico escalabilidad al algoritmo propuesto a través de la metodología	Alireza Khaksari, Georgios Tsaousoglou, Prodromos Makris, Konstantinos Steriotis, Nikolaos fthymiopoulos, Emmanouel Varvarigos	Sizing of electric vehicle charging stations with smart charging capabilities and quality of service requirement	Minimización del costo de inversión de las estaciones de servicio, sujeto a controlar la carga de la batería durante el tiempo operativo	ELSEVIER, 2021 (Khaksari, y otros, 2021)

Método	Autores	Título	Función objetivo	Publicación
basada en simulaciones de Montecarlo.				
2 Se implementa el análisis envolvente de datos (DEA) para determinar la capacidad y ubicación óptima de las estaciones de recarga y utilizaron el análisis de supereficiencia (SE), para determinar la eficiencia de la estación de recarga con respecto a los indicadores técnicos propuestos	Kazem Khalkhali1, Saeed Abapour, Seyed Masoud, Mehdi Abapour	Application of data envelopment analysis theorem in plug-in hybrid electric vehicle charging station planning	Maximizar el beneficio del administrador del sistema de distribución y la satisfacción de las características técnicas	IET JOURNALS, THE INSTITUTION OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY 2015 (Khalkhali, Abapour, Moghaddas Tafreshi, & Abapour, 2015)
3 Proponen un modelo de ubicación de flujo capacitado para estimar la demanda de carga de los vehículos eléctricos mediante el método de teoría de colas y para el dimensionamiento implementaron un método de programación lineal de enteros mixtos	Hongcai Zhang, Student Member, IEEE, Scott J. Moura, Member, IEEE, Zechun Hu, Member, IEEE, and Yonghua Song	PEV Fast-Charging Station Siting and Sizing on Coupled Transportation and Power Networks	Toma en cuenta la restricción del rango de conducción y el flujo de tráfico origen destino	IEEE 2018 (Zhang, Moura, Hu, & Song, 2018)

	Método	Autores	Título	Función objetivo	Publicación
4	Para la ubicación se implementó el algoritmo genético y para el dimensionamiento se empleó programación lineal	Hassan S. Hayajneh, Muath Naser Bani Salim, Srikanth Bashetty, and Xuewei Zhang*	PEV Fast-Charging Station Siting and Sizing on Coupled Transportation and Power Networks	En la primera parte para la ubicación, la función objetivo es minimizar las pérdidas de energía de VE, y para el dimensionamiento la función objetivo es minimizar los costos de inversión, operación y mantenimiento de las instalaciones de carga	IEEE 2019 (Hayajneh, Bani Salim, Bashetty, & Zhang, 2019)
5	Para el dimensionamiento implementaron varios programas entre esos esta la simulación de montecarlo, cadenas de MARKOV y teoría de colas	Qiang Yang , Senior Member, IEEE, Siyang Sun, Student Member, IEEE, Shuiguang Deng , Senior Member, IEEE, Qinglin Zhao , and MengChu Zhou	Optimal Sizing of PEV Fast Charging Stations With Markovian Demand Characterization	Para maximizar la rentabilidad esperada de la estación de carga, apoyándose en la rentabilidad del servicio, el coste de las colas, rechazos y el costo de mantenimiento de las estaciones inactivas	IEEE 2019 (Yang, Sun, Deng, Zhao, & Zhou, 2019)

En (Khaksari, y otros, 2021) se establece que las estaciones de recarga estén compuestas con varios tipos de carga inteligente, garantizando la calidad del servicio en base a restricciones y

franjas de espera para el abastecimiento de carga. Las restricciones establecen ciclos de espera más allá de su hora habitual de carga, que dependen del número de vehículos eléctricos que lleguen a la estación y del costo de los cargadores que se requieran implementar. Este documento simulo, con la ayuda de un algoritmo basado en las simulaciones de Montecarlo, la relación de la calidad del servicio y el costo de los cargadores, evaluando el impacto de la carga inteligente y la reducción del costo de la infraestructura durante la fase inicial del dimensionamiento de la estación.

En el artículo (Khalkhali, Abapour, Moghaddas Tafreshi, & Abapour, 2015) el dimensionamiento de las estaciones de recarga juega un papel trascendental, ya que se centran mucho en el impacto técnico e infraestructural que pudiese llegar a tener las redes de distribución con respecto al perfil de demanda, esta investigación incorpora la adopción del vehículo eléctrico como una generación distribuida, ya que promueven incentivos a los propietarios de los EV para abastecer el sistema interconectado en horas pico mejorando el perfil de demanda. Este documento ofrece una técnica de optimización para determinar la ubicación y capacidad de las estaciones de carga maximizando el beneficio del operador de red, mejorando los perfiles de tensión, las pérdidas de potencia activa y el suministro de energía en cualquier momento sin verse afectada la carga del sistema. El análisis se hizo en un sistema de 9 barras que consta en decidir cuantas estaciones de carga se instalarían y en qué puntos específicamente. Parte inicialmente evaluando un algoritmo numérico de análisis envolvente de datos (DEA), que consiste en establecer las ecuaciones matemáticas relacionadas con los beneficios económicos de las estaciones de carga que se quieren implementar; en segunda instancia, se indican los índices para poder clasificar las ubicaciones candidatas, estos índices están relacionado con la desviación de voltaje, las pérdidas de potencia activa y emisión de CO₂, y son denominados índices de entrada de las unidades de toma de decisiones (DMU). El análisis utiliza la DEA para clasificar varios DMU en grupos eficientes e

ineficientes en función de sus puntajes de eficiencia, evaluando el desempeño y comparando las DMU. Para la evaluación de los DMU se implementó el modelo de análisis de eliminaciones virtuales (SE) el cual se utiliza para evaluar los puntajes y rangos de eficiencia de las estaciones de carga, eliminando las DMU bajo criterios de puntuaciones de clasificación basadas únicamente en la eficiencia.

Se revisó el artículo (Zhang, Moura, Hu, & Song, 2018), este documento se centra en el dimensionamiento y ubicación de las estaciones de carga rápida teniendo en cuenta los parámetros eléctricos y el área geográfica de las vías de transporte por donde circularán los vehículos. Inicialmente este artículo propone un modelo de reabastecimiento de combustible de flujo capacitado (CFRLM), en el que incorpora la restricción de los rangos de conducción de los vehículos eléctricos. CFRLM captura los flujos de tráfico de origen-destino y estima la demanda de vehículos y con base a la información recolectada, evalúa mediante la programación de teoría de colas el costo de la estación de carga y las capacidades de servicio de las estaciones de carga. Este modelo arroja que satisfacer la demanda puede generar un colapso en las líneas de distribución, por lo cual se adoptó la penalización de demanda de cobro insatisfecho en CFRLM. A partir de lo anterior, se plantea el modelo de planificación de programación lineal de enteros mixtos, que considera las limitaciones de la red de transporte y distribución de energía de alta tensión, adoptando diversas sensibilidades relacionadas con la población de vehículos eléctricos, así como la capacidad de la línea, las rutas de despliegue, el estado de carga de llegada y salida de las baterías. En esta simulación se estudió el comportamiento de las redes de distribución en un escenario de 1000 y 1500 VE/h en una red de transporte de 25 nodos con un nivel de tensión de 110 kV, donde se tuvieron unas consideraciones técnicas y económicas para su evaluación, y se llegó a concluir que cuando crece el flujo de tráfico de VE más allá de 1500 VE/h el sistema no

suple por completo la demanda total, debido a las limitaciones de operación de la red de distribución, dando a entender que el número máximo de puntos de carga del sistema son de 1800 VE/h. De lo anterior se deduce que, el número de estaciones de carga tiende a aumentar con el flujo de tráfico, pero cuando el flujo aumenta más que las capacidades de las líneas, el modelo de planificación ubica menos estaciones de carga centralizadas para disminuir los costos fijos de inversión y construir estaciones de carga en nodos de bajo costo.

En el artículo (Hayajneh, Bani Salim, Bashetty, & Zhang, 2019), se analiza un marco de optimización para el dimensionamiento y ubicación de estaciones de carga (EVCS), en este documento, a comparación de los revisados anteriormente, las EVCS están alimentadas por baterías y no por la red de distribución. Se divide en dos etapas este estudio, la primera parte se centra en el número óptimo y ubicación de EVCS bajo el modelo de optimización de algoritmo genético (GA), basado en la cantidad de energía que pierde un vehículo eléctrico (TEL), desde su ubicación actual hasta su llegada a una estación de servicio. TEL aumenta cuando un vehículo debe recorrer una distancia larga para llegar a una EVCS, además está relacionado también con el estado de carga de la batería, la velocidad de descarga y capacidad de la batería; con base a estos parámetros, el artículo determina el número óptimo de EVCS analizando inicialmente 48 puntos candidatos con una demanda total estimada de 10000 VE en el sector comercial y residencial. En cada iteración se generan ubicaciones aleatorias de 500 VE, así como un estado de llegada de la batería y obtener el número óptimo de EVCS. Como resultado de 100 iteraciones hechas, se seleccionaron 31 EVCS con más del 50 % de frecuencia relativa de pertenencia para suplir a la población de VE en ciertos puntos estratégicos.

La segunda parte consiste en el dimensionamiento de las EVCS el cual consiste en minimizar los costos anuales de inversiones, operaciones y mantenimiento. Se determinó que cada

EVCS tendrá dos tipos de carga, la lenta que está en el alrededor de 8 horas de carga y la carga rápida con un tiempo de hasta de 2 horas, la llegada de los vehículos eléctricos a las EVCS en toda una jornada se representó como una distribución gaussiana donde alcanza su punto máximo dos veces al día, que son las 8 a.m. y las 5pm denominados como la hora pico de la localidad evaluada. Para la simulación a cada vehículo que llegue a la EVCS se le asignara aleatoriamente una duración en la EVCS y un estado inicial de la carga de la batería con el fin de asignarle el tipo de carga que se requiere y determinar el tiempo de carga necesario, llegando a calcular el número de vehículos por hora que se cargaran en cada una de las EVCS con su respectivo tipo de carga.

En el artículo (Yang, Sun, Deng, Zhao, & Zhou, 2019), el autor establece inicialmente que el tipo de recarga rápida trae problemas para su implementación, dependiendo de la alta masificación del vehículo eléctrico enchufable (PEV) en el sistema interconectado. Este documento aborda el dimensionamiento de las estaciones de recarga presentando una solución en la planificación, basándose en una caracterización explícita del estado temporal de la demanda de carga rápida de PEV, mediante el uso de modelado de MARKOV. También determina el número de cargadores y espacios de espera en las estaciones de recarga los cuales se optimizan de forma conjunta para maximizar la rentabilidad esperada de la estación, apoyándose en la rentabilidad del servicio, el coste de las colas, rechazos y el costo de mantenimiento de las estaciones inactivas. El artículo inicialmente muestra el análisis SoC temporal de la demanda de PEV, el cual es el encargado de evaluar el estado inicial de carga de las baterías y la demanda de carga rápida a través del comportamiento de viaje de PEV en cada una de las transiciones de estado. Para llevar a cabo esto, determinaron dos tipos de uso para PEV, el cual está dividido en C-PEV, que son vehículos que hacen desplazamientos entre el hogar y trabajo y O-PEV que son vehículos comerciales que hacen varios viajes al día, además se definió el consumo típico de energía por kilómetro y la

capacidad máxima de la batería con sus respectivos valores máximos y mínimos. También se definió los estados (SoC) donde pueden operar PEV los cuales fueron en: 1.) estado normal, 2.) estado de carga rápida, 3.) estado de conducción y 4.) estado de estacionamiento, seguidamente se definió que el estado de un PEV operativo permanece sin cambios dentro de un tiempo de 30 minutos por intervalo, ósea 48 ciclos por día, estableciendo una potencia nominal de la carga típica y un nivel de sobrecarga y sobre-descarga de la batería. Los patrones de viaje de los PEV se consideran iguales a los vehículos de combustión interna. Seguidamente se hace la presentación de la simulación de Montecarlo, que consiste en generar el propósito de uso y la capacidad de la batería de muestras individuales de PEV en función de la distribución de probabilidad y las restricciones nombradas anteriormente, una vez el algoritmo determina el comportamiento de viaje de las muestras de PEV individuales en un intervalo de tiempo, pasa al otro intervalo donde se puede actualizar con el estado PEV actual y los parámetros PEV generados, y así sucesivamente, pasando por todos los intervalos de tiempo de todo el día hasta que se cumpla la condición de terminación. Luego con el programa de MARKOV, se determina la matriz de probabilidad de transición de PEV, donde se lleva a cabo el modelado de patrones de viaje que es similar al de un vehículo de combustión y que se asocia a las muestras de entrada de PEV, seguidamente se derivan explícitamente a cada uno de los intervalos siguientes, dicho análisis fue evaluado en cada uno de los estados (SoC) y se determinó su respectivo comportamiento en cada intervalo de tiempo. Para terminar se implementó la teoría de colas para caracterizar los patrones de carga de los PEV en función de su llegada a las estaciones, ya con las ubicaciones de las estaciones, se puede determinar el flujo de tráfico de vehículos y calcularon el patrón de llegada de las solicitudes de carga PEV, donde se evidencia que cada llegada de un PEV se comportaba como un modelo de POISSON con una tasa de llegada y la duración de la carga, dado esto obtuvieron la tasa de llegada en intervalos

de tiempos individuales llegando a formular el número máximo de cargadores permitidos de PEV, que depende del número de cargadores posibles y espacios de espera en las estaciones de recarga, hallados por un método de cadenas de MARKOV. Este análisis fue evaluado en un sistema de 56 barras de la IEEE con sus respectivos parámetros eléctricos de la red, las estadísticas de la red de transporte fueron sacados de una base de datos de BEJING CHINA, se adoptaron los parámetros de convergencia de los programas nombrados y se definió una tasa de llegada máxima y variable en el tiempo de los PEV como caso de estudio y simulación del programa.

3. Métodos de ubicación de una estación de recarga

Este capítulo se centrará en describir de una manera muy resumida algunos de los métodos de ubicación que se encuentran en el estado del arte, dando a conocer de cada artículo las variables que inciden en dar solución a la ubicación óptima de una estación de recarga.

En la siguiente tabla se muestra un resumen de los artículos revisados y los métodos de ubicación identificados:

Tabla 3.

Resumen de artículos Ubicación.

	Método	Autores	Título	Función objetivo	Publicación
1	El dimensionamiento se evalúa bajo el	Guangyou Zhou a , Zhiwei Zhu	Location optimization of electric vehicle	La función objetivo es el costo total	ELSEVIER, 2022 (Zhou,

	Método	Autores	Título	Función objetivo	Publicación
	método de algoritmo genético.	a , Sumei Luo	charging stations: Based on cost model and genetic algorithm	social y costo ambiental	Zhu, & Luo, 2022)
2	Técnica Heurística	Maria Fernanda Narvaez Enriquez	Ubicación de estaciones de recarga vehículos eléctricos sistemas de distribución usando una técnica heurística	Define un indicador de sensibilidad que proporciona la razón de cambio entre las pérdidas de energía activa y la potencia reactiva en cada uno de los nodos del sistema	UNIVERSI DAD TECNOLÓGICA DE PEREIRA, 2019 (Narvaez Enriquez, 2019)
3	Inicialmente se establece una formulación matemática necesaria y optimiza por un algoritmo genético para la ubicación	Milad Akbari, Morris Brenna and Michela Longo	Optimal Locating of Electric Vehicle Charging Stations by Application of Genetic Algorithm	Su función objetivo es considerar la potencia de la estación de recarga, el tiempo promedio necesario para cada recarga y la distancia recorrida	MDPI, 2018 (Akbari, Brenna, & Longo, 2018)
4	La ubicación de las estaciones de recarga fue calculada en MATLAB por la herramienta IBM ILOG CPLEX y el editor YALMIP	Shengdong Zua,, Lijiang Sun	Research on location planning of urban charging stations and battery-swapping stations for electric vehicles	La función objetivo es maximizar la satisfacción del cliente y minimizar la energía eléctrica consumida por los vehículos	ELSEVIER, 2021 (Zu & Sun, 2021)

Método	Autores	Título	Función objetivo	Publicación
			eléctricos hacia la estación de recarga	
5 La ubicación fue calculada por un algoritmo de optimización llamado (GWO)	Fareed Ahmad, Atif Iqbal, Imtiaz Ashraf, Mousa Marzband, Irfan Khan	Optimal location of Electric Vehicle Rapid Charging Stations in Power Distribution Network and Transportation Network with V2G Strategies	Se consideran como función objetiva las pérdidas de energía en la red de distribución y el costo de energía desde el punto de carga a la estación de recarga	IEEE 2021 (Ahmad , Iqbal , Ashraf, Marzband, & Khan, 2021)

Según el artículo (Zhou, Zhu, & Luo, 2022), bajo la alta demanda de vehículos eléctricos que se han prolongado en Europa, también se han desembocado un gran número de problemas que acarrearán esta masificación, como es el caso del número de estaciones de carga que deben estar instaladas para suplir la demanda, la asignación geográfica de la estación de carga desigual por territorio y el alto costo que generan su implementación. Por tanto, los autores decidieron escoger como estudio de simulación la isla de Irlanda dando más relevancia a las ciudades más importantes, ya que es un país desarrollado con una alta renta per cápita, un fuerte poder de consumo y su condición geográfica es específicamente ideal para el análisis. Este documento consta en construir un modelo basado en el costo total social y calcular el costo operativo que generaría la implementación de las estaciones de carga bajo un cierto tipo de restricciones, el costo social total está dividido en tres componentes que son, el costo de construcción que está relacionado con la inversión fija, el mantenimiento y operación, también está el costo de recarga que es debido al tiempo y consumo de energía que un vehículo gasta en llegar a la estación de recarga y la tarifa

de electricidad que se paga al usar los cargadores, por último está el costo ambiental que es la emisión de carbono en el camino de las estaciones de recarga. Para dicho análisis se tuvieron en cuenta también tres restricciones que son: la demanda total de vehículos eléctricos de carga que no puede exceder al suministro de energía total que puede proporcionar una estación de carga, otra de la restricción es que cada uno de los vehículos eléctricos debe elegir una estación de recarga y por último la distancia del vehículo y la estación de carga no puede ser superior la máxima distancia de conducción adaptada. Dado los costos y las restricciones dadas, el análisis también tiene en cuenta unos factores que afectan el costo total, el cual está relacionada con la ubicación de las subestaciones eléctricas, el número de lavaderos de carros, la cantidad de estaciones de carga existentes, la distancia que hay desde la subestación a la estación de carga a implementar, la probabilidad de carga de todos los días y demás factores determinantes que inciden en la simulación. Los autores implementaron un algoritmo genético en MATLAB, el cual, realiza una búsqueda global en una gran población de esquemas de diseño de estaciones de recarga bajo ciertas condiciones, logrando la prioridad del costo generalizado más económico para la implementación de una estación de carga, teniendo en cuenta un cierto número de suposiciones necesarias que excluyan la interferencia de otros factores que infieran en la simulación. Esta simulación costa en simplificar el área de Irlanda en un rectángulo con una longitud de 350 km y un ancho de 200 km fragmentándolo en pequeños cuadrados y enumerar las necesidades de carga de cada punto de intersección, basándose que no todos los puntos son equivalentes, ya que Irlanda cuenta con 5 ciudades principales, Se simularon 670 puntos al azar obteniendo obviamente 670 puntos óptimos de estaciones de recarga, dando a conocer la distribución geográfica de las estaciones y mostrando que el grado de concentración es más significativo en las 5 ciudades principales. Este análisis

determina que existirán un mayor número de estaciones de carga en las ciudades desarrolladas de Irlanda debido a la existencia de transporte eléctrico existente y la alta economía de estas zonas.

El artículo (Narvaez Enriquez, 2019), nace bajo la problemática del impacto que causa la llegada del vehículo eléctrico a las redes de distribución, no es un secreto que la masificación del vehículo eléctrico está en su máximo esplendor, lo cual ha causado diferentes opiniones entre operadores de red e inversionistas con respecto a la instalación de las estaciones de recarga necesarias para abastecer la demanda futura, el operador de red se enfoca más en que los puntos donde se implementarían la estación de recarga no impacte las redes de distribución y el perfil de demanda del sistema, en cambio el inversionista, buscan es abastecer el mayor número de vehículos en un punto estratégico al menor costo, de esta problemática se adoptó un equilibrio para todos, donde se cumpla con unos criterios técnicos y económicos indispensables al menor costo posible. Dado esto, el artículo propone inicialmente una técnica heurística que es la encargada de definir un indicador de sensibilidad que proporciona la razón de cambio entre las pérdidas de energía activa del sistema y la potencia reactiva en cada uno de los nodos del sistema de evaluación. El autor propone una metodología dividida en seis pasos para determinar los puntos donde se deberían implementar una estación de recarga: el primer paso es obtener las características más representativas del sistema de distribución, en este caso escogieron un sistema de distribución de 123 nodos en un sector de Pereira que opera a 13.2kV. El segundo paso es obtener las características más representativas de la red de transporte, para este escogieron la red de transporte de buses masivos que opera en la zona estudio dando un total de 15 rutas con su respectiva distancia y frecuencia diaria. El tercer paso es definir el valor nominal de las estaciones de recarga de vehículos eléctricos que se deben implementar, en esta ocasión supusieron un valor nominal total de la estación de recarga el cual fue de 497.2 kW. El cuarto paso es determinar el

conjunto posible de ubicaciones de una estación de recarga en función de su impacto en las pérdidas técnicas en el sistema, para llevar a cabo esta parte implementaron la técnica heurística que fue analizar el comportamiento de las pérdidas en cada uno de los 123 nodos, dando a conocer los seis primeros lugares que representan el menor impacto de pérdidas técnicas en la red con su respectiva distancia entre cada de los puntos escogidos. El quinto paso es obtener el conjunto de posibles ubicaciones de estaciones de recarga en función de su impacto en las rutas del sistema de transporte, dieron solución a este paso presentando la cantidad de rutas que transitan por cada uno de los 6 puntos escogidos anteriormente. El sexto paso es definir el ranking de las posibles ubicaciones de una estación de recarga en función del impacto eléctrico y de transporte considerando diversos factores de peso en función de su prioridad. Por último, una vez realizado el análisis en los seis pasos, se escogen los puntos que menos pérdidas técnicas represente al sistema y que tenga una buena cantidad de rutas que transiten por el punto.

En el artículo (Akbari, Brenna, & Longo, 2018), el estudio se enfoca en el despliegue de las estaciones de recarga en la ciudad de MILAN, dando solución a minimizar el costo que deben asumir los clientes para llegar a una estación de recarga y determinando la ubicación óptima de las estaciones dependiendo de cada uno de los modos de carga existentes. El algoritmo genético implementado es el encargado de calcular el mínimo costo que debe asumir el cliente para ir de un asentamiento a una estación de recarga dependiendo de los gastos ocasionados, *(cabe resaltar que un asentamiento es un lugar donde se concentran un gran número de vehículos eléctricos en un determinado tiempo como es el caso de un parqueadero)*, además determinaron la función objetivo de la simulación, que es ubicar las estaciones de recarga con ayuda de la fórmula de distancia de HAVERSINE, dieron continuidad a esta simulación planteando las siguientes consideraciones: primeramente asumieron 50 asentamientos distribuidos aleatoriamente sin salirse del casco urbano

de MILAN, luego estimaron el número de vehículos eléctricos con ayuda del modelo BASS y una base de datos existente de la llegada de los vehículos eléctricos a MILAN desde los años 2008-2012, determinando un valor real del número de vehículos que llegarían en el 2024, luego calcularon la cantidad de estaciones de recarga que deben existir mediante una ecuación que depende del número de vehículos eléctricos en la ciudad, el consumo de energía del vehículo por día, un factor de equilibrio para la estaciones de recarga, la potencia de la estación y el tiempo promedio requerido para hacer una recarga. Con estas consideraciones el autor entrega la potencia de la estación de recarga, sabiendo que el modo de carga es el dominante de la potencia, gracias a esto calcularon el número de estaciones de recarga que debe haber en la zona de estudio, seguidamente corren la simulación hasta que converja dando a conocer las distancias óptimas entre los asentamientos y la estación de recarga, esto lo hacen para los tres modos de carga existente y determinar las ubicaciones y los costos que pierden los clientes en ir del asentamiento a la estación de recarga más cercana.

El artículo (Zu & Sun, 2021), define la planificación de las estaciones de recarga y cambio de batería, teniendo en cuenta el comportamiento de los usuarios, como función objetivo propone minimizar el costo total de la estación, maximizar la satisfacción del cliente y minimizar la energía consumida por los vehículos eléctricos desde el punto de carga hasta la estación de recarga o estación de cambio de batería. Este análisis fue desarrollado en MATLAB con el solucionador IBM ILOG CPLEX y el editor YALMIP con el fin de dar solución a esta problemática, se tuvieron en cuenta 3 escenarios los cuales fueron para una estación de recarga rápida, para una estación de recarga lenta y una estación de cambio de batería, dado esto hicieron unas suposiciones para darle inicio al caso de estudio que fueron las siguientes: 1.) cada punto de demanda representa un área de vehículos y las necesidades de los usuarios se dividen en demanda rápida, demanda lenta y

cambio de batería. 2.) los usuarios de cada punto de demanda tienen una racionalidad limitada y los coeficientes de utilidad de atraer usuarios similares de cada punto de demanda a las estaciones de recarga y cambio de baterías son consistentes. 3.) No se debe exceder el número de cargadores o el sistema de intercambio de baterías por la capacidad del sitio. 4.) Los costos fijos de construcción de una estación de recarga rápida y lenta. 5.) Cada sitio es adecuado para construir cualquiera de las tres tecnologías, pero solo puede utilizarse para la construcción de una sola de ellas. 6.) La distancia del punto de demanda y la estación de recarga o cambio de baterías es una distancia recta, no se considera líneas discontinuas. Además, se consideraron ciertos datos técnicos y geográficos necesarios para la simulación, los cuales fueron: un área de SHANGAI expresada geográficamente en un plano cartesiano y se generaron 60 puntos de demanda de usuarios con sus respectivas coordenadas y demandas para cada uno de los escenarios, se establecieron los valores para el coeficiente de utilidad de atracción característica para los usuarios, también el costo de construcción, el costo de construcción de los cargadores y sistema de cambio de baterías, igualmente el importe máximo de inversión de una estación, los radios mínimos y máximos de la ubicación de una estación de recarga o de cambio de baterías, la frecuencia media diaria con la que se hace una recarga o un cambio de batería y la electricidad promedio consumida por kilómetro de un vehículo eléctrico. El análisis de optimización empieza mediante el método de control de una sola variable, el cual consta en primera parte evaluar la relación del coeficiente de utilidad promedio de cada escenario con cada una de las funciones objetivo, donde las funciones objetivo son el costo de total de la construcción, el consumo de energía de la distancia de conducción hasta la estación y la satisfacción del cliente. Esta relación la hacen independientemente para cada uno de los escenarios y cada una de las funciones objetivos, buscando dar solución en un punto determinado donde se establezcan satisfactoriamente cada una de las funciones objetivo. Este

análisis lo hacen también independientemente para los coeficientes de atracción y racionalidad con cada una de las funciones objetivo. Seguidamente elaboraron una ecuación matemática para la función de atracción, para el modelo de satisfacción del usuario, para el modelo de costos de construcción y el modelo de consumo. Como resultado se expresa una función objetivo general que enlaza cada una de las ecuaciones nombradas anteriormente, brindando solución a la planeación y ubicación de cada uno de los escenarios planteados con sus respectivos nodos referenciados donde se ubicaran cada una de las estaciones, los tiempos de carga y respuesta a cada función objetivo establecida.

El artículo (Ahmad , Iqbal , Ashraf, Marzband, & Khan, 2021), nace del futuro exitoso que les espera a los vehículos eléctricos como avance tecnológico y fuente alternativa de energías limpias. Este documento se centró en predecir la cantidad de estaciones de recarga rápida (EVRCS) y la ubicación óptima de (EVRCS) en el área de estudio. El análisis se hizo en un sistema de bus IEEE34 con sus respectivos parámetros eléctricos, del cual analizaron como era el comportamiento del flujo eléctrico mediante un algoritmo de barrido hacia atrás y adelante (BFS), identificando las pérdidas de potencia total y los niveles de tensión en cada de una de las barras para los 3 escenarios propuestos: 1.) sin EVRCS. 2.) la ubicación óptima de EVRCS sin vehículos a la red (V2G). y 3.) la ubicación óptima de EVRCS con V2G. Para llevar a cabo este análisis el autor inicialmente identifico la función objetivo la cual establece la perdida de potencia de la red de distribución y el costo de transporte de los vehículos eléctricos desde el punto de demanda hasta EVRCS, se consideró que en este estudio solo se iban a instalar estaciones de carga rápida (RCS) donde se tuvo en cuenta las redes de transporte (TN) y las redes de distribución eléctrica (DN). Seguidamente hicieron la formulación del problema iniciando con la ecuación del número estaciones de recarga EVRCS en el área de estudio, la cual depende del número total de vehículos

eléctricos, el tiempo de carga y el tiempo de servicio de EVRC, después se hizo el planteamiento de las fórmulas del modelo de optimización que consistían en el modelado de la carga de los vehículos eléctricos, el costo de pérdidas de energía de transporte y el costo de pérdidas de energía, además se plantearon unas restricciones eléctricas para la simulación, la cual consistía en poner restricción al voltaje máximo y mínimo del sistema, restricción del flujo actual, restricción del equilibrio de potencia activa y reactiva y restricción del número máximo de estaciones EVRCS que pueden existir. También se hizo unas consideraciones para iniciar la simulación, estas consistían en dar el número de vehículos cargados por día, la capacidad total de una RCS, la capacidad de cada uno de los cargadores de RCS y el porcentaje de vehículos que se conectaran a la red V2G. Con estos datos se calculó el número de estaciones de carga rápida RCS y procedieron finalmente hacer la simulación con un algoritmo optimización llamado (GWO) que es el encargado de indicar las ubicaciones óptimas de RCS, las pérdidas de potencia activa total y el nivel de voltaje de las barras.

4. Conclusiones y recomendaciones

En Colombia se ha avanzado en cuanto a normativa asociada a la construcción de las estaciones de recarga, pero en cuanto a normas para dimensionamiento y ubicación de las estaciones no se encontraron referentes. Así, desde el Reglamento Técnico de Instalaciones Eléctricas (RETIE) y el Código Eléctrico Colombiano (NTC 2050) en su sección 511 y 625 se dan los parámetros, elementos y equipos necesarios para construir una estación de recarga de vehículos

eléctricos. Por otro lado, operadores de red también han emitido normativa para la construcción de las estaciones, es el caso de la norma técnica EPM RA8-031, que describe los lineamientos generales para la instalación de los cargadores de baterías de vehículos eléctricos. Esas normas son muy útiles al momento de requerirse la instalación de puntos de recarga lenta privados en viviendas o edificios y rápida en puntos de recarga públicos.

Se recomienda realizar un análisis de ubicación de estaciones de recarga en ciudades donde se cuente con un alto grado de desarrollo económico, que haya un crecimiento de la demanda de los vehículos eléctricos y que sea posible adoptar el flujo de tráfico del transporte público o vehículos comerciales que circulan por dicha zona, recopilando el histórico de los recorridos y la frecuencia de circulación diaria, de manera que se establezca un estudio futuro de la ubicación de una estación de recarga, seleccionando las zonas más concurridas de la ciudad en un determinado hora del día.

Es necesario determinar previamente un indicador de sensibilidad que permita definir los posibles puntos donde se implementarían las estaciones de recarga, evaluando el estado técnico y los porcentajes de cargabilidad en los que se encuentra la red de distribución existente, corroborando si es factible construir una estación de recarga en los puntos escogidos o es imprescindible hacer una expansión de las redes de distribución en el lugar dispuesto.

Para un estudio futuro será indispensable considerar en nivel de satisfacción del usuario, debido que en la actualidad no se cuenta con una gran influencia de vehículos eléctricos circulantes en el país, se carece de infraestructura de estaciones de recarga y se tiene incertidumbre en la post venta del vehículo, por tal razón, estos estudios deben modelar variables que estén más enfocadas en persuadir al usuario. De lo anterior, se recomienda tener en cuenta como factor determinante en un estudio de optimización, el lugar donde se concentre el mayor número de vehículos, también

se recomienda minimizar la cantidad de energía que consume un vehículo desde su origen a la estación de recarga, maximizar el número de puntos de carga en una estación conforme la disponibilidad que puede ofrecer la red de distribución y la calidad del servicio de energía prestado brindando sus posibles expansiones y modernización de las redes de distribución, todo acorde a la masificación del vehículo. Dicho lo anterior, el objetivo es garantizarle al usuario un respaldo en la compra hecha y persuadir a nuevos usuarios que quieran comprar un vehículo eléctrico.

El dimensionamiento de una estación de recarga trae consigo un número de restricciones que son determinantes a la hora de su implementación, estas restricciones están relacionadas en primera medida con la ubicación de las estaciones de recarga, debido a que el número de puntos de carga depende del lugar donde se construya la estación, también depende de la cargabilidad y disponibilidad de la red de distribución en un determinado punto, además es necesario establecer el modo de carga, el tipo de cargador y la potencia del vehículo eléctrico. Por lo tanto, se recomienda definir previamente la disponibilidad de la red de distribución en los puntos candidatos, adoptar el cargador más implementado a nivel internacional con respecto al modo de carga y definir la potencia promedio del vehículo más transitado en Colombia para un caso de estudio de optimización futuro.

Se recomienda que el gobierno promueva iniciativas que busquen adoptar un sistema tarifario del precio del kW/h en horas valle y pico, beneficiando a los propietarios de los vehículos eléctricos para que incorporen la carga de la batería al sistema como una generación distribuida en horas pico y penalizando con el costo del kWh a usuarios que carguen sus vehículos en estos horarios.

Esta monografía define una serie de requisitos y conclusiones que se pueden utilizar para el análisis óptimo del dimensionamiento y la ubicación de estaciones de recarga de vehículos eléctricos, a la hora de la implementación a futuro de una infraestructura de carga.

Referencias Bibliográficas

- Akbari, M., Brenna, M., & Longo, M. (2018). Optimal locating of electric vehicle charging stations by application of genetic algorithm. *Jornal Sustainability MDPI*.
- Ahmad , F., Iqbal , A., Ashraf, I., Marzband, M., & Khan, I. (2021). *Optimal location of electric vehicle rapid charging stations in power distribution network and transportation network with v2g strategies*. India: IEEE.
- CELSIA. (agosto de 2018). *Celsia Tolima s.A. E.S.P. Capitulo 16. Criterios de diseño y normas para construcción de instalaciones de distribución y uso final de la energía. instalacion de estaciones de recarga para vehiculos electricos*.
- Clean Cities, U.S. Departament of Energy. (2012). *Siting and design guidelines for electric vehicle supply equipment*. New York State Energy Research and Development Authority .
https://www.transportationandclimate.org/sites/default/files/EV_Siting_and_Design_Guidelines.pdf
- Colombia. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostible. (2019). *Estrategia Nacional de Movilidad Electrica*. <https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/ENME.pdf>
- CREG 186, Comisión de Regulación de Energía y Gas. (17 de Diciembre de 2021). *CREG 186 Nuevos servicios: movilidad eléctrica documento de consulta*. Bogotá.
- EPM RA8-031. (1 de Mayo de 2018). *Norma Tecnica RA8-031. instalación de estaciones de carga para vehiculos electricos*. Empresas Publicas de Medellin (EMP):
https://cu.epm.com.co/Portals/proveedores_y_contratistas/proveedores-y-

contratistas/normas-tecnicas/documentos/DOCUMENTOS-ENERGIA/NORMAS-TECNICAS-PARA-REDES-AEREAS/NORMAS-TECNICAS/RA8-031.pdf

Greepeace. (05 de Octubre de 2018). *10 Años para deshacernos de los motores de combustión o de nuestro clima*. <https://es.greenpeace.org/es/noticias/tenemos-10-anos-para-deshacernos-de-los-motores-de-combustion-o-de-nuestro-clima/>

Hayajneh, H., Bani Salim, M. N., Bashetty, S., & Zhang, X. (2019). Optimal Planning of Battery-Powered Electric Vehicle Charging Station Networks. *IEEE*.

ICONTEC. (1998). *Norma Técnica Colombiana 2050*. ICONTEC.

INFOBAE. (20 de ENERO de 2023). *Colombia tiene más vehículos eléctricos, pero está lejos de la meta de transición*. <https://www.infobae.com/colombia/2023/01/20/colombia-tiene-mas-vehiculos-electricos-pero-esta-lejos-para-la-meta-de-la-transicion/>

Khaksari, A., Tsaousoglou, G., Makris, P., Steriotis, K., Efthymiopoulos, N., & Varvarigos, E. (2021). Sizing of electric vehicle charging stations with smart charging capabilities and quality of service requirements. *Elsevier*.

Khalkhali, K., Abapour, S., Moghaddas Tafreshi, S., & Abapour, M. (2015). Application of data envelopment analysis theorem in plug-in hybrid electric vehicle charging station planning. *The Institution of Engineering and Technology*.

Ley 1964. (2019). *Por medio de la cual se promueve el uso de vehículos eléctricos en Colombia y se dictan otras disposiciones*. Congreso de Colombia: [https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30036636#:~:text=LEY%201964%20DE%202019&text=\(julio%2011\)-,por%20medio%20de%20la%20cual%20se%20promueve%20el%20uso%20de,y%20se%20dictan%20otras%20disposiciones](https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=30036636#:~:text=LEY%201964%20DE%202019&text=(julio%2011)-,por%20medio%20de%20la%20cual%20se%20promueve%20el%20uso%20de,y%20se%20dictan%20otras%20disposiciones).

- Minergia, UPME. (2019). *Establecer Recomendaciones en Materia de Infraestructura de Recarga para la Movilidad Eléctrica en Colombia para los Diferentes Segmentos: Buses, motos, taxis, BRT.*
https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/Consortio_Usaene_sumatoria_producto_3_estaciones_de_cargaVF.pdf
- Narvaez Enriquez, M. (2019). *Ubicacion de estaciones de recarga de vehiculos electricos en sistemas de distribución usanda una tecnica heuristica.* Pereira: Universidad Tecnológica de Pereira.
- OMM, Organización Meteorológica Mundial. (22 de Abril de 2020). *El Día de la Tierra hace hincapié en la acción climática.* <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/el-d%C3%ADa-de-la-tierra-hace-hincapi%C3%A9-en-la-acci%C3%B3n-clim%C3%A1tica>
- Ruíz Barrientos, F. M., Gámiz Martínez, E., Aspiazu Pérez, I., Román Calvo, C., & Sallent Bayo, H. (2021). *Estudio sobre el despliegue de la infraestructura de carga del vehículo eléctrico en España.* https://ecodes.org/images/que-hacemos/01.Cambio_Climatico/Incidencia_politicas/Movilidad/2021_02_Estudio_sobre_el_.pdf.
- Salmerón Ozores, J. M. (2012). *Diseño de la instalación eléctrica de una electrolinera.* Leganés: Universidad Carlos III de Madrid.
- U.S. Department of Transportation. (2023). *EV Planning Resources: Implementation, Installation, and Maintenance.* <https://www.transportation.gov/rural/ev/toolkit/planning-resources/implementation-installation-and-maintenance>

- Yang, Q., Sun, S., Deng, S., Zhao, Q., & Zhou, M. (2019). Optimal Sizing of PEV Fast Charging Stations With Markovian Demand Characterization. *IEEE*.
- Zhang, H., Moura, S. J., Hu, Z., & Song, Y. (2018). PEV Fast-Charging Station Siting and Sizing on Coupled Transportation and Power Networks.
- Zhou, G., Zhu, Z., & Luo, S. (2022). Location optimization of electric vehicle charging stations: Based on. *Elsevier*.
- Zu, S., & Sun, L. (2021). *Research on location planning of urban charging stations and battery-swapping stations for electric vehicles*. Shaghai: ELSEVIER.