



UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

Desarrollo de una estrategia de respuesta a la demanda para la gestión de energía en estaciones de recarga de vehículos eléctricos en edificios de oficinas

Andrés Alfonso Rodríguez

Universidad Nacional de Colombia
Departamento Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Bogotá, Colombia
2020

Desarrollo de una estrategia de respuesta a la demanda para la gestión de energía en estaciones de recarga de vehículos eléctricos en edificios de oficinas

Andrés Alfonso Rodríguez

Tesis de investigación presentado como requisito parcial para optar al título de:

Magister en Ingeniería Eléctrica

Director:

Sergio Raúl Rivera Rodríguez, Ph. D

Codirector:

Francisco Santamaría Piedrahita, Ph. D

Línea de Investigación: Gestión de energía

Grupo de Investigación: EMC - UN

Universidad Nacional de Colombia
Departamento Ingeniería Eléctrica y Electrónica
Bogotá, Colombia

2020

“Y en cuanto a ti, oh Daniel, haz secretas las palabras y sella el libro, hasta el tiempo del fin. Muchos discurrirán, y el verdadero conocimiento se hará abundante”.

Daniel 12:4

Agradecimientos

Agradezco a mucho a Jehová Dios el poder vivir, disfrutar de su creación y ahondar cada día más en sus caminos. Tener la posibilidad de investigar es un privilegio, poder avanzar en el conocimiento es gratificante y aportar al desarrollo de la sociedad es un logro.

El amor de mi esposa Angie Lorena Pérez Varón, de mis padres Pablo Antonio Alfonso Rivera y María Nohelia Rodríguez Moreno y de mi hermano Alejandro Alfonso Rodríguez ha sido parte fundamental de mi vida. Este logro alcanzado, es también de ustedes.

Quiero agradecer a Francisco Santamaría Piedrahita, quien a lo largo de estos años me ha brindado apoyo, guía y animo en el camino de la ciencia e investigación. Lo encomio por su excelente trayectoria docente e investigativa y lo animo a que continúe apoyando a los jóvenes, que como en mi caso, deseamos contribuir con el desarrollo de nuestra sociedad a través de la investigación.

A Luis Eduardo Perdomo Orjuela con quien hemos compartido años de estudio, trabajo y amistad.

Me encuentro agradecido con Sergio Raúl Rivera Rodríguez por aceptar dirigir este trabajo, aportando con su tiempo, conocimiento y experiencia. Lo felicito por su excelente trayectoria como docente e investigador, por favor continúe apoyado a todos los que queremos seguir esa trayectoria.

Al grupo de investigación EMC – UN gracias por ser un apoyo técnico durante el desarrollo de esta investigación.

Resumen

El presente documento tiene como objetivo presentar la estrategia de gestión de recarga de vehículos eléctricos en un edificio de oficinas. El primer capítulo analiza la capacidad de carga de un edificio de oficinas, así como flujo vehicular adyacente al mismo y el tiempo de desplazamiento al trabajo de usuarios de vehículos particulares, factores considerados dentro de la estrategia de gestión. El segundo capítulo se centra en los vehículos eléctricos, analiza el mercado actual y define los parámetros que se tomaron en cuenta en la estrategia de gestión. El capítulo tercero presenta la estrategia de gestión desarrollada y los algoritmos implementados que finalmente son validados en el cuarto capítulo.

Palabras clave: Estrategia de gestión, respuesta a la demanda, vehículo eléctrico, internet de las cosas, aprendizaje automático, algoritmo de programación entera binaria.

Abstract

The purpose of this document is to present the management strategy for charging electric vehicles in an office building. The first chapter analyzes the load capacity of an office building, as well as vehicular flow adjacent to it and the travel time to the work of users of private vehicles, factors considered within the management strategy. The second chapter focuses on electric vehicles, analyzes the current market and defines the parameters that were taken into account in the management strategy. The third chapter presents the management strategy developed and the algorithms implemented that are finally validated in the fourth chapter.

Keywords: Management strategy, demand response, electric vehicle, internet of things, machine learning, binary entire programming algorithm.

Contenido

Pregunta de investigación.....	2
Objetivos propuestos	2
Objetivo General	2
Objetivos específicos	2
Organización del documento	3
1 Capítulo 1: Estado del arte	5
1.1 Esquema de gestión.....	5
1.1.1 Demand response as a load shaping tool integrating electric vehicles (2012).....	5
1.1.2 Microgrids emergency management exploiting EV, demand response and energy storage (2013)	6
1.1.3 Optimal power management for electric tugboats with unknown load demand (2014).....	6
1.1.4 Incentive Load Scheduling Schemes for PHEV Battery Exchange Stations in Smart Grid (2015).....	6
1.1.5 A distributed, real-time and non-parametric approach to demand response in the smart grid (2015)	6
1.1.6 Assessment of Energy Efficiency indicators on a residential building with Plug-in Electric Vehicles and energy action plans for users (2015)	7
1.1.7 Methodology to Manage Electric Vehicles Charging in Real-Time (2016)	7
1.1.8 Implementación de un Esquema de Gestión de Recarga de Vehículos Eléctricos Basado en V2G y Respuesta a la Demanda (2016)	8
1.1.9 Distributed Scheduling and Cooperative Control for Charging of Electric Vehicles at Highway Service Stations (2017)	8
1.2 Carga de vehículos eléctricos	9
1.2.1 Smart Car: Smart charging and driving control for electric vehicles in the smart grid (2014).....	9
1.2.2 New services of plug-in electric vehicles charging stations (2016)	9
1.2.3 Analysis of plug-in electric vehicles penetration in residential buildings under deterministic and stochastic scenarios (2016)	9
1.3 Vigilancia tecnológica.....	10
1.3.1 Objetivo vigilancia.....	10
1.3.2 Patentes	10
1.3.3 Normatividad	12
1.4 Conclusiones del capítulo.....	20
2 Capítulo 2: Identificación de la capacidad para cargar vehículos eléctricos de un edificio de oficinas.....	23
2.1 Evaluación de parámetros eléctricos de un edificio de oficinas en condiciones normales de operación	23

2.2	Búsqueda zonas de concentración de edificios de oficinas.....	27
2.3	Evaluación de la demanda de potencia de una red de distribución en media tensión que alimenta en condiciones normales varios edificios de oficinas	28
2.4	Densidad de tráfico vehicular en zonas de edificios de oficinas	31
2.5	Conclusiones del capítulo	33
3	Capítulo 3: Características de los vehículos eléctricos necesarias para el sistema de gestión.....	35
3.1	Características vehículos eléctricos	35
3.1.1	Consumo de energía.....	36
3.1.2	Almacenamiento de energía.....	37
3.1.3	Estaciones de recarga.....	38
3.2	Mercado de vehículos eléctricos	39
3.3	Capacidad de carga de los vehículos eléctricos.....	41
3.4	Distancia recorrida	42
3.5	Conclusiones del capítulo	46
4	Capítulo 4: Estrategia de gestión de energía en estaciones de recarga de vehículos eléctricos en un edificio de oficinas.....	49
4.1	Definición de la estrategia.....	51
4.2	Desplazamiento de la demanda.....	54
4.3	Algoritmo de agrupamiento	58
4.3.1	Método del codo.....	63
4.3.2	Método del coeficiente de la silueta.....	64
4.3.3	Método de propagación de afinidad.....	66
4.4	Predicción de la energía disponible	68
4.4.1	Regresión lineal.....	69
4.4.2	Árbol de decisión.....	71
4.4.3	Bosques aleatorios de decisión	73
4.5	Conclusiones del capítulo	74
5	Capítulo 5: Validación de los algoritmos implementados en la estrategia de gestión.....	77
5.1	Prueba algoritmo de predicción de la demanda del edificio de oficinas.....	78
5.2	Prueba algoritmo de desplazamiento de la demanda de recarga de los vehículos eléctricos	81
5.3	Prueba algoritmo de agrupamiento	86
5.4	Conclusiones del capítulo	92
6	Conclusiones y recomendaciones	95
6.1	Conclusiones	95
6.2	Recomendaciones	96

Lista de figuras

	Pág.
Figura 2-1: Curva de carga edificio de oficinas.	24
Figura 2-2: Potencia máxima promedio por hora edificio de oficinas.....	25
Figura 2-3: Localidades de Bogotá con la mayor concentración de entidades financieras.	27
Figura 2-4: Potencia máxima promedio por día transformador AT/MT red de edificios de oficinas.	29
Figura 2-5: Potencia máxima promedio por horas transformador AT/MT red de edificios de oficinas.	30
Figura 2-6: Función “planear mi viaje” de Google Maps.....	32
Figura 2-7: Tiempo de desplazamiento por hora.....	33
Figura 2-8: Tiempo de desplazamiento hora a hora por día.	33
Figura 3-1: Tren de potencia básico de un vehículo eléctrico.	36
Figura 3-2: Visualización cuantitativa jerárquica modelos por marca.	39
Figura 3-3: Participación en el mercado de vehículos eléctricos por tecnología.....	40
Figura 3-4: Diagrama de cajas y bigotes capacidad de carga de energía máxima por marca.	41
Figura 3-5: Capacidad carga de energía máxima por marca.	42
Figura 3-6: Rango de distancia por marca.	43
Figura 3-7: Visualización cuantitativa jerárquica rango de distancia por marca.....	45
Figura 3-8: Histograma de datos encuesta movilidad 2015.....	45
Figura 4-1: Ciudades inteligentes.	49
Figura 4-2: Estrategia de gestión de recarga.	52
Figura 4-3: Flujo de programa sistema de gestión.	54
Figura 4-4: Algoritmo de desplazamiento de la demanda.	56
Figura 4-5: Restricción de energía requerida por vehículo.....	57
Figura 4-6: Matriz de asignación binaria.	57
Figura 4-7: Restricción de potencia disponible.....	58
Figura 4-8: Flujo de programa algoritmo de agrupamiento.....	59
Figura 4-9: Implementación en Python del algoritmo de agrupamiento.....	61
Figura 4-10: Conjunto original de datos.	62
Figura 4-11: Resultado del algoritmo de agrupación de datos.	63
Figura 4-12: Resultado implementación método del codo.....	64
Figura 4-13: Método del coeficiente de la silueta para agrupamiento malo.	65
Figura 4-14: Método del coeficiente de la silueta para un buen agrupamiento.....	66

Figura 4-15:	Implementación en Python del método de propagación de afinidad.	67
Figura 4-16:	Flujo de programa algoritmo de predicción de energía.....	69
Figura 4-17:	Regresión lineal.	70
Figura 4-18:	Implementación algoritmo de regresión lineal en Python.....	71
Figura 4-19:	Árbol de decisión.....	72
Figura 4-20:	Implementación en Python del algoritmo de Árbol de decisión.....	73
Figura 4-21:	Árbol de decisión.....	74
Figura 5-1:	Implementación algoritmo de árbol de decisión.....	79
Figura 5-2:	Demanda de potencia predicha por los algoritmos implementados.	81
Figura 5-3:	Comportamiento de la potencia requerida vs potencia disponible sin estrategia de gestión.....	82
Figura 5-4:	Comportamiento estrategia de gestión iniciando carga en el momento más próximo al ingreso al parqueadero.	83
Figura 5-5:	Comportamiento de esquema propuesto de gestión de recarga.....	84
Figura 5-6:	Resultado algoritmo de desplazamiento de la demanda.....	85
Figura 5-7:	Resultado de potencia total demandada.	86
Figura 5-8:	Conjunto original de datos.....	87
Figura 5-9:	Resultado del algoritmo de agrupación de datos.....	88
Figura 5-10:	Resultado implementación método del codo.	89
Figura 5-11:	Resultado implementación método del coeficiente de la silueta para $k=6$	89
Figura 5-12:	Resultado implementación método del coeficiente de la silueta para $k = 8$	90
Figura 5-13:	Resultado implementación del método de propagación de afinidad.	91
Figura 5-14:	Resultado del algoritmo de agrupación de datos para $k=3$	91
Figura 5-15:	Resultado del algoritmo de agrupación de datos para $k=3$	92

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1-1: Sistemas de carga.	13
Tabla 1-2: Carga inalámbrica.	13
Tabla 1-3: Cambio de baterías.	14
Tabla 1-4: Equipo de recarga de vehículos eléctricos (EVSE).	14
Tabla 1-5: Vehículo como fuente.	19
Tabla 1-6: Sistemas de almacenamiento de energía.	20
Tabla 1-7: Método de medición de potencia.	20
Tabla 2-1: Medidas estadísticas potencia máxima por horas edificio de oficinas.	25
Tabla 2-2: Medidas estadísticas potencia máxima por días edificio de oficinas.	26
Tabla 2-3: Localidades de Bogotá con la mayor concentración de entidades financieras.	28
Tabla 2-4: Medidas estadísticas potencia máxima por días transformador AT/MT red de edificios de oficinas.	29
Tabla 2-5: Medidas estadísticas potencia máxima por días transformador AT/MT red de edificios de oficinas.	30
Tabla 3-1: Modelos de vehículos por marca.	40
Tabla 3-2: Capacidad de carga energía por marca.	41
Tabla 3-3: Rango de distancia por marca.	43
Tabla 3-4: Rango de distancia por marca.	44
Tabla 3-5: Resultados encuesta de movilidad.	46
Tabla 5-1: Datos aleatorios de entrada.	80
Tabla 5-2: Tiempo de carga y parqueo.	81
Tabla 5-3: Potencia disponible y requerida por periodo de tiempo.	82

Introducción

El Grupo de Investigación en Compatibilidad Electromagnética de la Universidad Nacional de Colombia y el Grupo de Compatibilidad e Interferencia Electromagnética de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas, han realizado investigaciones en el área de calidad de energía, microrredes, recarga de vehículos eléctricos y gestión de la demanda. Por esta razón, y teniendo en cuenta la experiencia de los miembros de ambos grupos, se realizó una alianza estratégica para adelantar este proyecto de investigación.

El ministerio de minas y energía en el Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes no Convencionales PROURE tiene como enfoque la disminución de impactos ambientales, el manejo eficiente de los recursos y la promoción de fuentes energéticas no convencionales como un asunto de interés social, público y de conveniencia nacional [1].

Uno de los subprogramas prioritarios es el comercial, público, servicios, residencial e industrial. En el cual se establece la iluminación, refrigeración, edificaciones, alumbrado público, vehículos eléctricos y la gestión energética como focos de atención [1].

Alrededor del mundo el interés por los vehículos eléctricos ha crecido a tal punto, que se espera durante los próximos 20 años un aumento exponencial de la cantidad de vehículos eléctricos rodando en las calles [2].

Entre los principales inconvenientes frente una alta penetración de la tecnología de vehículos eléctricos en el país se encuentra la falta de estaciones de recarga y la adaptación de la red eléctrica [3]. De allí la importancia de optimizar la red eléctrica existente y los espacios de parqueo de vehículos.

Los edificios de oficinas son puntos de alta concentración de vehículos, que a futuro serán eléctricos. Debido a esto, es necesario disponer en las áreas de parqueo del servicio de recarga de vehículos. Esto plantea desafíos tanto para la administración de estos edificios,

como para los operadores de red, dado que la infraestructura existente podría resultar insuficiente y generase problemas de calidad de energía y potencia [4][5][6].

Debido a esto, se hace necesario disponer de una herramienta que gestione la recarga de los vehículos para aprovechar la infraestructura eléctrica y de parqueo existente en los edificios de oficinas. Esto permitirá que la penetración de vehículos eléctricos en el mercado local aumente y el uso de la infraestructura existente sea más eficiente.

Pregunta de investigación

A partir de la formulación anterior, se plantearon las siguientes preguntas de investigación: ¿Qué estrategia de respuesta a la demanda se puede implementar para la gestión de energía en estaciones de recarga en un edificio de oficinas? ¿Bajo qué escenarios es posible implementar esta estrategia de gestión? ¿Qué recursos tecnológicos son necesarios para la implementación de la estrategia de gestión?

Objetivos propuestos

Objetivo General

Desarrollar una estrategia de respuesta a la demanda para la gestión de energía en estaciones de recarga de vehículos eléctricos en un edificio de oficinas.

Objetivos específicos

- Identificar la capacidad para cargar vehículos eléctricos que tiene una red eléctrica de un edificio de oficinas. Con el fin de establecer la energía disponible hora a hora y contrastar los parámetros eléctricos con los técnicamente requeridos por los vehículos eléctricos.
- Establecer las características de los vehículos eléctricos, tales como tipo de vehículo, baterías, nivel de penetración, necesarias para desarrollar el sistema de gestión.
- Proponer una estrategia de gestión de energía en estaciones de recarga de vehículos eléctricos en un edificio de oficinas que permita mantener los parámetros de tensión y potencia de la red dentro de niveles adecuados.

Organización del documento

En respuesta a la necesidad de proponer una estrategia de recarga de vehículos eléctricos en un edificio de oficinas se organizó el presente documento. A continuación, se describe los capítulos constitutivos de la investigación:

El primer capítulo presenta un análisis de la capacidad de recarga de vehículos eléctricos que tiene un edificio de oficinas, analiza el tráfico circundante al edificio y el tiempo empleado por las personas en la ciudad de Bogotá para desplazarse en vehículos particulares hacia y desde su trabajo; esto como insumo para la estrategia de recarga propuesta.

El segundo capítulo expone el mercado de vehículos eléctricos actual, mostrando las principales características, tanto de los vehículos eléctricos como los sistemas de recarga, a tener en cuenta en la estrategia de gestión.

En el tercer capítulo se describe la estrategia de gestión propuesta, así como cada uno de los algoritmos implementados. Se incluye el código desarrollado en Python de varios de los algoritmos incluidos en la estrategia, así como diferentes metodologías para determinar variables clave en algunos de ellos.

Durante el cuarto capítulo se abordan las pruebas realizadas a cada uno de los algoritmos implementados en la estrategia de gestión, se presenta el resultado de validación y se entregan recomendaciones para un mejor comportamiento de los algoritmos.

Finalmente, se muestran las principales conclusiones del trabajo y recomendaciones para futuros trabajos que permitan continuar con la línea de investigación y profundizar más en el conocimiento.

1 Capítulo 1: Estado del arte

1.1 Esquema de gestión

Se realizó una búsqueda de los trabajos desarrollados en relación a esquemas de gestión de carga de vehículos eléctricos, encontrando que los principales enfoques están orientados a zonas residenciales o a estaciones de carga en carretera, similar a las actuales estaciones de recarga de combustible. Sin embargo, el enfoque novedoso que se da en el presente trabajo hacia los edificios de oficinas no es abordado directamente.

Estos trabajos presentan información relevante con respecto a la forma de abordar el problema y establecer claramente las limitaciones y alcance.

A continuación, se presentan varios artículos por orden cronológico y relevantes para el tema de investigación:

1.1.1 Demand response as a load shaping tool integrating electric vehicles (2012)

Este trabajo se enfoca en el desarrollo de una herramienta para la planificación del sector residencial por parte de las empresas distribuidoras de energía. Esta herramienta es especialmente útil porque optimizar la infraestructura actual frente a la entrada masiva de vehículos eléctricos, contribuyendo a disminuir los costos de inversión en infraestructura.

Se analizó el comportamiento de los consumidores frente a estímulos económicos, precios de mercado y confiabilidad del sistema eléctrico. Se propuso una metodología para la gestión de energía en el centro de distribución, incluyendo la conexión de vehículos eléctricos junto a la carga normal, sin exceder los límites de operación. [7]

1.1.2 Microgrids emergency management exploiting EV, demand response and energy storage (2013)

El concepto de microred dentro de las redes inteligentes da un marco adecuado para la gestión de la red de baja tensión y la coordinación de los recursos conectados a ella. El documento presenta una metodología para la gestión de la capacidad de almacenamiento de la microred con estrategias de carga de vehículos eléctricos y esquemas de respuesta a la demanda.[8]

1.1.3 Optimal power management for electric tugboats with unknown load demand (2014)

Se presenta un esquema óptimo de gestión de energía en montacargas eléctricos, inspirado en la administración de energía en vehículos eléctricos híbridos. Se desarrolla un nuevo esquema de predicción de la demanda, lo que permite implementar el esquema de optimización.[9]

1.1.4 Incentive Load Scheduling Schemes for PHEV Battery Exchange Stations in Smart Grid (2015)

Las estaciones de intercambio de baterías para vehículos eléctricos híbridos enchufables son similares a las estaciones actuales de gasolina. En estos lugares se realiza la recarga de las baterías, por lo tanto, se almacena energía en las baterías que podría ser vendida a una red inteligente durante periodos de alta demanda. Para esto se proponen varios esquemas de programación de carga. Entre los esquemas propuestos están la minimización pico – promedio, incentivos y el intercambio de información limitada entre estaciones.[10]

1.1.5 A distributed, real-time and non-parametric approach to demand response in the smart grid (2015)

Este artículo presenta una metodología de respuesta a la demanda, pero basándose en la flexibilidad de las cargas, esto permite agregar carga al sistema de la manera suave, de tal forma que se pueda ajustar fácilmente la generación.

La simulación se realizó en un escenario ficticio de una pequeña porción de la ciudad de Iowa, agregando en una serie de tiempo fuentes de generación y cargas. Para esto se asumió que cada casa tenía un vehículo eléctrico, lo que resultaba en un consumo del 30% del total de generación y se ajustaban las cargas cada 5 minutos, con el fin de generar una curva de carga diaria. [11]

1.1.6 Assessment of Energy Efficiency indicators on a residential building with Plug-in Electric Vehicles and energy action plans for users (2015)

En este artículo se presenta los resultados de un caso de estudio en el que se evalúa la eficiencia energética de un edificio residencial a partir de la implementación de una estrategia de gestión de recarga de vehículos eléctricos y un plan de modernización de dispositivos tecnológicos.

Se realiza un análisis teniendo en cuenta varias consideraciones como una descarga continua de la batería hora a hora, el comportamiento estadístico de la capacidad y el consumo de la batería siguiendo una distribución logarítmica normal y los niveles de penetración de vehículos variando en 30%, 50% y 100%. [12]

1.1.7 Methodology to Manage Electric Vehicles Charging in Real-Time (2016)

En este artículo se presenta el resultado de la implementación de una metodología de gestión de recarga de vehículos eléctricos en tiempo real, mitigando los impactos en el nivel de tensión, las pérdidas de energía y tomando en cuenta la capacidad máxima del transformador.

Se analizaron diferentes escenarios de penetración de vehículos eléctricos encontrando que con un 38% se tiene un efecto negativo sobre los niveles de tensión y para un 72% se sobrepasan los niveles de tensión y capacidad. [13]

1.1.8 Implementación de un Esquema de Gestión de Recarga de Vehículos Eléctricos Basado en V2G y Respuesta a la Demanda (2016)

Este trabajo presenta una estrategia de respuesta a la demanda para la recarga de vehículos eléctricos que permita aplanar la curva de demanda de energía diaria en un conjunto residencial.

La estrategia tiene en cuenta la energía demanda por un conjunto residencial sin vehículos eléctricos y a partir del estado de carga del vehículo se le asigna un horario de carga, con el objetivo de maximizar el uso de la red eléctrica, particularmente el transformador del conjunto residencial.

Adicionalmente, se considera el escenario en que el vehículo eléctrico no solo es una carga sino también una fuente de energía.[14]

1.1.9 Distributed Scheduling and Cooperative Control for Charging of Electric Vehicles at Highway Service Stations (2017)

La infraestructura de recarga de vehículos eléctricos es muy limitada. Adicionalmente los vehículos deben permanecer en la estación de carga un tiempo considerable y esto varía de una estación a otra. Por tal motivo, en este trabajo se propuso una estrategia para gestionar las colas entre estaciones de recarga, basándose en la información de energía disponible en la estación y los flujos de tránsito.

Para cumplir con este objetivo se implementó un algoritmo de programación distribuida y un sistema de control cooperativo para cada vehículo eléctrico. El algoritmo usa la información de las estaciones de recarga cercanas y propende porque todas se utilicen de manera uniforme. Además, se analiza la información de carga de las baterías de los vehículos para determinar la posibilidad de asignar esa cantidad de carga a una estación.[15]

1.2 Carga de vehículos eléctricos

1.2.1 Smart Car: Smart charging and driving control for electric vehicles in the smart grid (2014)

La industria y la academia están buscando tecnologías y aplicaciones que permitan optimizar el costo de conducción de un vehículo eléctrico. Es un problema manejar la incertidumbre en la demanda y el precio de la electricidad. En este artículo, se modela el problema de minimización de costos de conducción y se formula como un problema de optimización.

La demanda de los vehículos y el precio de la electricidad varían en el tiempo y se utiliza el método de modelo de control predictivo para modelar la carga dinámica, durante la carga y descarga del vehículo.[16]

1.2.2 New services of plug-in electric vehicles charging stations (2016)

En este artículo se presenta un nuevo enfoque para los parqueaderos de vehículos, en los cuales se oferta el servicio de recarga de vehículos eléctricos, siendo una parte activa del mercado de energía minorista.

Se realiza un análisis partiendo desde las características de recarga de los vehículos eléctricos, pasando por las oportunidades desde el punto de vista de negocio, la certificación LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) y la participación del gobierno, así como los costos de implementación y la definición de la ubicación de la estación de recarga.[17]

1.2.3 Analysis of plug-in electric vehicles penetration in residential buildings under deterministic and stochastic scenarios (2016)

Este trabajo presenta un análisis comparativo de la red eléctrica residencial con la inclusión de vehículos eléctricos. A partir de simulaciones realizadas en Matlab y DigSilent® se analiza el comportamiento estocástico y determinístico de las curvas de carga.

Se obtiene la curva de carga agregada hora a hora, el comportamiento de la tensión en cada uno de los nodos y las pérdidas en el sistema en función de la penetración de los vehículos eléctricos para un escenario estocástico y uno determinístico.[18]

1.3 Vigilancia tecnológica

1.3.1 Objetivo vigilancia

El objetivo principal para la elaboración de esta vigilancia tecnológica, ha sido la identificación de patentes, normatividad y estado del mercado relacionado con vehículos eléctricos, dando un gran énfasis a el tema de la recarga. Esto con el fin de identificar las fortalezas, debilidades y el estado del arte de la investigación desarrollada.

1.3.2 Patentes

1.3.2.1 Safety device for preventing overcharge and secondary battery therewith (USA Patent No US 20060051660 A1, 2005)

Las baterías secundarias son baterías recargables incluyendo las baterías del Ni-Cd, las baterías del Ni-MH, y las baterías del ion del litio. Estas últimas son altamente utilizadas en dispositivos electrónicos y vehículos eléctricos.

Aunque las baterías de ion – litio tienen grandes ventajas como la alta densidad de energía, posee la gran desventaja de ser vulnerable a la sobrecarga. Una sobrecarga de este tipo de baterías puede causar explosiones e incendios.

Por tal motivo, fue desarrollado un dispositivo de seguridad para la protección de baterías recargables ante la sobrecarga, la sobretensión, la sobrecorriente y el sobrecalentamiento.[19]

1.3.2.2 Electric power grid control system and method for electric power control (USA Patent No US 20130184894 A1, 2010)

El Sistema se encarga de mantener el nivel de tensión en el punto de conexión de la red. Cuenta con elementos de medida de tensión, corriente, dos generadores distribuidos y un sistema de control de generadores centralizado.

Cuando el sistema detecta una desviación de los rangos del nivel de tensión, ajusta lo generadores con el fin de volverlo afijar dentro del rango. Este sistema es aplicable a las estaciones de recarga cuando el vehículo actúa como fuente de energía.[20]

1.3.2.3 Adapter, and vehicle and method for performing power feeding using adapter (USA Patent No US 20140002011 A1, 2012)

El invento consiste en un adaptador que suministra energía eléctrica a un dispositivo eléctrico que se conecta a un vehicule eléctrico enchufable a través de su cable de carga.

El adaptador se comunica con el sistema de control de vehículo el cual activa los inversores para entregar la energía necesaria. El cable cuenta con un adaptador para conectar a la red con el fin de cargar el vehículo y otro para suministrar energía a un artefacto eléctrico conectado a él.[21]

1.3.2.4 System and method of estimating available driving distance (USA Patent No US 20160097652 A1, 2014)

Sistema desarrollado le permite al usuario conocer la distancia que puede recorrer con la energía almacenada en las baterías. El sistema cuenta con un controlador que muestra en un mapa la distancia que se puede recorrer desde la posición actual.

Para el cálculo de la distancia se tienen en cuenta múltiples trayectorias posibles, inconvenientes típicos de la conducción y eventos que agotan la batería a lo largo del recorrido, lo cual permite actualizar la información de manera constante.

El controlador muestra en el mapa las posibles rutas que se pueden tomar con la cantidad de energía almacenada y las marca con una línea de contorno.[22]

1.3.2.5 Wireless power transmission apparatus and method (USA Patent No US 20140340033 A1, 2014)

El invento consiste en un artefacto de carga inalámbrica que identifica la capacidad de carga de cada uno de los dispositivos conectados y la disponibilidad de carga.

El controlador evalúa la necesidad de carga, analiza la capacidad de carga y hace un seguimiento de la carga de cada uno de los dispositivos, manteniendo todo dentro de los límites de carga inalámbrica del artefacto.[23]

1.3.2.6 Information distribution method, information distribution server, and charging device (USA Patent No US 20150127462 A1, 2015)

Es un método de distribución de información a dispositivos electrónicos que incluyen la carga inalámbrica de la batería, una unidad de visualización que presenta información y una unidad de comunicación inalámbrica.

El método de distribución de información inicia adquiriendo la información sobre los propietarios de dispositivos electrónicos a través de al menos un dispositivo de carga que incluye una unidad de comunicación que comunica con la unidad de comunicación inalámbrica del dispositivo.

El Sistema adquiere la información de 50 propietarios de dispositivos electrónicos y de 20 dispositivos que son cargados desde el 1 al 20. A partir de sus características, crea un grupo, que está constituido por elementos de múltiples características.

El sistema almacena la información de 40 grupos de acuerdo con las características del grupo y la envía a los dispositivos a ser cargados del 1 al 20.[24]

1.3.3 Normatividad

En esta sección se listan las normas relacionadas en especial con la carga de vehículos eléctricos. En las **Tabla 1-1** a **Tabla 1-7** se realiza una clasificación por temas de la normatividad internacional que es aplicable en diversos temas relacionados con los

sistemas de carga de vehículos eléctricos. Este fundamental esta información debido a que permite identificar parte del alcance del sistema de gestión.

Tabla 1-1: Sistemas de carga.

AÑO DE PUBLICACIÓN	DESARROLLADOR	DENOMINACIÓN	TÍTULO
1998	UL	1998	Standards for software in programmable components

Nombre de la fuente: Elaboración propia.

Tabla 1-2: Carga inalámbrica.

AÑO DE PUBLICACIÓN	DESARROLLADOR	DENOMINACIÓN	TÍTULO
2015/02	IEC	61980-1 Ed. 1.0	Electric vehicle wireless power transfer systems (WPT) - Part 1: General requirements
	IEC	TS 61980-2 Ed. 1.0	Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems - Part 2 specific requirements for communication between electric road vehicle (EV) and infrastructure with respect to wireless power transfer (WPT) systems
2017/01	IEC	TS 61980-3 Ed. 1.0	Electric vehicle wireless power transfer (WPT) systems - Part 3 specific requirements for the magnetic field power transfer systems
2009	IEEE	C63.4	American National Standard for Methods of Measurement of Radio-Noise Emissions from Low-Voltage Electrical and Electronic Equipment in the Range of 9 kHz to 40 GHz
	ISO	15118-6	Road vehicles -- Vehicle to grid communication interface -- Part 6: General information and use-case definition for wireless communication
	ISO	15118-7	Road vehicles -- Vehicle to grid communication interface -- Part 7: Network and application protocol requirements for wireless communication
	ISO	15118-8	Road vehicles -- Vehicle to grid communication interface -- Part 8: Physical layer and data link layer requirements for wireless communication
	ISO	PAS 19363	Electrically propelled road vehicles -- Magnetic field wireless power transfer -- Safety and interoperability requirements
	OSHA	1926,441	Batteries and battery charging General requirements
2015	SAE	J2954	Wireless Charging of Electric and Plug-in Hybrid Vehicles
	UL	2750	Standard for Safety for Electric Vehicle Wireless Charging Equipment

Nombre de la fuente: Elaboración propia.

Tabla 1-3: Cambio de baterías.

AÑO DE PUBLICACIÓN	DESARROLLADOR	DENOMINACIÓN	TÍTULO
2015/04	IEC	62840-1 Ed. 1.0	Electric vehicle battery swap system Part 1: System description and general requirements
2016	IEC	62840-2 Ed. 1.0	Electric Vehicles Battery Swap System - Part 2: Safety requirements
2000	SAE	2000-05-0356	Design and Safety Considerations for Automated Battery Exchange Electric Vehicles
	SAE	J3073	Battery Thermal Management
	China GB/T	GB/T XXX	Electric energy metering for electric vehicle off-board charger
	China GB/T	GB/T XXX	General Requirements of Electric Vehicle Battery Swap Station
	China GB/T	GB/T XXX	Terminology of Electric Vehicle Charging/Battery Swap Infrastructure
	China Professional	NB/T XXX	Technical Guide for Electric Vehicle Charging/Battery Swap Infrastructure Construction
	China Professional	NB/T XXX	Charging equipment inspection and testing specifications Part 1: Electric vehicle off-board charger
	China Professional	NB/T XXX	Charging equipment inspection and testing specifications Part 2: Electric vehicle A.C. charging spot
	China Professional	NB/T XXX	Code for construction and acceptance of electric vehicle charging infrastructure engineering
	China Professional	NB/T XXX	Communication Protocol between Monitoring System in Electric Vehicle Charging Station/Battery Swap Station and Charging Equipment/Battery Swap Equipment
	China Professional	NB/T XXX	General requirements for electric vehicle battery-pack-swap equipment

Nombre de la fuente: Elaboración propia.

Tabla 1-4: Equipo de recarga de vehículos eléctricos (EVSE).

AÑO DE PUBLICACIÓN	DESARROLLADOR	DENOMINACIÓN	TÍTULO
2009	IEC	60038	IEC standard voltages
2009	IEC	60059	IEC standard current ratings
2009	IEC	60269-1	Low-voltage fuses - Part 1: General requirements
	IEC	60309 series	Plugs, socket-outlets and couplers for industrial purposes

1974	IEC	60481	Coupling devices for power line carrier systems
2001	IEC	60529	Degrees of protection provided by enclosures (IP Code)
	IEC	60884	Plugs and socket-outlets for household and similar purposes
2011	IEC	60947-1	Low-voltage switchgear and controlgear - Part 1: General rules
2009	IEC	60947-2	Low-voltage switchgear and controlgear - Part 2: Circuit-breakers
2008	IEC	60947-3	Low-voltage switchgear and controlgear - Part 3: Switches, disconnectors, switch-disconnectors and fuse-combination units
	IEC	60947-6	Low-voltage switchgear and controlgear - Part 6-1: Multiple function equipment
	IEC	60950 series	Information technology equipment - Safety
2009	IEC	61140	Protection against electric shock - Common aspects for installation and equipment
	IEC	61508	Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems
2010 y 2015/06	IEC	61851-1 Ed. 2.0	Electric vehicle conductive charging system - Part 1: General requirements
2015/07	IEC	61851-3-1 Ed. 1.0	Electric Vehicles conductive power supply system - Part 3-1: General Requirements for Light Electric Vehicles (LEV) AC and DC conductive power supply systems
2015/07	IEC	61851-3-2 Ed. 1.0	Electric Vehicles conductive power supply system - Part 3-2: Requirements for Light Electric Vehicles (LEV) DC off-board conductive power supply systems
2015/07	IEC	61851-3-3 Ed. 1.0	Electric Vehicles conductive power supply system - Part 3-3: Requirements for Light Electric Vehicles (LEV) battery swap systems
2015/07	IEC	61851-3-4 Ed. 1.0	Electric Vehicles conductive power supply system - Part 3-4: Requirements for Light Electric Vehicles (LEV) communication
2001	IEC	61851-21 Ed. 1.0	Electric vehicle conductive charging system - Part 21: Electric vehicle requirements for conductive connection to an a.c./d.c. supply
2015/01	IEC	61851-21-1 Ed. 1.0	Electric vehicle conductive charging system - Part 21-1 Electric vehicle onboard charger EMC requirements for conductive connection to an a.c./d.c. supply
2014	IEC	61851-21-2 Ed. 1.0	Electric vehicle conductive charging system - Part 21-2: EMC requirements for off-board electric vehicle charging systems
2001	IEC	61851-22 Ed. 1.0	Electric vehicle conductive charging system - Part 22: AC electric vehicle charging station
2014/03	IEC	61851-23 Ed. 1.0	Electric vehicle conductive charging system- Part 23: DC electric vehicle charging station
2014/03	IEC	61851-24 Ed. 1.0	Electric vehicle conductive charging system - Part 24: Digital communication between a d.c. EV

16 Desarrollo de una estrategia de respuesta a la demanda para la gestión de energía en estaciones de recarga de vehículos eléctricos en edificios de oficinas

			charging station and an electric vehicle for control of d.c. charging
2002	IEC	61947-1	Electronic projection - Measurement and documentation of key performance criteria - Part 1: Fixed resolution projectors
2001	IEC	61947-2	Electronic projection - Measurement and documentation of key performance criteria - Part 2: Variable resolution projectors
2008	IEC	62040-1	Uninterruptible power systems (UPS) - Part 1: General and safety requirements for UPS
2005	IEC	62040-2	Uninterruptible power systems (UPS) - Part 2: Electromagnetic compatibility (EMC) requirements
2011	IEC	62040-3	Uninterruptible power systems (UPS) - Part 3: Method of specifying the performance and test requirements
2014/06	IEC	62196-1 Ed. 3.0	Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles - Part 1: General requirements
2011 y 2015/05	IEC	62196-2 Ed. 1.0	Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles - Part 2: Dimensional compatibility and interchangeability requirements for a.c. pin and contact-tube accessories
2014/06	IEC	62196-3 Ed. 1.0	Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles - Part 3: Dimensional compatibility and interchangeability requirements for d.c. and a.c./d.c. pin and contact-tube vehicle couplers
2015/05	IEC	62196-4 Ed. 1.0	Future IEC 62196-4: Plugs, socket-outlets, and vehicle couplers - Conductive charging electric vehicles - Part 4: Dimensional compatibility and interchangeability requirements for a.c., d.c. and a.c./d.c. vehicle couplers for Class II or Class III light e
	IEC	TS 62351	Power systems management and associated information exchange - Data and communications security
2010	IEEE	1901-2010	Broadband over Power Line Networks: Medium Access Control and Physical Layer Specifications
	IEEE	P2030.1.1	Standard Technical Specifications of a DC Quick Charger for Use with Electric Vehicles
2008	ISO	8820-1	Road vehicles -- Fuse-links -- Part 1: Definitions and general test requirements
2005	ISO	8820-2	Road vehicles -- Fuse-links -- Part 2: User's guide
2010	ISO	8820-3	Road vehicles -- Fuse-links -- Part 3: Fuse-links with tabs (blade type) Type C (medium), Type E (high current) and Type F (miniature)
2010	ISO	8820-4	Road vehicles -- Fuse-links -- Part 4: Fuse-links with female contacts (type A) and bolt-in contacts (type B) and their test fixtures
2007	ISO	8820-5	Road vehicles -- Fuse-links -- Part 5: Fuse-links with axial terminals (Strip fuse-links) Types SF 30 and SF 51 and test fixtures

2007	ISO	8820-6	Road vehicles -- Fuse-links -- Part 6: Single-bolt fuse-links
2007	ISO	8820-7	Road vehicles -- Fuse-links -- Part 7: Fuse-links with tabs (Type G) with rated voltage of 450 V
2015/06	ISO	16254	Measurement of minimum noise emitted by road vehicles
2014	ISO	17409,2	Electrically propelled road vehicles - Connection to an external electric power supply - Safety requirements
2008	ISO	19092	Financial services -- Biometrics -- Security framework
	ISO	26262	Road vehicles -- Functional safety
2005 / 2013	ISO/IEC	27001	Information technology -- Security techniques -- Information security management systems -- Requirements
2014 / 2017	NFPA	70®	National Electrical Code®
2012/10	SAE	J1772TM	SAE Electric Vehicle and Plug in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler
2009	SAE	J1773	Electric Vehicle Inductively Coupled Charging
2008	SAE	J2293/1	Energy Transfer System for Electric Vehicles--Part 1: Functional Requirements and System Architectures
2008	SAE	J2293/2	Energy Transfer System for Electric Vehicles - Part 2: Communication Requirements and Network Architecture
2010/04	SAE	J2836/1TM V1	Use Cases for Communication Between Plug-in Vehicles and the Utility Grid
2013/11	SAE	J2847/1 V4	Communication for Smart Charging of Plug-in Electric Vehicles using Smart Energy Profile 2.0
2012-08 / 2014	SAE	J2847/2 V2	Communication between Plug-in Vehicles and Off-Board DC Chargers
2011/12	SAE	J2894/1	Power Quality Requirements for Plug In Electric Vehicle Chargers
	SAE	J2894/2	Power Quality Requirements for Plug In Vehicle Chargers - Part 2: Test Methods
2012/09 y 2014	SAE	J2931/1 V2	Digital Communications for Plug-in Electric Vehicles
2014	SAE	J2931/2	Inband Signaling Communication for Plug-in Electric Vehicles
2014	SAE	J2931/3	PLC Communication for Plug-in Electric Vehicles
2014-10	SAE	J2931/4 V3	Broadband PLC Communication for Plug-in Electric Vehicles
2015	SAE	J2931/5 V1	Telematics Smart Grid Communications between Customers, Plug-In Electric Vehicles (PEV), Energy Service Providers (ESP) and Home Area Networks (HAN)
2015	SAE	J2931/6 V1	Digital Communication for Wireless Charging Plug-in Electric Vehicles
2015	SAE	J2931/7 V1	Security for Plug-in Electric Vehicle Communications
2013/10 y 2014	SAE	J2953/1 V1	Plug-In Electric Vehicle (PEV) Interoperability with Electric Vehicle Supply Equipment (EVSE)

18 Desarrollo de una estrategia de respuesta a la demanda para la gestión de energía en estaciones de recarga de vehículos eléctricos en edificios de oficinas

2014 y 2014	SAE	J2953/2 V1	Test Procedures for the Plug-In Electric Vehicle (PEV) Interoperability with Electric Vehicle Supply Equipment (EVSE)
2015	SAE	J2954	Wireless Charging of Electric and Plug-in Hybrid Vehicles
	SAE	J3068	Electric Vehicle Power Transfer System Using a Three-phase Capable Coupler
2010	UL	62	Flexible Cords and Cables
2004	UL	991	Tests for Safety-Related Controls Employing Solid-State Devices
2009	UL	2202	Safety of Electric Vehicle (EV) Charging System Equipment
2012	UL	NMX-J-668/1-ANCE / CSA C22.2 No. 281.1 / UL 2231-1	Standard for Safety for Personnel Protection Systems for Electric Vehicle (EV) Supply Circuits: General Requirements
2012	UL	NMX-J-668/2-ANCE / CSA C22.2 No. 281.2 / UL 2231-2	Standard for Safety for Personnel Protection Systems for Electric Vehicle (EV) Supply Circuits: Particular Requirements for Protection Devices for Use in Charging Systems
2013	UL	NMX-J-678-ANCE/CSA C22.2 No. 282-13/UL 2251	Standard for Plugs, Receptacles, and Couplers for Electric Vehicles
2010	UL	2271	Batteries and Battery Packs for Use in Light Electric Vehicles
2013	UL	NMX-J-677-ANCE/CSA C22.2 NO. 280-13/UL 2594	Standard for Electric Vehicle Supply Equipment
2013/01	UN	UN/SCETD G/38/INF.22	Transport of waste lithium batteries and damage/defective lithium batteries
	CHAdeMO	CHAdeMO	CHAdeMO Protocol
2011	CSA	TIL I-44	Interim Certification Requirements for off-board charging system equipment for recharging the storage batteries of electric vehicles with inputs and outputs rated 600 V or less.
2011	CSA	TIL J-39	Interim Certification Requirements for Electric Vehicle Cables, rated 600 V maximum

Nombre de la fuente: Elaboración propia.

Tabla 1-5: Vehículo como fuente.

AÑO DE PUBLICACIÓN	DESARROLLADOR	DENOMINACIÓN	TÍTULO
2014-02	EPRI		Common Functions for Smart Inverters, Version 3
2009-03 y 2015-09	IEC	61850-7-420 Ed. 1.0	Communication networks and systems for power utility automation - Part 7-420: Basic communication structure - Distributed energy resources logical nodes
2013-02	IEC	TR 61850-90-7 Ed.1.0	Communication networks and systems for power utility automation - Part 90-7: IEC 61850 object models for power converters in distributed energy resources (DER) systems
	IEC	TR 61850-90-8 Ed. 1.0	IEC 61850 object models for electrical mobility
	IEC	TR 61850-90-9 Ed. 1.0	Use of IEC 61850 for electrical storage systems
2001	IEC	61851-21 Ed. 1.0	Electric vehicle conductive charging system - Part 21: Electric vehicle requirements for conductive connection to an a.c./d.c. supply
2001	IEC	61851-22 Ed. 1.0	Electric vehicle conductive charging system - Part 22: AC electric vehicle charging station
2014-03	IEC	61851-23 Ed. 1.0	Electric vehicle conductive charging system- Part 23: DC electric vehicle charging station
2014-03	IEC	61851-24 Ed. 1.0	Electric vehicle conductive charging system - Part 24: Digital communication between a d.c. EV charging station and an electric vehicle for control of d.c. charging
	IEEE	1547 Series*	Standard for Interconnecting Distributed Resources with Electric Power Systems
2011	IEEE	2030	IEEE Guide for Smart Grid Interoperability of Energy Technology and Information Technology Operation with the Electric Power System (EPS), End-Use Applications, and Loads
	IEEE	P2030.1	Guide for Electric-Sourced Transportation Infrastructure
2013	IEEE	2030,5	IEEE Adoption of Smart Energy Profile 2.0 Application Protocol Standard
2012	IEEE (ASC C2)	C2	National Electrical Safety Code®
2014 y 2017	NFPA	70®	National Electrical Code®
2012-10	SAE	J1772TM	SAE Electric Vehicle and Plug in Hybrid Electric Vehicle Conductive Charge Coupler
2013-01 y 2015	SAE	J2836/3TM V1	Use Cases for Plug-in Vehicle Communication as a Distributed Energy Resource
2015	SAE	J2836/5TM V1	Use Cases for Communication between Plug-in Vehicles and their customers
2013-12	SAE	J2847/3 V1	Communication for Plug-in Vehicles as a Distributed Energy Resource
2015	SAE	J2847/5 V1	Communication between Plug-in Vehicles and Their Customers

	SAE	J3072	Interconnection Requirements for Onboard, Utility-Interactive, Inverter Systems
2010	UL	1741	Inverters, Converters, Controllers and Interconnection System Equipment for Use With Distributed Energy
2014-03	UL	9741	Outline of Investigation for Bidirectional Electric Vehicle (EV) Charging System Equipment

Nombre de la fuente: Elaboración propia.

Tabla 1-6: Sistemas de almacenamiento de energía.

AÑO DE PUBLICACIÓN	DESARROLLADOR	DENOMINACIÓN	TÍTULO
2004	IEC	60050-482	International Electrotechnical Vocabulary (IEV) - Part 482: Primary and secondary batteries
2012	ISO	8713	Electric road vehicles -- Vocabulary
2014	SAE	J1715	Hybrid Electric Vehicle (HEV) & Electric Vehicle (EV) Terminology
2013/07	SAE	J1715/2 V1	Battery Terminology

Nombre de la fuente: Elaboración propia.

Tabla 1-7: Método de medición de potencia.

AÑO DE PUBLICACIÓN	DESARROLLADOR	DENOMINACIÓN	TÍTULO
	SAE	J2907	Hybrid Motor Ratings
	SAE	J2908	Hybrid Electric Powertrain Power Test Methods and Definitions

Nombre de la fuente: Elaboración propia.

El análisis de la normatividad referente a vehículos eléctricos permitió identificar normatividad relacionada con los sistemas de carga, almacenamiento de energía, autonomía y telemática, los cuales son fundamentales dentro del desarrollo del proyecto, dado que permitió establecer las limitaciones y retos del mismo.

1.4 Conclusiones del capítulo

La mayoría de esquemas de gestión de recarga de vehículos eléctricos se enfocan en lugares residenciales o en estaciones de recarga similares a las actuales estaciones de servicio de recarga de combustibles fósiles.

Este trabajo se centra de forma innovadora en una estrategia de gestión de recarga de vehículos eléctricos en un edificio de oficinas y adicionalmente, introduce algoritmos de aprendizaje automático para la predicción de la potencia disponible para recarga y la clasificación de los vehículos eléctricos adyacentes al edificio. Estos algoritmos y variables no fueron considerados dentro de las estrategias de gestión revisadas en este estado del arte.

2 Capítulo 2: Identificación de la capacidad para cargar vehículos eléctricos de un edificio de oficinas

La ley 1715 de 2014 tiene como objeto promover la gestión eficiente de la energía, que comprende tanto la eficiencia energética como la respuesta a la demanda, para lo cual le atribuye a la Comisión de Regulación de Energía y Gas (CREG) la responsabilidad de establecer mecanismos regulatorios para incentivar la respuesta a la demanda con el objetivo de aplanar la curva de demanda. Por tal motivo, la propuesta de la resolución CREG 179/2014 regula la gestión eficiente de la energía.

Los edificios del sector servicios como los edificios de oficinas cuentan con un importante potencial de ahorro de energía mediante la implementación de esquemas de gestión de energía como el propuesto en la norma ISO 50001:2011 [25], [26].

En este capítulo se analiza la capacidad de un edificio de oficinas para una estrategia de gestión de recarga de vehículos eléctricos. Para tal fin, se realizó el análisis de la potencia eléctrica demandada por un edificio de oficinas y por una zona de oficinas, se estableció las zonas donde se aglomeran edificios de oficinas en la ciudad de Bogotá – Colombia y se analizó el flujo vehicular en una de estas zonas

2.1 Evaluación de parámetros eléctricos de un edificio de oficinas en condiciones normales de operación

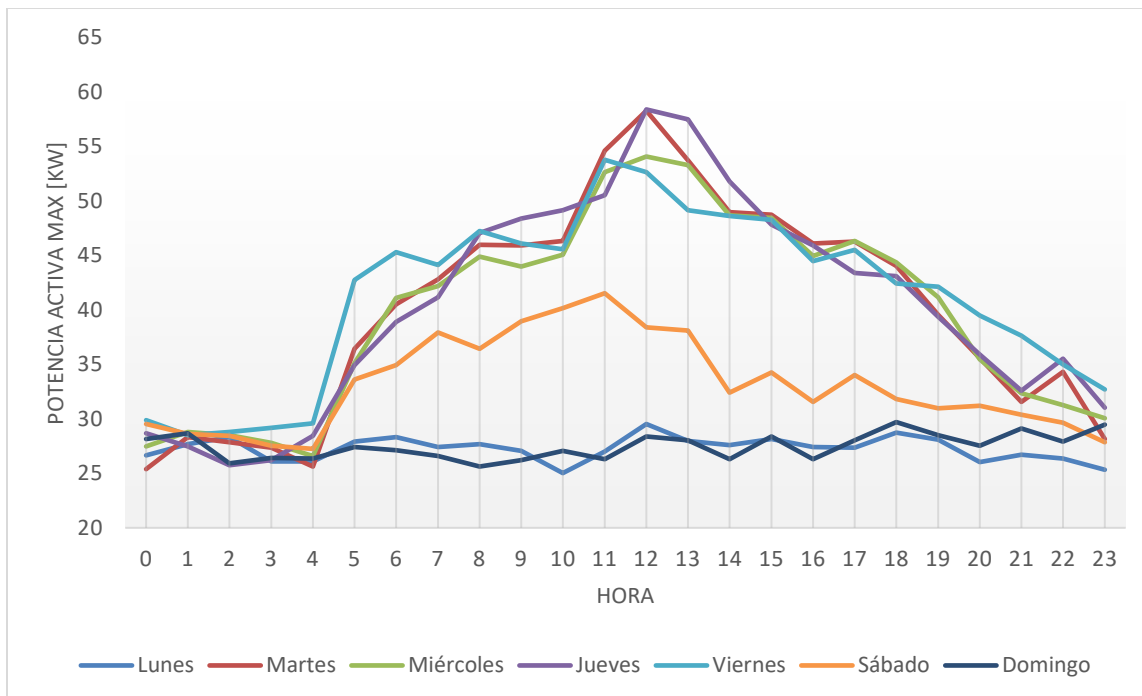
Con el fin de establecer la capacidad de un edificio de oficinas para recargar vehículos eléctricos sin necesidad de repotenciar el transformador de potencia de la instalación, se realizó la medición de la potencia suministrada por el mismo durante condiciones normales de operación durante una semana del mes de agosto de 2018.

La medición se realizó con un analizador de calidad de energía Fluke 430-II, con certificado de calibración vigente hasta mayo de 2019, en un edificio de oficinas de una entidad bancaria que cuenta con un transformador de potencia MT / BT de 150 kVA, 11,4 kV / 208 V, 60 HZ. Este edificio se encuentra ubicado en la ciudad de Bogotá – Colombia en la localidad de Chapinero.

La **Figura 2-1** presenta el comportamiento de la demanda de potencia hora a hora por cada día de la semana. En esta grafica se observa que durante los días martes y jueves se presenta la mayor demanda de potencia hacia el mediodía.

Adicionalmente, se observa hay un comportamiento no esperado el día lunes. Dado que este es un día laboral se esperaba un comportamiento similar al resto de días laborales. Sin embargo, el comportamiento observado es similar a un día de fin de semana, esto se debe a que para la semana de medición el lunes fue un día feriado.

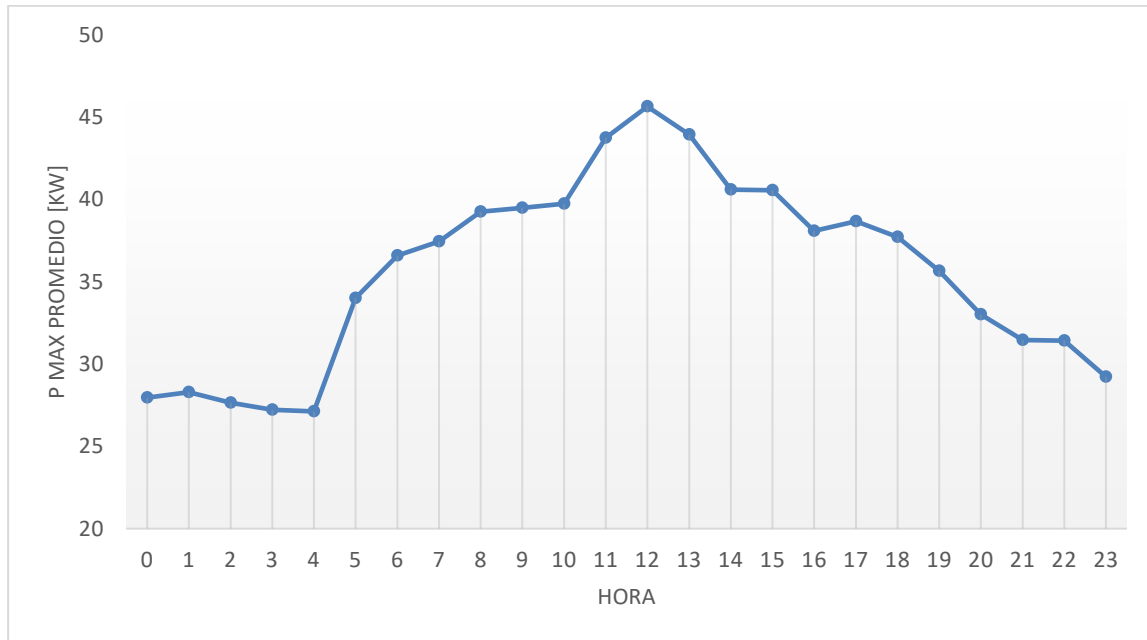
Figura 2-1: Curva de carga edificio de oficinas.



Nombre de la fuente: Elaboración propia.

La **Figura 2-2** muestra que el consumo de potencia máximo en promedio durante la semana se da hacia el mediodía. Durante ese pico de potencia el transformador tan solo está cargado a un 38,92 % de su capacidad nominal.

Figura 2-2: Potencia máxima promedio por hora edificio de oficinas.



Nombre de la fuente: Elaboración propia.

La **Tabla 2-1** presenta un análisis estadístico de los datos de potencia suministrada hora a hora, el promedio de potencia máxima se encuentra entre 30 y 46 kW, dejando una gran cantidad de potencia remanente que puede ser aprovechada para la recarga de vehículos eléctricos sin necesidad de repotenciar el transformador.

Tabla 2-1: Medidas estadísticas potencia máxima por horas edificio de oficinas.

HORA	PROMEDIO DE POTENCIA MÁX. [KW]	MÁX. DE POTENCIA MÁX. [KW]	MÍN. DE POTENCIA MÁX. [KW]	DESV. EST. DE POTENCIA MÁX. [KW]	VAR. DE POTENCIA MÁX. [KW]	# DE DATOS
0	27,96	29,88	25,38	1,60	2,55	7
1	28,29	28,80	27,48	0,52	0,27	7
2	27,65	28,80	25,74	1,28	1,63	7
3	27,22	29,16	26,10	1,09	1,19	7
4	27,13	29,58	25,62	1,41	2,00	7
5	34,01	42,72	27,42	5,24	27,44	7

6	36,59	45,30	27,12	6,80	46,27	7
7	37,45	44,10	26,58	7,39	54,62	7
8	39,26	47,22	25,62	9,39	88,17	7
9	39,51	48,36	26,22	9,26	85,71	7
10	39,75	49,14	25,02	9,76	95,20	7
11	43,76	54,60	26,28	12,47	155,53	7
12	45,66	58,38	28,38	13,24	175,23	7
13	43,95	57,48	27,96	12,49	155,96	7
14	40,61	51,78	26,28	11,29	127,52	7
15	40,57	48,72	28,14	9,85	97,06	7
16	38,09	46,08	26,28	9,20	84,72	7
17	38,69	46,32	27,36	8,64	74,61	7
18	37,73	44,34	28,74	7,24	52,43	7
19	35,67	42,12	28,08	6,21	38,59	7
20	33,03	39,48	26,04	4,91	24,08	7
21	31,47	37,62	26,70	3,40	11,57	7
22	31,42	35,52	26,34	3,64	13,21	7
23	29,22	32,70	25,32	2,39	5,73	7

Nombre de la fuente: Elaboración propia.

Durante la semana analizada el comportamiento en los días laborales fue bastante similar como se observa en la **Tabla 2-2**, los días martes y jueves son los que presentaron la demanda de potencia más alta.

Tabla 2-2: Medidas estadísticas potencia máxima por días edificio de oficinas.

DIAS	PROMEDIO DE POTENCIA MÁX. [KW]	MÁX. DE POTENCIA A MÁX. [KW]	MÍN. DE POTENCIA A MÁX. [KW]	DESV. EST. DE POTENCIA A MÁX. [KW]	VAR. DE POTENCIA A MÁX. [KW]	# DE DATOS
DOMINGO	27,47	29,70	25,62	1,18	1,40	24
LUNES	27,27	29,52	25,02	1,08	1,17	24
MARTES	40,09	58,26	25,38	9,87	97,50	24
MIÉRCOLES	39,77	54,06	26,58	8,98	80,69	24
JUEVES	40,37	58,38	25,74	9,83	96,64	24
VIERNES	41,19	53,76	28,50	7,92	62,74	24
SÁBADO	33,14	41,52	27,24	4,31	18,58	24

Nombre de la fuente: Elaboración propia.

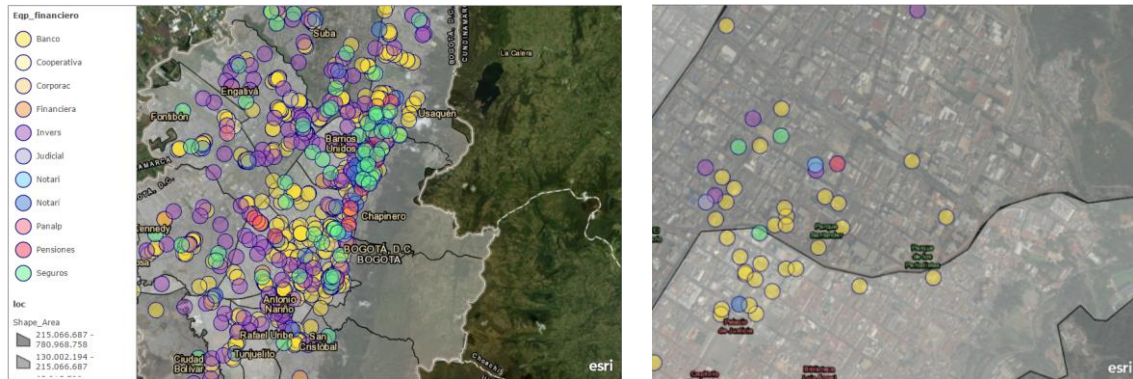
2.2 Búsqueda zonas de concentración de edificios de oficinas

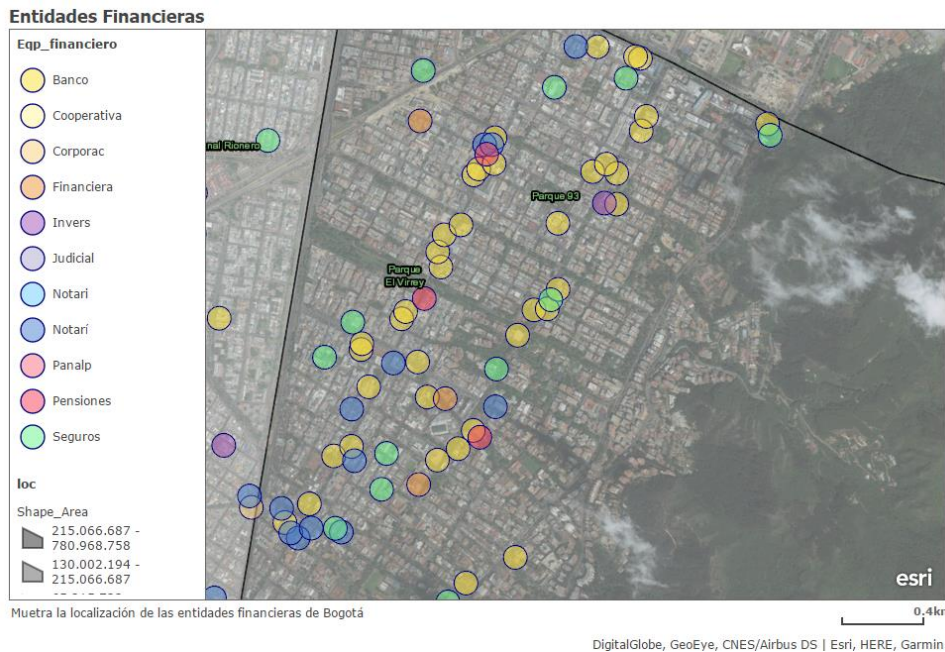
Esta sección presenta las zonas de Bogotá con mayor concentración de sedes de entidades bancarias. Dichas entidades son uno de los sectores que desarrollan su actividad económica principalmente en edificios de oficinas.

Esta información es de especial interés para el desarrollo de la estrategia de gestión porque permite establecer las zonas con la mayor cantidad de edificios de oficinas para estudiar la potencia demandada y el tráfico vehicular en estas zonas con el fin determinar las necesidades de recarga de vehículos eléctricos y la oferta de potencia eléctrica para tal fin.

Como se observa en la parte superior derecha de la **Figura 2-3**, las localidades de Santafé y la Candelaria agrupan la mayor cantidad de entidades de este tipo en una menor área geográfica. Sin embargo, la zona del parque del Virrey es la que concentra la mayor cantidad entidades de este tipo **Tabla 2-3**.

Figura 2-3: Localidades de Bogotá con la mayor concentración de entidades financieras.





Nombre de la fuente: Mapa de referencia para Bogotá D.C. [27]

Tabla 2-3: Localidades de Bogotá con la mayor concentración de entidades financieras.

LOCALIDAD	ÁREA [KM ²]	# ENTIDADES FINANCIERAS
SANTAFÉ Y CANDELARIA	0,85	42
CHAPINERO ZONA DEL PARQUE EL VIRREY	3,36	68
CHAPINERO ZONA DEL LAGO	2,14	51

Nombre de la fuente: Mapa de referencia para Bogotá D.C. [27]

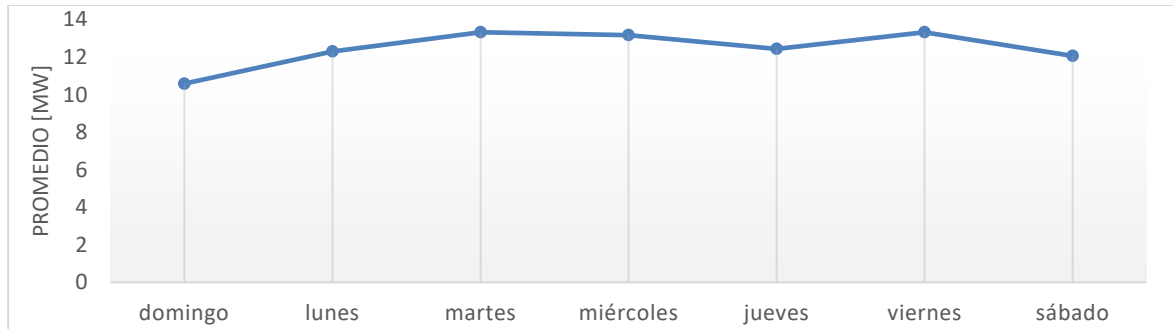
2.3 Evaluación de la demanda de potencia de una red de distribución en media tensión que alimenta en condiciones normales varios edificios de oficinas

En esta sección se analiza la demanda de potencia agregada de varios edificios de oficinas en un transformador de distribución AT/MT en una subestación de potencia.

Con el fin de analizar dicha demanda de potencia se registró durante el mes de junio de 2019 la potencia suministrada hora a hora por un transformador de potencia AT/MT 30 MVA, 115 kV / 11,4 kV, 60 Hz, que alimenta varios edificios de oficinas y se encuentra ubicado en la Bogotá – Colombia en la localidad de Chapinero.

La **Figura 2-4** presenta potencia promedio suministrada por día durante el mes, donde se observa un comportamiento bastante constante, siendo los fines de semana los días con menor demanda.

Figura 2-4: Potencia máxima promedio por día transformador AT/MT red de edificios de oficinas.



Nombre de la fuente: Elaboración propia.

La **Tabla 2-4** permite concluir que, durante el día de máxima carga registrada, el día miércoles, el transformador tan solo se carga aproximadamente a un 60% de su capacidad nominal. Esto indica que existe potencia excedente que puede ser utilizada para la recarga de vehículos eléctricos antes de tener la necesidad de repotenciar la misma.

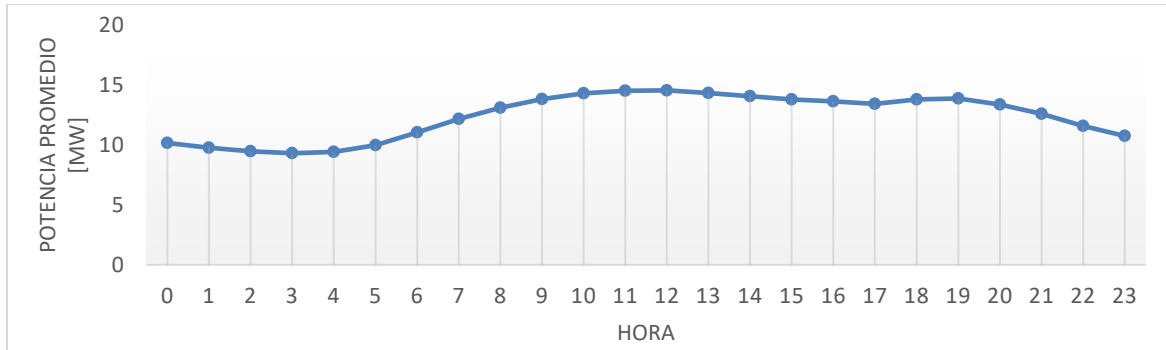
Tabla 2-4: Medidas estadísticas potencia máxima por días transformador AT/MT red de edificios de oficinas.

DIA	MÁX. DE POTENCIA A MW	MÍN. DE POTENCIA MW	PROMEDIO DE POTENCIA MW	DESV. EST. DE POTENCIA MW	VARIACIÓN DE POTENCIA MW	# DE DATOS
DOMINGO	13,42	7,93	10,59	1,63	2,64	120,00
LUNES	16,27	7,71	12,30	2,58	6,64	96,00
MARTES	16,63	7,65	13,33	2,79	7,80	96,00
MIÉRCOLES	17,72	7,86	13,17	3,08	9,50	96,00
JUEVES	16,80	7,37	12,43	2,96	8,76	96,00
VIERNES	16,76	7,60	13,32	2,71	7,34	96,00
SÁBADO	15,21	7,44	12,06	2,12	4,51	120,00

Nombre de la fuente: Elaboración propia.

Como se observa en la **Figura 2-5** las horas de mayor carga del transformador se encuentran a partir de las 8 de la mañana siendo bastante constantes hasta que disminuye cerca de las 20 horas.

Figura 2-5: Potencia máxima promedio por horas transformador AT/MT red de edificios de oficinas.



Nombre de la fuente: Elaboración propia.

La **Tabla 2-5** presenta un análisis estadístico de la potencia suministra por el transformador hora a hora durante el mes de junio. Como se observa durante las horas de mayor carga coincidentes con los horarios laborales típicos de un edificio de oficinas el transformador tiene excedentes de potencia.

Tabla 2-5: Medidas estadísticas potencia máxima por días transformador AT/MT red de edificios de oficinas.

HORA	PROMEDIO DE POTENCIA MW	MÁX. DE POTENCIA MW	MÍN. DE POTENCIA MW	DEV. EST. DE POTENCIA MW	VAR. DE POTENCIA MW	# DE DATOS
0	10,17	16,10	8,45	1,91	3,64	30
1	9,79	16,09	7,97	2,09	4,38	30
2	9,49	16,07	7,71	2,21	4,86	30
3	9,32	16,06	7,37	2,29	5,26	30
4	9,43	16,05	7,67	2,21	4,90	30
5	9,99	16,04	7,96	1,94	3,76	30
6	11,06	16,03	8,04	2,10	4,41	30
7	12,19	16,01	8,75	2,26	5,11	30
8	13,12	16,10	9,39	2,28	5,19	30
9	13,84	16,76	9,37	2,30	5,27	30

10	14,32	17,35	9,35	2,29	5,23	30
11	14,52	17,72	9,33	2,22	4,93	30
12	14,57	17,57	9,31	2,21	4,87	30
13	14,34	16,89	9,29	2,11	4,44	30
14	14,09	16,52	9,27	2,08	4,31	30
15	13,81	16,32	9,24	2,08	4,32	30
16	13,64	16,19	9,22	1,99	3,97	30
17	13,45	16,18	9,20	1,81	3,27	30
18	13,82	16,17	9,18	1,90	3,60	30
19	13,89	16,30	9,16	1,87	3,49	30
20	13,38	16,14	9,14	1,57	2,46	30
21	12,62	16,13	9,12	1,33	1,76	30
22	11,61	16,12	9,10	1,33	1,76	30
23	10,76	16,11	8,96	1,64	2,69	30

Nombre de la fuente: Elaboración propia.

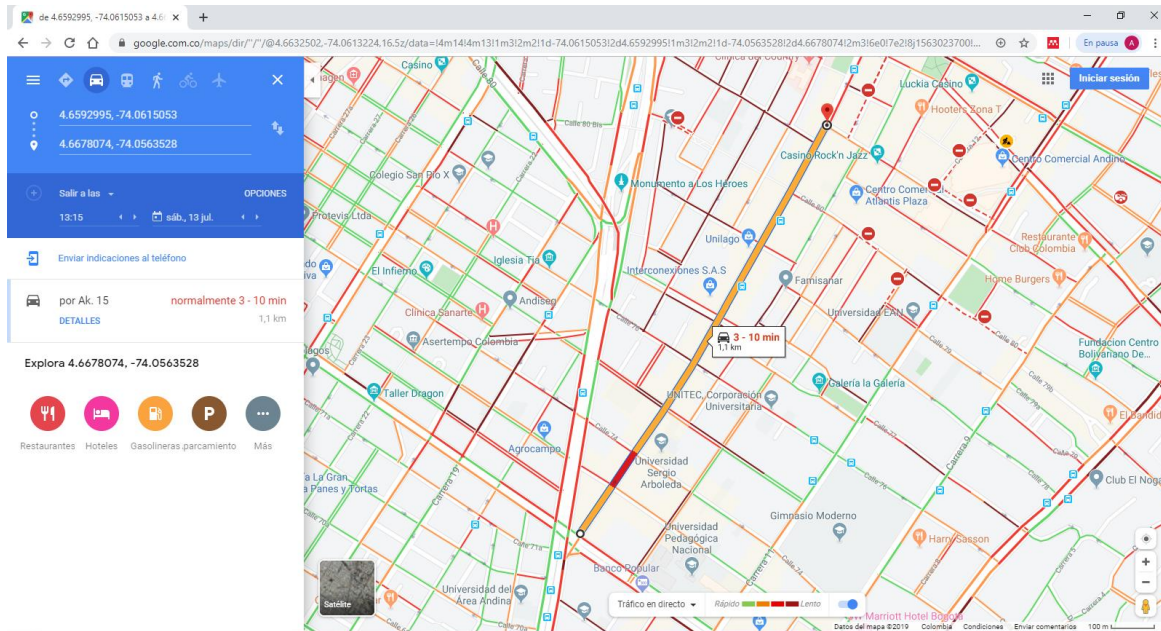
2.4 Densidad de tráfico vehicular en zonas de edificios de oficinas

Un parámetro que permite evaluar la necesidad de recarga de vehículos eléctricos en un edificio de oficinas es el tráfico adyacente al mismo. Este análisis permite conocer las horas en las cuales el flujo vehicular aumenta y aunque no se conozca la necesidad de recarga de cada vehículo, el aumento de circulación por una zona de destino final de viaje como los edificios de oficinas, aumenta la probabilidad de vehículos con necesidad de recarga.

Con el fin de realizar esta evaluación, se estableció un trayecto entre dos direcciones y se utilizó la función “planear mi viaje” de Google Maps **Figura 2-6**. Esta función permite seleccionar entre tráfico en directo o en tiempo real y tráfico típico, este último posibilita la elección de día y la hora del desplazamiento.

El trayecto definido para el análisis es el comprendido entre la intersección de la calle 72 con carrera 15 y la intersección de la calle 82 con carrera 15, una distancia de aproximadamente 1,1 km. Esta trayectoria atraviesa una de las zonas con mayor cantidad de edificios de oficinas identificada en la sección anterior.

Figura 2-6: Función “planear mi viaje” de Google Maps.

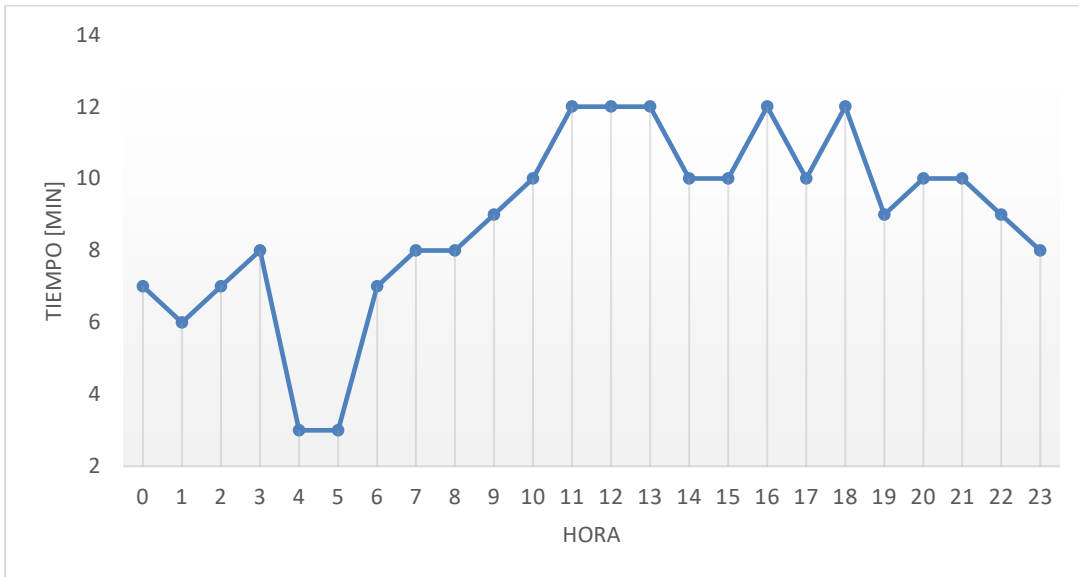


Nombre de la fuente: Google Maps.

A partir de la información extraída de Google Maps, se construyó la **Figura 2-7** donde se evidencia el tiempo de desplazamiento máximo promedio durante el mes de septiembre de 2019 hora a hora en la zona de estudio definida. Como se observa la mayor densidad de tráfico se concentra en las horas posteriores al medio día, presentado picos a la hora de almuerzo y fin de la jornada laboral. Adicionalmente, se observa un incremento constante en el tráfico a partir de la hora de inicio de la jornada laboral.

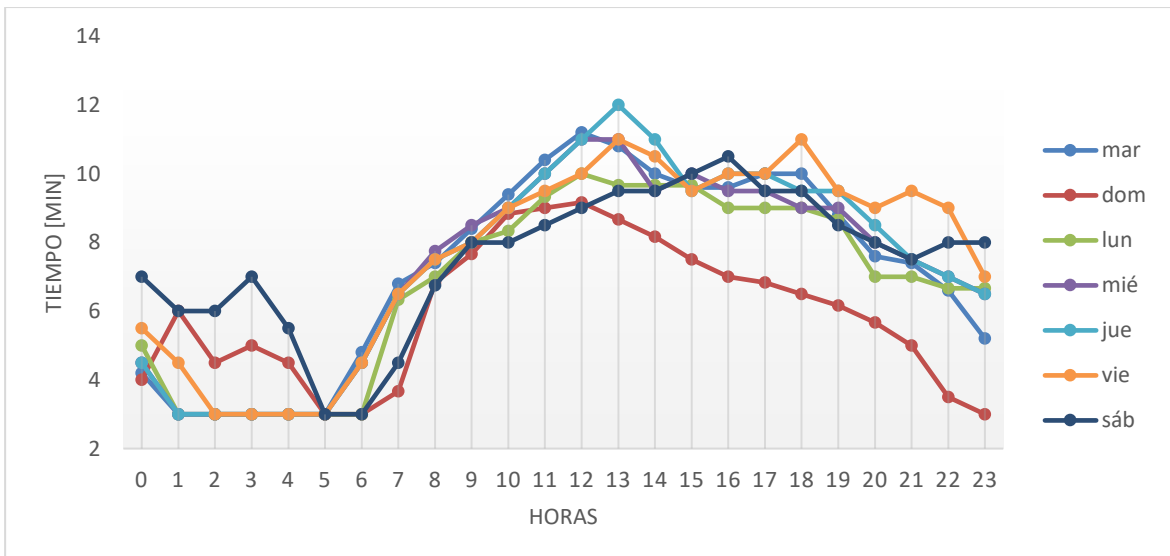
Finalmente, la **Figura 2-8** presenta gráficamente el tiempo de desplazamiento máximo para la trayectoria definida hora a hora por cada día durante el mes de septiembre del año 2019. Como se puede observar, relacionando mayores tiempos de viaje con mayor flujo vehicular, el día con mayor flujo vehicular es el jueves, presentado un pico a las 13 horas. Sin embargo, se observa que el comportamiento del tráfico vehicular es similar para todos los días de la semana a excepción del domingo cuando el flujo es menor.

Figura 2-7: Tiempo de desplazamiento por hora.



Nombre de la fuente: Elaboración propia

Figura 2-8: Tiempo de desplazamiento hora a hora por día.



Nombre de la fuente: Elaboración propia

2.5 Conclusiones del capítulo

Al analizar tanto la demanda de potencia de un edificio de oficinas como una zona de edificios de oficinas se puede concluir que no alcanza a un 50 % de su capacidad nominal,

por lo que la propuesta de un algoritmo de gestión de recarga de vehículos eléctricos es bastante conveniente a fin de aprovechar esta capacidad disponible.

Las zonas de edificios de oficinas presentan una gran afluencia de vehículos durante las horas laborales por lo que la oferta de recarga de vehículos eléctricos será una necesidad imperativa. Por tal motivo, la oferta de recarga a vehículos externos al edificio de oficinas debe ser considerada dentro de la estrategia de gestión.

3 Capítulo 3: Características de los vehículos eléctricos necesarias para el sistema de gestión

A lo largo del presente capítulo se describen las principales características de los vehículos eléctricos a tener en cuenta dentro del desarrollo de la estrategia de gestión de recarga de dichos vehículos en un edificio de oficinas, como son la potencia de recarga, la capacidad de almacenamiento de energía y el rango de distancia.

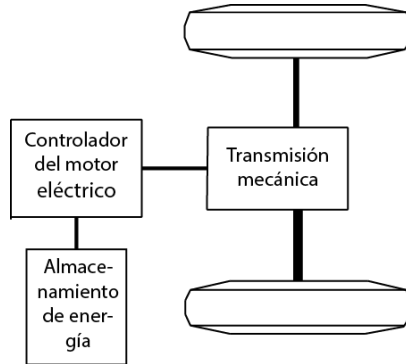
Se presenta un análisis del mercado actual de vehículos eléctricos y el comportamiento de movilidad de los posibles consumidores de estos vehículos. Esta información permite determinar las necesidades de carga y seleccionar los tipos de cargadores a tener en cuenta en la estrategia de gestión.

3.1 Características vehículos eléctricos

Los vehículos eléctricos usan un motor eléctrico y un sistema de almacenamiento de energía como baterías químicas, supercapacitores, celdas de combustible, volantes de inercia, entre otros. Su principal ventaja sobre los vehículos de combustión interna es la reducción de la emisión de gases de efecto invernadero, mejor eficiencia, disminución de la dependencia de combustibles fósiles y baja producción de ruido [28]–[30].

Inicialmente los vehículos eléctricos se construían a partir del modelo del vehículo de combustión interna como se observa en la **Figura 3-1**, en donde se cambiaba el motor de combustión interna por un motor eléctrico y el tanque de combustible por un conjunto de baterías. Sin embargo, el vehículo eléctrico actual cuenta con inversores de potencia, unidades de recarga, control de energía, control del vehículo, control de dirección, etc. Esto hace al vehículo eléctrico un elemento complejo y con una demanda mayor de energía eléctrica, pero a su vez más eficiente en el manejo de la misma [28].

Figura 3-1: Tren de potencia básico de un vehículo eléctrico.



Nombre de la fuente: Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles [28].

3.1.1 Consumo de energía

El consumo de energía en los vehículos de combustión interna típicamente es una medida física de la unidad de volumen de combustible por unidad de distancia, como litros o galones por kilómetros recorridos. Sin embargo, en el vehículo eléctrico la medida se realiza en las terminales de la batería y está dada en Kilovatios hora (kWh), lo que facilita calcular la distancia que se puede recorrer con una carga.

La energía consumida es una integral de la potencia de salida de la batería. En la potencia de salida de la batería se incluyen las pérdidas internas en la batería, pérdidas de transmisión y en el controlador del motor y en los dispositivos electrónicos. Esta potencia se puede representar como se muestra en (3-1, donde V es la velocidad del vehículo, η_t y η_m representan las pérdidas de transmisión y del controlador del motor, A_f el área frontal del vehículo, f_r el coeficiente de resistencia al giro de los neumáticos, M_v la masa del vehículo, g la gravedad, δ el factor de masa, ρ_a es la densidad del aire, C_D coeficiente de resistencia aerodinámica, i es el grado de carretera. Para esta ecuación no se toma en cuenta las cargas auxiliares.

$$P_{Bateria\ out} = \frac{V}{\eta_t \eta_m} \left(M_v g (f_r + i) + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 + M \delta \frac{dV}{dt} \right) \quad (3-1)$$

Cuando se dispone de la recarga de baterías a través de sistemas como el frenado regenerativo se puede expresar esta potencia de entrada como se evidencia en (3-2), donde α es el factor de frenado regenerativo, puede tomar un valor entre $0 < \alpha < 1$ y representa el porcentaje total de energía de frenado que puede ser aplicada por el motor eléctrico [28].

$$P_{Bateria\ in} = \frac{\alpha V}{\eta_t \eta_m} \left(M_v g (f_r + i) + \frac{1}{2} \rho_a C_D A_f V^2 + M \delta \frac{dV}{dt} \right) \quad (3-2)$$

De tal forma que la energía consumida se puede calcular aplicando la siguiente ecuación [28]:

$$E_{out} = \int_{Tracción} P_{Bateria\ out} dt + \int_{Frenado} P_{Bateria\ in} dt \quad (3-3)$$

3.1.2 Almacenamiento de energía

Los elementos de almacenamiento de energía, son aquellos dispositivos que son capaces de almacenar energía eléctrica, entregarla (carga) y aceptarla (descargarla). Dentro de estos dispositivos se encuentran baterías químicas, supercapacitores, volantes de inercia de ultra alta velocidad [31].

Para caracterizar las fuentes de almacenamiento de energía se toman en cuenta características como energía específica, potencia específica, eficiencia, requerimientos de mantenimiento, costo, adaptación y amabilidad ambiental y seguridad.

Dentro de las tecnologías de baterías electroquímicas existen las baterías solido- acido, las basadas en níquel como níquel/hierro, níquel/cadmio, níquel/ hidruro de metal y las de base de litio entre las que se encuentra las de polímero de litio y ion-litio.

En aplicaciones recientes se realiza la combinación de tecnología. Por ejemplo, se combina baterías electroquímicas con supercapacitores, esto permite mejorar las características de ambas tecnologías, la baja potencia especifica de las baterías electroquímicas y la baja energía especifica de los supercapacitores [28].

3.1.3 Estaciones de recarga

El equipo de suministro al vehículo eléctrico (EVSE en inglés) es el equipo utilizado para suministrar energía eléctrica a los vehículos eléctricos enchufables (PEV en inglés). El objetivo del EVSE es mantener una comunicación con el PEV para suministrar energía de manera apropiada y segura.

Los EVSE en función de la tasa de carga de los PEV se pueden clasificar en dos niveles. El primer nivel se carga el vehículo con corriente alterna por lo que el vehículo debe tener un convertidor a corriente directa para cargar las baterías, por cada hora de carga el vehículo podría recorrer aproximadamente entre 3 a 8 km. En tanto, que en el segundo nivel se recarga el vehículo con un sistema de carga rápida en corriente directa y se podría alcanzar entre 16 a 32 km por hora de carga.

Los tiempos de carga pueden ir desde 30 minutos hasta 20 horas dependiendo del tipo de nivel del EVSE, el tipo y capacidad de la batería, nivel de carga de la batería y capacidad del cargador interno del vehículo [32].

Actualmente, se comercializan estaciones con tres tipos de recarga: convencional, semi-rápida y rápida [33]. La primera es una instalación monofásica que realiza la carga a una tensión nominal igual a la residencial, entregando una potencia aproximada de 3,7 kW. La recarga puede llegar a tardar 8 horas para alcanzar un 100% de carga. El segundo tipo de recarga se realiza aplicando una potencia de 7,3 kW aproximadamente, lo cual permite cargar el vehículo en 4 horas. Finalmente, el tercer tipo de recarga se realiza entregando 50 kW aproximadamente, generalmente en corriente continua. Esto permite que el vehículo se cargue a un 80% de su capacidad nominal en 30 minutos.

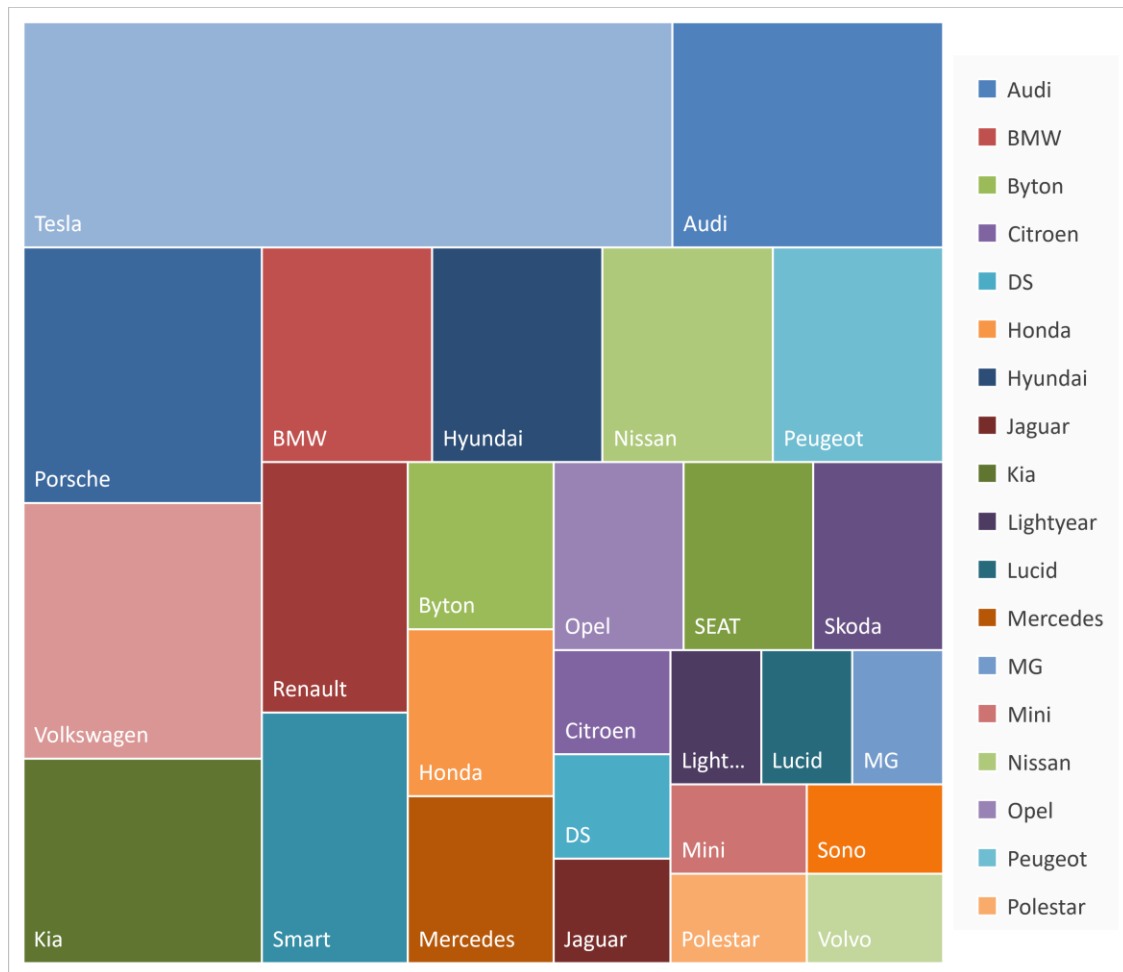
Los modos de carga varían entre los que se realizan con corriente alterna, corriente continua, con comunicación para verificar conexión y los que integran dispositivos de control y protección [33].

3.2 Mercado de vehículos eléctricos

En el mercado actual de vehículos eléctricos los vehículos a base de baterías y los híbridos enchufables son las tecnologías que más se comercializan. La primera hace referencia a vehículos 100% eléctricos, mientras que los segundos son una combinación de la tecnología de combustión interna y un motor eléctrico, el cual es utilizado en la mayoría de los casos para las primeras marchas.

La **Figura 3-2** presenta una representación cuantitativa jerárquica de la cantidad de modelos que ha septiembre de 2019 se comercializaban por marca. Como se puede observar la marca con la con mayor oferta en el mercado es Tesla con 12 modelos, le siguen marcas como Audi, Porsche y Volkswagen.

Figura 3-2: Visualización cuantitativa jerárquica modelos por marca.



Nombre de la fuente: Elaboración propia con datos de [34].

Adicionalmente, la **Tabla 3-1** muestra que la media de oferta de modelos por marca es aproximadamente de 2,63, siendo el rango de oferta normal entre 0,38 y 4,88 modelos. Para el primer cuartil la oferta mayor es de 1 modelo, mientras que para el tercer cuartil de 3.

Marcas con mayores ofertas a 3 modelos no son el común del mercado. Sin embargo, el que exista al menos 27 marcas ofertando vehículos eléctricos, demuestra que el interés del mercado en este tipo de tecnologías en los últimos años ha crecido significativamente. Por tanto, es imperativo disponer de estaciones de recarga para estos vehículos.

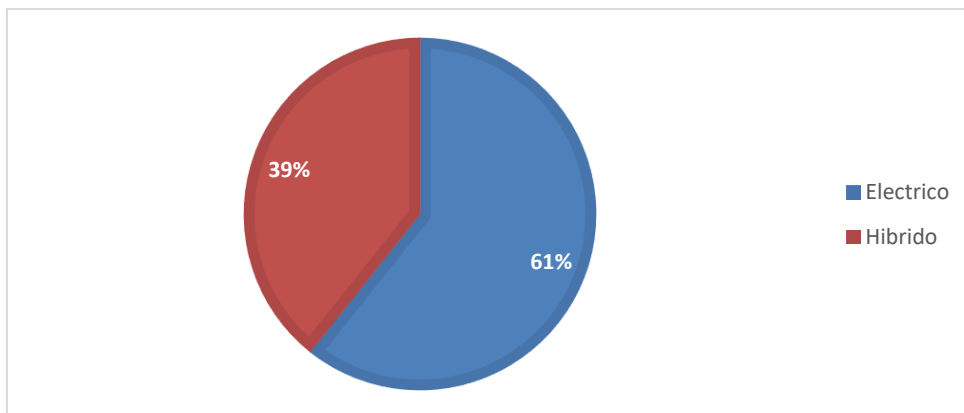
Tabla 3-1: Modelos de vehículos por marca.

Nº DE DATOS	MEDIA C/U	DESVIACIÓN ESTÁNDAR C/U	MEDIANA C/U	MÍNIMO C/U	MÁXIMO C/U
71	2,63	2,25	2	1	12

Nombre de la fuente: Elaboración propia con datos de [34].

Por otra parte, la **Figura 3-3** presenta la participación en el mercado de las de tecnologías de vehículos híbridos enchufables y con motor eléctrico a base de baterías, encontrándose una participación mayoritaria de este último.

Figura 3-3: Participación en el mercado de vehículos eléctricos por tecnología.



Nombre de la fuente: Elaboración propia con datos de [34].

3.3 Capacidad de carga de los vehículos eléctricos

La capacidad de recarga de energía de los vehículos eléctricos ha aumentado considerablemente llegando incluso a 200 kWh como lo muestra la **Tabla 3-2**. La capacidad promedio de los vehículos se encuentra alrededor de los 63,52 kWh y como mínimo se oferta una capacidad de 16 kWh.

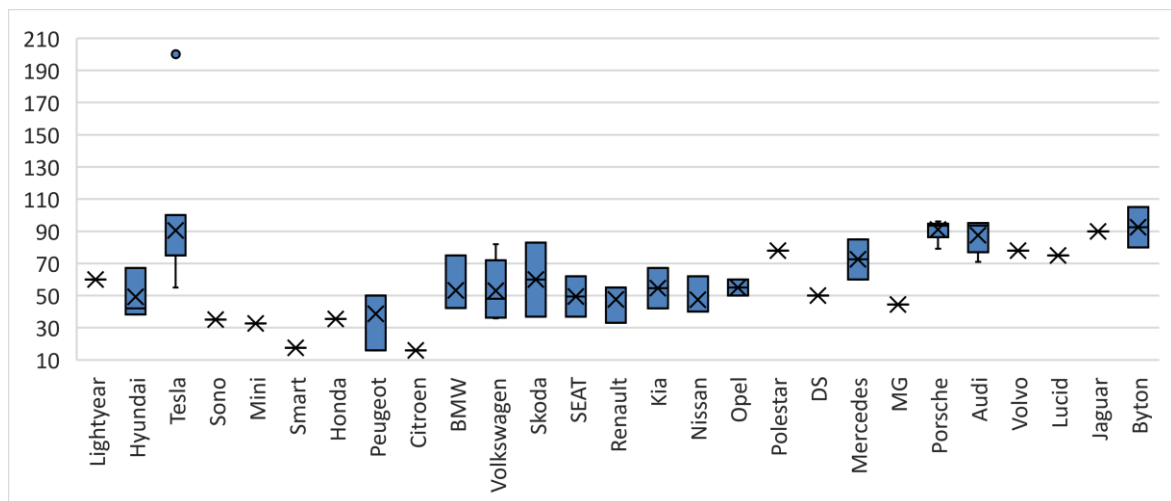
Tabla 3-2: Capacidad de carga energía por marca.

N° DE DATOS	MEDIA [kWh]	DESVIACIÓN ESTÁNDAR [kWh]	MEDIANA [kWh]	MÍNIMO [kWh]	MÁXIMO [kWh]
71	63,52	29,33	62	16	200

Nombre de la fuente: Elaboración propia con datos de [34].

Como se observa en la **Figura 3-4** y la **Figura 3-5** la capacidad de carga ofertada en el mercado se centra entre 34,19 kWh y 92,85 kWh, siendo 42 kWh para el percentil 25 y 82 kWh para el percentil 75. Capacidad de carga superiores a 92,85 no son normales en el mercado y muy pocas marcas lo ofertan.

Figura 3-4: Diagrama de cajas y bigotes capacidad de carga de energía máxima por marca.

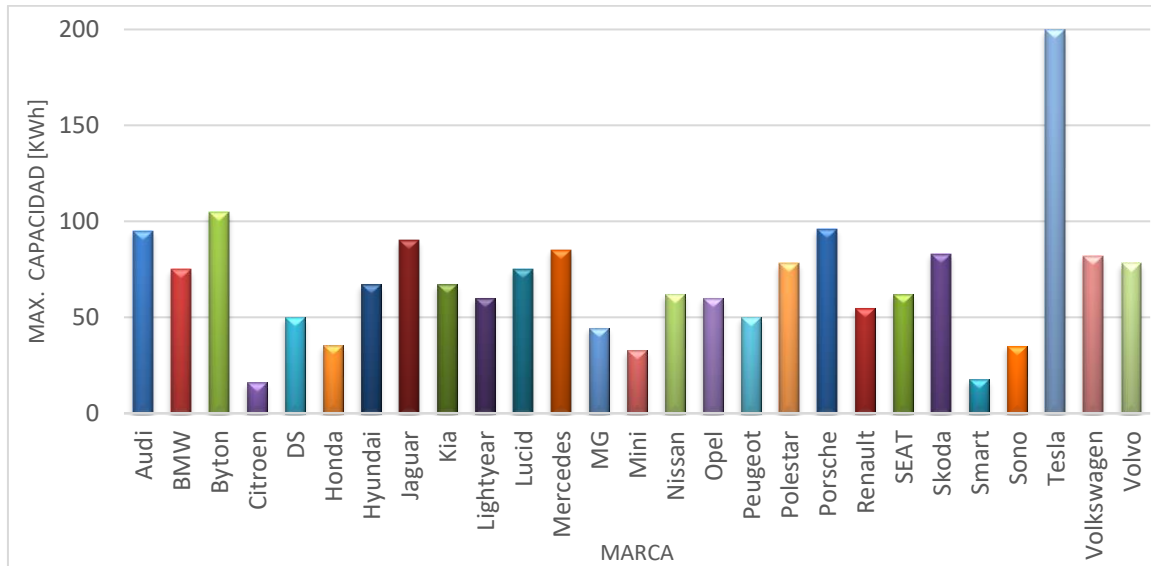


Nombre de la fuente: Elaboración propia con datos de [34].

Tesla es el fabricante que oferta los vehículos con mayor capacidad de carga y adicionalmente presenta una gran variedad de ofertas en capacidad de carga. Sin

embargo, no es la única marca, marcas como BMW, SKODA, PEUGEOT, aunque no oferta tan alta capacidad, tienen un rango amplio de oferta de capacidad en sus modelos.

Figura 3-5: Capacidad carga de energía máxima por marca.



Nombre de la fuente: Elaboración propia con datos de [34].

3.4 Distancia recorrida

En cuanto al rango máximo de distancia que puede alcanzar un vehículo, la

Tabla 3-3: Rango de distancia por marca.

N° DE DATOS	MEDIA [km]	DESVIACIÓN ESTÁNDAR [km]	MEDIANA [km]	MÍNIMO [km]	MÁXIMO [km]
71	327,61	135,73	340	90	970

Nombre de la fuente: Elaboración propia.[34]

La **Figura 3-7** divide de manera jerárquica las marcas de vehículos de acuerdo al rango de distancia que puede alcanzar sus modelos ofertados. Como se observa las marcas con menor rango de distancia son Honda, Mini, Smart y Citroën.

Figura 3-6 muestra que Tesla lidera el mercado con un aproximado de 970 km. De acuerdo a la **Tabla 3-3** el promedio de distancia es de aproximadamente 327,61 km, siendo 90 km el menor de los máximos rangos de distancia alcanzados por los modelos ofertados.

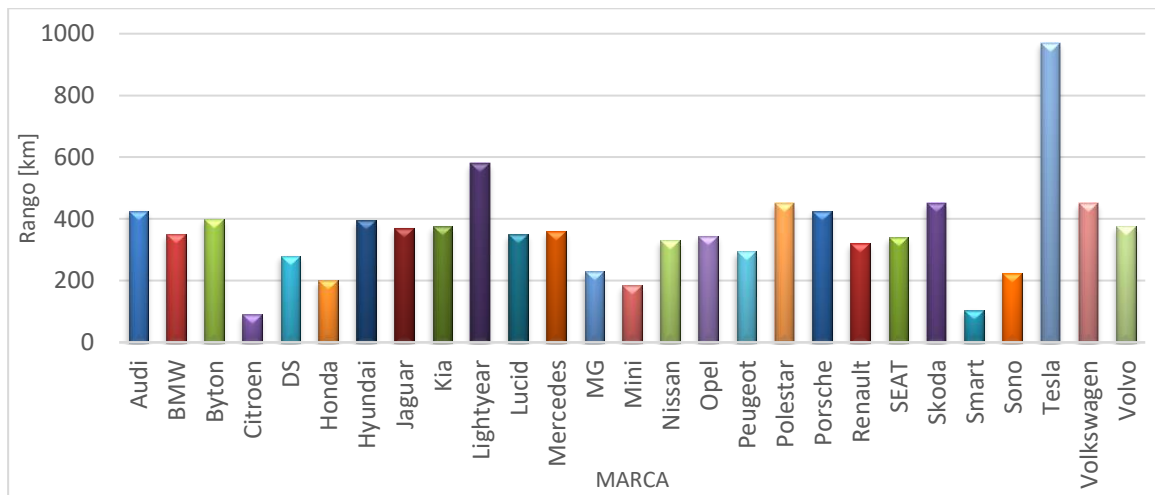
Tabla 3-3: Rango de distancia por marca.

N° DE DATOS	MEDIA [km]	DESVIACIÓN ESTÁNDAR [km]	MEDIANA [km]	MÍNIMO [km]	MÁXIMO [km]
71	327,61	135,73	340	90	970

Nombre de la fuente: Elaboración propia.[34]

La **Figura 3-7** divide de manera jerárquica las marcas de vehículos de acuerdo al rango de distancia que puede alcanzar sus modelos ofertados. Como se observa las marcas con menor rango de distancia son Honda, Mini, Smart y Citroën.

Figura 3-6: Rango de distancia por marca.



Nombre de la fuente: Elaboración propia.[34]

Haciendo una correlación entre los datos de numero de modelos ofertados por marca y el rango máximo de distancia se encontró un coeficiente de correlación de 0.71 aproximadamente, lo que indica una alta y directa relación entre los datos.

Finalmente, para analizar la distancia que debería recorrer un vehículo eléctrico utilizado para ir al trabajo, se analizó la encuesta de movilidad 2015 realizada por la alcaldía de Bogotá. En la Tabla 3-4 presenta la ficha técnica de la encuesta.

Tabla 3-4: Datos técnicos encuesta de movilidad Bogotá 2015.

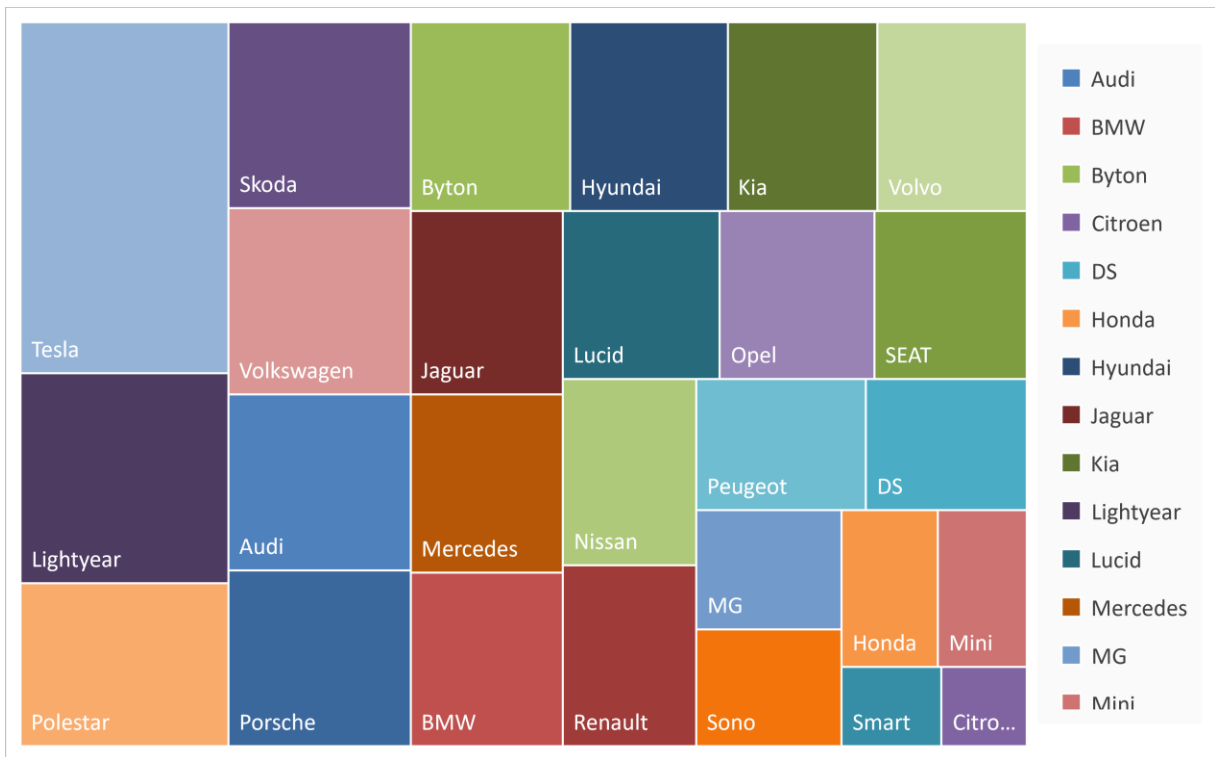
ÁMBITO GEOGRÁFICO	Bogotá y los 17 municipios vecinos de su área de influencia, así: Bojacá, Cajicá, Chía, Cota, La Calera, Facatativá, Funza, Gachancipá, Madrid, Mosquera, Sibaté, Soacha, Sopó, Tabio, Tenjo, Tocancipá y Zipaquirá.
POBLACIÓN OBJETIVO	Población igual o mayor a los 5 años de edad, residentes habituales de los municipios que conforman el ámbito geográfico del estudio.
UNIVERSO DE ESTUDIO	Hogares y personas residentes de los municipios que conforman el ámbito geográfico del estudio, de acuerdo con las proyecciones de población a junio de 2015 (DANE, 2005).
UNIDADES ESTADÍSTICAS	<ul style="list-style-type: none"> • Unidad de observación: población igual o mayor a los 5 años de edad de los municipios que conforman el ámbito geográfico de estudio. • Unidad de muestreo: áreas de empadronamiento censal, con cobertura sobre las áreas urbanas y suburbanas de los municipios objeto de la investigación, con medidas de tamaño de 30 hogares en promedio. • Unidad de análisis: cada una de las localidades de Bogotá y cada uno de los municipios definidos en el ámbito geográfico de estudio.
CARACTERÍSTICAS DEL DISEÑO DE MUESTRA	<ul style="list-style-type: none"> • El diseño de muestreo prevé una muestra probabilística, estratificada, de conglomerados por etapas. • Probabilístico, porque cada una de las unidades seleccionadas tiene una probabilidad de selección, conocida y mayor de cero. • Estratificado, es decir, clasificando, previamente a la selección, las diferentes unidades de muestreo, en función de variables independientes conocidas. Para este estudio el criterio para estratificar es cada uno de los municipios considerados dentro del ámbito geográfico. La estratificación es la técnica por excelencia para la optimización de un diseño muestral, pues permite la obtención de errores de muestreo mínimos. • De conglomerados, constituidos por áreas de empadronamiento censal conformadas por más de un elemento de la población. Por etapas, porque para llegar a la selección final de la unidad informante se surten varios momentos. • La determinación del número de etapas a realizar en cada municipio se determina con el total de sectores, secciones, manzanas.
MARCO MUESTRAL	Para este estudio se utilizó un marco de áreas, el cual está conformado por la cartografía de tipo censal generada por el DANE, donde se describen los polígonos (sectores, secciones, manzanas) con la cantidad de viviendas, hogares y personas, junto con las proyecciones de población a junio de 2015 con base en la información censal del año 2005.
NIVEL DE CONFIANZA	95%
MARGEN DE ERROR	0.73% para toda el área de estudio, con error estándar relativo máximo de hasta 6% por dominio de estudio.

TAMAÑO DE MUESTRA	El tamaño de muestra calculado fue de 28.025 encuestas en hogares. Finalmente se obtuvieron 28.212 encuestas válidas.
DESCRIPCIÓN OPERATIVA	A recolección de la información se realizó entre el 15 de marzo y el 30 de agosto de 2015. Se utilizó un cuestionario estructurado en dispositivos móviles de captura (Tablet). En total, el equipo de campo estuvo conformado por cerca de 300 personas entre encuestadores, supervisores y coordinadores.

Nombre de la fuente: Encuesta de movilidad de Bogotá 2015.

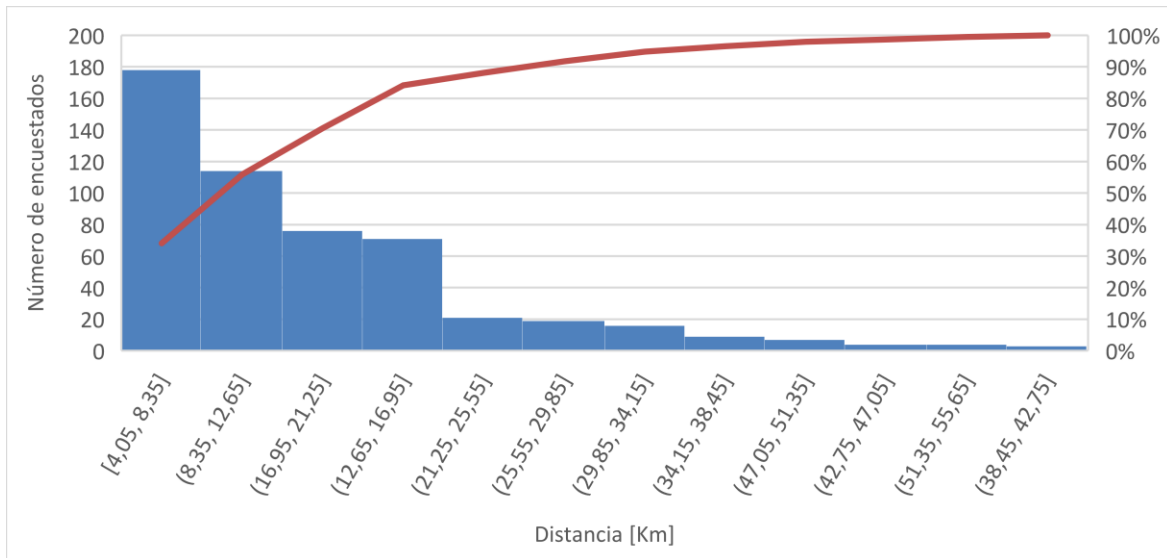
En la **Figura 3-8** se observa un histograma que agrupa los datos de distancia recorrida por cada encuestado para asistir a su lugar de trabajo usando un vehículo propio y en la Tabla 3-5 unas medidas de tendencia central y dispersión. Como se puede identificar la media de los encuestados recorre aproximadamente 14,35 km para asistir a su trabajo. La distancia normal recorrida se ubica en un rango de 4,5 km a 24,20 km, siendo 7,33 km el máximo para el primer cuartil y 18,56 km para el tercer cuartil.

Figura 3-7: Visualización cuantitativa jerárquica rango de distancia por marca.



Nombre de la fuente: Elaboración propia.[34]

Figura 3-8: Histograma de datos encuesta movilidad 2015.



Nombre de la fuente: Elaboración propia con datos de la encuesta de movilidad de Bogotá 2015.

Tabla 3-5: Resultados encuesta de movilidad.

N° DE DATOS	MEDIA [km]	DESVIACIÓN ESTÁNDAR [km]	MEDIANA [km]	MÍNIMO [km]	MÁXIMO [km]
522	14,35	9,85	11,68	4,05	54,66

Nombre de la fuente: Elaboración propia con datos de la encuesta de movilidad de Bogotá 2015.

3.5 Conclusiones del capítulo

Aunque el coeficiente de correlación entre el máximo rango de distancia y la máxima capacidad ofertada de recarga es de aproximadamente 0,91, lo que indica una relación directa y proporcional, las marcas que ofertan los mayores almacenamientos de energía eléctrica en los vehículos no son necesariamente las que ofertan el mayor rango de distancia, lo que indica que estos vehículos no son necesariamente los más eficientes.

Los tipos de estaciones a tener en cuenta en la estrategia de gestión son de carga semi-rápida y rápida. Esto debido a que permiten gestionar el tiempo de inicio de recarga de los vehículos durante la jornada laboral, ya que realizan la carga total o al 80 % de la capacidad total en cuatro horas o menos, tiempo inferior a la jornada laboral corriente.

Contrastando la media de los datos de la encuesta de movilidad de Bogotá contra la media del rango de distancia ofertada por las marcas para un vehículo eléctrico, se puede intuir que una persona podría realizar aproximadamente 22 viajes al trabajo. Si, por otro lado, se realiza una hipótesis en la cual las personas que realizan el viaje normal más largo adquieren el vehículo con el menor rango de distancia normal, solo podría realizar aproximadamente 8 viajes.

4 Capítulo 4: Estrategia de gestión de energía en estaciones de recarga de vehículos eléctricos en un edificio de oficinas

El acelerado desarrollo de las tecnologías de la información y las comunicaciones permite disponer de una gran cantidad de información relacionada con casi cualquier cosa en cuestión de milisegundos. El internet de las cosas es parte de ese desarrollo y nos permite conectarnos de forma remota con casi cualquier dispositivo electrónico, lo que ha llevado a hablar de ciudades inteligentes, como lo muestra la **Figura 4-1**.

Figura 4-1: Ciudades inteligentes.



Nombre de la fuente: Korea Joongang Daily

Una de las grandes necesidades del sector energético, proviene de la digitalización de la información asociada a cada uno de los elementos de consumo. Como ejemplo, la mayoría de electrodomésticos están conectados a internet y tienen la capacidad de gestionar compras, descargar actualizaciones, identificar las preferencias de usuario, almacenar y compartir datos de uso, etc. Toda esta información es recolectada, procesada y analizada en la nube. Por tanto, el presente desarrollo pretende aportar a la tendencia IoT (Internet of Things) enfocada al sector eléctrico [35]–[44].

Sin embargo, la obtención de información solo es una parte de lo que conlleva llegar a ser una ciudad inteligente. Para alcanzar este propósito, tecnologías como inteligencia artificial, aprendizaje automático y manejo de grandes volúmenes de datos son requeridas, ya que lo valioso de los datos no es solo obtenerlos si no analizarlos y tomar decisiones en función de ellos.

Uno de los mayores problemas de las ciudades actuales son los espacios de parqueo y sumado al progresivo cambio de los vehículos de combustión por vehículos eléctricos, los puntos de recarga son otro problema adicional.

El presente capítulo, tiene como fin dar a conocer la estrategia de gestión de recarga de vehículos eléctricos en edificios de oficinas, en la cual el uso de tecnologías como aprendizaje automático, internet de las cosas y los algoritmos de optimización, permiten abordar de manera conjunta los dos problemas y dar una alternativa de solución.

La estrategia se basa en aprovechar el espacio de parqueo, la infraestructura eléctrica instalada y la gran afluencia de vehículos que posee un edificio de oficinas, gestionando tanto el espacio como la capacidad de recargar vehículos.

Para cumplir con dicho objetivo, la estrategia establece que todos los vehículos eléctricos suben a la nube los datos de estado de carga de la batería y ubicación geográfica. El esquema tiene como entrada los datos de energía requerida por los vehículos y la distancia con respecto al edificio de los vehículos circundantes.

Adicionalmente, se establece la posibilidad de que los vehículos eléctricos puedan recibir ofertas de recarga y que dichas ofertas sean aceptadas de manera automática o a elección del conductor del vehículo.

Finalmente, la instalación debe contar con mediciones históricas de demanda de potencia y un medidor de potencia que suministre la medición en tiempo real.

4.1 Definición de la estrategia

El problema consiste en gestionar la recarga de vehículos eléctricos y los espacios para parqueo de vehículos en un edificio de oficinas. Los espacios de parqueadero pueden ser asignados a empleados del edificio de oficinas o vehículos circundantes al edificio.

Los espacios asignados a los empleados tienen una permanencia mínima de cuatro horas y una máxima de ocho horas, donde cada empleado debe indicar el tiempo que permanecerá ocupado el espacio de parqueo durante ese rango de tiempo. En el caso de los espacios asignados a vehículos circundantes el tiempo de permanencia es siempre igual a treinta minutos.

Para los vehículos eléctricos de los empleados se realiza una recarga semi-rápida (32 A 7,3 kW 100% = 4 horas), mientras que para los vehículos circundantes una recarga rápida (30 min 50 kW 80%). Esta definición permite gestionar tanto la potencia eléctrica disponible para recarga, como los espacios de parqueo porque no permite desplazar en el tiempo el inicio de la recarga de los vehículos eléctricos propiedad de los empleados del edificio de oficinas.

El sistema busca tener el parqueadero a máxima capacidad y recargar la mayor cantidad de vehículos posible. Para lograrlo se propone la estrategia de gestión de la **Figura 4-2**, la cual consiste en abordar el problema desde tres aristas. La primera está relacionada con la selección de los vehículos eléctricos circundantes para recargar. La segunda se enfoca en la predicción de la potencia disponible para recarga y la última, en el desplazamiento del inicio de la recarga de los vehículos eléctricos de los empleados.

Figura 4-2: Estrategia de gestión de recarga.



Nombre de la fuente: Elaboración propia.

La primera arista consiste en un algoritmo de aprendizaje automático (en inglés, Machine Learning) no supervisado de agrupamiento (en inglés, Machine Clustering), el cual agrupa los vehículos circundantes en función de la distancia a la que se encuentran del edificio y el estado de carga de la batería.

La información de estado de carga y ubicación geográfica de cada vehículo es previamente almacenada en una nube en tiempo real, el algoritmo adquiere esta información, la procesa y la agrupa.

Una vez agrupados, se selecciona el mejor grupo en función de estas dos variables y se les envía una oferta de recarga. El proceso finaliza permitiendo parquear y recargar a todos o algunos de los que acepten la oferta, dependiendo de la potencia y espacios de parqueo disponibles.

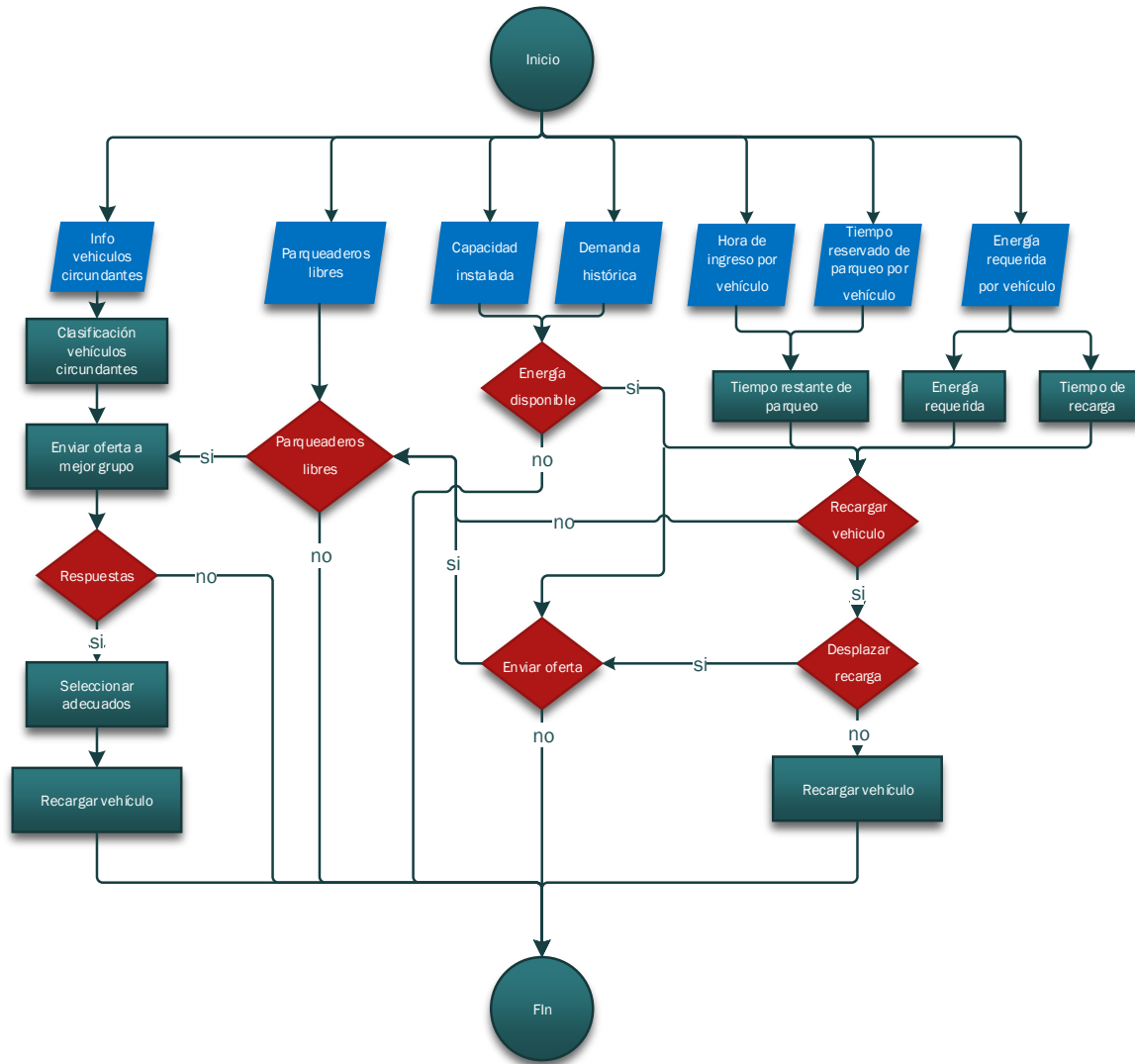
La segunda arista se fundamenta en un algoritmo de aprendizaje automático supervisado de regresión, el cual predice la demanda de potencia del edificio sin recarga de vehículos eléctricos para las siguientes ocho horas en función de la potencia actual. Este algoritmo al ser supervisado es entrenado previamente con los datos históricos de potencia medida. Esta información es fundamental dentro de la estrategia de gestión, debido a que permite decidir si es posible iniciar la recarga de los vehículos eléctricos de los empleados en las horas subsecuentes.

La tercera y última arista consta de un algoritmo de programación entera binaria, el cual se encarga de decidir el instante de tiempo de inicio de recarga de cada vehículo eléctrico de los empleados, en función de la potencia disponible para las siguientes ocho horas, la cantidad de tiempo de recarga requerido por cada vehículo y la hora de salida del vehículo del parqueadero con el fin de tener de optimizar la instalación eléctrica existente aplanando la curva de demanda de potencia.

Como resultado de la integración de estas tres aristas, la estrategia de gestión sigue el flujo que se observa en la **Figura 4-3** para decidir, cada treinta minutos, los vehículos que se recargarán durante los siguientes treinta minutos, entre los vehículos de los empleados y los circundantes al edificio, en función de la potencia y los espacios de parqueo disponibles.

El proceso inicia con la predicción de la potencia demandada (Arista 2), cuyo resultado es la entrada de la siguiente etapa del proceso donde se desplaza el inicio de la recarga de cada vehículo perteneciente a los empleados en función de la potencia disponible predicha (Arista 3). Si hay un excedente de potencia y espacio de parqueo libre para el espacio de tiempo actual, se inicia la última etapa del proceso la cual consiste en seleccionar de los vehículos circundantes al edificio de oficinas vehículos para recarga y asignarles un espacio de parqueo en función de la potencia y espacios de parqueo disponibles. (Arista1).

Figura 4-3: Flujo de programa sistema de gestión.



Nombre de la fuente: Elaboración propia.

4.2 Desplazamiento de la demanda

El objetivo del algoritmo es desplazar el inicio de la recarga del vehículo lo más cerca posible del momento de finalización de reserva del parqueadero, alcanzando el máximo de carga del vehículo y manteniendo hora a hora los límites máximos de potencia disponible. La carga de cada vehículo, una vez iniciada, no puede ser interrumpida hasta alcanzar el 100%.

Para la solucionar el problema se desarrolló el algoritmo propuesto en la **Figura 4-4**. Las entradas son el número de espacios de parqueo libre cada 30 min, el tiempo de recarga requerido por cada vehículo (Resultante del estado de carga de la batería y la potencia de recarga) y el tiempo de parqueo reservado por cada vehículo.

El problema se trata como un problema de asignación, donde se busca maximizar la función F , la cual es la resultante de la suma de los productos de la matriz de pesos por la matriz binaria de asignación.

$$\max(F) = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ij} * P_{ij} \quad (4-1)$$

La matriz X_{ij} se construye de manera iterativa respectado las restricciones (4-2 y (4-3, las cuales limitan la cantidad de potencia disponible por hora Z_j y la energía mínima requerida por vehículo T_i .

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = T_i \forall j \quad (4-2)$$

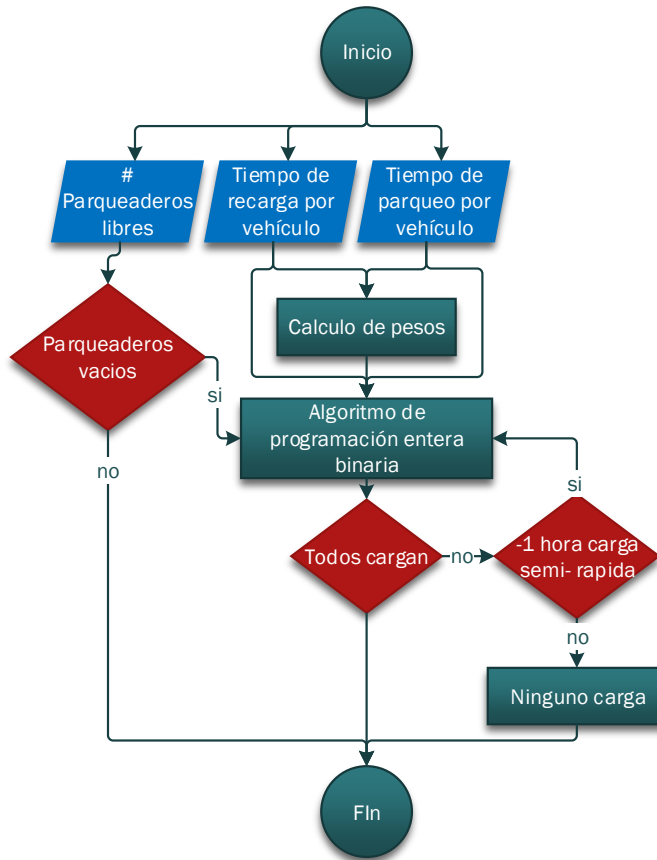
$$\sum_{i=1}^n X_{ij} \leq Z_j \forall j \quad (4-3)$$

La matriz de pesos P_{ij} consiste en asignar un peso a cada hora de recarga en función de la hora de salida. Cuanto más cerca está la hora de salida más peso tiene esta posición en la matriz, con el fin de trasladar el inicio de la recarga del vehículo lo más cerca posible de la hora de salida del parqueadero.

El cálculo de P_{ij} se realiza con (4-4, donde i corresponde al parqueadero y j a la hora de recarga. T_i es el tiempo durante el cual el vehículo debe ser cargado para alcanzar 100% de recarga, Z_j corresponde a la cantidad máxima de parqueaderos a los que se les puede habilitar recarga en la hora j , M_i es el tiempo durante el cual está el vehículo en el estacionamiento y X_{ij} es la matriz de asignación binaria.

$$P_{ij} = \begin{cases} (T_{ij} + j)/M_i, & (T_{ij} + j)/M_i \leq 1 \\ 1, & T_{ij} - M_i \geq 0 \\ -(n * m), T_{ij} - M_i < 0 \end{cases} \quad (4-4)$$

Figura 4-4: Algoritmo de desplazamiento de la demanda.



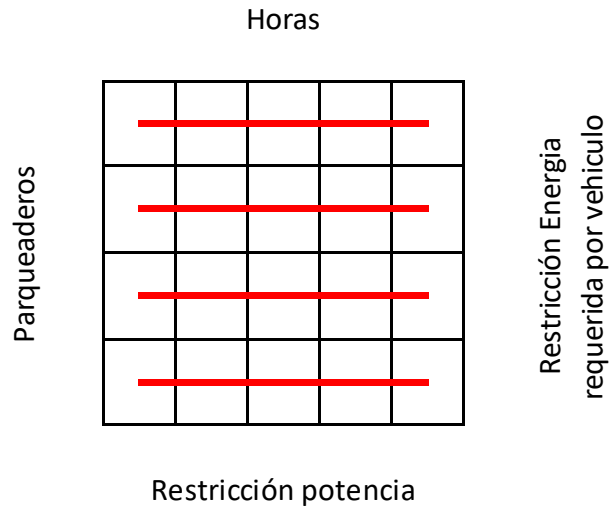
Nombre de la fuente: Elaboración propia.

Aplicando un algoritmo de programación entera binaria modificado, se asigna un valor de 0 o 1 que maximice la función objetivo F, teniendo en cuenta las restricciones de energía requerida por vehículo y potencia máxima disponible hora a hora.

Durante el proceso iterativo el algoritmo coloca 1 en las posiciones de la matriz que maximizan la función y que cumplen la restricción de energía requerida por el vehículo. En la **Figura 4-5** se observa que el algoritmo inicia cumpliendo la restricción horizontal (4-2,

la cual está relacionada con la cantidad de tiempo de recarga por cada parqueadero y se representa con las líneas rojas horizontales.

Figura 4-5: Restricción de energía requerida por vehículo.



Nombre de la fuente: Elaboración propia.

La **Figura 4-6** presenta un ejemplo para once parqueaderos, ocho horas de parqueo, una cantidad aleatoria entre 1 y 4 de horas de recarga requerida por vehículo. Como se observa el algoritmo coloca 1 en las posiciones de la matriz que maximizan la función.

Figura 4-6: Matriz de asignación binaria.

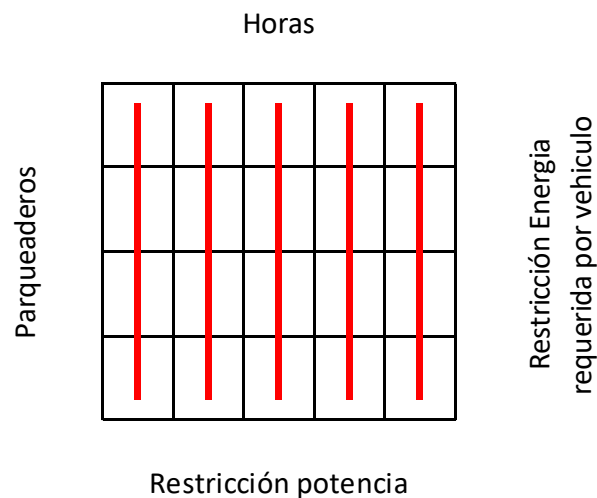
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	0	0	0	0	0	1	0	0	1
2	1	0	0	0	0	0	0	0	1
3	1	1	1	1	0	0	0	0	4
4	0	0	0	0	1	1	1	1	4
5	1	1	1	1	0	0	0	0	4
6	0	1	0	0	0	0	0	0	1
7	0	0	0	0	0	1	0	0	1
8	0	1	1	1	1	0	0	0	4
9	0	0	0	0	1	0	0	0	1
10	0	0	1	0	0	0	0	0	1
11	1	0	0	0	0	0	0	0	1
	5	4	1	3	6	7	7	2	

Nombre de la fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, el algoritmo valida que se cumplan las restricciones de potencia disponible hora a hora, es decir la cantidad de parqueaderos a los cuales es posible habilitar la recarga (4-3, tal como se ejemplifica con las líneas rojas en **Figura 4-7**, donde se puede observar que esta restricción se evalúa sumando los valores de cada columna de la matriz.

Si esta restricción no se cumple, se procede a buscar las horas de salida coincidentes con las horas donde no se cumple esta restricción y se adelanta un periodo de tiempo el inicio de la recarga; siempre validando que se alcance la carga requerida.

Figura 4-7: Restricción de potencia disponible.

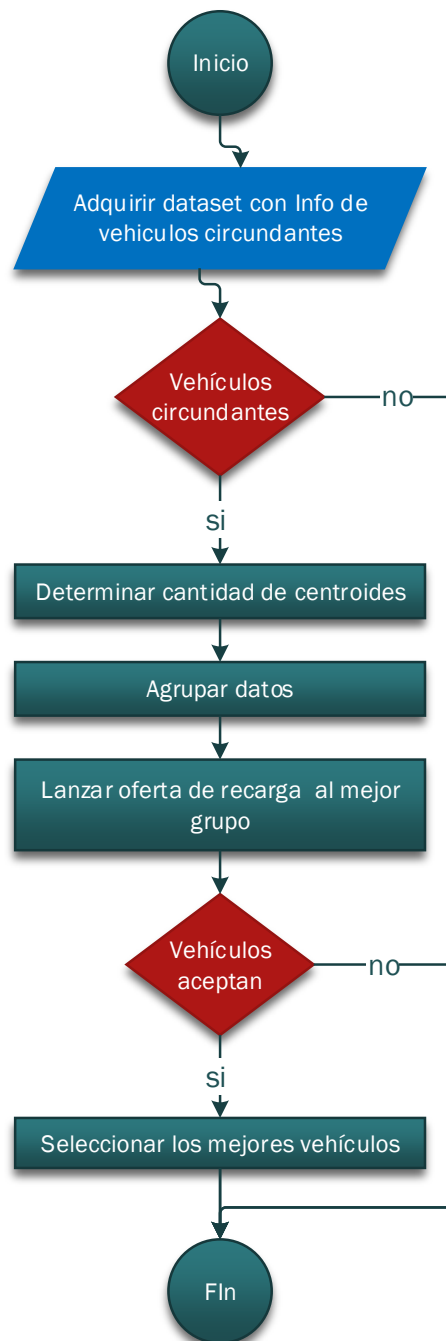


Nombre de la fuente: Elaboración propia.

El algoritmo finalmente determina las horas de inicio de recarga de cada vehículo cumpliendo todas las restricciones e inicia la carga de aquellos a los cuales sea posible recargar.

4.3 Algoritmo de agrupamiento

La estrategia de gestión propuesta oferta la recarga y los espacios de parqueaderos disponibles a aquellos vehículos con mayor necesidad de recarga y que estén más cerca al edificio de oficinas. Por tal motivo, se construyó el algoritmo de la **Figura 5-8**, el cual busca agrupar los vehículos circundantes al edificio de oficinas en función de la distancia al mismo y el tiempo de recarga requerido.

Figura 4-8: Flujo de programa algoritmo de agrupamiento

Nombre de la fuente: Elaboración propia.

El almacenamiento en tiempo real en una base de datos en la nube de los datos de georreferencia, estado de la batería y capacidad de carga máxima no está contemplado

dentro del alcance este trabajo, por lo que, estos datos deberán estar disponibles para ser importados por el programa, con el fin de calcular la distancia en línea recta de cada vehículo al edificio de oficinas y el tiempo de recarga requerido para una carga rápida.

Con estos datos de entrada el algoritmo procede a agruparlos en la cantidad grupos determinado, posteriormente, entrega el valor de cada uno de los centroides y una tabla de datos donde se identifica a que grupo pertenece cada vehículo. A partir de allí, el algoritmo lanza ofertas de recarga a los vehículos agrupados alrededor del centroide con la mayor relación tiempo requerido de recarga versus distancia al edificio de oficinas.

Se confirma la recarga a los vehículos que acepten la oferta de recarga, hasta que se alcance el límite de potencia disponible.

Con este objetivo se implementó el algoritmo de agrupamiento K-means **Figura 4-9**, el cual está incluido en la librería de Scikit-Learn de Python [45], [46]. Tal algoritmo de agrupación no supervisado, agrupa datos como los presentados en la **Figura 4-10** en k grupos en función de sus características. La finalidad del algoritmo es agrupar minimizando la suma de distancias entre cada objeto y el centroide o promedio de los puntos similares con características continuas. Para tal fin, comúnmente se usa la distancia cuadrática [47].

La distancia intragrupo para un grupo C_j cualquiera se define como [47]:

$$SS_w(C_j) = \sum_{x \in C_j} (x - C_j)^2 \quad (4-5)$$

Con el fin de evaluar la eficacia del modelo se puede usar la distancia intragrupo normalizada:

$$S\tilde{S}_w = \sum_{j=1}^k \frac{SS_w(C_j)}{SS_T} \quad (4-6)$$

Donde:

$$SS_T = \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (4-7)$$

Figura 4-9: Implementación en Python del algoritmo de agrupamiento.

```

1 import pandas as pd
2 from sklearn.cluster import KMeans
3 from sklearn import datasets
4 import matplotlib.pyplot as plt
5 import seaborn as sns; sns.set()
6 import numpy as np
7 %matplotlib inline
8
9 df= pd.read_csv('AUT01.csv', sep = ';')
10 df.head()
11 df_norm = (df-df.min())/(df.max()-df.min())
12 x= df_norm.values
13 plt.scatter(x[:,0], x[:,1], s=50)
14 plt.xlabel("Tiempo de recarga requerido",fontsize=14)
15 plt.ylabel("Distancia al edificio",fontsize=14)
16 plt.show()
17
18 kmeans = KMeans(n_clusters=3)
19 kmeans.fit(x)
20 y_means = kmeans.predict(x)
21 centers = kmeans.cluster_centers_
22 print(centers)
23
24
25 plt.scatter(x[:,0], x[:,1], c=y_means, cmap='viridis')
26 plt.scatter(centers[:,0], centers[:,1], c='black', s=200, alpha=0.5)
27 plt.xlabel("Tiempo de recarga requerido",fontsize=12)
28 plt.ylabel("Distancia al edificio",fontsize=12)
29 plt.show()

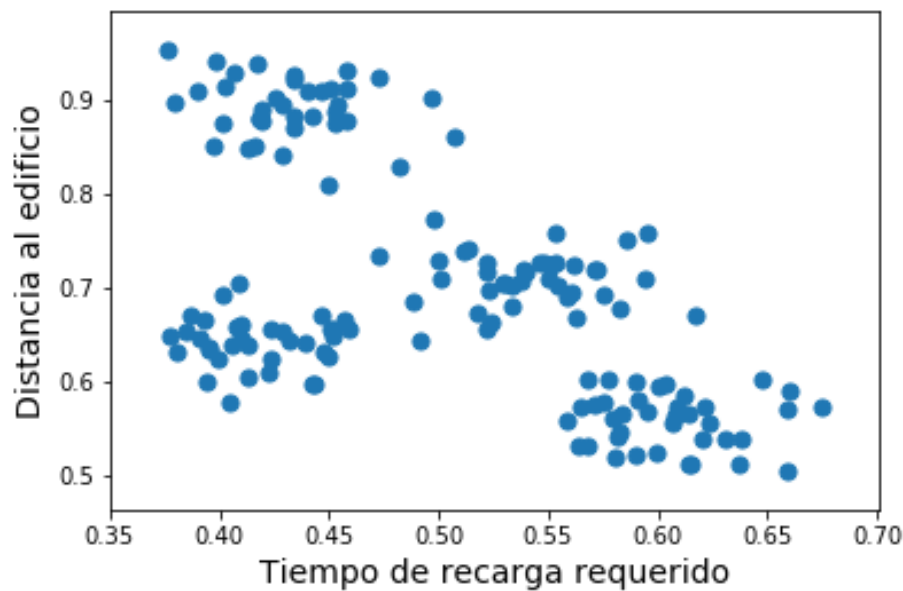
```

Nombre de la fuente: Elaboración propia

El objetivo de k-means es obtener una configuración de centroides del grupo de modo que la suma total de cuadrados siguiente (SS_w) sea mínima, donde k es el número de grupos, x_i son los puntos que pertenecen al grupo j -ésimo y C_j es el centroide del grupo j -ésimo [47]:

$$\min(SS_w(k)) = \sum_{j=1}^k SS_w(C_j) = \sum_{j=1}^k \sum_{x_i \in C_j} (x_i - C_j)^2 \quad (4-8)$$

Figura 4-10: Conjunto original de datos.



Nombre de la fuente: Elaboración propia.

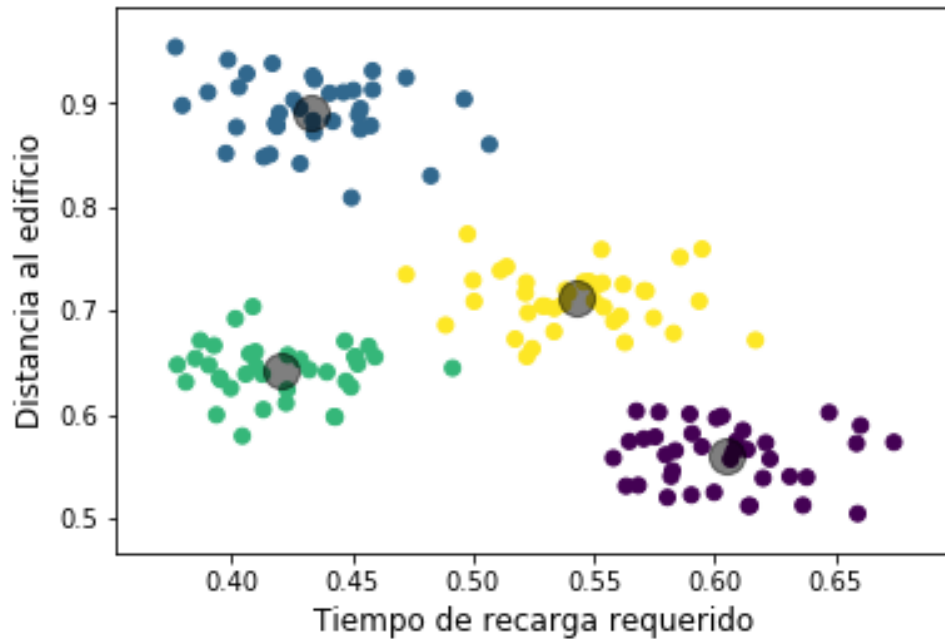
El cálculo de la cantidad de centroides k se realiza siguiendo un método en varios casos gráfico que a menudo requiere la intervención de un experto en el contexto del problema, para definir el k óptimo. Para esto se dispone de los siguientes métodos los cuales son descritos en las secciones posteriores de este documento [46]:

- Método del codo
- Método del coeficiente de la silueta
- El método de propagación de afinidad

En la **Figura 4-11** se observa el resultado gráfico de aplicar K-means a los datos de la **Figura 4-10**. Se observa cada grupo identificado con diferente color y unos círculos negros que representan los centroides. En cada grupo se encuentra ubicados los datos más próximos al centroide del grupo.

Figura 4-11: Resultado del algoritmo de agrupación de datos.

Algoritmo de Agrupamiento



Nombre de la fuente: Imagen tomada de GUI desarrollada. Fuente propia.

4.3.1 Método del codo

Con el objetivo de estimar el número óptimo de k grupos se implementó la herramienta gráfica método de elbow o codo. Este método busca identificar el valor de k donde la distorsión SS_w , la suma de los errores cuadráticos dentro del grupo, empieza a aumentar más rápidamente; esto se hace evidente si graficamos esta distorsión para los diferentes valores de k . [47]

$$SS_w(k) = \sum_{i=1}^n |x_i - \mu|^2 \quad (4-9)$$

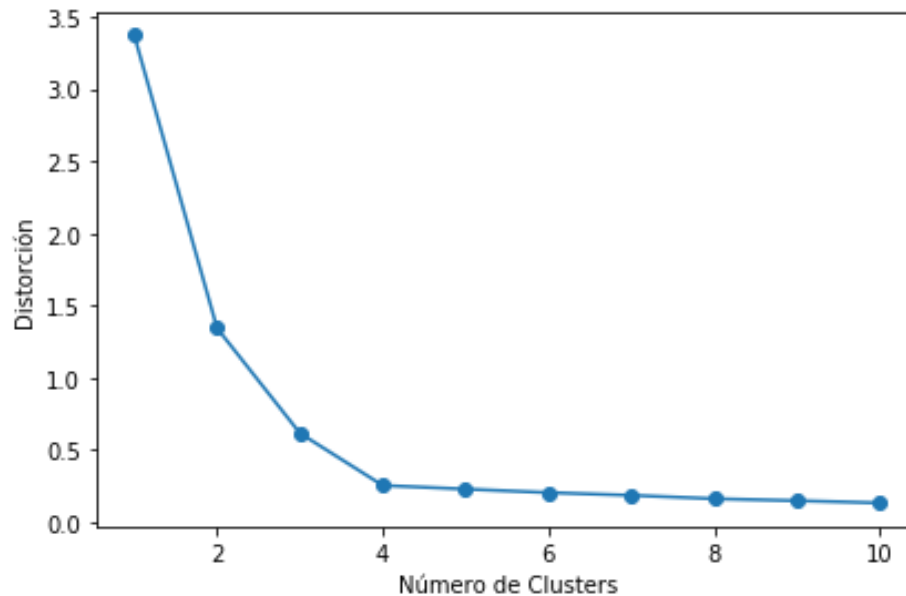
donde:

x_i : Cada uno de los objetos en el grupo

μ : el centroide

La **Figura 4-12** presenta el resultado de aplicar el método del codo para los datos presentados en la **Figura 4-10**, los cuales corresponden a datos generados durante una prueba del algoritmo de agrupación de datos. Como se observa el punto donde SS_w comienza a aumentar más rápidamente se ubica aproximadamente en 4, por lo que el k óptimo es 4.

Figura 4-12: Resultado implementación método del codo.



Nombre de la fuente: Imagen tomada de GUI desarrollada. Fuente propia.

4.3.2 Método del coeficiente de la silueta

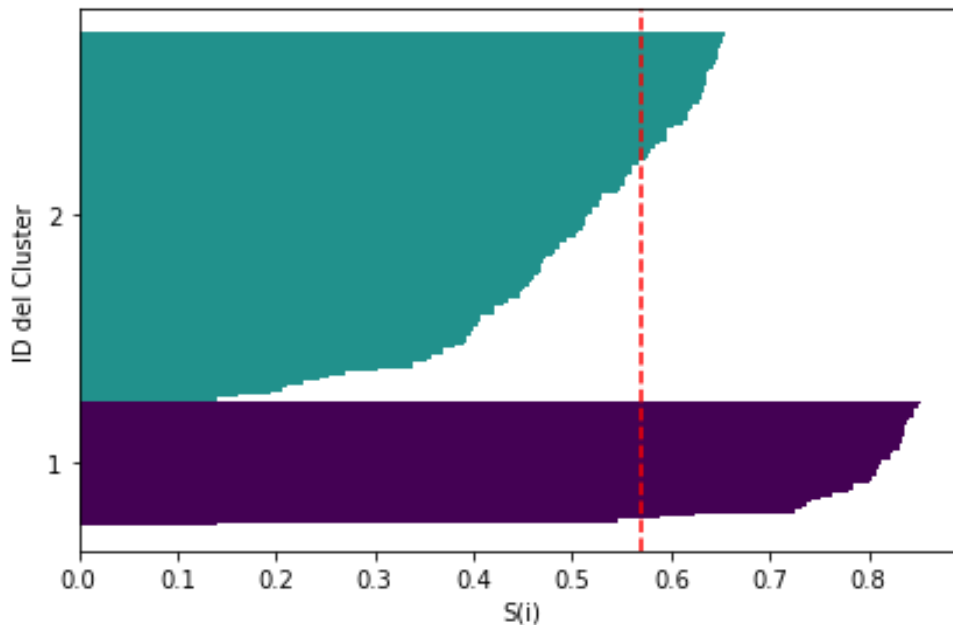
Otra medida incluida en el software es el análisis de silueta, el cual al igual que el método del codo, permite evaluar la calidad del agrupamiento de los datos. Esta herramienta grafica permite representar una medida de cómo están agrupadas las muestras y determinar el número óptimo de centroides.

El coeficiente de silueta S se calcula a partir de la cohesión del grupo y la separación del grupo, con la siguiente ecuación:

$$S^i = \frac{b^i - a^i}{\max\{b^i, a^i\}} \quad (4-10)$$

Como se observa en la **Figura 4-13**, las siluetas tienen diferente largo y ancho, esto quiere decir que la agrupación de los datos no es buena o insuficiente. Por tal motivo, es necesario incrementar el valor de k , es decir la cantidad de grupos. Comúnmente, para la mayoría de problemas es suficiente con agrupar los datos entre 2 y 10 grupos. Aun así, siempre la opinión de un experto en el tema es la que puede llegar a determinar el número óptimo de grupos.

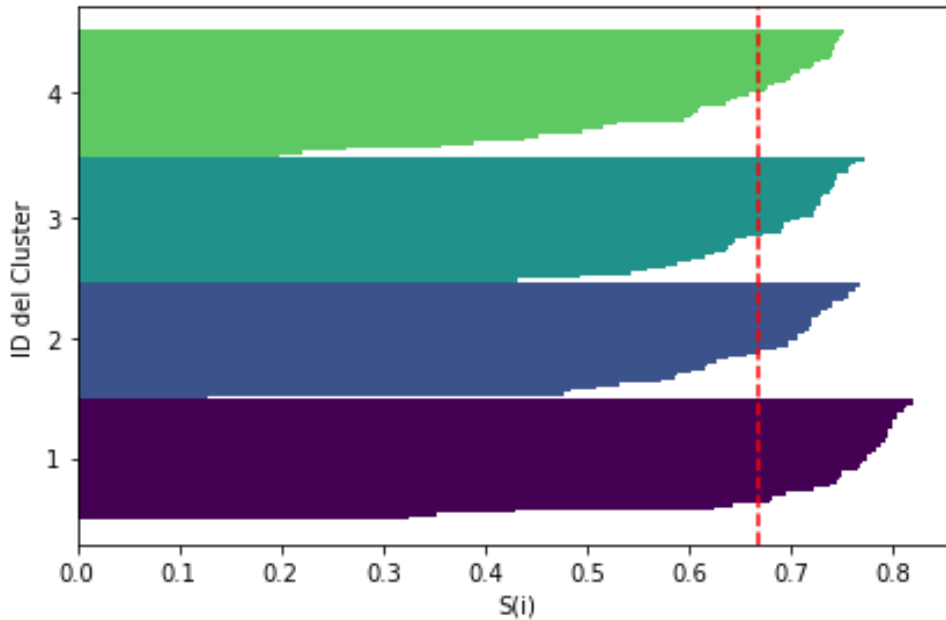
Figura 4-13: Método del coeficiente de la silueta para agrupamiento malo.



Nombre de la fuente: Imagen tomada de GUI desarrollada. Fuente propia.

Como se evidencia en la **Figura 4-14**, aumentar el número de grupos dio como resultado siluetas de similar longitud y ancho, adicionalmente se alejan de cero, lo cual es un buen indicativo que la agrupación de datos es buena o suficiente.

Figura 4-14: Método del coeficiente de la silueta para un buen agrupamiento.



Nombre de la fuente: Imagen tomada de GUI desarrollada. Fuente propia.

4.3.3 Método de propagación de afinidad

Esta técnica intenta encontrar el número de grupos o clústeres a partir de los puntos del conjunto de datos. Como dato de entrada se toma la matriz de semejanza $s(i,j)$, la cual mide que tan parecidos son los valores en función de la distancia euclidiana.

El proceso empieza asignado 0 la matriz de responsabilidad $r(i,k)$ y a la de disponibilidad $a(i,k)$, donde i es el punto donde se intenta encontrar el centro del grupo, k es el centro del clúster potencial. De ahí en adelante se calcula la responsabilidad de un punto del grupo de datos k con respecto al clúster de otro punto i y se representa numéricamente por las semejanzas de esos dos puntos del conjunto de datos.

La responsabilidad va decreciendo y se hace negativa para muchos puntos del conjunto de datos, dado que se está restando las mayores disponibilidades y semejanzas con respecto a otros puntos, dejando al final un par de opciones que terminarán siendo asignados como centros del clúster [47]. Todo el proceso matemático se detalla en las ecuaciones (4-11 a (4-14).

La **Figura 4-15** presenta la implementación en Python del algoritmo de propagación de afinidad.

Figura 4-15: Implementación en Python del método de propagación de afinidad.

```

1 from sklearn.cluster import AffinityPropagation
2 from sklearn import metrics
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 from itertools import cycle
5
6 af = AffinityPropagation().fit(df_norm)
7 cluster_center_ids = af.cluster_centers_indices_
8 labels = af.labels_
9 n_clust = len(cluster_center_ids)
10 n_clust
11
12 def report_affinity_propagation(X):
13     af = AffinityPropagation().fit(X)
14     cluster_center_ids = af.cluster_centers_indices_
15     n_clust = len(cluster_center_ids)
16     clust_labels = af.labels_
17
18     print("Número estimado de clusters: %d"%n_clust)
19     print("Homogeneidad: %0.3f"%metrics.homogeneity_score(labels, clust_labels))
20     print("Compleitud: %0.3f"%metrics.completeness_score(labels, clust_labels))
21     print("V-measure: %0.3f"%metrics.v_measure_score(labels, clust_labels))
22     print("R2 ajustado: %0.3f"%metrics.adjusted_rand_score(labels, clust_labels))
23     print("Información mútua ajustada: %0.3f"%metrics.adjusted_mutual_info_score(labels, clust_labels))
24     print("Coeficiente de la silueta: %0.3f"%metrics.silhouette_score(X, labels, metric="sqeuclidean"))
25
26     plt.figure(figsize=(16,9))
27     plt.clf()
28
29     colors = cycle('bgrcmykbgrcmykbgrcmykbgrcmyk')
30     for k, col in zip(range(n_clust), colors):
31         class_members = (clust_labels==k)
32         clust_center = X[cluster_center_ids[k]]
33         plt.plot(X[class_members,0], X[class_members, 1], col + '.')
34         plt.plot(clust_center[0], clust_center[1], 'o', markerfacecolor=col, markeredgecolor='k', markersize=14)
35         for x in X[class_members]:
36             plt.plot([clust_center[0],x[0]], [clust_center[1], x[1]], col)
37
38     plt.title("Número estimado de clusters %d"%n_clust)
39     plt.xlabel("Tiempo de recarga requerido",fontsize=14)
40     plt.ylabel("Distancia al edificio",fontsize=14)
41     plt.show()
42
43     report_affinity_propagation(x)

```

Nombre de la fuente: Elaboración propia.

$$r(i, k) = s(i, k) - \max_{j \neq k} (a(i, j) + s(i, j)) \quad (4-11)$$

$$s(i, k) = \frac{1}{d(i, k)} \quad (4-12)$$

$$a(i, k) = \min \left(0, r(k, k) + \sum_{j \notin \{i, k\}} \max(0, r(k, k)) \right) \quad (4-13)$$

$$a(k, k) = \sum_{j \neq k} \max(0, r(j, k)) \quad (4-14)$$

4.4 Predicción de la energía disponible

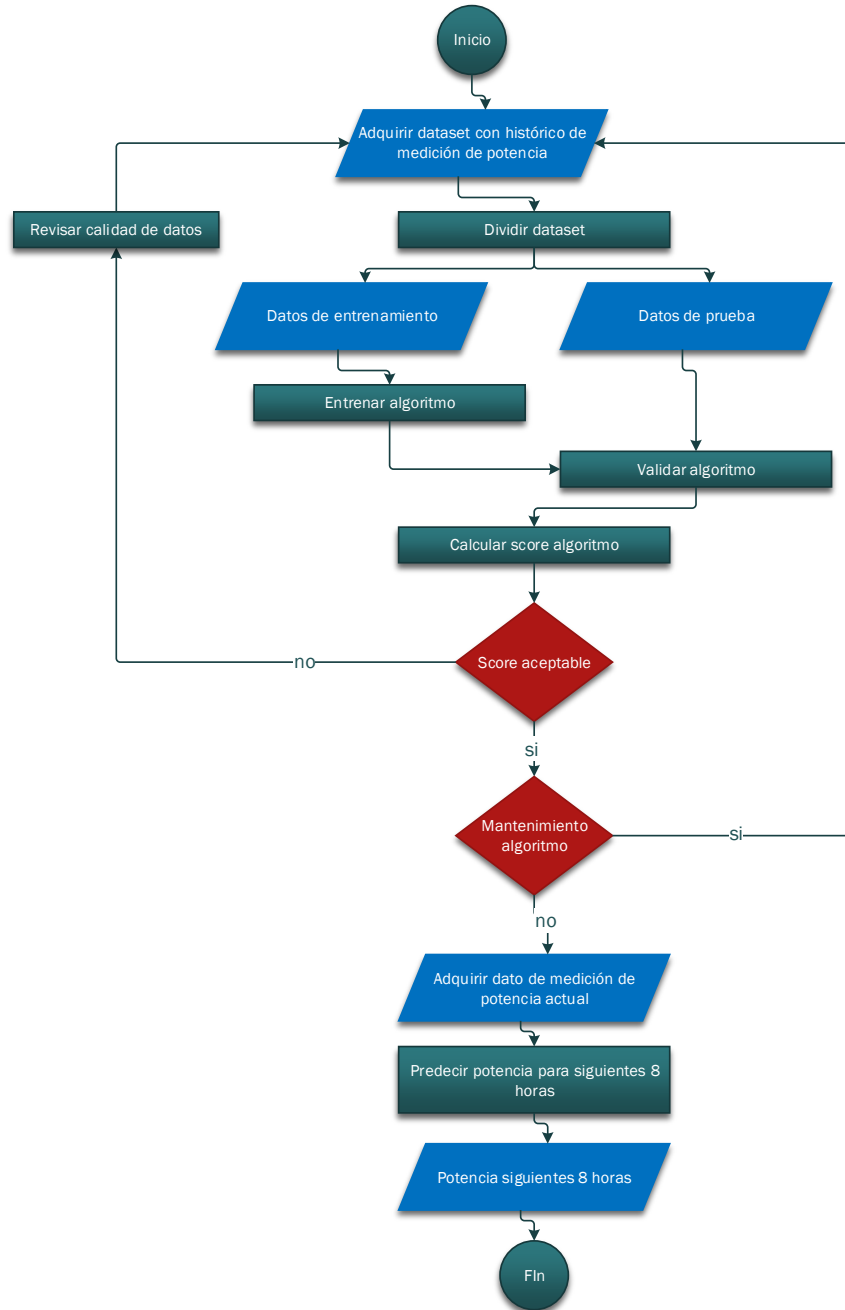
La predicción de la energía disponible se realiza con base en los datos históricos de demanda almacenados, los cuales permiten entrenar un algoritmo de aprendizaje automático supervisado, el cual utiliza un modelo de regresión para predecir variables de destino en una escala continua **Figura 4-16** [48].

En el caso de la estrategia de gestión propuesta, la variable de interés es la potencia disponible cada 30 minutos para las 8 horas siguientes a la actual, con el fin de desplazar el inicio de la recarga de los vehículos en estas ocho horas y dejar la mayor cantidad de potencia disponible para ofertarla a los vehículos circundantes al edificio de oficinas. Para esto se observa la relación entre el día, la hora actual, la potencia actual disponible y la potencia disponible histórica para las siguientes 8 horas.

Con el fin de realizar esta predicción se implementaron tres algoritmos de regresión. El usuario puede elegir entre regresión lineal simple, árbol de decisión y bosques aleatorios de decisión, dependiendo de la cantidad de datos, el rendimiento del modelo, capacidad de procesamiento de la máquina y si la relación de los datos es lineal o no.

El rendimiento del modelo se evalúa mediante la medida cuantitativa denominada Error Cuadrático medio (en inglés MSE) que entre más pequeño sea indica un mayor ajuste del modelo a los datos y el coeficiente de determinación (R^2) el cual debe estar lo más cerca posible de 1, tanto para los datos de entrenamiento como de prueba [47].

Figura 4-16: Flujo de programa algoritmo de predicción de energía.



Nombre de la fuente: Elaboración propia.

4.4.1 Regresión lineal

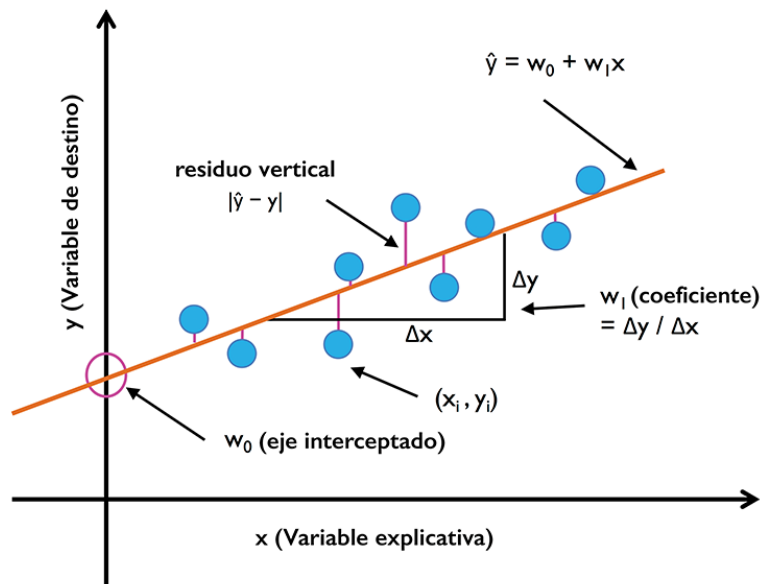
La regresión lineal (4-15) consiste en modelar una relación entre una característica simple (x) y una respuesta de valor continuo (y), donde el peso w_0 representa la intercepción con el eje y, mientras que w_1 es el coeficiente ponderado de la variable explicativa. [48]

$$y = w_0 + w_1x \tag{4-15}$$

El objetivo es aprender la relación entre estas dos variables, explicativa y destino, para después predecir las respuestas ante nuevos valores de la variable explicativa que no forman parte del conjunto de datos o valores de entrenamiento. En otras palabras, se busca la mejor recta que se ajuste a los datos de entrenamiento.

Como se observa en **Figura 4-17**, la gran mayoría de datos se aproximan a la recta trazada, quedando un residuo vertical, el cual está relacionado con el error de predicción que presentará el modelo. Sin embargo, a pesar del error inherente al modelo, la simplicidad de implementación y cálculo, puede ser suficiente para el problema que se está tratando. La **Figura 4-18** presenta la implementación en Python del algoritmo.

Figura 4-17: Regresión lineal.



Nombre de la fuente: Python Machine Learning [48].

Figura 4-18: Implementación algoritmo de regresión lineal en Python.

```
1 from sklearn.feature_selection import RFE
2 from sklearn.datasets import make_friedman1
3 from sklearn.svm import SVR
4 from sklearn.linear_model import LinearRegression
5 import numpy as np
6 import pandas as pd
7
8 data = pd.read_csv('Potencia.csv', sep = ';', decimal=",")
9 data.head()
10 colnames = data.columns.values.tolist()
11 predictors = colnames[:3]
12 target = colnames[3:4]
13 target
14 X = data[predictors]
15 Y = data[target].values.ravel()
16 estimator = SVR(kernel='linear')
17 selector = RFE(estimator, 2, step=1)
18 selector = selector.fit(X,Y)
19 selector.support_
20
21 colnames = data.columns.values.tolist()
22 predictors = colnames[:3]
23 target = colnames[3:10]
24 X = data[predictors]
25 Y = data[target]
26 lm = LinearRegression()
27 lm.fit(X,Y)
28 lm.intercept_
29 lm.coef_
30 lm.score(X,Y)
31 lm.predict([[1, 3, 26.5]])
```

Nombre de la fuente: Python Machine Learning [48].

4.4.2 Árbol de decisión

El árbol de decisión consiste en la descomposición de los datos mediante la toma de decisiones basada en una serie de preguntas. Basándose en las características de los datos de entrenamiento, el modelo de árbol de decisión aprende una serie de preguntas para deducir las etiquetas de clase de las muestras. Una ventaja de este algoritmo es que no requiere de ninguna transformación de las características en caso de tratar con datos que no son lineales.

Utilizando el algoritmo de decisión, se inicia en la raíz del árbol y se divide los datos en la característica que resulta en la mayor ganancia de información (IG). Se repite el proceso de división en cada nodo hijo hasta que las hojas sean puras, por lo que todas las muestras de cada nodo pertenecen a la misma clase .

Figura 4-19. Como buena práctica para evitar el sobre ajuste, se poda el árbol definiendo un número límite de profundidad.

Figura 4-19: Árbol de decisión.



Nombre de la fuente: Python Machine Learning [48].

Con el fin de dividir los nodos en las características más informativas, se define la función siguiente, donde f es la característica para realizar la división, D_p y D_j son el conjunto de datos del nodo padre p y el nodo hijo j , I es la medida de impureza, N_p es el numero total de muestras del nodo padre, mientras que, N_j las muestras del nodo hijo [47].

$$IG(D_p, f) = I(D_p) - \sum_{j=1}^m \frac{N_j}{N_p} I(D_j) \tag{4-16}$$

En la librería de Scikit-Learning de Python, la cual es implementada **Figura 4-20**, por simplicidad y con el objetivo de reducir el espacio de búsqueda, se implementa arboles de decisión binarios. Por tal motivo, la función se simplifica de la siguiente manera [47]:

$$IG(D_p, f) = I(D_p) - \frac{N_{izquierdo}}{N_p} I(D_{izquierdo}) - \frac{N_{derecho}}{N_p} I(D_{derecho}) \quad (4-17)$$

Figura 4-20: Implementación en Python del algoritmo de Árbol de decisión.

```

1 from sklearn.tree import DecisionTreeRegressor
2 from sklearn.tree import export_graphviz
3 from sklearn.model_selection import KFold
4 import os
5 from graphviz import Source
6 from sklearn.model_selection import cross_val_score
7 import numpy as np
8
9 regtree = DecisionTreeRegressor(min_samples_split= 10 , min_samples_leaf=10, random_state=0)
10 regtree.fit(X,Y)
11 preds = regtree.predict(data[predictors])
12
13
14 with open('potencia_rtree.dot','w') as dotfile:
15     export_graphviz(regtree, out_file=dotfile, feature_names=predictors)
16     dotfile.close()
17
18
19 file = open('potencia_rtree.dot','r')
20 text = file.read()
21 Source(text)
22
23 cv = KFold(n_splits = 10, shuffle=True, random_state=1)
24 scores = cross_val_score(regtree, X, Y, scoring='neg_mean_squared_error', cv = cv, n_jobs=1)
25 print(scores)
26 score = np.mean(scores)
27 print(score)
28 list(zip(predictors,regtree.feature_importances_))
29 print(regtree.predict([[1, 3, 26.5]]))

```

Nombre de la fuente: Elaboración propia.

Para arboles de decisión binarios normalmente se utiliza las siguientes medidas de impureza o criterios de división:

- Impureza de Gini
- Entropía
- Error de clasificación

4.4.3 Bosques aleatorios de decisión

Los bosques aleatorios consisten en promediar un conjunto de árboles de decisión múltiples (Profundos), con el fin de evitar la elevada varianza y el sobre ajuste que sufre un solo árbol. El algoritmo consta de los siguientes 4 pasos [47]:

1. Dibujar una muestra Bootstrap aleatoria de tamaño n
2. Crear un árbol de decisión a partir de la muestra. Para cada nodo:
 - Seleccionar al azar características d sin reemplazo

- Dividir el nodo según la característica que proporciona la mejor división según la función objetivo
3. Repetir los pasos 1-2 k veces
 4. Añadir la predicción para cada árbol con el fin de asignar la etiqueta de clase por mayoría de votos

El tamaño de muestra Bootstrap se elige de tal forma que sea igual al número de muestras de conjunto de entrenamiento. El número de características d en cada división debería ser menor que el número total de características en el subconjunto de entrenamiento.

La **Figura 4-21** presenta la implementación realizada en Python del algoritmo de bosques aleatorios para la estrategia de gestión de recarga de vehículos eléctricos.

Este algoritmo puede trabajar con datos lineales y no lineales, presenta una muy buena precisión, pero a coste de una gran demanda de recursos de procesamiento y memoria.

Figura 4-21: Árbol de decisión.

```
1 import pandas as pd
2 from sklearn.ensemble import RandomForestRegressor
3
4 data = pd.read_csv('Potencia.csv', sep = ';', decimal=",")
5 data.head()
6 data.shape
7 colnames = data.columns.values.tolist()
8 predictors = colnames[:3]
9 target = colnames[3:10]
10 X = data[predictors]
11 Y = data[target]
12
13 forest = RandomForestRegressor(n_jobs = 2, oob_score=True, n_estimators = 10000)
14 forest.fit(X,Y)
15 sum(((data['rforest_hora_1']-data['P_hora _1'])**2))/len(data['P_hora _1'])
16 forest.oob_score_
```

Nombre de la fuente: Elaboración propia.

4.5 Conclusiones del capítulo

Se propone una estrategia de gestión que no solo se limita a realizar el desplazamiento de la demanda, sino que también predice la demanda de energía del edificio y agrupa los vehículos circundantes a la edificación con el fin de ofertar espacios de parqueo y recarga.

La estrategia propuesta se basa en tecnologías de última generación como internet de las cosas, manejo de grandes volúmenes de datos y aprendizaje automático.

Se desarrolló un algoritmo de programación entera binaria, el cual busca desplazar la demanda, es decir la recarga del vehículo, lo máximo posible de la hora actual. Para tal fin, el problema se trató como un problema de asignación, dando mayor peso a las horas más cercanas a la hora de salida del parqueadero y respetando las restricciones de energía requerida por vehículo y potencia máxima disponible hora a hora

El software dispone de tres herramientas, dos gráficas y una automática para definir la cantidad de grupos en los cuales el algoritmo de agrupación implementado agrupara los vehículos circundantes al edificio a los que se ofertara el parqueo por 30 min y la recarga.

Para la predicción de la demanda de potencia se incluyó tres algoritmos de aprendizaje automático los cuales dan como resultado la potencia para las siguientes ocho horas en función de la potencia actual disponible medida. El usuario puede elegir cualquiera de los tres en función de la cantidad de datos que tenga, la capacidad de procesamiento, el comportamiento lineal o no lineal de los datos y la precisión requerida.

5 Capítulo 5: Validación de los algoritmos implementados en la estrategia de gestión

El presente capítulo da a conocer los resultados obtenidos en las pruebas aplicadas a la estrategia de gestión de recarga de vehículos eléctricos como son: prueba del algoritmo de programación entera binaria, pruebas a el algoritmo de clasificación, prueba a las herramientas de estimación del número de grupos y pruebas a los algoritmos de regresión. Dichas pruebas permiten validar el funcionamiento de cada uno de los algoritmos propuestos dentro de la estrategia de gestión e implementados en el software desarrollado en Python.

Las pruebas inician entrenando el algoritmo de predicción de demanda de potencia con los datos de la **Figura 2-1**. Posteriormente, se simula la obtención en tiempo real de la medida potencia demandada, generando un valor aleatorio, el cual se ingresa al algoritmo de predicción de la demanda.

A continuación, el resultado de dicho algoritmo se introduce como valores de restricción de potencia disponible para probar el algoritmo de desplazamiento de inicio de recarga de los vehículos en el parqueadero.

Finalmente, se agrupa los vehículos circundantes al edificio, se oferta la recarga al grupo con el centroide con la mejor relación tiempo de recarga requerido versus distancia al edificio y se presenta la demanda de potencia final.

5.1 Prueba algoritmo de predicción de la demanda del edificio de oficinas

Para la prueba de los algoritmos de predicción de la demanda, se tomaron los datos de la **Figura 2-1** como datos de entrenamiento y prueba. Dichos fueron obtenidos del analizador de calidad de energía instalado en un edificio de oficinas ubicado en la ciudad de Bogotá – Colombia en la localidad de Chapinero.

Este conjunto de datos fue dividido en un 70% datos de entrenamiento y 30% datos de prueba con el fin de entrenar y validar mediante el método de validación cruzada los algoritmos implementados en la estrategia de gestión.

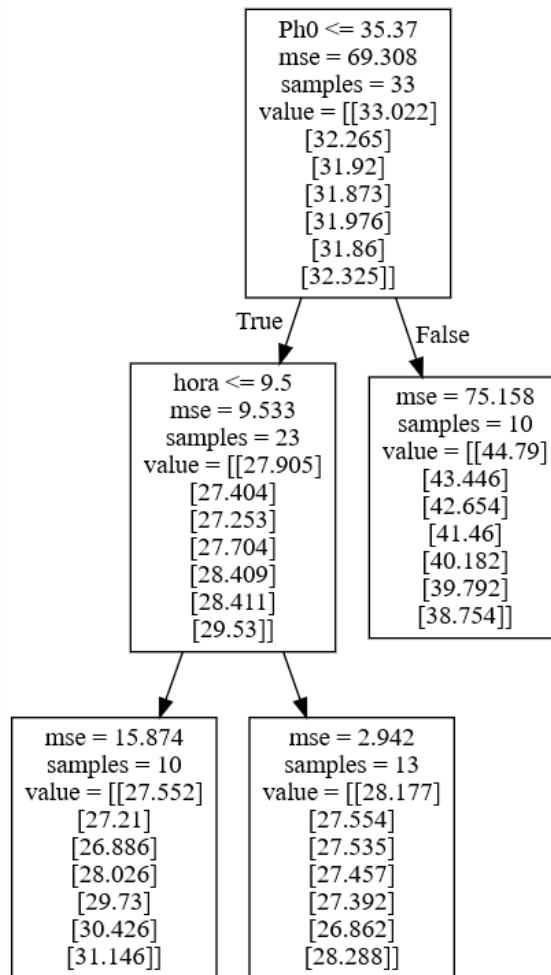
La **Figura 5-1** presenta el resultado gráfico de el algoritmo de árbol de decisión, teniendo como número mínimo 10 muestras por corte, mínimo 10 muestras por hoja y el estado aleatorio en 0.

Si se observa la imagen del árbol de decisión, se puede trazar fácilmente las divisiones que el árbol de decisión ha determinado a partir de los datos de entrenamiento. El árbol inicio con 33 muestras en la raíz y se dividieron en dos nodos hijo con 23 y 10 muestras, mediante el corte potencia momento inicial ≤ 35.37 . Si la potencia del momento inicial es menor a 35.37 se toma la rama de la izquierda, en caso contrario la derecha.

Se realizo una validación cruzada con los datos de entrenamiento y prueba. Se obtuvo un MSE de entrenamiento de 28.744 y de prueba de 78.138, mientras que un R^2 de entrenamiento de 0.591 y de 0.228 para el de prueba. Esto muestra que el modelo tiene un sobre ajuste dado que el MSE de entrenamiento es mucho mayor al de prueba lo que se refleja en un bajo rendimiento. Es posible mejorar el modelo aumenta la profundidad de árbol sacrificando incrementado el requerimiento de recursos de procesamiento.

El algoritmo también arroja la importancia de cada variable en la predicción. Para la prueba los valores fueron los siguientes 'Dia', 0.0, 'hora', 0.095, 'P_hora _0', 0.91. De tal forma, que la variable que más influye en la predicción es la potencia del momento inicial.

Figura 5-1: Implementación algoritmo de árbol de decisión.



Nombre de la fuente: Elaboración propia.

La prueba del algoritmo de bosques aleatorios se realizó con un número de estimadores igual a 1000. No se tiene una profundidad máxima del árbol, ni un mínimo de divisiones por impureza, el mínimo de muestras por hoja es 1 y el mínimo de muestras por poda es 2. Adicionalmente, el muestreo automático fue activado.

Como resultado de la prueba se obtuvo un oob score de 0.71 siendo 1 el máximo posible. Adicionalmente, el MSE de entrenamiento es de 2.559 y el de prueba de 28.840, mientras que el R^2 de entrenamiento fue de 0.963 y de 0.722 para el de prueba. Este resultado muestra que el modelo tiene un buen rendimiento y no presenta un excesivo sobre ajuste.

Es posible obtener una mayor precisión aumentando el número de estimadores. Sin embargo, esto aumenta la complejidad del modelo lo que se traduce en un mayor requerimiento en tiempos y capacidad de procesamiento.

Finalmente, se efectuó la prueba del algoritmo de regresión lineal. Este algoritmo obtuvo un MSE de entrenamiento de 18.915 y de prueba de 47.417, mientras que el R^2 de entrenamiento fue de 0.730 y de 0.538 para el de prueba.

Estos resultados reflejan un rendimiento aceptable y un valor de sobreajuste un poco alto, aunque bastante menor al presentado por el árbol de regresión. Dichos resultados son bastante sorprendentes dada la sencillez del modelo y puede ser una buena opción cuando no se disponga de suficiente capacidad de procesamiento.

Los algoritmos son bastante consistentes dado que para múltiples simulaciones con los mismos datos de entrada se observaron pequeñas variaciones en milésimas en los datos de predicción. Adicionalmente, se mantuvieron los valores de rendimiento MSE y R^2 para diferentes conjuntos de datos de entrenamiento y prueba.

Con el objetivo de validar la estrategia de gestión se decidió generar con los tres algoritmos la potencia demandada para las siguientes 8 horas a partir de los datos de entrada de la **Tabla 5-1**, que fueron seleccionados de manera aleatoria.

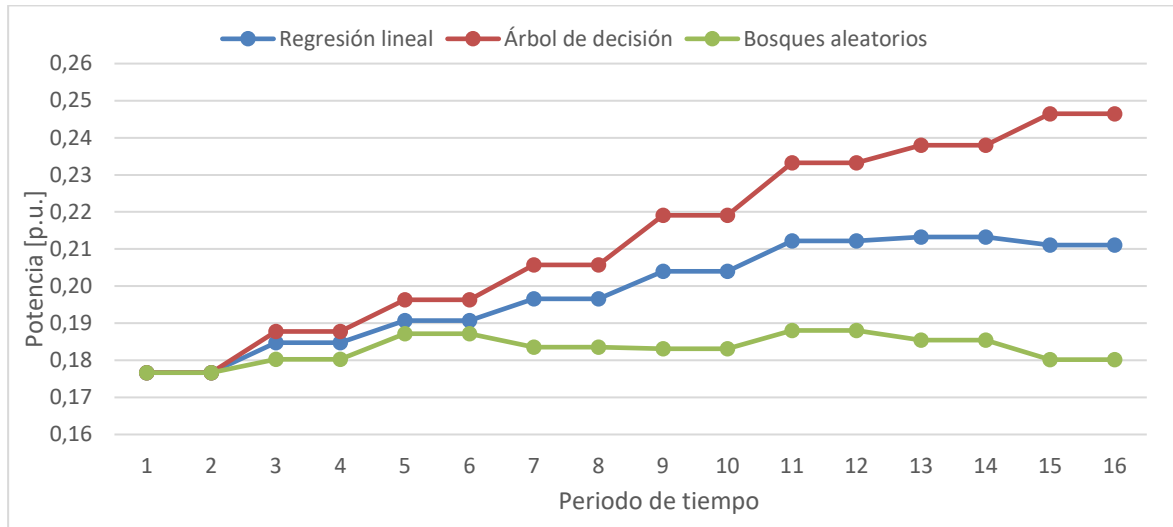
Tabla 5-1: Datos aleatorios de entrada.

Día	Hora	Potencia medida p.u.
Lunes	3	0,176

Nombre de la fuente: Elaboración propia.

La Figura 5-2 presenta el resultado de la predicción de demanda de potencia en el edificio de oficinas para las siguientes 8 horas a partir de los datos de entrada con una resolución de 30 minutos, por lo que se obtiene un total de 16 datos. Estos datos son la entrada para el algoritmo de desplazamiento del inicio de la recarga de los vehículos eléctricos que se analiza en la siguiente sección.

Figura 5-2: Demanda de potencia predicha por los algoritmos implementados.



Nombre de la fuente: Elaboración propia.

5.2 Prueba algoritmo de desplazamiento de la demanda de recarga de los vehículos eléctricos

Con el fin de validar el comportamiento del algoritmo se realizaron dos pruebas. La primera consiste en generar los datos de entrada aplicando un algoritmo de generación de números aleatorios en un rango de 1 a 4 para el tiempo de carga por vehículo y de 1 a 8 para el tiempo el tiempo de parqueo por vehículo y contrastar el comportamiento del algoritmo contra un algoritmo que inicia la recarga de los vehículos tan pronto ingresan al parqueadero del edificio de oficinas y el comportamiento sin ningún algoritmo. Los datos obtenidos se observan en las **Tabla 5-2** y **Tabla 5-3**.

Tabla 5-2: Tiempo de carga y parqueo.

VEHÍCULO	TIEMPO CARGA	TIEMPO PARQUEADERO
1	1	6
2	1	1
3	4	4
4	4	8
5	4	4
6	1	2
7	1	6
8	4	5
9	1	5

10	1	3
11	1	1

Nombre de la fuente: Elaboración propia.

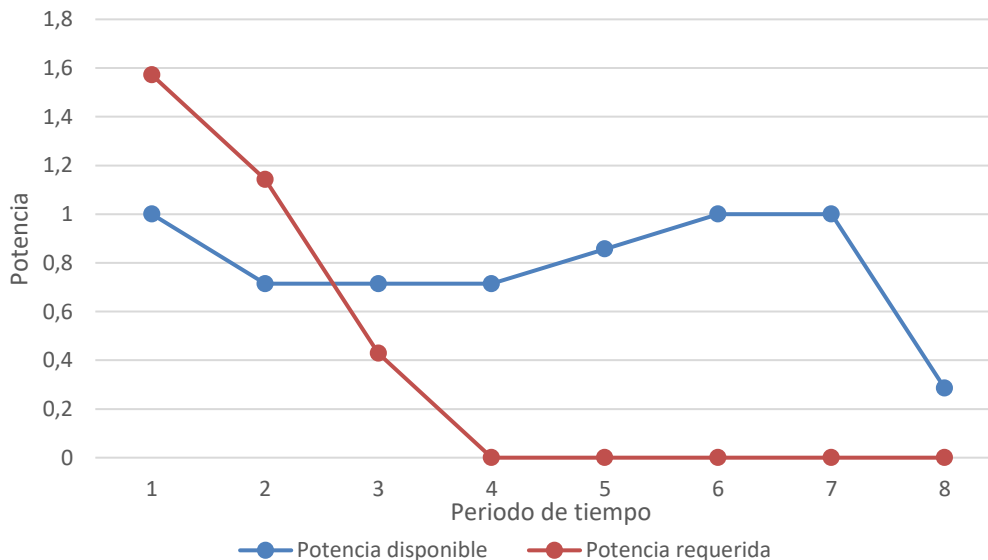
Tabla 5-3: Potencia disponible y requerida por periodo de tiempo.

PERIODO DE TIEMPO	POTENCIA DISPONIBLE [p.u.]	POTENCIA REQUERIDA [p.u.]
1	0,2857	0,7143
2	0,4286	0,2857
3	0,2857	0,4286
4	0,5714	0,1429
5	0,4286	0,4286
6	0,2857	0,7143
7	0,5714	0,4286
8	0,2857	0,0000

Nombre de la fuente: Elaboración propia.

La **Figura 5-3** presenta el comportamiento de la potencia requerida para recarga de vehículos eléctricos vs la potencia disponible para los datos de entrada de las **Tabla 5-2** y **Tabla 5-3** sin aplicar la estrategia de gestión de la demanda e iniciando la recarga de los vehículos en el preciso momento que ingresan al parqueadero.

Figura 5-3: Comportamiento de la potencia requerida vs potencia disponible sin estrategia de gestión.



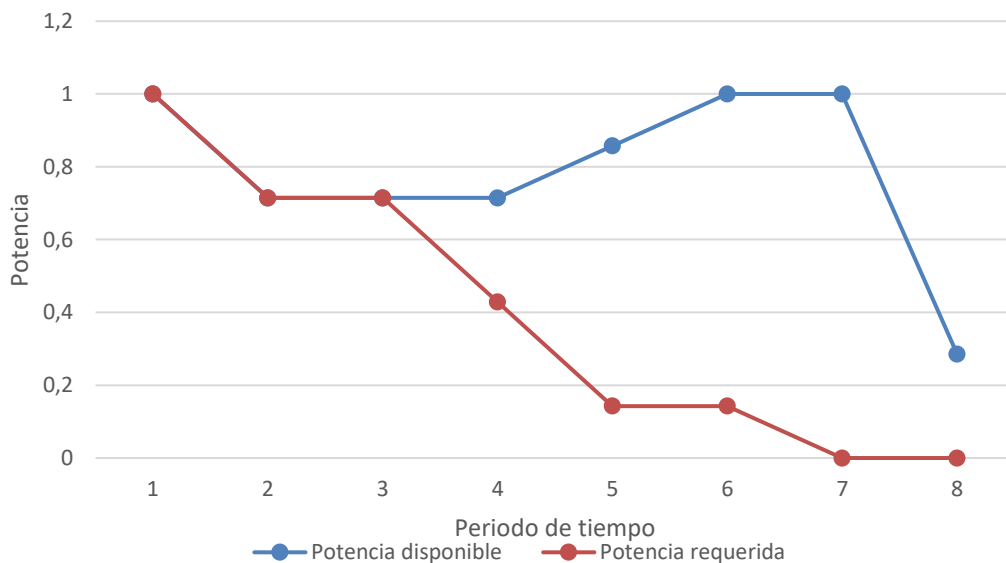
Nombre de la fuente: Elaboración propia.

Como se puede identificar la potencia de recarga necesaria en el periodo de tiempo actual excede a la disponible, violando las restricciones del problema. Esto supondría que la instalación eléctrica debería ser repotenciada con el fin de disponer de una mayor cantidad de potencia. Sin embargo, al observar a partir del periodo de tiempo 4 se puede notar que la demanda es nula mientras que la potencia disponible es incluso mayor que para los primeros periodos de tiempo.

Este comportamiento permite concluir que se debería desplazar el inicio de la recarga de los vehículos, a fin de distribuir a lo largo de todo el periodo de tiempo la demanda de potencia, con el fin de aprovechar mejor la instalación actual y postergar las inversiones en repotenciación de la misma.

La **Figura 5-4** presenta el resultado de aplicar una estrategia de gestión enfocada en respetar las restricciones del problema, pero iniciando la recarga del vehículo los más próxima posible al momento actual. Como se puede observar se disminuye la diferencia entre la potencia disponible y la requerida para los tiempos cercanos al momento actual.

Figura 5-4: Comportamiento estrategia de gestión iniciando carga en el momento más próximo al ingreso al parqueadero.



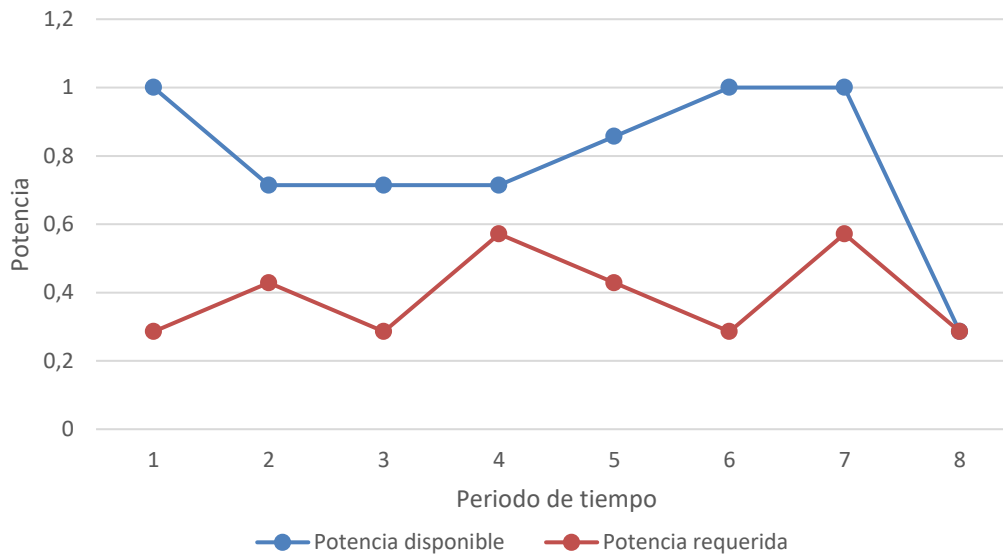
Nombre de la fuente: Elaboración propia.

Este comportamiento impide disponer de energía para la recarga de vehículos en el periodo actual (Periodo 1), no homogeniza la curva de carga y presenta periodos de tiempo con demanda de potencia pico y valle bien marcados.

Adicionalmente, el algoritmo se concentra en cumplir con la restricción de potencia disponible hora a hora y deja en segundo plano la cantidad de parqueaderos vacíos. Esto impide aprovechar los espacios vacíos para más vehículos en el periodo de tiempo 1 que puedan requerir menos tiempo de carga, incluso tan solo un periodo de carga.

En la **Figura 5-5** se observa el resultado de aplicar la estrategia de gestión propuesta en este trabajo. Tal como se observa, la curva de potencia requerida hora a hora es más homogénea y la recarga del vehículo se desplaza lo máximo posible a la hora de salida del parqueadero.

Figura 5-5: Comportamiento de esquema propuesto de gestión de recarga.



Nombre de la fuente: Elaboración propia.

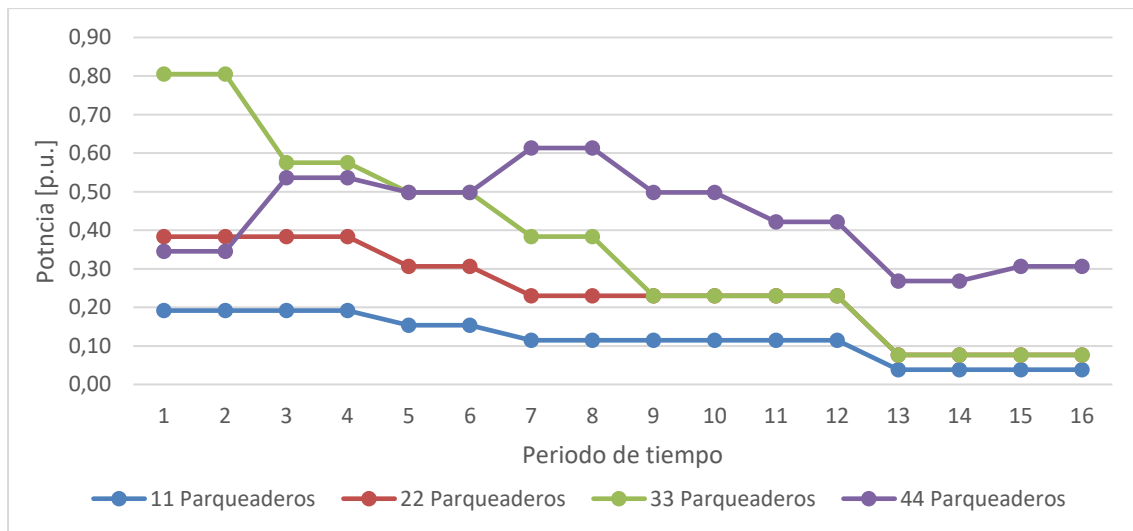
Esta estrategia permite disponer de una mayor cantidad de energía para recargar más vehículos en el periodo de tiempo actual, ayudando a maximizar el uso del espacio de parqueo, aprovechando las necesidades de recarga rápida de vehículos circundantes a la edificación.

Por otra parte, no se observan periodos de demanda de potencia pico y valle marcados, lo cual permite aprovechar de mejor manera la infraestructura eléctrica existente, postergar inversiones y optimizar el uso del terreno destinado a parqueaderos de vehículos.

Para la segunda prueba se ingresaron como datos de entrada los valores de demanda de potencia para cada hora predichos en la sección anterior y que se observan en la **Figura 5-2**. El total de parqueaderos en el edificio de oficinas es 44. Con el objetivo de probar la estrategia de gestión dependiendo del nivel de penetración de vehículos eléctricos se realizaron cuatro pruebas del algoritmo de desplazamiento de la demanda, aumentando un cuartil de la cantidad de parqueaderos en cada prueba, generando de manera aleatoria los valores de tiempo requerido de recarga y tiempo requerido o reservado de parqueo y en todos los casos habilitando la disponibilidad de recarga en los 44 parqueaderos.

El resultado de la prueba se presenta en la **Figura 5-6**, donde se observa que para 11, 22 y 44 vehículos eléctricos en el parqueo de oficinas es posible ofertar recarga a los vehículos eléctricos circundantes al edificio de oficinas, debido a que el algoritmo logró desplazar la demanda lo suficiente como para dejar disponible la potencia suficiente.

Figura 5-6: Resultado algoritmo de desplazamiento de la demanda.



Nombre de la fuente: Elaboración propia.

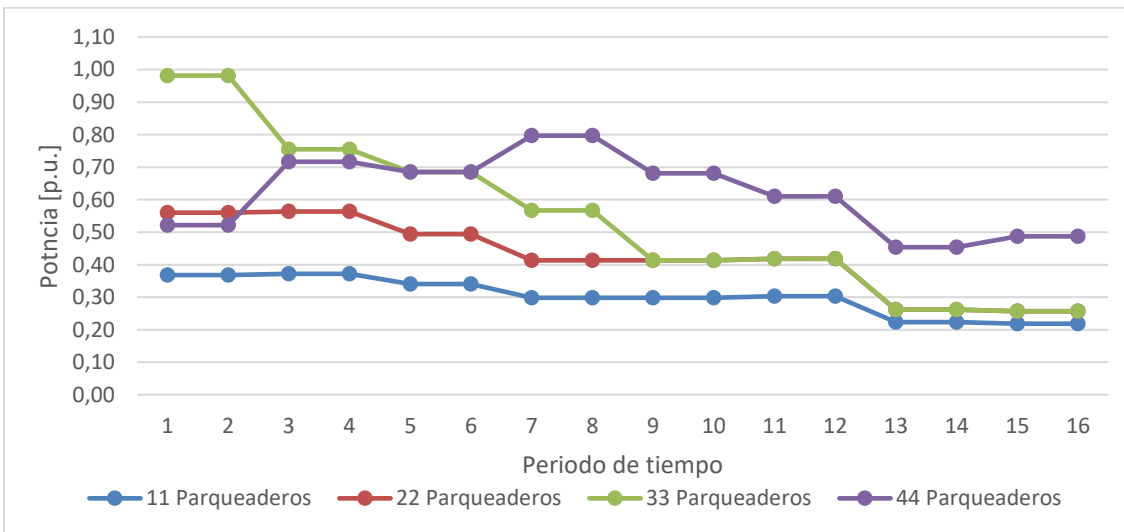
La siguiente etapa de la estrategia de gestión, la cual consiste en ofertar recarga a los vehículos eléctricos circundantes al edificio de oficinas, solo continua para los casos de 11

y 22 vehículos eléctricos. En el caso de 44 vehículos eléctricos, la estrategia no avanza al siguiente paso ya que, aunque hay potencia disponible, no hay parqueaderos.

Adicionalmente, para el caso de 33 vehículos eléctricos la estrategia de gestión también finaliza en este punto debido a que la generación aleatoria de datos de tiempo requerido de recarga y periodo de tiempo reservado de parqueo, produjo un conjunto de datos que se ubican más cerca del periodo de tiempo actual y con diferencias menores entre los dos datos, lo que obligó al algoritmo a iniciar en el periodo actual la recarga de una gran cantidad de vehículos eléctricos.

La **Figura 5-7** presenta el resultado final de demanda de potencia para cada una de los cuatro casos adicionando la demanda de potencia descrita en la sección anterior. Como se observa, se respeta la cargabilidad del transformador establecida en 1 p.u.

Figura 5-7: Resultado de potencia total demandada.



Nombre de la fuente: Elaboración propia.

5.3 Prueba algoritmo de agrupamiento

Una vez sorteadas las dos etapas anteriores de la estrategia de gestión para los casos en los que se obtuvieron excedentes de potencia y parqueaderos, como fue el caso de 11 y 22 vehículos eléctricos, se verificó el funcionamiento del algoritmo de agrupamiento. Con tal fin, se utilizó un algoritmo de generación de números aleatorios en un rango de 10 a 30 para el tiempo de recarga requerido y de 1 a 100 para la distancia con respecto al edificio.

El tiempo de recarga el cual se calcula a partir del porcentaje de carga de la batería, la capacidad máxima de la batería y la potencia de recarga, que para recarga rápida es de aproximadamente 50 kW para alcanzar un 80% de carga en 30 minutos.

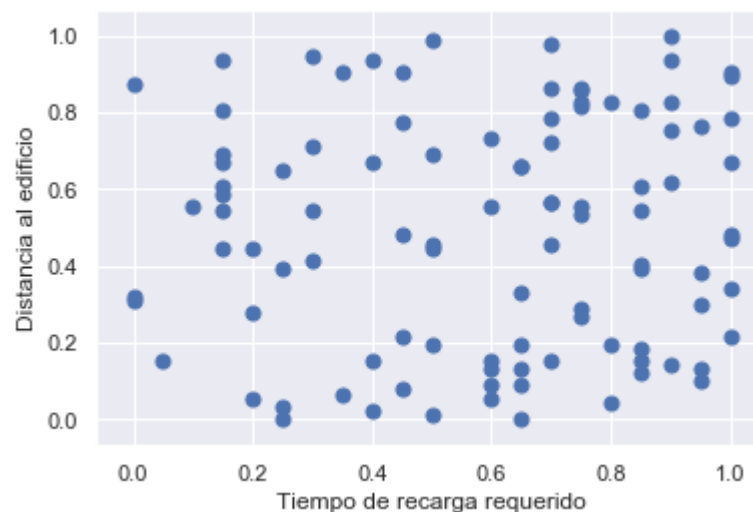
La distancia del vehículo con respecto al edificio es una distancia lineal que se definió con un máximo de 100 m a la redonda del edificio de oficinas.

Los datos obtenidos varían en el rango de las decenas, otros en cientos y otros en miles, esto dificulta los cálculos, las gráficas y el análisis. Por tal motivo los datos fueron normalizados, con el fin de disponer de datos que variaran entre 0 y 1. Dicha normalización se llevó a cabo mediante la siguiente ecuación:

$$df_{normalizado} = \frac{df - df_{minimo}}{df_{maximo} - df_{minimo}} \quad (5-1)$$

La figura **Figura 5-8** presenta el conjunto de datos normalizados obtenidos del algoritmo de generación aleatoria de datos. Como se observa no se tienen grupos bien definidos a primera vista.

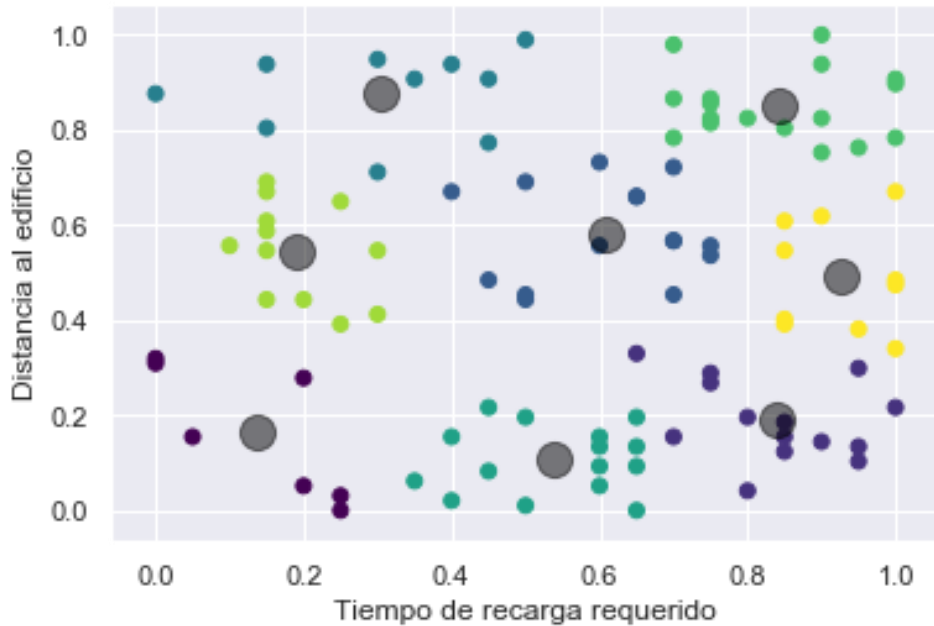
Figura 5-8: Conjunto original de datos.



Nombre de la fuente: Elaboración propia.

Este grupo de datos normalizado, se introdujo como entrada en el algoritmo de agrupamiento implementado, seleccionando el número de grupos igual a 8. Este número de grupos fue determinado de manera automática utilizando el método de propagación de afinidad, que se presenta una sección más adelante. El resultado se puede observar en la **Figura 5-9**.

Figura 5-9: Resultado del algoritmo de agrupación de datos.



Nombre de la fuente: Elaboración propia.

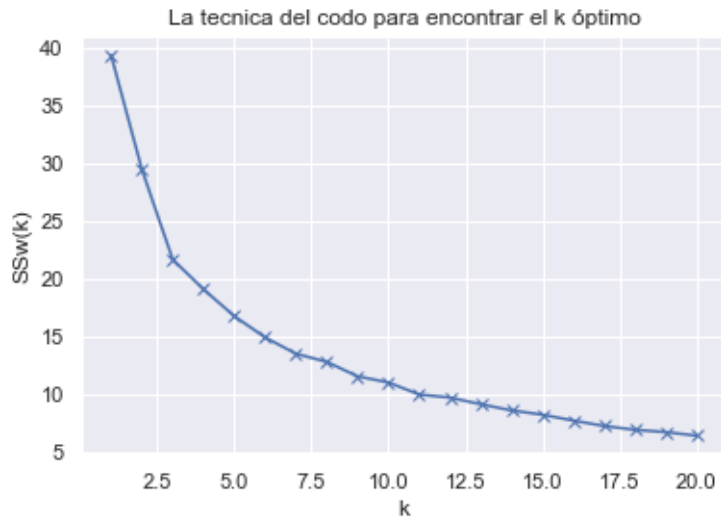
Los grupos son claramente definidos y permiten definir diferentes estrategias de mercadeo para cada grupo. Para el caso de la estrategia de gestión se busca definir el grupo de vehículos al cual se le realizará oferta de recarga y desde el cual se seleccionan los vehículos más adecuados para cargar.

La definición del número de grupos se realizó utilizando este mismo conjunto de datos normalizados como entrada por los tres métodos implementados: técnica del codo, técnica del coeficiente de silueta y propagación de afinidad.

La **Figura 5-10** presenta el resultado gráfico de aplicar la técnica del codo al conjunto de datos normalizado. En esta gráfica no es sencillo distinguir el punto en el cual el valor de

K empieza a hacer que la distorsión aumenta más rápidamente. Sin embargo, para un valor de K aproximadamente igual a 3, esta distorsión comienza a aumentar de una manera más rápida, por lo que podríamos elegir este como un valor adecuado para k.

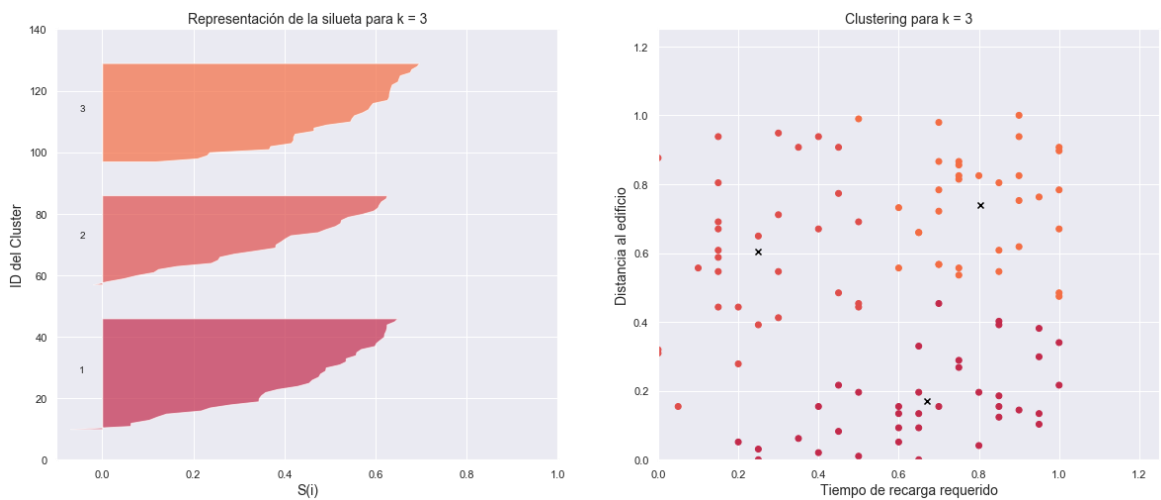
Figura 5-10: Resultado implementación método del codo.



Nombre de la fuente: Elaboración propia.

La **Figura 5-11** muestra los resultados de aplicar el método del coeficiente de silueta a los datos normalizados. En esta grafica se observa el resultado obtenido seleccionado tres grupos. El software desarrollado presenta esta misma grafica para grupos de 2 hasta 10.

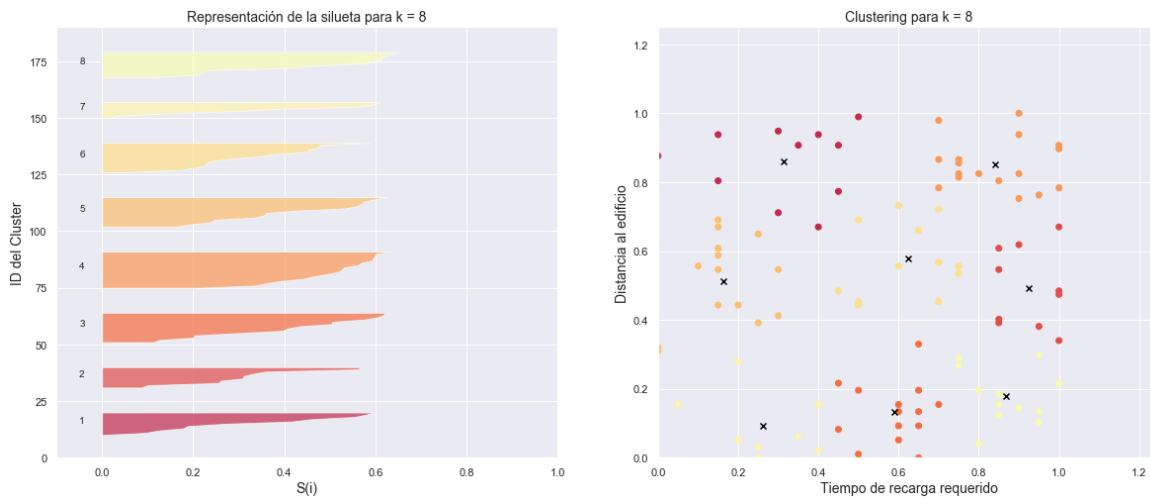
Figura 5-11: Resultado implementación método del coeficiente de la silueta para k=6.



Nombre de la fuente: Elaboración propia.

Como se puede identificar, una agrupación de tres grupos presenta siluetas similares en ancho y longitud, adicionalmente se alejan bastante de cero. Sin embargo, para valores superiores en la cantidad de grupos las siluetas dejan de ser uniformes como se observar en la **Figura 5-12**, donde se presenta el comportamiento para 6 siluetas. Esto indica que una cantidad de 3 grupos la más adecuada para este problema.

Figura 5-12: Resultado implementación método del coeficiente de la silueta para k = 8.



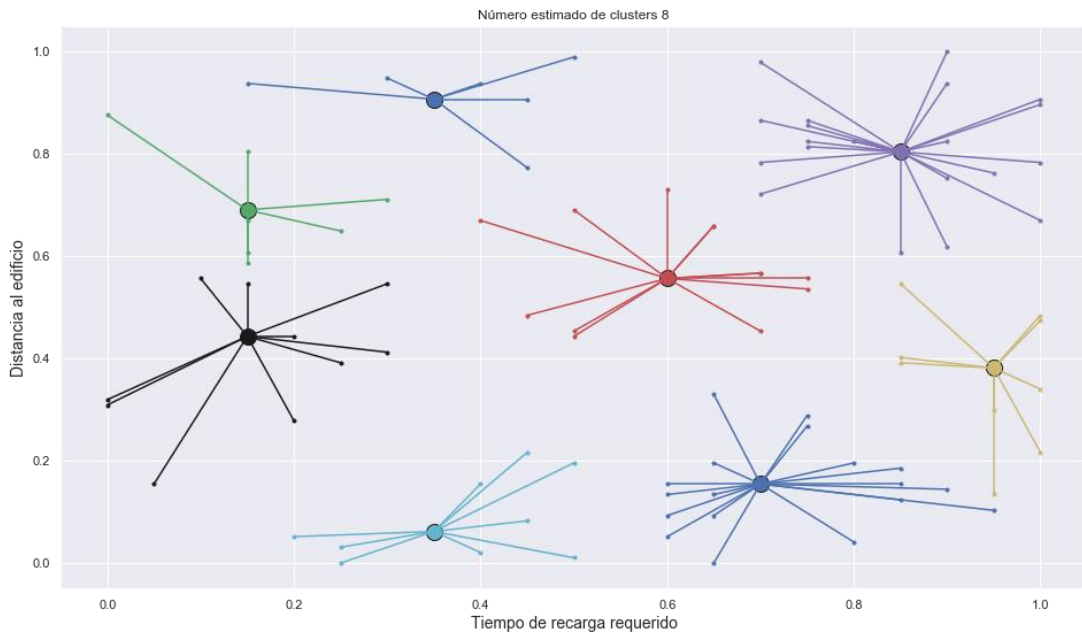
Nombre de la fuente: Elaboración propia.

Finalmente, la **Figura 5-13**, presenta el resultado de aplicar el método automático de propagación de afinidad, el cual dio como resultado un número igual a 8. A pesar que está un poco alejado del resultado de los otros dos métodos, se observa en la figura que los datos se encuentran agrupados distribución de los centros.

Este comportamiento se debe a que los datos se encuentran bastante dispersos, incluso tanto en la gráfica de siluetas, como de codo, los resultados muestran esta gran dispersión. En el caso de las siluetas el valor de $S(i)$ alcanza máximo 0.7 y el aumento en la distorsión en el gráfico de codo tiene comportamiento exponencial decreciente.

Por tal, motivo un valor de k igual a 8 es un valor adecuado, para el problema porque permite segmentar más los datos, dado que la potencia permite la recarga de tan solo un vehículo eléctrico para los escenarios de para 11 y 22 vehículos eléctricos.

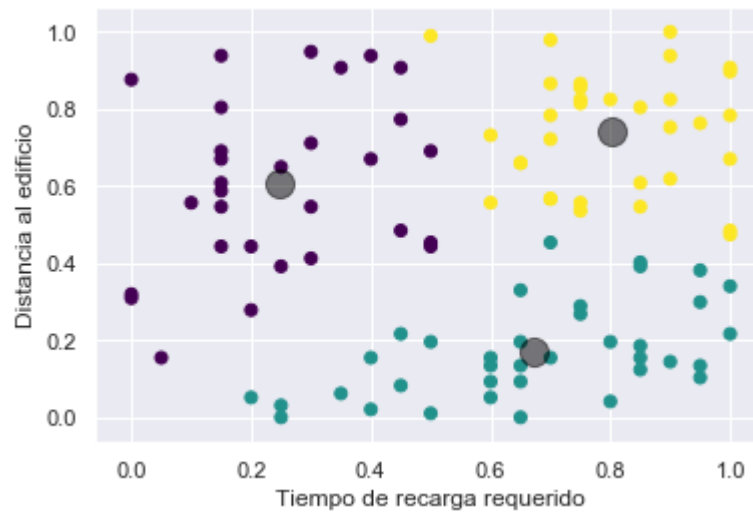
Figura 5-13: Resultado implementación del método de propagación de afinidad.



Nombre de la fuente: Elaboración propia.

La **Figura 5-14** muestra el resultado obtenido después de elegir la cantidad optima de grupos, para la prueba igual a tres, a partir de los métodos gráficos coeficiente de silueta y codo. La grafica muestra tres grupos claramente definidos y uniformes.

Figura 5-14: Resultado del algoritmo de agrupación de datos para k=3.



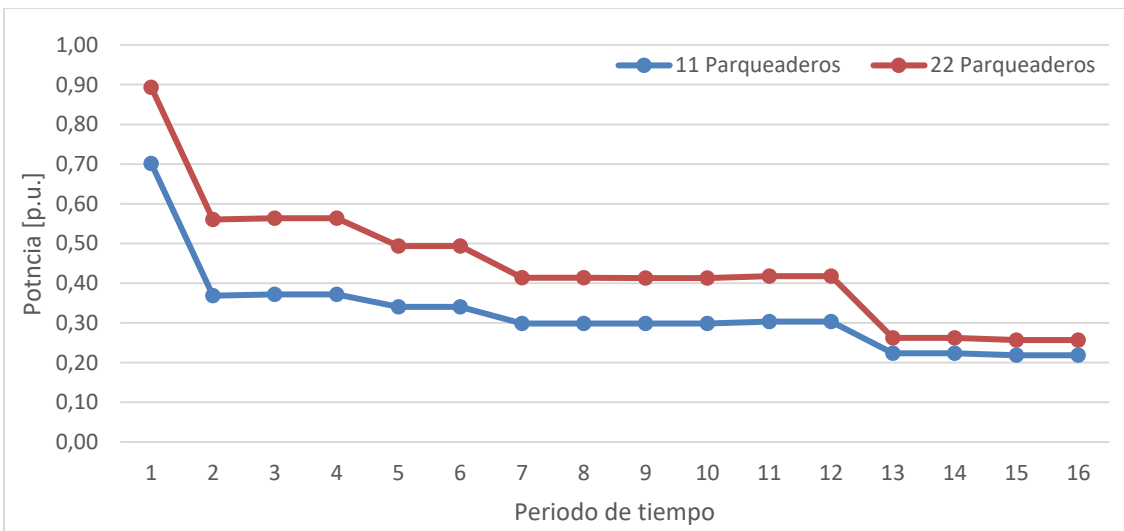
Nombre de la fuente: Elaboración propia.

Posteriormente, el algoritmo entrega el valor de distancia al edificio y tiempo de recarga requerido para cada uno de los centroides y adicionalmente una tabla con una columna donde se identifica el grupo al que pertenece cada vehículo.

El algoritmo lanza la oferta a los grupos con los centroides con la mejor relación tiempo de recarga requerido vs distancia al edificio. El algoritmo asigna la recarga en función del tiempo de respuesta a la oferta, hasta que alcanza el máximo de potencia y espacios de parqueaderos. Para ambos casos la potencia disponible solo permitió asignar la recarga a uno de los vehículos de los que aceptaron la oferta.

El resultado final para 11 y 22 vehículos eléctricos de demanda de potencia en la instalación se observa en **Figura 5-15**. Allí se puede identificar que para el periodo de tiempo actual la demanda de potencia está muy cerca de alcanzar 1 p.u., aprovechando mejor tanto la potencia disponible como los espacios de parqueadero.

Figura 5-15: Resultado del algoritmo de agrupación de datos para $k=3$.



Nombre de la fuente: Elaboración propia.

5.4 Conclusiones del capítulo

El algoritmo de programación entera lineal funcionó correctamente, consiguiendo distribuir de manera uniforme a lo largo del tiempo la demanda de potencia de recarga, dejando potencia disponible para ofertar a los vehículos eléctricos externos al edificio de oficinas.

Sin embargo, esto depende de las necesidades de carga y el tiempo reservado de parqueo, que si para la mayoría de vehículos es muy justa la diferencia entre los dos, la estrategia no podría desplazar la carga suficiente como para pasar a la siguiente etapa del proceso, la oferta de recarga a los vehículos eléctricos circundantes al edificio de oficinas

La cantidad de grupos optima determinada para el algoritmo de agrupamiento datos con los métodos de coeficiente de siluetas, codo y propagación de afinidad difieren en los valores de k optimo, a medida que la dispersión en los datos aumenta, los métodos gráficos tienden a aproximarse un numero para k cercano a 2, mientras que el automático un número que se aleja de 2. Grupos más pequeños son deseables cuando la oferta de recarga es para pocos vehículos, en tal caso el método automático resulta más ventajoso.

El algoritmo de bosques aleatorios durante las pruebas resulto ser el más preciso. Sin embargo, para problemas con datos con comportamiento lineal, la regresión lineal es una alternativa que, aunque no tiene la misma precisión que el algoritmo de bosques aleatorios, requiere menos recursos de máquina. Esta agilidad puede llegar a sopesar la falta de precisión para escenarios con grandes volúmenes de datos.

6 Conclusiones y recomendaciones

6.1 Conclusiones

El objetivo general de la investigación fue alcanzado debido a que se desarrolló una estrategia que permite recargar vehículos eléctricos en un edificio de oficinas respetando los límites técnicos de la instalación y condiciones de recarga de los vehículos eléctricos. Esto se consiguió tomando como restricciones la potencia máxima disponible para recarga hora a hora y la recarga continua del vehículo eléctrico con el fin de respetar los ciclos de carga y descarga de la batería en el algoritmo de desplazamiento de la recarga.

Por otra parte, el algoritmo de predicción de la demanda está restringido por la potencia nominal de la instalación y el algoritmo de clasificación y oferta de recarga a vehículos eléctricos adyacentes al edificio, solo funciona si hay espacios de parqueo y potencia disponibles.

Las mediciones realizadas en un edificio de oficinas y en un transformador de distribución AT/MT que alimenta una zona de edificios de oficinas, permitieron identificar que estas instalaciones tienen la capacidad para recargar vehículos eléctricos, sin ser repotenciadas, ya que incluso durante el tiempo de máxima carga, la potencia demandada no superó el 60% de la capacidad nominal del transformador. Con esto se alcanzó el primer objetivo del trabajo.

El análisis del mercado de vehículos eléctricos permitió identificar que los vehículos con tecnología a base de baterías tienen gran participación en el mercado actual, incluso superando a los híbridos, por lo que la necesidad de estaciones de recarga se incrementará con el tiempo.

Por otra parte, se puede establecer que las dos tecnologías de recarga a tener en cuenta en el algoritmo de gestión son las de recarga semi – rápida y rápida, alcanzando de esta manera el segundo objetivo.

Se propuso una estrategia de gestión conformada por tres grupos de algoritmos como son el desplazamiento de la potencia de recarga de vehículos eléctricos demanda, la predicción de la potencia demandada por las cargas propias del edificio de oficinas y el agrupamiento de los vehículos eléctricos circundantes al edificio de oficinas y la oferta de recarga a los mismos. Estos tres grupos trabajando de manera conjunta y estando interrelacionados lograron disminuir la potencia disponible, al igual que la cantidad de espacios de parqueo libres, consiguiendo de esta manera alcanzar el objetivo número tres.

Finalmente, las pruebas realizadas a los algoritmos implementados en la estrategia de gestión, evidencia el cumplimiento del objetivo general de la investigación. Estas pruebas se realizaron para diferentes escenarios de penetración de vehículos eléctricos y con datos de entrada aleatorios, permitiendo evaluar de manera amplia el comportamiento de la estrategia.

6.2 Recomendaciones

Después de realizar esta investigación se considera un potencial de actividades futuras. A continuación, se relacionan varias de ellas:

- Obtener la medida de potencia demandada por uno o varios años para uno o múltiples edificios de oficinas con el fin de mejorar la precisión de los algoritmos de predicción de la demanda y poder incluir al algoritmo factores climáticos y sociales.
- Implementar las mejores prácticas de ciberseguridad y manejo de datos ajustándolas a las regulaciones locales con el fin de proteger los datos almacenados.
- Desarrollar algoritmos incluyendo precios de mercado de la energía eléctrica y parqueo, con el fin de maximizar el uso de la infraestructura y las ganancias. Adicionalmente, es posible tomar como variable a predecir el tiempo de

permanencia en el parqueadero de cada vehículo y definir una estrategia en la que se incluya casuísticas como por ejemplo el no obtener respuestas a la oferta de recarga y modificar los tiempos de inicio de recarga de los vehículos ya establecidos.

- Evaluar en algoritmos de máquinas de soporte vectorial y aprendizaje profundo para el agrupamiento de los vehículos circundantes al edificio de oficinas.
- Verificar el funcionamiento e interrelación de la estrategia propuesta implementándola en varios edificios de oficinas ubicados en la misma zona geográfica.

Bibliografía

- [1] UPME, “Programa de Uso Racional y Eficiente de Energía y Fuentes No Convencionales – PROURE Plan de acción al 2015 con visión al 2025,” 2015.
- [2] G. Mauri and A. Valsecchi, “Fast charging stations for electric vehicle: The impact on the mv distribution grids of the milan metropolitan area,” in *2012 IEEE International Energy Conference and Exhibition (ENERGYCON)*, 2012, pp. 1055–1059.
- [3] G. tecnico proyecto BID, “Smart Grids Colombia vision 2030,” *Smart Grids Colomb. Vis. 2030*, p. 81, 2016.
- [4] Li Hui-ling, Bai Xiao-min, and Tan Wen, “Impacts of plug-in hybrid electric vehicles charging on distribution grid and smart charging,” in *2012 IEEE International Conference on Power System Technology (POWERCON)*, 2012, pp. 1–5.
- [5] C. Zhang, C. Chen, J. Sun, P. Zheng, X. Lin, and Z. Bo, “Impacts of electric vehicles on the transient voltage stability of distribution network and the study of improvement measures,” in *2014 IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference (APPEEC)*, 2014, pp. 1–6.
- [6] A. G. Neagoe-Stefana, A. C. Neagoe, and A. C. Mandis, “Impact of charging electric vehicles in residential grid on the power losses and voltage plan,” in *2014 International Symposium on Fundamentals of Electrical Engineering (ISFEE)*, 2014, pp. 1–4.
- [7] Pengxin and Zhang Zhebo, “Analysis of electric vehicles’ impact to the electric grid,” in *2012 China International Conference on Electricity Distribution*, 2012, pp. 1–5.
- [8] C. Gouveia, C. L. Moreira, and J. A. P. Lopes, “Microgrids emergency management exploiting EV, demand response and energy storage units,” in *2013 IEEE Grenoble Conference*, 2013, pp. 1–6.
- [9] T. L. Vu, J. S. Dhupia, A. A. Ayu, L. Kennedy, and A. K. Adnanes, “Optimal power management for electric tugboats with unknown load demand,” in *2014 American*

- Control Conference*, 2014, pp. 1578–1583.
- [10] F. Ye, Y. Qian, and R. Q. Hu, “Incentive Load Scheduling Schemes for PHEV Battery Exchange Stations in Smart Grid,” *IEEE Syst. J.*, pp. 1–09, 2015.
- [11] S. Goguri, J. Hall, R. Mudumbai, and S. Dasgupta, “A distributed, real-time and non-parametric approach to demand response in the smart grid,” in *2015 49th Annual Conference on Information Sciences and Systems (CISS)*, 2015, pp. 1–5.
- [12] A. D. Quevedo, E. G. Suarez, S. M. Arias, F. Santamaria, and J. A. Alarcon, “Assessment of Energy Efficiency indicators on a residential building with Plug-in Electric Vehicles and energy action plans for users,” in *2015 IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies Latin America (ISGT LATAM)*, 2015, pp. 881–886.
- [13] C. C. Mendoza, A. M. Quintero, F. Santamaria, and J. A. Alarcon, “Methodology to Manage Electric Vehicles Charging in Real-Time,” *IEEE Lat. Am. Trans.*, vol. 14, no. 2, pp. 782–791, Feb. 2016.
- [14] A. D. Quevedo Rodriguez, “Implementación de un Esquema de Gestión de Recarga de Vehículos Eléctricos Basado en V2G y Respuesta a la Demanda,” 2016.
- [15] A. Gusrialdi, Z. Qu, and M. A. Simaan, “Distributed Scheduling and Cooperative Control for Charging of Electric Vehicles at Highway Service Stations,” *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, pp. 1–15, 2017.
- [16] L. Rao and J. Yao, “SmartCar: Smart charging and driving control for electric vehicles in the smart grid,” in *2014 IEEE Global Communications Conference*, 2014, pp. 2709–2714.
- [17] S. Zare, P. Najafi, H. Mansuri, and H. Taghiya, “New services of plug-in electric vehicles charging stations,” in *CIREC Workshop 2016*, 2016, pp. 32 (4 .)-32 (4 .).
- [18] A. D. Quevedo, F. Santamaria, and J. A. Alarcon, “Analysis of plug-in electric vehicles penetration in residential buildings under deterministic and stochastic scenarios,” in *2016 IEEE PES Transmission & Distribution Conference and Exposition-Latin America (PES T&D-LA)*, 2016, pp. 1–6.
- [19] L. Sung Kyun, L. Jae Hyun, H. Joon Hwan, C. Soo Hyun, and C. Jeong Ju, “Safety device for preventing overcharge and secondary battery therewith,” US 20060051660 A1, 2005.
- [20] Sakuma Hitoshi, Hisato Kudo, and Koji Yano, “Electric power grid control system and method for electric power control,” US 20130184894 A1, 2012.

- [21] O. Wanleng and A. Ryouji, "Adapter, and vehicle and method for performing power feeding using adapter," US 20140002011 A1, 2012.
- [22] L. Perry Robinson, L. Yimin, and M. Michael Edward, "System and method of estimating available driving distance," US 20160097652 A1, 2014.
- [23] K. Nam Yun, K. Hyuk Choon, K. Sang Wook, K. Ki Young, J. Dong Zo, and K. Soo Yeon, "Wireless power transmission apparatus and method," US 20140340033 A1, 2014.
- [24] I. Koudai, H. Ryoustake, A. Junji, M. Masanari, and F. Takeshi, "Information distribution method, information distribution server, and charging device," 2015.
- [25] ISO, *Sistemas de gestión de la energía. Requisitos con orientación para su uso*. AENOR, 2011.
- [26] E. Llera Sastresa, S. Díaz de Garaio, A. Aranda Usón, and I. Zabalza Bribián, *Eficiencia energética en instalaciones y equipamientos de edificios: eficiencia energética*. Prensas Universitarias de Zaragoza, 2010.
- [27] "Buscador | Ideca." [Online]. Available: http://www.ideca.gov.co/buscador?topic=All&metadata=All&newest=All&entity=All&resource=All&content_type=map&res=true. [Accessed: 25-Oct-2019].
- [28] M. Ehsani, Y. Gao, and A. Emadi, *Modern electric, hybrid electric, and fuel cell vehicles: fundamentals, theory, and design*. CRC Press, 2010.
- [29] Y. Yang, Q. S. Jia, G. Deconinck, X. Guan, Z. Qiu, and Z. Hu, "Distributed coordination of EV charging with renewable energy in a microgrid of buildings," *IEEE Trans. Smart Grid*, vol. 9, no. 6, pp. 6253–6264, Nov. 2018.
- [30] U.S. DEPARTMENT OF ENERGY, "Plug-In Electric Vehicle Handbook for Public Charging Station Hosts," 2012.
- [31] Sociedad de Técnicos de Automoción, *El vehículo eléctrico: desafíos tecnológicos, infraestructuras y oportunidades de negocio*. Librooks, 2011.
- [32] "Plug-In Electric Vehicle Handbook for Public Charging Station Hosts."
- [33] Endesa, "No Title," *Tipos de recarga*, 2017. [Online]. Available: <https://endesavehiculoelectrico.com/recarga/tipos-de-recarga/>.
- [34] "Most efficient electric cars - EV Database." [Online]. Available: <https://ev-database.org/compare/efficiency-electric-vehicle-most-efficient>. [Accessed: 09-Nov-2019].

- [35] F. Bouhafs, M. Mackay, and M. Merabti, *Communication Challenges and Solutions in the Smart Grid*. New York: Springer, 2014.
- [36] T. Jiang, L. Yu, and Y. Cao, *Energy Management of Internet Data Centers in Smart Grid*. New York: Springer, 2015.
- [37] M. Uslar *et al.*, *Standardization in Smart Grids: Introduction to IT-Related Methodologies, Architectures and Standards*. New York: Springer Science & Business Media, 2012.
- [38] K. C. Budka, J. G. Deshpande, and M. Thottan, *Communication Networks for Smart Grids: Making Smart Grid Real*. New York: Springer Science & Business Media, 2014.
- [39] H. Li, *Enabling Secure and Privacy Preserving Communications in Smart Grids*. New York: Springer Science & Business Media, 2014.
- [40] M. Begovic, Ed., *Electrical Transmission Systems and Smart Grids: Selected Entries from the Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*. New York: Springer Science & Business Media, 2012.
- [41] A. Keyhani and M. Marwali, Eds., *Smart Power Grids 2011*. New York: Springer Science & Business Media, 2012.
- [42] R. Smolenski, *Conducted Electromagnetic Interference (EMI) in Smart Grids*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [43] B. M. Buchholz and Z. Styczynski, *Smart Grids – Fundamentals and Technologies in Electricity Networks*. New York: Springer Science & Business Media, 2014.
- [44] Z. M. Fadlullah and N. Kato, *Evolution of Smart Grids*, vol. 13. New York: Springer Science & Business Media, 2015.
- [45] F. Nelli, *Python data analytics: With Pandas, NumPy, and Matplotlib: Second edition*. Apress Media LLC, 2018.
- [46] F. Nelli, *Python Data Analytics*. Berkeley, CA: Apress, 2015.
- [47] R. Garreta and G. Moncecchi, *Learning scikit-learn : machine learning in Python : experience the benefits of machine learning techniques by applying them to real-world problems using Python and the open source scikit-learn library*. .
- [48] S. Raschka and V. Mirjalili, *Python machine learning : aprendizaje automático y aprendizaje profundo con Python, scikit-learn y TensorFlow*. Marcombo, 2019.