



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

# Sistema de toma de decisiones para la ubicación, dimensionamiento y despacho óptimo de las estaciones de carga para el abastecimiento energético de un sistema de transporte eléctrico multimodal

Juan Pablo González Alzate

Universidad Nacional de Colombia  
Facultad de Minas, Departamento de Energía Eléctrica y Automática  
Medellín, Colombia  
2023



# Sistema de toma de decisiones para la ubicación, dimensionamiento y despacho óptimo de las estaciones de carga para el abastecimiento energético de un sistema de transporte eléctrico multimodal

Juan Pablo González Alzate

Tesis presentada como requisito parcial para optar al título de:  
**Magister en Ingeniería - Automatización Industrial**

Director:

Prof. Jairo José Espinosa Oviedo PhD

Co-Director:

Ing. Christian Roviro Portilla Caicedo PhD

Línea de Investigación:

Matemáticas Aplicadas

Grupo de Investigación:

Grupo de Automática de la Universidad Nacional - GAUNAL

Universidad Nacional de Colombia

Facultad de Minas, Departamento de Energía Eléctrica y Automática

Medellín, Colombia

2023



A mi familia.



# Agradecimientos

Expreso mi agradecimiento más sincero a mis padres Yolanda Alzate y Marcos González por amarme, escucharme y apoyarme en la obtención de mis sueños y por entregar su vida a mi bienestar y felicidad. También, agradezco a mis hermanas Janneth y Alejandra, que me han empujado sin cansancio, que me aman sin medida y que han sido grandes pilares de apoyo en mi vida y en mi proceso profesional. Agradezco Juan Carlos por su generosidad y su gran amistad.

Agradezco a mi profesor y director Jairo José Espinosa Oviedo, por su acertado acompañamiento, por sus palabras de reconocimiento y apoyo, por su infinita solidaridad, por brindarme su conocimiento y por la seguridad y confianza depositada en mí.

Agradezco a mi codirector y mi amigo Christian Portilla, por su generosidad intelectual, por su talento investigativo y por su permanente disposición para ayudarme y guiarme durante el desarrollo de esta tesis.

Agradezco al grupo de investigación GAUNAL y a sus integrantes, Esteban Lage, Andrés Acosta, Felipe Valencia, Juan David y David Alejandro por sus valiosos conocimientos y por su grandiosa amistad. Agradezco a mis amigos Alejandro y Felipe de la Universidad EAFIT que me brindaron su conocimiento, apoyo y amistad para superar esta etapa de mi vida. Así mismo, agradezco al grupo de investigación GRID y al profesor Ricardo Mejía por acogerme y ayudarme a avanzar con mis procesos de formación profesional.

Doy gracias a mi sensei, amigo y maestro Óscar Ramos, por su amistad incondicional y desinteresada y por empujarme en los momentos más críticos de mi proceso de formación profesional. Así mismo, agradezco a mis amigos Felipe Vélez y Pablo Ríos por su inmensurable amistad, por guiarme, por el cariño que me brindan y por la sensatez que los representa. Expreso mi cariño sincero a mis amigos de Karate Do por su apoyo y palabras de aliento, el Profe, Diego, Manu, Caliche, Isa, Caro, Wilson, Michel y Sayaka.

Doy infinitas gracias a mi psicóloga Alicet por ayudarme a crecer emocionalmente, por ayudarme a afianzar el reconocimiento propio y por su entrega desmedida para aportar a mi formación de vida. También agradezco a mi amiga Franchesca, quien me oriento emocionalmente durante mi proceso profesional.

Manifiesto mi gratitud y mi cariño sincero a mi amiga Luisa Velásquez y su familia, quienes me escucharon, me brindaron conocimientos valiosos sobre la vida y por su generosidad.

Esta tesis se enmarca en la alianza interinstitucional Energética 2030 en el proyecto de movilidad sostenible. El proyecto “Estrategia de transformación del sector energético colombiano en el horizonte de 2030” ha recibido financiación de la convocatoria 778 del programa “Ecosistema Científico” de Minciencias bajo el acuerdo de subvención FP44842-210-2018.



## Resumen

En esta tesis se propone un sistema de toma de decisiones para la ubicación, el dimensionamiento y el despacho óptimo de las estaciones de carga para el abastecimiento energético de un sistema de transporte eléctrico multimodal, que impacte positivamente la movilidad, el transporte y el medio ambiente. El sistema se compone por motocicletas híbridas, embarcaciones eléctricas y estaciones de carga con generación de energía fotovoltaica, respaldo energético de baterías y conexión a la red eléctrica. La ubicación y el dimensionamiento de estaciones de carga se basa en la programación lineal entera mixta (MILP por sus siglas en inglés) que integra costos de inversión, mantenimiento y energía no suministrada, perfiles de demanda, precios de energía, radiación y variables binarias que describen la carga y la descarga del respaldo energético. Además, para el desarrollo del despacho de energía en la estación de carga, se empleó un modelo discreto de predicción y se soluciona por medio del método de programación cuadrática (QP por sus siglas en inglés) para la maximización del beneficio del operador de la estación de carga. Dicha implementación requirió un software de simulación de movilidad urbana para validar el sistema de transporte eléctrico multimodal. Este software cuenta con la herramienta TraCI que permite la conexión con Python y dispone de una alta variedad de redes de tráfico de todo el mundo. Con esta herramienta se simularon 5 escenarios donde se obtuvieron ventajas a favor de los usuarios de la estación y ganancias considerables para los operadores de la estación de carga, además, los errores respecto al suministro y la demanda son menores al 1%. Además, El método óptimo propuesto para la ubicación y el dimensionamiento óptimo de estaciones, establece una cantidad de 4 estaciones de carga, cada una con 22 paneles solares y 10 puntos de carga. Así mismo, para un escenario que incluye conexión a la red eléctrica, se encontraron dimensiones para 1 día de operación de 10000 W de capacidad de la red.

# Decision-making system for the optimal location, sizing and dispatching of charging stations for the energy supply of a multimodal electric transport system

## Abstract

In this thesis, a decision-making system is proposed for the location, sizing and optimal dispatch of charging stations for the energy supply of a multimodal electric transport system, which positively impacts mobility, transport and the environment. The system is made up of hybrid motorcycles, electric boats and charging stations with photovoltaic energy generation, battery backup energy and connection to the electricity grid. The location and sizing of charging stations is based on mixed integer linear programming (MILP) that integrates investment, maintenance and non-supplied energy costs, demand profiles, energy prices, radiation and binary variables that describe the charging and discharging of the energy backup. In addition, for the development of the energy dispatch in the charging station, a discrete prediction model was used and it is solved by means of the quadratic programming (QP) method to maximize the benefit of the station operator of load. This implementation required urban mobility simulation software to validate the multimodal electric transport system. This software has the TraCI tool that allows connection with Python and has a wide variety of traffic networks from around the world. With this tool, 5 scenarios were simulated where advantages were obtained in favor of station users and considerable profits for charging station operators with errors regarding supply and demand of less than 1%. In addition, the optimal method proposed for the location and optimal sizing of stations establishes a number of 4 charging stations, each with 22 solar panels and 10 charging points. Likewise, for a scenario that includes connection to the electrical network, dimensions were found for 1 day of operation of 10,000 W of network capacity.

**Keywords:** Transport, multimodal, charging stations, electric vehicles, optimization, urban traffic.

# Contenido

<b>Agradecimientos</b>	<b>VII</b>
<b>Resumen</b>	<b>IX</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>2</b>
1.1. Motivación . . . . .	2
1.2. Propuesta de Tesis . . . . .	3
1.2.1. Problema de la investigación . . . . .	3
1.2.2. Hipótesis de la investigación . . . . .	4
1.2.3. Objetivos . . . . .	4
1.2.4. Alcance de la tesis . . . . .	5
1.3. Contribución de la tesis . . . . .	5
1.4. Estructura de la tesis . . . . .	6
1.5. Metodología . . . . .	7
<b>2. Estado del arte</b>	<b>9</b>
2.1. La movilidad en Colombia . . . . .	9
2.2. Transporte sostenible . . . . .	14
2.2.1. Energías renovables . . . . .	15
2.2.2. Electromovilidad en Colombia . . . . .	15
2.3. Representación de redes de tráfico . . . . .	25
2.3.1. Simulación de redes de tráfico . . . . .	25
2.4. Gestión de sistemas de transporte eléctrico . . . . .	27
2.4.1. Estaciones de carga y nodos prosumidores . . . . .	28
2.4.2. Ubicación y dimensionamiento . . . . .	32
2.4.3. Despacho óptimo de estaciones de carga . . . . .	33
2.5. Resumen . . . . .	35
<b>3. Modelado y simulación del transporte eléctrico multimodal</b>	<b>38</b>
3.1. Estructura del sistema de transporte eléctrico multimodal . . . . .	38
3.2. Modelado y simulación del sistema de transporte . . . . .	39
3.2.1. Construcción de redes de tráfico . . . . .	39
3.2.2. Demanda de transporte - perfiles de peticiones de carga . . . . .	42
3.2.3. Perfiles de irradiancia . . . . .	44

3.3.	Modelado y simulación del consumo energético de vehículos eléctricos . . . . .	44
3.3.1.	Consumo energético de motocicletas híbridas . . . . .	45
3.3.2.	Embarcaciones eléctricas . . . . .	51
3.4.	Resumen . . . . .	54
<b>4.</b>	<b>Ubicación y dimensionamiento óptimo de las estaciones de carga</b>	<b>55</b>
4.1.	Ubicación y dimensionamiento óptimo de las estaciones de carga de embarcaciones eléctricas . . . . .	55
4.2.	Ubicación y dimensionamiento óptimo de estaciones de carga de las motocicletas híbridas . . . . .	58
4.2.1.	Formulación del problema de optimización . . . . .	63
4.2.2.	Resultados . . . . .	66
4.3.	Resumen . . . . .	70
<b>5.</b>	<b>Sistema de toma de decisiones para el despacho óptimo de energía</b>	<b>72</b>
5.1.	Gestión de transporte . . . . .	72
5.2.	Despacho energético . . . . .	77
5.3.	Resumen . . . . .	89
<b>6.</b>	<b>Validación del sistema de transporte eléctrico multimodal propuesto en un caso de estudio</b>	<b>91</b>
6.1.	Simulación del sistema de transporte multimodal sostenible . . . . .	91
6.1.1.	Dimensionamiento y ubicación . . . . .	92
6.1.2.	Gestión de peticiones de carga . . . . .	92
6.1.3.	Despacho de estaciones de carga . . . . .	93
6.1.4.	Descripción general del caso de estudio . . . . .	93
6.1.5.	Simulación de las redes de tráfico de Magangué y Sincelejo . . . . .	95
6.1.6.	Dimensionamiento y ubicación . . . . .	95
6.1.7.	Demanda de transporte y de energía - peticiones . . . . .	99
6.2.	Gestión del despacho de energía . . . . .	101
6.3.	Resumen . . . . .	105
<b>7.</b>	<b>Conclusiones</b>	<b>106</b>
7.1.	Conclusiones . . . . .	106
7.2.	Recomendaciones y trabajo a futuro . . . . .	107
<b>A.</b>	<b>Modelo de consumo energético de una motocicleta híbrida</b>	<b>109</b>
	<b>Bibliografía</b>	<b>113</b>

# Lista de Figuras

1-1. Descripción general de la estructura de la tesis. . . . .	8
2-1. Histórico comparativo del transporte de millones de pasajeros por modo fluvial. Elaboración propia con base en los datos encontrados en [55]. . . . .	11
2-2. Histórico comparativo del transporte de millones de pasajeros por modos terrestres, aéreos y férreos. Elaboración propia con base en los datos encontrados en [55]. . . . .	11
2-3. Histórico comparativo del consumo de combustible, gasolina y diésel. Elaboración propia con base en los datos encontrados en [55]. . . . .	12
2-4. Comparativo del total de vehículos de servicio público, oficial y particular según tipo de combustible. Elaboración propia con base en los datos encontrados en [55]. . . . .	13
2-5. Histórico comparativo del total de vehículos de servicio público, oficial y particular. Elaboración propia con base en los datos encontrados en [55]. . . . .	13
2-6. Comparativo del total de vehículos de servicio público, oficial y particular según los medios de transporte. Elaboración propia con base en los datos encontrados en [55]. . . . .	14
2-7. Histórico comparativo de la matriz energética Colombiana. Elaboración propia con base en los datos encontrados en [86]. . . . .	15
2-8. Histórico comparativo de la cantidad de vehículos eléctricos. Elaboración propia con base en los datos encontrados en [55]. . . . .	16
2-9. Histórico comparativo de la cantidad de vehículos híbridos. Elaboración propia con base en los datos encontrados en [55]. . . . .	16
2-10. Potencia requerida para embarcaciones de desplazamiento y planeo. Elaboración propia con base en los datos encontrados en [79] y [59]. . . . .	22
2-11. Comparación del consumo eléctrico para diferentes vehículos. Elaboración propia con base en los datos encontrados en [25]. . . . .	23
2-12. Estructura del modelo de control predictivo. Imagen tomada de [22]. . . . .	25
2-13. Generación solar fotovoltaica, irradiación incidente. . . . .	29
2-14. Diagrama del nodo prosumidor. Imagen tomada de [28]. . . . .	31
3-1. Red de tráfico de Medellín adquirida de SUMO . . . . .	40
3-2. Modos de transporte que ofrece SUMO . . . . .	41
3-3. Representación de los puntos de concentración y estaciones de carga en SUMO	42

<b>3-4.</b> Representación de las estaciones de carga de las embarcaciones simuladas en SUMO . . . . .	42
<b>3-5.</b> Perfil de demandas de transporte . . . . .	43
<b>3-6.</b> Perfil de demandas de energías . . . . .	44
<b>3-7.</b> Perfil de radiación nominal de un día en Magangué . . . . .	45
<b>3-8.</b> Perfil de radiación nominal en un mes . . . . .	45
<b>3-9.</b> Diagrama de cuerpo libre de las interacciones de una motocicleta. . . . .	46
<b>3-10.</b> Trayectoria recorrida por la motocicleta en SUMO . . . . .	49
<b>3-11.</b> Perfil de velocidad de la motocicleta híbrida . . . . .	50
<b>3-12.</b> Perfil de potencia eléctrica, consumo energético y consumo de gasolina de la motocicleta híbrida . . . . .	50
<b>3-13.</b> Trayectoria recorrida por la embarcación en SUMO . . . . .	53
<b>3-14.</b> Perfil de velocidad, potencia eléctrica y consumo energético . . . . .	53
<b>4-1.</b> Ubicación de las estaciones de carga para embarcaciones eléctricas . . . . .	56
<b>4-2.</b> Energía tomada de la red, paneles y almacenamiento. Elaboración propia con base a la información encontrada en [69] . . . . .	57
<b>4-3.</b> Ubicación de estaciones y puntos de acopio para motocicletas híbridas . . . . .	60
<b>4-4.</b> Perfil de demanda y balance energético para 1 día . . . . .	67
<b>4-5.</b> Perfil de demanda y balance energético para 1 mes . . . . .	68
<b>4-6.</b> Perfil de demanda y balance energético para 1 año . . . . .	69
<b>5-1.</b> Resultados para 1 día de simulación con $N_p = 2$ . . . . .	86
<b>5-2.</b> Resultados para 1 día de simulación con $N_p = 24$ . . . . .	87
<b>5-3.</b> Resultados para 5 días de simulación con $N_p = 20$ . . . . .	88
<b>5-4.</b> Precio de la energía . . . . .	88
<b>5-5.</b> Resultados para 1 mes de simulación con $N_p = 24$ . . . . .	89
<b>5-6.</b> Perfil de demanda para 1 mes . . . . .	90
<b>6-1.</b> Mapa descriptivo de la ubicación y el dimensionamiento . . . . .	92
<b>6-2.</b> Mapa descriptivo de la integración de modelos y métodos . . . . .	94
<b>6-3.</b> Mapa de Magangué modelado en SUMO . . . . .	96
<b>6-4.</b> Red de tráfico de Sincelejo simulada en SUMO . . . . .	96
<b>6-5.</b> Ubicación de las estaciones y puntos de acopio en la red de tráfico de Magangué simulada en SUMO . . . . .	98
<b>6-6.</b> Ubicación de las estaciones y puntos de acopio en la red de tráfico de Magangué-Pinillos simulada en SUMO . . . . .	99
<b>6-7.</b> Ubicación de las estaciones y puntos de acopio en la red de tráfico de Sincelejo simulada en SUMO . . . . .	100
<b>6-8.</b> Zonas de Magangué . . . . .	101
<b>6-9.</b> Zonas de Sincelejo . . . . .	102

---

<b>6-10.</b> Peticiones de carga y demanda energética . . . . .	103
<b>6-11.</b> Generación de energía fotovoltaica y perfil de precios de compra . . . . .	103
<b>6-12.</b> Resultados de 1 día de simulación para Magangué . . . . .	104
<b>6-13.</b> Resultados de 1 día de simulación para Sincelejo . . . . .	104
<b>6-14.</b> Resultados de 1 día de simulación para Magangué-Pinillos . . . . .	105
<b>A-1.</b> Estimación del consumo energético y velocidad de la motocicleta . . . . .	111

# Lista de Tablas

2-1. Investigaciones recientes en el desarrollo de modelos para consumo energético. Elaboración propia con base en los datos encontrados en [87]. . . . .	19
2-2. Investigaciones recientes en el desarrollo de modelos para el consumo energético. Elaboración propia con base en los datos encontrados en [87]. . . . .	20
2-3. Investigaciones recientes en el desarrollo de modelos para el despacho energético; Usuarios (U), Operadores (O), Sistema de generación solar (PV), almacenamiento energético (BESS) y red eléctrica. . . . .	37
3-1. Parámetros dinámicos del modelo de motocicleta . . . . .	48
3-2. Eficiencias del modelo de consumo . . . . .	52
4-1. Parámetros de la formulación del problema de optimización . . . . .	66
4-2. Dimensiones óptimas encontradas para una operación de 1 día . . . . .	68
4-3. Dimensiones óptimas encontradas para una operación de 1 mes . . . . .	68
4-4. Dimensiones óptimas encontradas para el transcurso de 1 año . . . . .	69
5-1. Resultados para t igual a 0 segundos. . . . .	76
5-2. Resultados para t igual a 1440 segundos. . . . .	76
5-3. Resultados para t igual a 1800 segundos. . . . .	77
5-4. Resultados para t igual a 2520 segundos. . . . .	77
A-1. Resultados . . . . .	111

# 1. Introducción

En este capítulo se presenta la motivación de esta tesis en donde se advierte la necesidad de contar con una alternativa de transporte multimodal, medioambientalmente sostenible a través del aprovechamiento de las fuentes no convencionales de energía. Por otra parte, se presenta la distribución de la propuesta de esta tesis, compuesta por los problemas a solucionar a nivel medioambiental y del sistema multimodal sostenible. También, se presenta la hipótesis de esta investigación, los objetivos generales y específicos y el alcance. Luego, se muestra la contribución de esta tesis, la estructura y finalmente la metodología.

## 1.1. Motivación

La contaminación medioambiental sigue siendo un tema de discusión durante los últimos años, debido a los altos niveles de generación de emisiones de dióxido de carbono producto del uso de los sistemas de transporte convencionales de combustión interna. Según [86] entre los años de 1975 y 2019 el crecimiento de la demanda alude al aumento del consumo energético medido en Petajoule (PJ) en el sector de transporte, en este intervalo de tiempo, el consumo ha incrementado de 147 PJ a 550 PJ, donde los combustibles líquidos protagonistas fueron el diésel y la gasolina. Como alternativa, los sistemas de movilidad eléctrica sostenible tienen como propósito la reducción de las emisiones globales de combustibles fósiles contaminantes, la implementación y el aprovechamiento de las energías renovables, la participación activa en el mercado energético y el cubrimiento general de las necesidades sociales respecto al servicio de transporte. Un sistema de transporte multimodal sostenible hace referencia a un sistema compuesto por diversos modos de transporte electrificados, entre vehículos, motocicletas, embarcaciones, etc., y brinda una red de tráfico interconectado, prestando así, servicios de movilidad a usuarios en entornos urbanos.

La producción y distribución de energías renovables tiene un papel destacado en el contexto energético mundial, debido a su versatilidad, aplicabilidad y a su explotación con bajos impactos ambientales, permitiendo el desarrollo de los sistemas de consumo y de venta de energía eléctrica de forma cada vez más competitiva. Entre 1975 y 2019 la energía eléctrica fue ganando protagonismo, aumentando su participación en la oferta energética de un 5% a un 17% respectivamente [86]. Principalmente, las energías renovables se enfocan en la producción de energía eólica [58] y la producción de energía fotovoltaica [62], normalmente, estas tecnologías permiten que los usuarios que hacen uso de estas, puedan ser consumidores

y al mismo tiempo puedan vender los excedentes de energía a la red eléctrica o a otros usuarios.

Los nodos prosumidores de energía eléctrica son sistemas capaces de realizar la venta, la compra y el almacenamiento de energía eléctrica, con otros nodos o con la red de distribución. Su principal objetivo es alcanzar el mayor beneficio económico posible a través de las decisiones respecto a la cantidad de energía que pueden comprar y vender a la red, a la cantidad del consumo renunciado y a la cantidad de energía que se genera a partir de las tecnologías de distribución [82]. Por lo general, estos sistemas prosumidores se componen de residencias o pequeñas instalaciones en su mayoría dotadas con sistemas de generación fotovoltaica las cuales aprovechan la radiación solar para la producción y el suministro de la energía eléctrica. En términos generales, los nodos prosumidores pueden gestionar y producir energía, teniendo en cuenta la regulación del mercado energético respecto a los precios de la energía y a las necesidades y producciones generadas.

En el ámbito de la movilidad sostenible, un sistema de movilidad eléctrica multimodal como nodo prosumidor de energía, puede generar una sobrecarga en la red de media tensión, debido a la incorporación de cargas y demandas respecto a la cantidad de usuarios y a la multimodalidad incorporada, en consecuencia, se tendrá la interrupción del abastecimiento desde el sistema de energía renovable y si no existe una coordinación entre las estaciones de carga y los usuarios, la generación de altas demandas energéticas será crítica y afectará la disponibilidad de las estaciones de carga [13], [51]. Sin embargo, pese a que se ofrecen incentivos de precio para ocupar las estaciones menos transitadas y que se disponga de la misma cantidad de recursos que puede brindar la red eléctrica, es necesaria la coordinación y conexión entre estaciones y usuarios para el desarrollo de un sistema de movilidad sostenible óptimo. De esta manera, al no ser esto suficiente para evitar los problemas de coordinación y disponibilidad, las estrategias actuales de optimización para la coordinación de servicios de carga, no consideran la incorporación de la multimodalidad ni las restricciones alrededor de las redes de monitoreo de uso de las estaciones, que sean capaces de brindar por medio de infraestructuras en la nube, los requisitos de carga, probabilidades de congestión y bajas demandas energéticas, de tal manera que pueda existir una comunicación efectiva en tiempo real entre las estaciones de carga y los usuarios [97], [47].

## **1.2. Propuesta de Tesis**

### **1.2.1. Problema de la investigación**

La gestión y la operación ineficiente de carga energética son los problemas principales en relación con los sistemas de transporte eléctricos multimodales. Afectan la coordinación y disponibilidad del sistema, esto conduce a impactos negativos a nivel del sistema de transporte y a un nivel socioeconómico y medioambiental.

Los enfoques habituales para dar solución a problemas particulares como tiempos de espera

prolongados, cantidad limitada de puntos de carga, altas demandas energéticas y congestiones, se aproximan cada vez más a la implementación de estrategias de optimización basadas en interacciones existentes entre la estación de carga, los usuarios y la red eléctrica y estrategias de dimensionamiento y ubicación de estaciones de carga. Los objetivos principales se enfocan en la coordinación general de los servicios de carga para garantizar la eficiencia del sistema de transporte multimodal. Sin embargo, ninguna de estas estrategias hace énfasis en la selección de métodos de optimización para la coordinación de carga en sistemas multimodales de movilidad eléctrica como nodos prosumidores compuestos por conjuntos de estaciones de carga con generación fotovoltaica y respaldo de almacenamiento energético. Así mismo, no se precisa el monitoreo en tiempo real de cada estación de carga en cuanto al consumo y la producción de energía y pocas estrategias se centran simultáneamente en los intereses de los operadores de las estaciones y de los usuarios. Por lo tanto, se hacen necesarias estrategias de optimización que puedan asignar servicios de carga a los usuarios de forma controlada, bajo un esquema multimodal y una aproximación real del transporte urbano.

### **1.2.2. Hipótesis de la investigación**

Es posible diseñar un sistema de toma de decisiones para el despacho óptimo de energía, el dimensionamiento y la ubicación óptima de las estaciones de carga fotovoltaicas con respaldo de almacenamiento energético, conexión a la red eléctrica y monitoreo energético, teniendo en cuenta la demanda energética de un sistema de transporte eléctrico multimodal, además, que garantice el cumplimiento de carga de los usuarios y que respalde la viabilidad económica para los usuarios y para los operadores de las estaciones de carga.

### **1.2.3. Objetivos**

#### **Objetivo general**

Diseñar un sistema de toma de decisiones para la ubicación, dimensionamiento y despacho óptimo de las estaciones de carga fotovoltaicas con respaldo de baterías y conexión a la red eléctrica, para suplir las demandas energéticas de un sistema de transporte eléctrico multimodal (motocicletas híbridas y embarcaciones) en un caso de estudio en Magangué, Bolívar y en Sincelejo, Sucre.

#### **Objetivos específicos**

- Modelar el consumo eléctrico de las motocicletas híbridas y de las embarcaciones con relación a las características, necesidades de transporte sociales y a la evaluación socioeconómica del caso de estudio.

- Proponer una metodología para el dimensionamiento y la ubicación óptima de las estaciones de carga fotovoltaicas (baterías, paneles solares, nodos de carga, conexión a la red) teniendo en cuenta la estimación de la demanda de carga de las baterías.
- Diseñar un sistema de toma de decisiones para el despacho óptimo de energía del nodo prosumidor que permita la minimización de las tarifas de carga de los usuarios y que garantice el suministro de la energía demanda por los vehículos.
- Validar en simulación el sistema propuesto teniendo en cuenta los datos disponibles en un escenario realista.

#### 1.2.4. Alcance de la tesis

Al finalizar esta tesis se espera contar con un sistema de toma de decisiones para el cálculo del dimensionamiento, la ubicación óptima y el despacho óptimo de energía de un sistema de movilidad multimodal sostenible que actúe como nodo prosumidor, que incluya estaciones de carga fotovoltaicas y respaldo de almacenamiento energético, para suplir las demandas energéticas. Igualmente, que permita la maximización de las ganancias del operador, la minimización de las tarifas de carga y la minimización de costos. Con un caso de estudio desarrollado por medio de simulaciones de las redes de tráfico de Magangué y en Sincelejo. Este sistema será evaluado mediante simulación de movilidad urbana (SUMO), teniendo en cuenta un análisis socio económico, considerando un escenario realista y los datos disponibles.

### 1.3. Contribución de la tesis

Las principales contribuciones de esta tesis se establecen alrededor de la solución de los problemas planteados. Las contribuciones son las siguientes:

- Modelos discretos de consumo energético de motocicletas híbridas y embarcaciones eléctricas para simulación de movilidad urbana.
- Una metodología para el dimensionamiento y la ubicación de estaciones de carga solares fotovoltaicas con almacenamiento energético y conexión a la red eléctrica, fundamentadas en los costos de inversión, mantenimiento, energía no suministrada, energía renovable y costos de operación.
- Un sistema óptimo para la toma de decisiones en un entorno de transporte multimodal, respecto a la asignación de peticiones de carga y el despacho energético de una estación de carga, teniendo en cuenta, la producción solar fotovoltaica, la compra y venta de energía a la red, la carga y descarga de energía del sistema de almacenamiento y el suministro de energía.

- Simulación y modelado de redes de tráfico urbano, con un alto nivel de detalle, afín a un entorno de transporte real. Esta simulación, integra un sistema de transporte multimodal sostenible y variables de tráfico urbano.

## 1.4. Estructura de la tesis

Esta tesis contiene siete capítulos organizados de la siguiente manera: El Capítulo 1 presenta la introducción de esta tesis. El Capítulo 2 proporciona un estado del arte resumido sobre el tema de investigación. El Capítulo 3 desarrolla el modelado y simulación de la estructura del sistema de transporte eléctrico multimodal. En el Capítulo 4 se propone una metodología para la gestión del dimensionamiento y ubicación de la estación de carga. El Capítulo 5 muestra el desarrollo óptimo del despacho energético del sistema de transporte multimodal. El Capítulo 6 expone la validación del sistema de transporte multimodal por medio de simulación de movilidad urbana. Finalmente, en el Capítulo 7 se presentan las conclusiones, recomendaciones y el trabajo futuro. Los resultados de la investigación se encuentran en los capítulos 3, 4, 5 y 6.

El contenido detallado de los capítulos 3 a 6 de esta tesis se resume a continuación:

- **Capítulo 3** describe detalladamente la estructura del sistema de transporte eléctrico multimodal, los sistemas y procedimientos incluidos en el sistema y describe el marco para el modelado de los consumos energéticos de los vehículos implicados en el desarrollo del sistema de transporte multimodal.
- **Capítulo 4** presenta el dimensionamiento y la ubicación de las estaciones de carga, teniendo en cuenta la formulación del problema de optimización basado en MILP. Aquí se definen en detalle los modelos y variables explicativas de las dinámicas de la estación para el dimensionamiento.
- **Capítulo 5** describe despacho óptimo de energía en las estaciones de carga. Aquí se propone y soluciona un problema de optimización basado en los principios del control predictivo y de la programación cuadrática, teniendo en cuenta los modelos discretos representativos del almacenamiento energético y el beneficio del operador de la estación de carga.
- **Capítulo 6** muestra la simulación del sistema de transporte multimodal integrado en SUMO, teniendo en cuenta como caso de estudio, los modelos geográficos de Magangué y Sincelejo, los modelos de los vehículos eléctricos e integra los desarrollos de los capítulos 3, 4 y 5.

## 1.5. Metodología

El desarrollo de esta tesis de maestría está enmarcado dentro de una aproximación metodológica cuantitativa, teórica y práctica, basada en simulación. Con el fin de dar cumplimiento a cada uno de los objetivos propuestos en la sección 1.2.3, inicialmente se desarrollarán los modelos de consumo energético de las motocicletas híbridas y embarcaciones eléctricas. Se determinan las condiciones y restricciones de optimización para el dimensionamiento óptimo de la infraestructura. Además, se proponen rutas de operación fluviales y terrestres para considerar la distribución inicial de la ubicación de las estaciones de carga.

El diseño de la toma de decisiones para el despacho óptimo de energía se basa en la evaluación de la optimización MILP y programación cuadrática con un horizonte de predicción para considerar la programación secuencial del sistema multimodal ante las peticiones de carga aleatorias, perfiles de radiación, etc. Finalmente, el sistema fue validado mediante microsimulación por medio del simulador de movilidad urbana (SUMO) teniendo en cuenta las particularidades socioeconómicas de los casos de estudio de Magangué y Sincelejo.

La Figura **1-1** presenta una descripción general de los capítulos de esta tesis en forma de diagrama de flujo y su relación con los objetivos específicos.

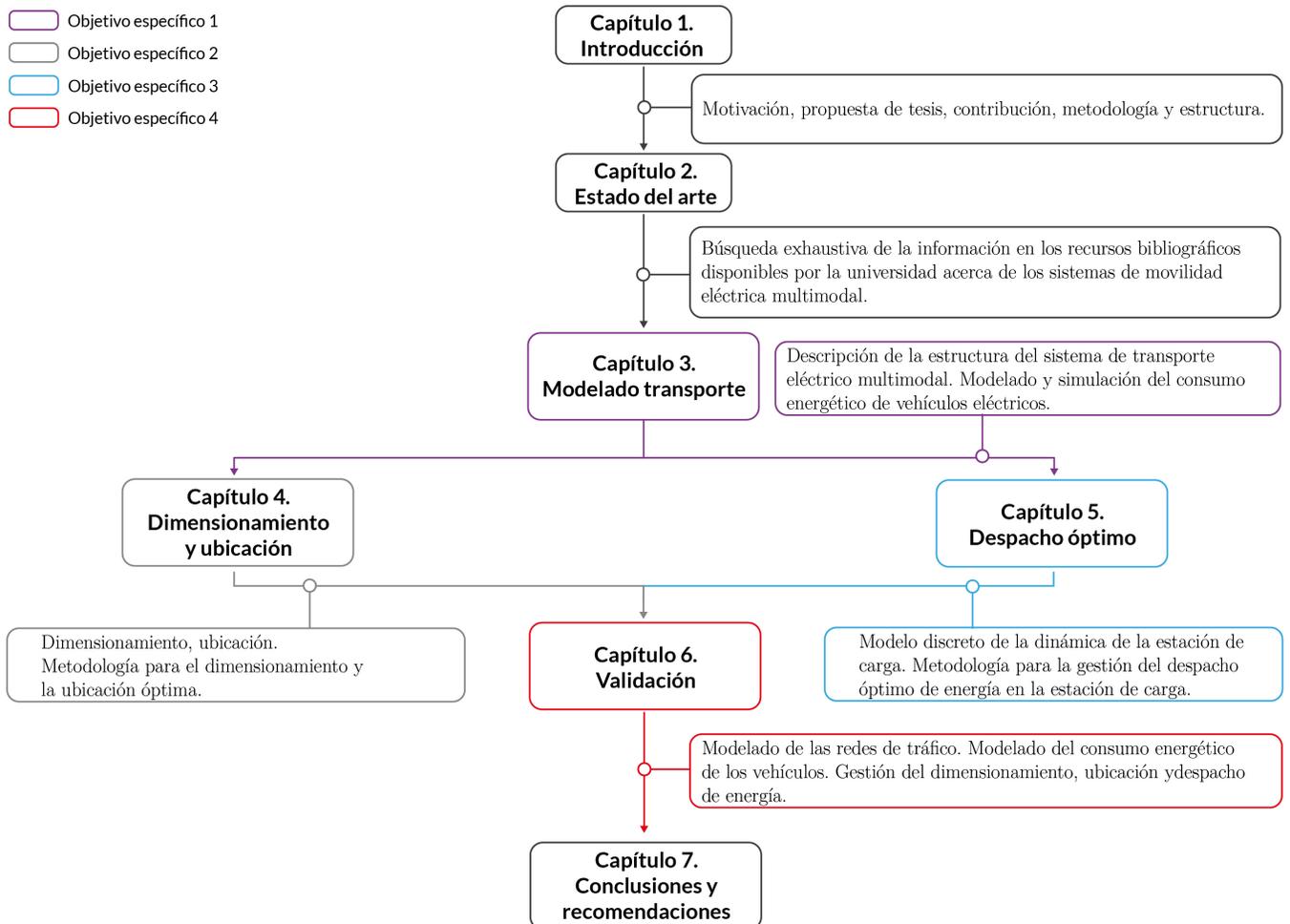


Figura 1-1.: Descripción general de la estructura de la tesis.

## 2. Estado del arte

El estado del arte presentado en este capítulo se divide en seis apartados correspondientes a, los aspectos generales de la movilidad, el transporte sostenible, las generalidades de las estaciones de carga que consideran generación fotovoltaica, almacenamiento energético y actúan como nodos prosumidores de energía, las redes de tráfico y la gestión de los sistemas de transporte eléctricos, estos son descritos en las siguientes subsecciones. Al final de este capítulo se presenta un resumen.

### 2.1. La movilidad en Colombia

La movilidad es una acción que se describe en términos de transporte de personas y productos entre diferentes lugares. Un modo de transporte, se describe como la forma en la que las personas se transportan entre lugares, por ejemplo, los modos de transporte más conocidos y desarrollados son el fluvial, terrestre, férreo, marítimo y aéreo. También, los medios de transporte, se definen como diferentes tipos de vehículos en movimiento que facilitan la movilidad de las personas en un entorno urbano, por ejemplo, para el modo terrestre existen medios de transporte como, las motocicletas, automóviles, bicicletas, etc. Para el modo de transporte fluvial existen medio de transporte como, embarcaciones, balsas, motocicletas acuáticas, etc.

La movilidad se puede clasificar como multimodal, si integra diversos modos y medios de transporte, y sostenible, si considera nuevas tecnologías y energías no convencionales que no generen consecuencias negativas sobre el medio ambiente. El transporte siendo un factor principal de la movilidad, se define como el medio por el cual se pueden trasladar mercancías y personas, conectar ciudades o lugares, y permite facilitar el crecimiento económico de una nación. Para esta tesis, la movilidad y el transporte son los factores principales para el desarrollo de un sistema de transporte eléctrico multimodal sostenible, por lo tanto, estas fuentes de información y sus características se describen en detalle a continuación:

En Colombia, el transporte comprende modos terrestres, fluviales, aéreos, marítimos y férreos y diversos medios de transporte como lo son, vehículos, motocicletas, buses, bicicletas, aviones, embarcaciones, etc. Estos favorecen el desplazamiento de personas y productos y las actividades económicas entre diferentes lugares.

En el sector de transporte colombiano existen 3 tipos de servicios, público, oficial y privado.

- El servicio de transporte público, permite la movilización de pasajeros y de carga por

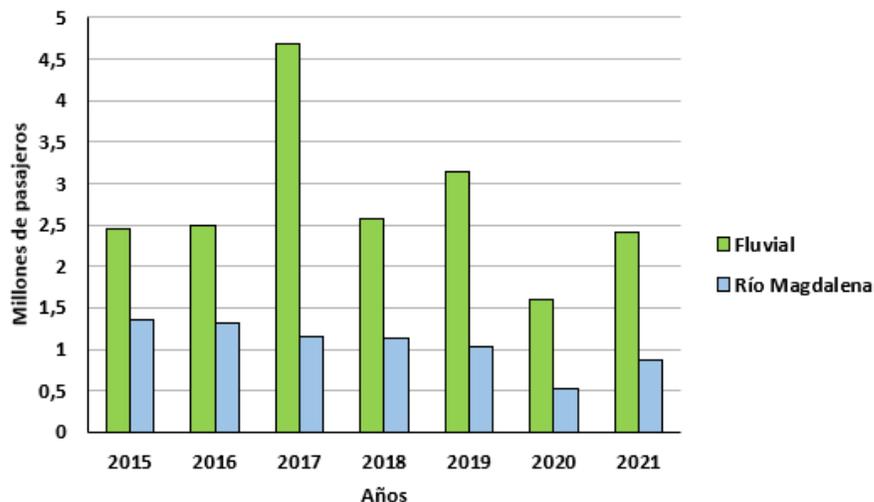
medio del cobro de una tarifa.

- El servicio de transporte oficial, permite la movilización de funcionarios públicos.
- El servicio de transporte particular, permite la movilización entorno a las necesidades privadas.

La multimodalidad siendo una característica del transporte, se describe como el conjunto de modos y medios de transporte interconectados de servicio público del cual puede hacer uso una persona para transportar carga o productos y desplazarse entre diversos lugares. Por ejemplo, en Colombia, aproximadamente el 89 % del transporte de cargas, se realiza por modo terrestre y solo el 1.5 % se hace de forma multimodal según el Ministerio de Transporte [84]. Esto muestra un bajo potencial en el desarrollo de sistemas multimodales para el transporte. Actualmente en Colombia, la movilidad tiene características importantes como lo es el transporte de pasajeros por modos, fluviales, terrestres, aéreos y férreos, y el consumo de combustibles por cada medio de transporte. Las mediciones de transporte de millones de pasajeros y de consumo de combustible en millones de barriles desde el 2015, permite evaluar la evolución del transporte de Colombia a través de los años. Colombia cuenta con un alto desarrollo en el sector de transporte fluvial, debido a sus extensos corredores fluviales compuestos principalmente por los ríos Magdalena, Caquetá, Amazonas, Orinoco, Cauca, entre otros. Estos conectan a diferentes zonas y ciudades intermedias del país, facilitando el transporte de personas y mercancías. En el año 2021, se transportaron por modo fluvial aproximadamente 2.4 millones de pasajeros, el cual representa un 50 % más en comparación a la cantidad de pasajeros que se transportaron en el año 2020, esto debido a las restricciones del COVID-19 impuestas en Colombia. También, entre el año 2015 al 2017 hubo un incremento de registros de empresas de transporte fluvial, aproximadamente del 10 % [53]. En la Figura 2-1 se puede notar el incremento de transporte de millones de pasajeros por modo fluvial entre en 2015 y el 2017 siendo mayor para el año 2017, aproximadamente de 4.68 millones de pasajeros.

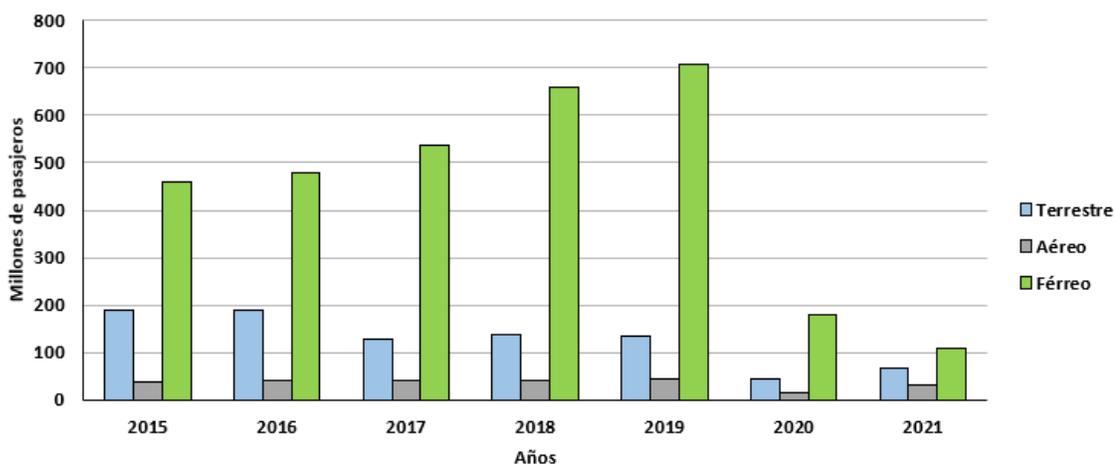
Para el transporte de millones de pasajeros por modo fluvial en el río Magdalena, se presentó un incremento del 60.4 % entre los años 2020 y 2021. Cabe señalar, que la cantidad de embarcaciones registradas para el año 2020 fueron de 644 unidades en comparación al año 2021 que fueron de 648 unidades según [55].

Por otra parte, el transporte de millones de pasajeros por modos terrestre, aéreo y férreo en Colombia se presentan en la Figura 2-2, donde se muestran los datos históricos comparativos desde el año 2015 hasta el año 2021. Cómo es evidente, desde el año 2015 hasta el año 2019 se ha presentado un incremento en el transporte por modo férreo de 458.62 hasta 706.37 millones de pasajeros. Esto representa un incremento aproximadamente del 54 %. El modo aéreo presentó, un incremento entre el 2015 y 2019 desde 37.82 hasta 45.55 millones de pasajeros. Para el modo terrestre es diferente, se puede ver que entre el 2015 y el 2019 existe un decremento en el transporte de millones de pasajeros aproximadamente del 28 %. Debido a la pandemia del COVID-19, entre los años 2020 y 2021, hubo un incremento en el



**Figura 2-1.:** Histórico comparativo del transporte de millones de pasajeros por modo fluvial. Elaboración propia con base en los datos encontrados en [55].

transporte de millones de pasajeros de 45.49 hasta 68.05 millones de pasajeros para el modo terrestre, de 14.52 hasta 32.64 millones de pasajeros para el modo aéreo y un decremento de 39.72 % para el modo férreo.

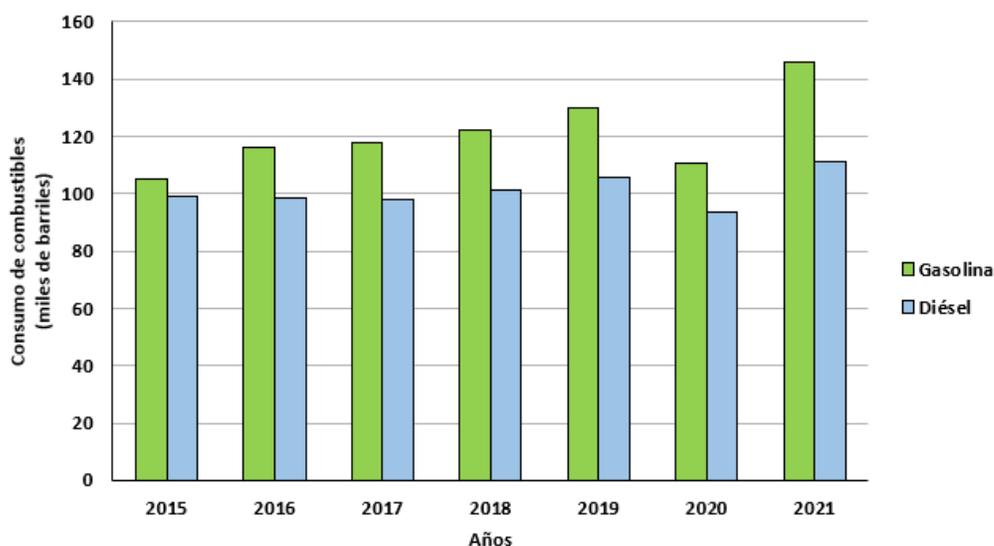


**Figura 2-2.:** Histórico comparativo del transporte de millones de pasajeros por modos terrestres, aéreos y férreos. Elaboración propia con base en los datos encontrados en [55].

En esta instancia, dada la importancia del sector de transporte colombiano, surge la necesidad de identificar los modos y medios de transporte menos desarrollados y donde el consumo de combustibles sea considerable, de tal forma, que se vea afectada la viabilidad y la permanencia de un sistema.

En particular, la mayoría de modos de transporte en Colombia, operan bajo dos tipos de

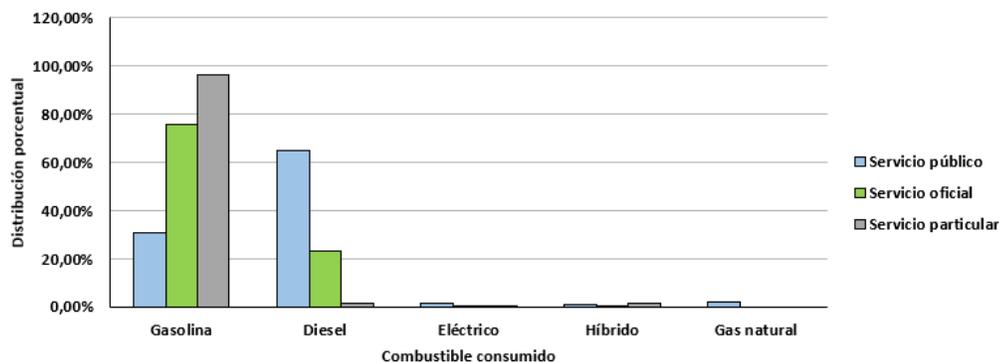
combustibles como lo son la gasolina y el diésel, el histórico del consumo de combustibles en miles de barriles se muestra en la Figura 2-3. En esta Figura se puede evidenciar el incremento del consumo durante el 2015 y el 2019 tanto para gasolina como para diésel siendo mayor el consumo de gasolina en este intervalo de tiempo. Sin embargo, hay un decremento de consumo de combustibles en el año 2020; a pesar de esto, el consumo de gasolina en el 2020 sigue siendo mayor (110.821 miles de barriles) en comparación al consumo de diésel (105.615 miles de barriles) en el año 2019. Esto muestra la dependencia del uso de combustibles fósiles en el sector de transporte colombiano. Como es evidente, el último año medido (2021) representó la mayor cantidad de consumo de combustibles, 145.587 millones de barriles de gasolina y 111.02 millones de barriles de diésel.



**Figura 2-3.:** Histórico comparativo del consumo de combustible, gasolina y diésel. Elaboración propia con base en los datos encontrados en [55].

Cabe resaltar, que el consumo de los combustibles fósiles como la gasolina y el diésel se representa como la cantidad de emisiones de dióxido de carbono provenientes del proceso de combustión de los vehículos del sector de transporte. En [86] muestran que la emisión de dióxido de carbono en el sector de transporte colombiano fue de 39,5 miles de Giga gramos de  $CO_2$  ( $GgrCO_2$ ) para el año 2019.

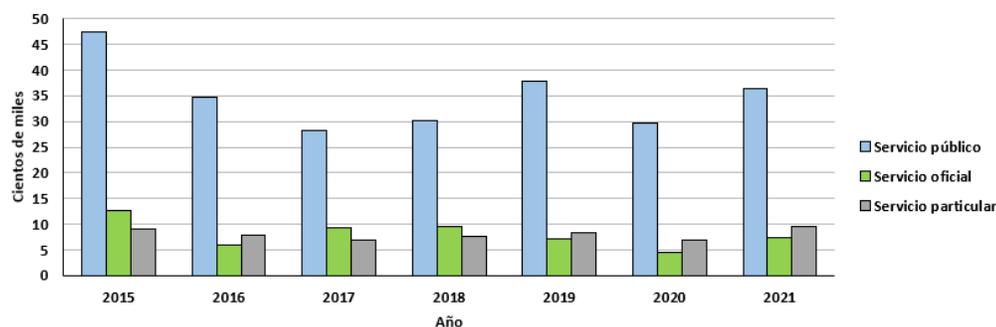
La Figura 2-4 muestra la comparación y distribución porcentual de la cantidad de vehículos de servicio público, oficial y particular, teniendo en cuenta la cantidad total de vehículos activos en el Registro Único Nacional de Tránsito (Runt). Donde, para el 2021 se tiene una cantidad de vehículos públicos del 64.80 % que operan con diésel, de vehículos oficiales del 23.20 % que operan con diésel y de vehículos particulares del 96.10 % que operan a gasolina, siendo este el mayor valor. La cantidad de vehículos que prestan servicios públicos, oficiales y particulares y operan bajo los modos eléctrico, híbrido y a gas natural, varían en un intervalo del 0 % al 2 %, esto muestra la baja integración de energías no convencionales como solución



**Figura 2-4.:** Comparativo del total de vehículos de servicio público, oficial y particular según tipo de combustible. Elaboración propia con base en los datos encontrados en [55].

para reducir los altos niveles de  $CO_2$  en el sector de transporte colombiano.

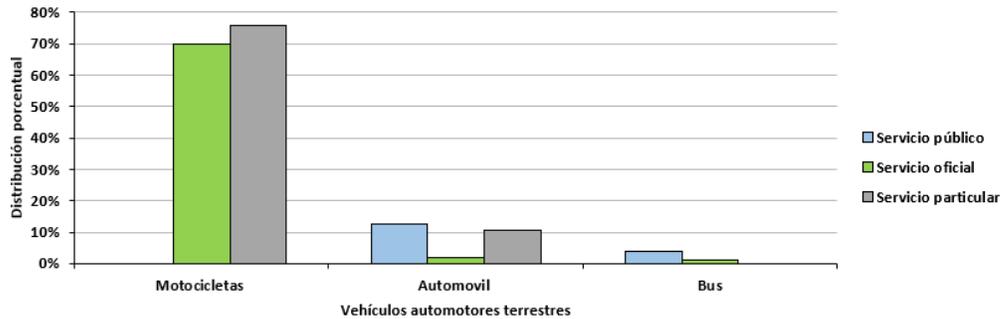
De la Figura 2-4 se puede concluir que existe un impacto negativo por parte de los servicios de transporte particulares y públicos, siendo mayor para el servicio particular, dado que tiene el valor porcentual más alto para el consumo de gasolina. Cabe resaltar que, de 100 % de los vehículos particulares, el 96.10 % opera bajo combustión interna, generando emisiones de  $CO_2$ . Igualmente, la cantidad porcentual de los vehículos que prestan servicios públicos y que operan bajo combustible diésel es de 65.80 %.



**Figura 2-5.:** Histórico comparativo del total de vehículos de servicio público, oficial y particular. Elaboración propia con base en los datos encontrados en [55].

La Figura 2-5 muestra que desde el año 2015 hasta el 2021 la cantidad de vehículos que prestan servicios públicos, es mayor a la cantidad de vehículos oficiales y particulares. Para el 2021 hay una cantidad total 36.5 y 9.49 cientos de miles de vehículos de servicio público y particular respectivamente. Cabe resaltar, que estos servicios son los que más dependientes de los combustibles fósiles.

La Figura 2-6 muestra que la mayoría de vehículos que prestan servicio particular son motocicletas y se puede concluir que, en Colombia, no fueron incluidos los sistemas de transporte compuestos por motocicletas que presten servicios públicos.



**Figura 2-6.:** Comparativo del total de vehículos de servicio público, oficial y particular según los medios de transporte. Elaboración propia con base en los datos encontrados en [55].

En el sector de transporte colombiano, se identifica que los vehículos que prestan servicios públicos son los que consumen más combustibles fósiles y generan más daños medioambientales. También, se identifica que no existe un sistema de transporte compuesto por motocicletas que presten servicios públicos y dado que la cantidad de embarcaciones registradas es inferior respecto a la cantidad de los otros medios de transporte, tampoco se considera un sistema fluvial que opere con energías no convencionales. Por lo tanto, es necesario el diseño y la construcción de un entorno de transporte multimodal (fluvial-terrestre) que responda a las exigencias de un sistema de transporte convencional. Con el objetivo de satisfacer las necesidades de conducción y de operación de vehículos de servicio público y mitigar las emisiones de  $CO_2$ . En la siguiente sección se presentan los principales conceptos del transporte sostenible.

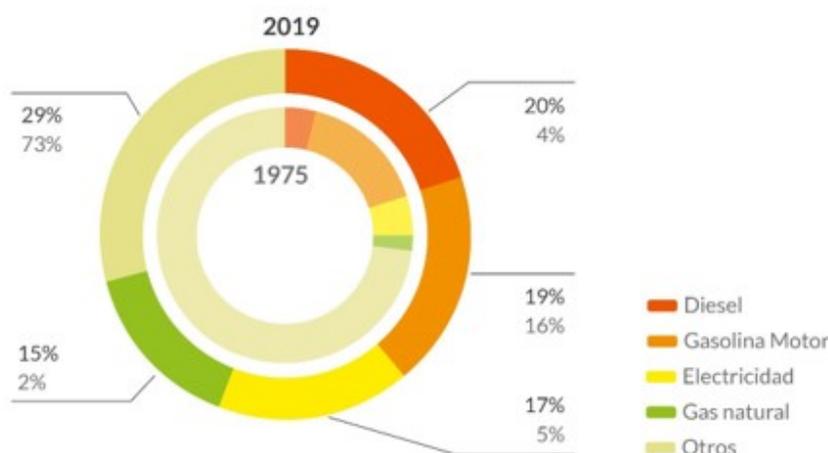
## 2.2. Transporte sostenible

Se considera la contaminación medioambiental como una situación adversa y preocupante, debido a los altos factores contaminantes, particularmente las emisiones de dióxido de carbono y material particulado del sector de transporte convencional colombiano. Consecuentemente, las altas demandas de energías primarias convencionales, también hacen parte de la problemática de la contaminación debido a que estas energías no se pueden regenerar de forma natural, por ejemplo, el gas natural, el petróleo crudo y el carbón [34]. Aludiendo a esta problemática, surgen consecuencias perjudiciales en relación con el bienestar de los seres vivos y al deterioro inminente del planeta tierra.

La sostenibilidad hace referencia al cuidado medioambiental y al desarrollo social y económico responsable. En el contexto de movilidad, un sistema de transporte multimodal sostenible, se describe como un sistema capaz de satisfacer las necesidades sociales de transporte, integrando vehículos sostenibles, que operen bajo restricciones técnicas y energías renovables.

### 2.2.1. Energías renovables

Colombia tiene una oferta energética compuesta principalmente por energéticos como el Diesel, la Gasolina, la electricidad y el gas natural. En Colombia, desde 1975 hasta el 2019, se ha presentado un incremento respecto a la oferta de estos energéticos, por ejemplo, para el gas natural, hubo un incremento del 13 %, para la electricidad el 16 %, la gasolina incremento 3 % y la oferta del Diesel incremento en un 16 %. Sin embargo, a pesar de que la electricidad tuvo un incremento considerable, el Diesel y la gasolina tienen una mayor oferta para el 2019 de 20 % y 19 % respectivamente, esto se puede ver en la Figura 2-7.



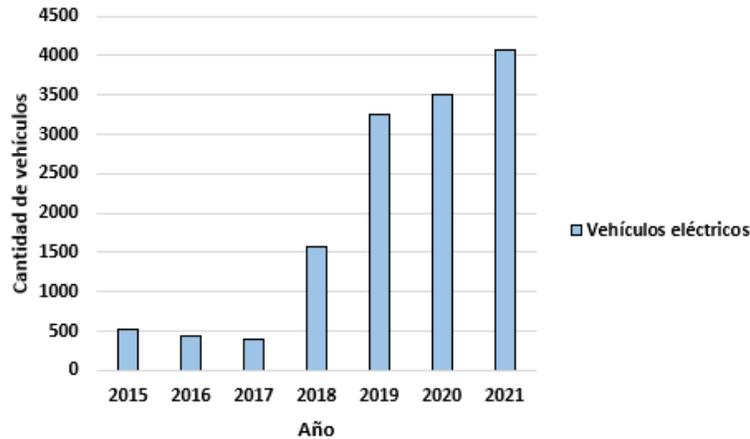
**Figura 2-7.:** Histórico comparativo de la matriz energética Colombiana. Elaboración propia con base en los datos encontrados en [86].

Las energías renovables surgen como alternativas para la reparación medioambiental. Se consideran como las fuentes primarias de energía capaces de regenerarse de forma continua dependiendo de los periodos naturales de la tierra, por ejemplo, la energía eólica y la energía solar fotovoltaica. Existe una baja implementación de estrategias para reducir la contaminación, en [86] muestran que Colombia en el 2019 tenía un mayor uso de combustibles líquidos como la gasolina y el diésel en su mayor parte debido al sector de transporte en un 91 %, siguiente a este se encuentra el uso de los biocombustibles en un 6 %, el uso del gas natural en un 3 % y finalmente el uso de la electricidad alrededor de un 0 %. Así mismo, [86] describe el uso de combustibles líquidos, biocombustibles, gas natural y electricidad para Latinoamérica y para el mundo, donde predomina el uso de los combustibles líquidos en altos porcentajes en comparación con las otras energías, siendo más baja la electricidad.

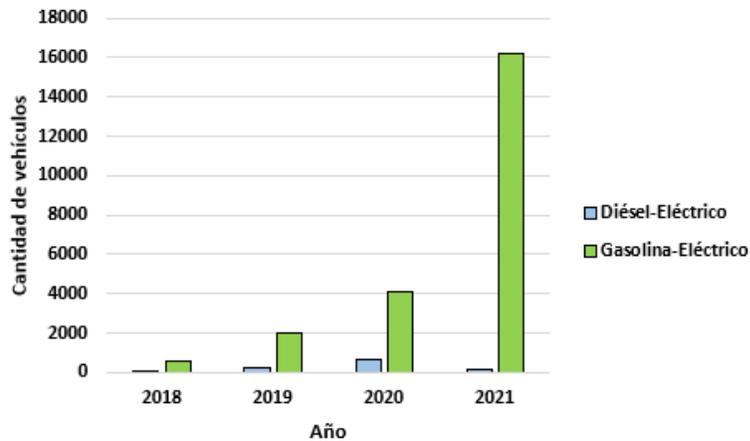
### 2.2.2. Electromovilidad en Colombia

Teniendo en cuenta que el principal uso de combustibles líquidos se debe al sector de transporte, surge la necesidad de integrar vehículos que operen bajo energías renovables, particu-

larmente, energía solar fotovoltaica.



**Figura 2-8.:** Histórico comparativo de la cantidad de vehículos eléctricos. Elaboración propia con base en los datos encontrados en [55].



**Figura 2-9.:** Histórico comparativo de la cantidad de vehículos híbridos. Elaboración propia con base en los datos encontrados en [55].

En Colombia, en el año 2021, se registraron una cantidad de 4076 vehículos eléctricos. Desde el 2015, se ha presentado una creciente integración de estos como se muestra en **2-8**. Sin embargo, esta cantidad es despreciable en comparación con la cantidad de vehículos convencionales registrados para el año 2021.

Igualmente, en la Figura **2-9** se muestra el desarrollo y la integración de vehículos híbridos, que operan bajo dos tipos de motores, un motor de combustión interna (Diésel-Gasolina) y un motor eléctrico, minimizando las emisiones por parte del motor de combustión.

La idealización de la electrificación e hibridación de vehículos de un sistema de transporte multimodal trae consigo consecuencias y restricciones técnicas y operativas, que, aunque

puedan reducir el daño medioambiental, no consiguen cumplir con las operaciones (como la congestión) y las características técnicas básicas de un sistema de transporte convencional, en términos de autonomía y desarrollo tecnológico. En virtud de ello, se pueden aproximar estas consecuencias técnicas en términos de autonomía del sistema a problemas de optimización. En este orden de ideas, se debe realizar un análisis de este tipo de vehículos conforme a sus dinámicas y recientes desarrollos.

### Modelado del consumo energético

El consumo energético de un vehículo eléctrico representa el gasto total de energía respecto al transporte o a un recorrido realizado. En sistemas de movilidad, el consumo energético de un vehículo eléctrico, atiende a criterios de sostenibilidad, debido al impacto que genera en la movilidad y en el medio ambiente. Los parámetros de diseño de un vehículo eléctrico, resultan ser indispensables, puesto que, intervienen directamente con el consumo energético. Los vehículos eléctricos operan con un motor eléctrico, un respaldo de baterías de potencia, un convertidor de corriente, un cargador de batería y sistemas de control y monitoreo electrónico. En [49] presentan un modelo genérico representativo del consumo energético de vehículos eléctricos, ese modelo se describe por medio de los siguientes balances energéticos:

$$E_{\text{veh}}(n) = E_{\text{kin}}(n) + E_{\text{pot}}(n) + E_{\text{rot,int}}(n) \quad (2-1)$$

La ecuación (2-1) representa la energía del vehículo, esta depende de la energía rotacional  $E_{\text{rot,int}}$ , la energía cinética  $E_{\text{kin}}$  y la energía potencial  $E_{\text{pot}}$ , donde  $n$  representa un instante en tiempo discreto.

$$E_{\text{veh}}(n) = \frac{m}{2} \cdot v^2(n) + m \cdot g \cdot h(n) + \frac{J_{\text{int}}}{2} \cdot v^2(n) \quad (2-2)$$

La ecuación (2-2) es una representación de la suma de las energías presentes en el vehículo, las cuales dependen de la masa del vehículo, la altura, la velocidad, la aceleración gravitatoria y el momento de inercia.

$$\Delta E_{\text{gain}}(n) = E_{\text{veh}}(n+1) - E_{\text{veh}}(n) - \Delta E_{\text{loss}}(n) \quad (2-3)$$

En la ecuación (2-3), se muestra el cambio del aumento de la energía del vehículo, esta se describe en términos de la energía del vehículo en instantes anteriores, la energía del vehículo en el instante actual y el cambio de las pérdidas energéticas en el instante actual.

$$\Delta E_{\text{loss}}(n) = \Delta E_{\text{air}}(n) + \Delta E_{\text{roll}}(n) + \Delta E_{\text{curve}}(n) + \Delta E_{\text{const}}(n) \quad (2-4)$$

La ecuación (2-4) se muestra el cambio en las pérdidas energéticas del vehículo. Estas dependen de la resistencia al aire, la resistencia a la rodadura, la curva de resistencia y la energía constante.

$$\Delta E_{\text{air}}(n) = \frac{1}{2} \cdot \rho_{\text{air}} \cdot A_{\text{vch}} \cdot c_w \cdot v^2(n) \cdot |\Delta s(n)| \quad (2-5)$$

La ecuación (2-5) representa el cambio energético debido a la resistencia al aire, depende de la densidad del aire, el área frontal, el coeficiente de resistencia aerodinámica, la velocidad y el valor absoluto del cambio de la distancia recorrida.

$$\Delta E_{\text{roll}}(n) = c_{\text{roll}} \cdot m \cdot g \cdot |\Delta s(n)| \quad (2-6)$$

La ecuación (2-6) representa el cambio energético debido a la resistencia a la rodadura, depende del coeficiente de rodadura, la masa, la constante gravitatoria y el valor absoluto del cambio de la distancia recorrida.

$$\Delta E_{\text{curve}}(n) = c_{\text{rad}} \cdot \frac{m \cdot v^2(n)}{r(n)} \cdot |\Delta s(n)| \quad (2-7)$$

La ecuación (2-7) representa el cambio energético debido a la curva de resistencia, depende del coeficiente de resistencia de la curva, la masa, la velocidad, el radio de curva y el valor absoluto del cambio de la distancia recorrida.

$$\Delta E_{\text{const}}(n) = P_{\text{const}} \cdot \Delta t \quad (2-8)$$

La ecuación (2-8) describen la energía constante, que depende de la potencia multiplicado por el cambio en el tiempo.

$$E_{\text{Bat}}(n+1) = E_{\text{Bat}}(n) + \Delta E_{\text{gain}}(n) \cdot \eta_{\text{recup}} \quad (2-9)$$

$$E_{\text{Bat}}(n+1) = E_{\text{Bat}}(n) + \Delta E_{\text{gain}}(n) \cdot \eta_{\text{prop}}^{-1} \quad (2-10)$$

$$E_{\text{Bat}}(n+1) = E_{\text{Bat}}(n) + P_{\text{chrg}} \cdot \eta_{\text{chrg}} \cdot \Delta t \quad 0 \leq E_{\text{Bat}} \leq E_{\text{Bat,max}} \quad (2-11)$$

Finalmente, las ecuaciones (2-9), (2-10) y (2-11) representan el consumo en términos de energía en la batería del vehículo en el instante (n + 1), este consumo depende del balance energético entre la energía del vehículo, las pérdidas energéticas existentes y la energía actual que tenga la batería. Cabe resaltar, que se tienen en cuenta las eficiencias de carga y descarga

del vehículo. Para conocer más sobre este modelo, en [49] se realiza una aplicación y una descripción detallada.

De lo anterior, se puede verificar la importancia de los parámetros de diseño de un vehículo y su relación con el consumo energético. Por lo tanto, es necesario resaltar, las investigaciones recientes, acerca de los tipos de modelos implementados y los modelos de consumo energético que comprendan parámetros de diseño de un vehículo.

En la literatura se identifican diversos modelos de estimación del consumo energético de los vehículos eléctricos, los cuales adoptan implementaciones deterministas y de macro y micro estimación.

- **Determinísticos:** Asumen parámetros conocidos por lo que no hay aleatoriedad en la estimación.
- **Macro estimación:** Predicen el consumo de energía usando parámetros iniciales, y pueden ser determinísticos.
- **Micro estimación:** Predicen el consumo de energía utilizando datos de GPS durante un viaje, y pueden ser determinísticos.

**Tabla 2-1.:** Investigaciones recientes en el desarrollo de modelos para consumo energético. Elaboración propia con base en los datos encontrados en [87].

Autores	Año	Modelo	Determinístico	Macro estimación	Micro estimación
[41]	2017	Model 1 (per Km)	x		x
[41]	2017	Model 2 (total trip)	x	x	
[41]	2017	Model 3 (per Km)	x		x
[41]	2017	Model 4 (total trip)	x	x	
[92]	2017	Energy consumption model	x	x	
[98]	2017	Energy consumption	x	x	
[98]	2017	Energy consumption	x		x
[46]	2017	Energy consumption	x	x	
[48]	2017	Simulation model	x	x	
[19]	2017	Energy consumption	x		x
[93]	2017	Energy consumption	x	x	
[27]	2018	Energy consumption	x		x
[45]	2018	Model 1	x		
[31]	2019	Energy consumption	x	x	
[80]	2019	Energy consumption	x		
[8]	2019	Energy consumption	x		
[52]	2019	Energy consumption	x		x
[42]	2020	Energy consumption	x		
[33]	2020	Energy consumption	x		
[96]	2020	Energy consumption	x		x
[60]	2020	Energy consumption	x		
[9]	2022	Energy consumption	x		x

En la Tabla 2-1, se muestran las investigaciones recientes realizadas en el desarrollo de modelos de consumo energético de vehículos eléctricos. La información se divide por autor,

año de publicación, nombre del modelo, y tipos de modelo. Cabe resaltar que todos los modelos se basan en representaciones deterministas dado que se tiene certeza de los parámetros utilizados, particularmente parámetros de diseño. Además, aproximadamente el 36 % de las investigaciones, desarrollan modelos de macro estimación de consumo energético para un viaje específico, sin embargo, no existe una realimentación de parámetros o valores para determinar la estimación del consumo energético de vehículos en estas investigaciones. Aproximadamente el 36 % de las investigaciones desarrollan modelos de micro estimación de consumo energético para un viaje específico, obteniendo realimentación de los parámetros vehiculares por medio de GPS, en relación a su ubicación, velocidad, aceleración, entre otros parámetros importantes. En este caso, la micro estimación genera una carga computacional mayor al momento de su simulación.

**Tabla 2-2.:** Investigaciones recientes en el desarrollo de modelos para el consumo energético. Elaboración propia con base en los datos encontrados en [87].

Autores	Año	Modelo	$v$	$\theta$	$\rho$	$A$	$m$	$d$	$Cx$	$Cr$	$g$	$\mu_p$	$t_T$	$t_{aux}$
[41]	2017	Model 1 (per Km)	x	x	x	x								x
[41]	2017	Model 2 (total trip)	x	x	x	x		x			x			x
[41]	2017	Model 3 (per Km)	x	x	x	x	x							x
[41]	2017	Model 4 (total trip)	x	x	x	x	x	x			x			x
[92]	2017	Energy consumption	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x
[98]	2017	Energy consumption	x	x	x	x	x		x	x		x	x	
[98]	2017	Energy consumption	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x	
[46]	2017	Energy consumption	x	x	x	x	x	x	x	x	x			
[48]	2017	Simulation model	x	x	x	x	x		x	x	x	x	x	
[19]	2017	Energy consumption	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x
[93]	2017	Energy consumption	x	x			x	x			x			
[27]	2018	Energy consumption	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x
[45]	2018	Energy consumption	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	x
[31]	2019	Energy consumption	x	x	x	x	x	x	x	x	x			x
[80]	2019	Energy consumption	x			x	x	x	x	x	x			x
[8]	2019	Energy consumption	x		x		x		x	x			x	
[52]	2019	Energy consumption	x	x	x	x	x		x	x	x			
[42]	2020	Energy consumption	x	x	x	x	x	x	x	x	x		x	
[33]	2020	Energy consumption	x	x	x	x	x		x	x	x	x		x
[96]	2020	Energy consumption	x	x	x	x	x		x	x	x		x	x
[60]	2020	Energy consumption	x		x	x	x	x	x	x	x	x		
[9]	2022	Energy consumption	x	x	x	x	x		x	x	x	x		

Igualmente, en la Tabla 2-2 se muestran las investigaciones recientes en el desarrollo de modelos de consumo energético de vehículos eléctricos. La información se divide por autor, año de publicación, nombre del modelo, y parámetros de diseño. En este caso particular, para el diseño del modelo de consumo energético, la mayoría de los modelos integran parámetros y características dinámicas intrínsecas de un vehículo. Sin embargo, pocos modelos integran características del tren de potencia y no consideran los tiempos de los viajes.

En la estimación de consumo energético de vehículos eléctricos, los parámetros más significativos son:

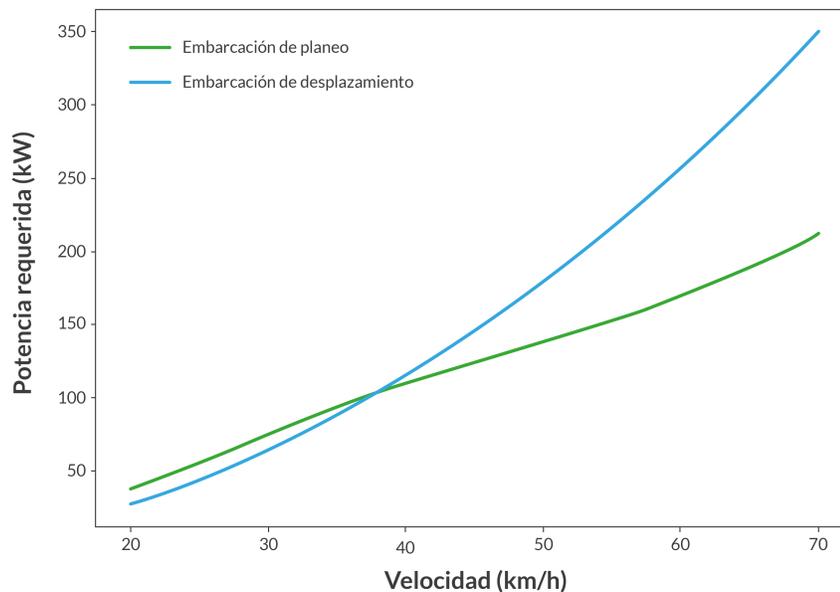
- $v$ : Velocidad del vehículo

- $\theta$ : Ángulo de inclinación de la carretera
- $\rho$ : Densidad de la masa de aire
- $A$ : Área frontal del vehículo
- $m$ : Masa del vehículo
- $d$ : Distancia
- $C_x$ : Coeficiente de resistencia aerodinámica
- $C_r$ : Coeficiente de resistencia a la rodadura
- $g$ : Constante de gravitación
- $\mu_p$ : Eficiencia del tren de potencia
- $t_v$ : Tiempo de viaje
- $t_{aux}$ : Tiempo de uso de los auxiliares

### Embarcaciones eléctricas

Dada la importancia y el bajo desarrollo del transporte fluvial en Colombia, surge la necesidad de analizar la integración de un medio de transporte sostenible como las embarcaciones eléctricas. Según [17], una embarcación tradicional consume entre 15 y 16 veces más combustible fósil que un automóvil en un mismo trayecto. En la literatura, existen diversos modelos de consumo energético para embarcaciones eléctricas. Según [79] y [59], algunos modelos dependen del peso, la velocidad, el dimensionamiento y forma de la embarcación. Así mismo, consideran si la embarcación es de desplazamiento, donde su casco se encuentra sumergido en el agua a un nivel específico, suelen ser mucho más estables, pero comprometen la velocidad de viaje y embarcaciones de planeo, su casco permanece por fuera del agua, lo que les permite alcanzar mayores velocidades, manteniéndose estables. En [44] realizan la estimación de la potencia instalada en una embarcación eléctrica teniendo en cuenta las pérdidas en relación a la propulsión eléctrica e integran eficiencias respecto al convertidor de potencia, al motor, la transmisión y el sistema de propulsión o hélice para el cálculo de la potencia.

En la Figura 2-10 se muestra la comparación de los modelos para embarcaciones de planeo y de desplazamiento, donde las embarcaciones de planeo ganan importancia debido a su bajo consumo energético respecto a las embarcaciones de desplazamiento para un mismo rango de velocidad. Cabe resaltar, que las embarcaciones de planeo, están diseñadas para navegar a altas velocidades, tiene menor peso en comparación a las embarcaciones de desplazamiento, esto representa una menor resistencia, facilita el planeo sobre el agua y consumen una menor cantidad de energía. Por otro lado, las embarcaciones de desplazamiento, están diseñadas



**Figura 2-10.:** Potencia requerida para embarcaciones de desplazamiento y planeo. Elaboración propia con base en los datos encontrados en [79] y [59].

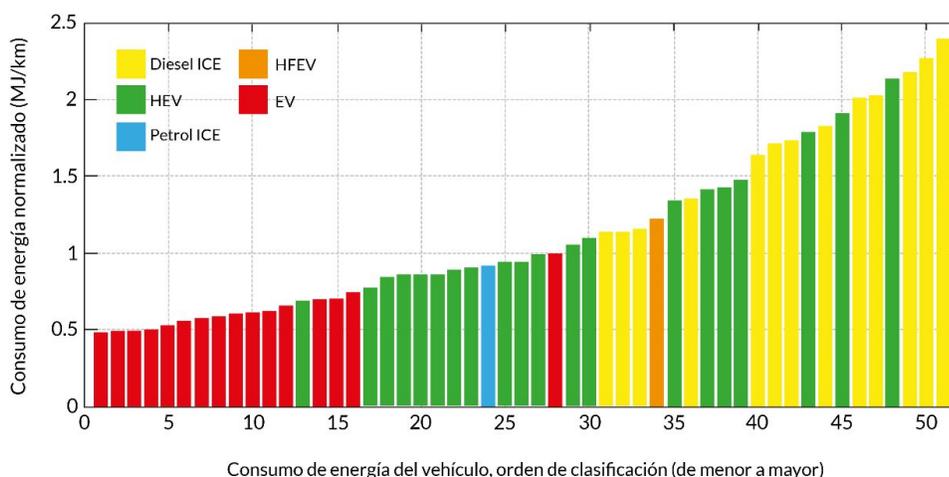
para el transporte, el casco de estas embarcaciones se encuentra sumergido en el agua, generando una mayor resistencia al movimiento y un mayor consumo energético.

### Motocicletas eléctricas e híbridas

Actualmente, hay un creciente desarrollo de vehículos eléctricos e híbridos, particularmente motocicletas, sin embargo, este desarrollo es mínimo, en comparación con la cantidad total de vehículos que operan bajo combustión interna. Las motocicletas eléctricas e híbridas surgen como alternativa de medio de transporte sostenible, para mitigar emisiones contaminantes. Las motocicletas eléctricas operan bajo sistemas de almacenamiento energético que alimentan al motor eléctrico que impulsa a la motocicleta, sin embargo, algunas motocicletas no tienen la autonomía necesaria para realizar trayectos como lo haría una motocicleta convencional. Por esta razón, existen desarrollos que permiten la hibridación de motocicletas, éstas operan bajo un sistema eléctrico y a combustión interna, dando prioridad al sistema eléctrico para reducir la dependencia del combustible. Dado lo anterior, es necesario considerar modelos de estimación energética de motocicletas eléctricas y/o híbridas, para desarrollar un sistema de transporte eléctrico sostenible, y que en un futuro exista una creciente integración de sistemas de movilidad eléctrica e híbrida.

La literatura reporta muy poca información respecto a modelos de estimación de consumo de energía exclusivamente para motocicletas eléctricas o híbridas. Diferentes investigaciones se centran en el análisis respecto al consumo de los vehículos híbridos con el objetivo de observar que el rendimiento y la autonomía sean iguales al de un vehículo convencional de

combustión interna. Por lo general, los vehículos híbridos requieren una cantidad de energía por distancia recorrida de aproximadamente 1.14 MJ/km, la cual es menor a la cantidad que necesita un vehículo convencional, que es de aproximadamente 1.68 MJ/km [25]. Los autores realizan el análisis del desempeño respecto a emisiones de  $CO_2$  y a la utilización de menor cantidad de energía al conducir una trayectoria de 57 millas para un conjunto de vehículos de bajo consumo.



**Figura 2-11.:** Comparación del consumo eléctrico para diferentes vehículos. Elaboración propia con base en los datos encontrados en [25].

En la Figura 2-11 se puede apreciar el consumo de energía media en orden de rango de menor a mayor para vehículos de bajo consumo como los vehículos eléctricos, los vehículos de combustión interna, los vehículos híbridos, los vehículos híbridos enchufables y los vehículos de Diesel. Se puede ver que los vehículos híbridos tienen un menor consumo de energía respecto a los vehículos convencionales de gasolina y Diesel, en consecuencia, esto muestra la importancia del estudio de la estimación del consumo energético no solo para disminuir las emisiones contaminantes sino también para garantizar el desempeño y la autonomía híbrida del vehículo.

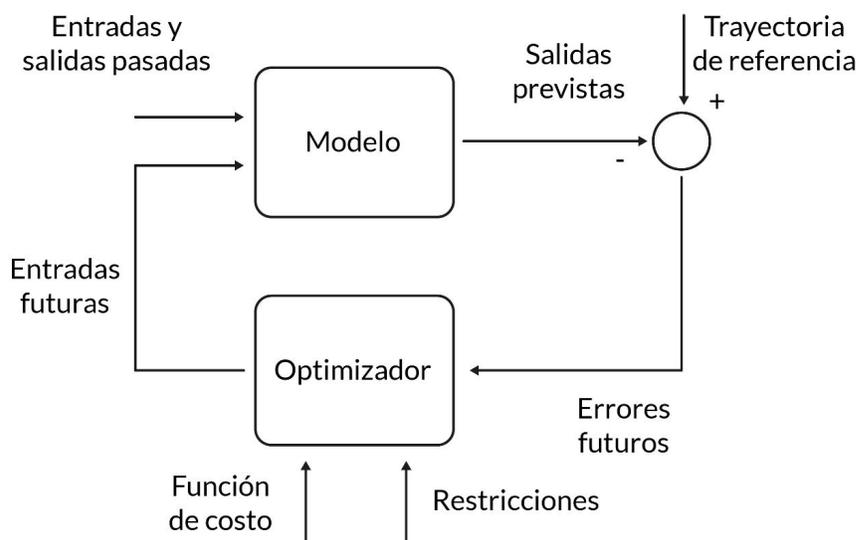
Gran parte de la información de la literatura respecto a la estimación del consumo de los vehículos híbridos se han centrado en analizar las posibles estrategias de control del vehículo híbrido y observar el comportamiento del sistema de batería asumiendo parámetros para la estabilidad de la eficiencia energética [21]. Normalmente, el ahorro energético de los motores eléctricos y su eficiencia complementan a la potencia y autonomía del motor de combustión. En [78] describen la estimación del consumo de un vehículo híbrido con la ayuda de modelos que tienen en cuenta componentes eléctricas, mecánicas y submodelos lineales de movimiento para la evaluación del desempeño y la reducción del consumo energético. Igualmente, para la predicción del consumo energético del extensor de rango de un vehículo híbrido y la reducción del consumo de combustible, son indispensables los modelos de predicción basados

en regresiones lineales que permiten calcular los valores futuros de corriente y voltaje DC del tren motriz de un vehículo híbrido según [83]. Por ejemplo, los algoritmos evolutivos en combinación con métodos de optimización basados en modelos permiten pronosticar variables futuras. En el caso de los vehículos híbridos permiten estimar la distribución de la energía óptima instantánea al convertir la energía de la batería en energía de combustible equivalente. Por otro lado, la estimación del consumo de energía en general utiliza modelos de causa-efecto como el visto en [67], tiene en cuenta los flujos de potencia de los vehículos, las características propias de los vehículos, los ciclos de conducción aplicados, las variaciones de potencia, voltaje y corriente en la red para evaluar las ventajas respecto a rendimiento, autonomía y reducción de consumo en un vehículo híbrido. Además, algunos modelos integran variables de entrada como la aceleración, el frenado regenerativo, la pendiente de la carretera, y las velocidades instantáneas para la estimación de energía y combustible de un vehículo híbrido en [21] y [5].

Actualmente, los vehículos híbridos emplean diferentes decisiones operativas respecto a los modos de gestión de energía mediante el agotamiento de carga y el mantenimiento de carga vistos en [2], [63] y [7]. En general, estos modos operativos son combinados desde algunos métodos de optimización, por ejemplo, el método de programación dinámica integrado con un modelo de tren de potencia. Esta combinación es capaz de comprender un controlador integrado para gestionar los modos de operación al control de alto nivel del tren motriz del vehículo híbrido. De esta manera, el vehículo híbrido propuesto en [63] usa el modo operativo denominado Normal, el cual funciona en el modo de agotamiento de carga desde un 90% hasta un 16.5% continuando en modo de mantenimiento de carga y el modo denominado Hold, solo funciona en modo mantenimiento de carga manteniendo el estado de carga de la batería.

En la literatura existen diversos métodos de optimización para la gestión de modos de operación de un vehículo híbrido. En [22] se presentan métodos como modelos de control predictivo para la predicción de ciclos de conducción futuros como se puede ver en la Figura **2-12**, estrategias de minimización del consumo equivalente, algoritmos genéticos, optimización de enjambre de partículas, redes neuronales, entre otros métodos que permitan evaluaciones rápidas y computacionalmente económicas respecto al procesamiento y la gestión óptima de los modos operativos. En [61] se considera el efecto de diferentes perfiles de conducción para un vehículo híbrido buscando minimizar el consumo de combustible y emisiones de este. Los autores controlan el torque generado por el motor de combustión y usan el motor eléctrico como soporte para compensar a este primero de ser necesario. Para optimizar la operación durante cada perfil de conducción usan un algoritmo genético que varía los parámetros del controlador de los motores de acuerdo con el perfil actual.

El acoplamiento multimodo presentado en [50] para vehículos híbridos serie-paralelo, trabaja bajo la estrategia adaptativa de consumo equivalente mínimo, este método integra dos módulos, uno de predicción de velocidad del vehículo y uno de control óptimo para calcular las combinaciones de distribución del torque del motor y los motores en función de la trans-



**Figura 2-12.:** Estructura del modelo de control predictivo. Imagen tomada de [22].

misión centralizada y la transmisión distribuida del vehículo híbrido. Los autores afirman que es posible mejorar la distribución óptima del torque, distribución de potencia y el ahorro energético.

## 2.3. Representación de redes de tráfico

Una red de tráfico es una infraestructura que permite visualizar y entender la operación de los sistemas de transporte. Las redes de tráfico se componen por diversas rutas, direcciones y trayectos que permiten la comunicación y la movilidad de las personas. Dado que esta tesis está basada en simulación y que se considera un sistema de movilidad eléctrica con estaciones de carga y vehículos híbridos y eléctricos, es necesario considerar simuladores de redes de tráfico, con la finalidad de generar entornos de simulación de movilidad urbana, que integre modos y medios de transporte multimodales.

### 2.3.1. Simulación de redes de tráfico

Los simuladores de redes de tráfico, permiten modelar con alto nivel de detalle, escenarios de movilidad vehicular y diferentes modos y medios de transporte. En [23], se muestran los simuladores de tráfico más utilizados, dependiendo del objetivo y nivel de detalle de la simulación. Existen diferentes tipos de simulaciones para redes de tráfico vehiculares, la simulación macroscópica, comprende variables de flujo y densidad vehicular, considerando el comportamiento de conjuntos de vehículos, la simulación microscópica, tiene en cuenta variables vehiculares mucho más específicas, como la velocidad del vehículo, aceleraciones,

distancias recorridas, considerando el comportamiento vehicular individual y la simulación mesoscópica combina características de la simulación macroscópica y microscópica. Los simuladores y algunas de sus características presentados en [23] se muestran a continuación:

- **Vehicular Ad-hoc Network (VANET)** [23]
  - Distribución libre.
  - Simulación macroscópica y microscópica.
  - Simuladores de tránsito.
- **Street Random Waypoint (STRAW)** [23]
  - Distribución libre.
  - Modelo vehicular de ciudades de Estados Unidos.
  - No se pueden crear más mapas.
- **Simulation of Urban MObility (SUMO)** [23]
  - Distribución libre.
  - Simulación macroscópica, microscópica y mesoscópica.
  - Posee herramientas para la creación de nodos, carreteras, diseños de red, detalles de los vehículos, etc.
  - Interacción desde Python en tiempo de ejecución.
- **City mobility (CityMob)** [23]
  - Distribución libre.
  - modelar accidentes vehiculares.
  - Los usuarios pueden cambiar el número de nodos simulados y el número de nodos dañados.

De todo lo anterior, se determina que SUMO es el simulador que tiene características más acordes a la simulación de transporte urbano y modos y medios de transporte. Cabe resaltar, que es de distribución libre, incluyendo simulaciones macroscópicas, microscópicas y mesoscópicas e interactúa con Python por medio de la herramienta Traffic Control Interface (TraCI) en tiempo de ejecución.

SUMO es un simulador de movilidad urbana, que permite la simulación de medios de transporte como, vehículos, motocicletas, buses, embarcaciones, entre otros. También, permite adquirir parámetros intrínsecos de cada medio de transporte e importar los mapas geográficos de las redes de tráfico de todo el mundo por medio de la herramienta OSM.WEB.WIZARD. SUMO cuenta con algunas herramientas como NETEDIT que posibilita la creación y edición de redes de tráfico, calles, carreteras, cruces peatonales, cruces viales, etc., y permite

visualizar y acceder a parámetros específicos de diseño de calles como direcciones, latitud y longitud de las vías, ancho, largo, cantidad de vehículos en la vía, etc.

Con relación a la movilidad eléctrica multimodal, los autores de [39] presentan un modelo energético para el cálculo de consumo de energía de vehículos eléctricos que se integra con SUMO, este modelo incluye la potencia que representa el consumo de energía en algunos sistemas auxiliares y cargas intermedias, lo cual indica que el simulador contempla desde características específicas del vehículo y rutas de conducción hasta las aproximaciones o estimaciones del consumo energético de los vehículos híbridos. Por otro lado, en [15] desarrollan un modelo dinámico de tráfico multimodal que integra automóviles, peatones y bicicletas y lo validan por medio del simulador de movilidad urbana (SUMO) en combinación con el modelo car-following que incluye características específicas respecto a la acción del conductor y del automóvil. Asimismo, por medio de la herramienta Traffic Control Interface (TraCI) y Matlab se puede obtener información del modelo dinámico de tráfico multimodal realizado en SUMO, esto muestra como SUMO está altamente desarrollado y es compatible con diferentes herramientas de control, optimización y estimación ya sea para el consumo, el rendimiento o entre otras características importantes que pueden describir los comportamientos y dinámicas de los sistemas de transporte multimodales.

Adicionalmente, se ha avanzado en la aproximación de los entornos urbanos de transporte, mediante la simulación de la movilidad terrestre microscópica y continua, para la caracterización de flujos, congestiones [24] y al tratarse de movilidad eléctrica, cálculos de consumo, trayectorias, demandas y pérdidas energéticas. Estos modelos, dan precisión de la constitución y la aproximación a la realidad de un sistema de movilidad eléctrica multimodal, debido a que, bajo un entorno de simulación urbano, se puede tener la integración de diferentes modos de transporte eléctricos, simular las entradas y salidas de los usuarios y los tiempos de espera referente a las colas y la congestión en una estación. Por lo tanto, se hacen necesarias estrategias de optimización que puedan asignar servicios de carga a los usuarios de forma controlada, bajo un esquema multimodal y una aproximación real del transporte urbano.

## 2.4. Gestión de sistemas de transporte eléctrico

Un sistema de transporte multimodal sostenible, a nivel de la estación de carga, debe contar con una operación óptima de tal forma que se eviten pérdidas energéticas y económicas. Además, debe satisfacer las necesidades de transporte y carga de los usuarios y a nivel macro reduciendo los niveles de contaminación en un entorno de movilidad urbano y rural. La gestión y el despacho de energía de los sistemas de transporte eléctrico surge como opción para determinar una adecuada operación al interior de la estación de carga. Si la estación cuenta con un sistema de respaldo de baterías, es necesario determinar el dimensionamiento de dicho sistema y la cantidad de energía que se debe almacenar. Asimismo, si el sistema cuenta con conexión a la red eléctrica, es necesario determinar en qué momentos y cuánta energía se debe comprar y vender a la red. Cabe resaltar, que el sistema debe garantizar el

suministro de la energía demandada por los usuarios.

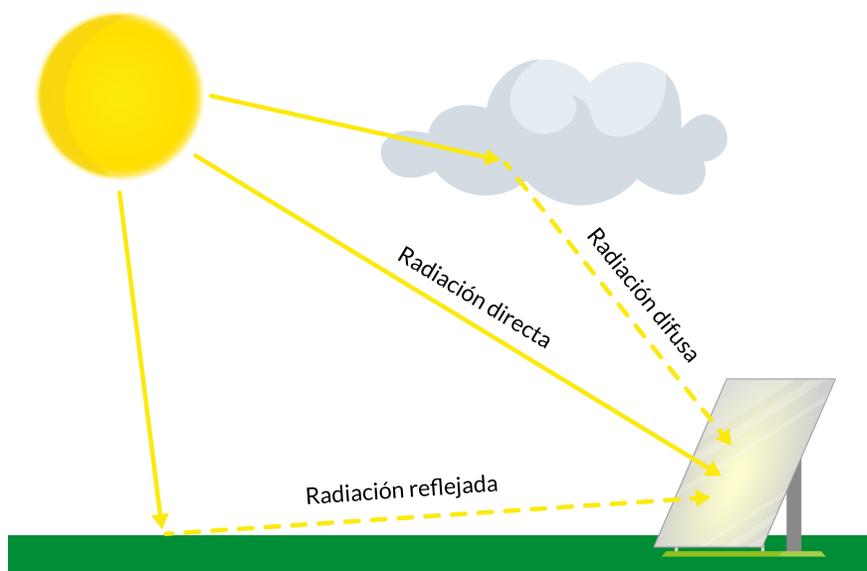
### 2.4.1. Estaciones de carga y nodos prosumidores

Las estaciones de carga, se encargan de suministrar energía eléctrica a vehículos eléctricos e híbridos, y pueden operar con energías renovables, con sistemas de almacenamiento energético y conexión a la red eléctrica. Por lo general, las estaciones de carga cuentan con un operador, encargado del despacho y distribución de energía al interior de la estación, la coordinación y planeación del servicio de carga de diferentes usuarios.

Las estaciones de carga cuentan con 3 niveles de carga según [10], el primer nivel proporciona potencia en corriente alterna (AC) de 120 voltios, el segundo nivel proporciona potencia en AC de 240 voltios y el tercer nivel proporciona potencia en corriente directa (DC) , operando entre 50 y 1000 voltios y 80 y 400 amperios. Para los niveles 1 y 2, el vehículo debe contar con un rectificador que permita convertir potencia en AC en potencia en DC, para el nivel 3, se realiza de forma directa, pasando por alto el convertidor.

Normalmente las estaciones cuentan con un respaldo de baterías, las cuales permiten almacenar la energía solar generada, sin embargo, las estaciones pueden operar sin sistemas de almacenamiento energético, pero resultaría ineficiente debido a la energía solar generada vertida o no aprovechada. Además, existen estaciones de carga solares que se pueden conectar a la red eléctrica para la compra de energía en caso tal de que la energía almacenada y generada no alcance a satisfacer las necesidades de carga en la estación. Por lo tanto, al considerar estaciones de carga solares fotovoltaicas con almacenamiento energético y conectadas a la red eléctrica, permite que exista una mayor eficiencia respecto al servicio de carga y al despacho de energía. La energía fotovoltaica y la energía almacenada son las fuentes principales para el suministro de energía, estas deben priorizarse respecto la energía que pueda ser comprada a la red, con el objetivo de minimizar y evitar costos adicionales por compra a la red. Sin embargo, resulta más eficiente que el sistema esté conectado a la red eléctrica, por que favorece su interacción con el mercado energético y favorece el despacho de energía a los usuarios de las estaciones de carga.

Las estaciones de carga fotovoltaicas cuentan con un sistema de generación eléctrica por medio de la radiación solar que incide en los paneles. La irradiación incidente es la irradiancia total que incide sobre los paneles solares fotovoltaicos, se compone por irradiación directa, difusa y reflejada [29]. La Figura **2-13** representa la irradiancia incidente sobre el panel que depende de la radiación directa o irradiancia proveniente del sol, la radiación difusa o indirecta debido a que se refleja respecto a las partículas de la atmósfera y la radiación reflejada la cual se refleja respecto a los objetos cercanos a la superficie del panel solar [29].



**Figura 2-13.:** Generación solar fotovoltaica, irradiación incidente.

La ecuación (2-12) representa la irradiancia incidente en ( $W/m^2$ ), representada por la suma de las irradiancias, directa, difusa y reflejada.

$$I_{inc} = I_{dir} + I_{dif} + I_{ref} \quad (2-12)$$

Las estaciones de carga operan bajo los siguientes casos. Caso 1, si hay un vehículo eléctrico cargando, la estación de carga tiene tres fuentes de suministro, energía generada, energía almacenada y energía de la red eléctrica; en caso tal de que no se esté generando energía solar, la estación acude al respaldo de baterías para suministrar la energía demandada y en caso tal de que no haya energía almacenada, la última opción de la estación sería la compra de energía a la red eléctrica. Caso 2, si no hay vehículos eléctricos cargando, la estación de carga tiene diferentes alternativas, como almacenar energía solar generada, vender directamente la energía generada o vender la energía almacenada. Cabe notar que, las estaciones de carga con conexión a la red eléctrica pueden interactuar con el mercado, ya sea con la compra o venta de energía dependiendo del precio de la energía.

Por otro lado, la implementación de vehículos eléctricos, ha demostrado que estos pueden ser cargados durante el día dependiendo de los estados de carga de las baterías, no obstante, dados los tiempos largos de carga, se debe generar interés por el sistema de carga de movilidad eléctrica, con el fin de ejecutar sistemas de carga rápida y garantizar un menor tiempo de carga para los vehículos. En la literatura, se describe la carga lenta como las duraciones de carga de más de dos horas para vehículos eléctricos, la carga rápida se describe como las duraciones de carga entre treinta minutos y dos horas y la carga extremadamente rápida se lleva a cabo en diez minutos aproximadamente, de esta manera, un sistema de carga rápida

o extremadamente rápida, dados sus bajos intervalos de tiempo, trae consigo consecuencias en el sistema de almacenamiento, en relación con las altas corrientes, las altas temperaturas y la reducción de las capacidades de carga [6]. Con el objetivo de aproximarse a la dinámica rápida de una gasolinera, los sistemas de movilidad eléctrica sostenible, deben considerar sistemas de carga rápida que tengan en cuenta la supervisión y la gestión del estado de carga de las baterías, los materiales de diseño y la distribución general de sus elementos.

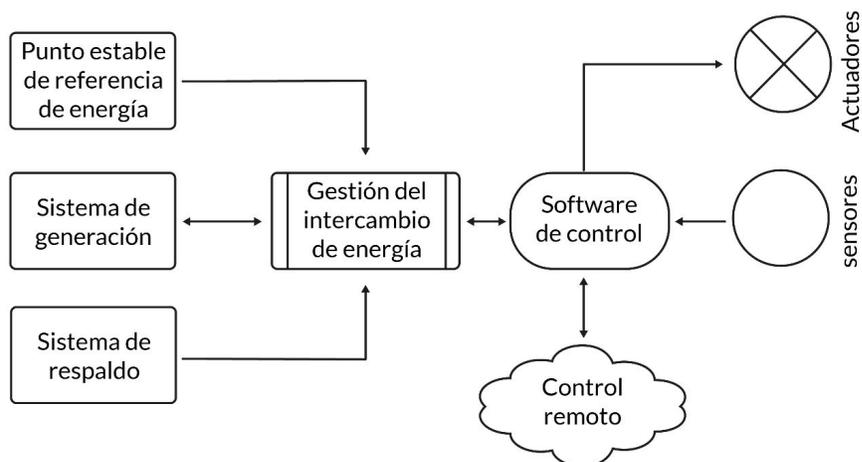
En general, en sistemas de movilidad eléctrica que comprenden el almacenamiento energético por un banco de baterías, se debe garantizar que el sistema no se cargue y descargue simultáneamente. Con el objetivo general de mantener la vida útil de las baterías, se consideran condiciones para relajar las restricciones del sistema de almacenamiento y evitar este problema, por ende, al considerar un variable booleana como restricciones de carga y descarga simultáneamente, se debe considerar el método de solución lineal entero mixto para resolver problemas de optimización con estas características específicas [36].

En el contexto de la producción y distribución de energía, las energías renovables sorprenden cada vez más debido a su alta aplicabilidad y explotación con bajos impactos ambientales. Estas energías permiten el alto desarrollo de los sistemas de consumo y venta de energía eléctrica, ya que son crecientemente competitivas y no producen gases de efecto invernadero [66], lo que las hace altamente aplicables en diferentes entornos, por ejemplo, la distribución de energía en redes inteligentes, la movilidad eléctrica multimodal, entre otros. En esta instancia, una persona puede acceder fácilmente a la generación y producción de energía hasta el punto de convertirse en productor y consumidor (prosumidor) de energía a la red eléctrica o a otras personas.

El sector de la movilidad eléctrica se ve altamente afectado debido a la aplicación de sistemas que puedan vender y consumir energía como las estaciones solares fotovoltaicas de carga para un vehículo eléctrico. Así, se hace necesario que el operador de la estación posea el conocimiento para llevar a cabo la ejecución del control y equilibrio económico para evitar pérdidas de energía y dinero asociados a la producción, carga y venta de energía, ya sea a la red eléctrica, a entes privados o exclusivamente para la carga de los vehículos eléctricos.

Los nodos prosumidores de energía eléctrica son sistemas capaces de realizar la venta, la compra y el almacenamiento de energía eléctrica, con otros nodos o con la misma red de distribución. Uno de sus objetivos principales es la maximización del beneficio económico al tomar decisiones respecto a la cantidad de energía que pueden comprar, vender a la red, a la cantidad del consumo renunciado y a la cantidad de energía que se genera a partir de las tecnologías de distribución [82]. Por lo general, estos sistemas prosumidores se componen de residencias o pequeñas instalaciones en su mayoría dotadas con sistemas de generación fotovoltaica las cuales aprovechan la radiación solar para la producción y el suministro de la energía eléctrica. En términos generales, los nodos prosumidores pueden gestionar, producir y manipular los precios de la energía a su conveniencia o dependiendo de la necesidad y la producción generada, en la Figura 2-14 se presenta un diagrama de nodo prosumidor, el cual se compone de 3 energías esenciales, como la energía de producción, la de consumo y la

de almacenamiento, dichas energías son operadas por un sistema de control de potencia que coordina los intercambios de energía, las tareas activas y pasivas y las decisiones respecto a la autonomía del sistema [28].



**Figura 2-14.:** Diagrama del nodo prosumidor. Imagen tomada de [28].

Una de las ventajas de los nodos prosumidores es la reducción de la huella de carbono, la implementación y el aprovechamiento de las energías renovables como la radiación solar, su autonomía y la participación activa en el mercado energético. Una componente adicional, es que los nodos prosumidores son capaces de elegir una distribución óptima de cargas para la disposición de energía dependiendo de factores meteorológicos, factores relacionados con la demanda por diversas actividades que se realizan dentro de las instalaciones del sistema prosumidor y las tarifas de corriente en Kilovatios hora, todo esto con el objetivo de mantener la autonomía de producción y una competencia equilibrada en el mercado energético.

En la literatura existen enfoques relacionados con los nodos prosumidores de movilidad eléctrica, uno de estos aportes muestra como por medio de un planificador de horarios de carga para vehículos eléctricos, se puede controlar la carga y la demanda de los vehículos eléctricos de acuerdo a los precios de energía del mercado y de la cantidad producida [81]. Este sistema de monitoreo y control de carga puede representarse como un nodo prosumidor de energía para la movilidad eléctrica debido a sus interacciones con la red eléctrica y los usuarios que poseen vehículos eléctricos. Igualmente, en [11] y [56], se presentan claros ejemplos de nodos prosumidores de movilidad eléctrica debido a su intervención e interacción con el mercado eléctrico, la venta y compra de energía eléctrica dependiendo de los posibles pronósticos y comportamientos del valor local de la energía, las posibles ofertas y la generación propia teniendo en cuenta el almacenamiento que el nodo posea. Por otro lado, estos sistemas prosumidores realizan toda una planificación de control de llegada y salida de los vehículos eléctricos con el objetivo de brindar un servicio óptimo de producción y venta de energía eléctrica enfocados directamente con los vehículos eléctricos.

A continuación, se presenta una revisión en la literatura acerca de desarrollos de dimensionamiento, ubicación y despacho óptimo de energía para una estación de carga de un sistema de transporte eléctrico multimodal sostenible.

## 2.4.2. Ubicación y dimensionamiento

Los sistemas de transporte multimodales sostenibles, cuentan con estaciones de carga conectadas a sistemas de generación fotovoltaica, a respaldos de baterías y con conexión a la red eléctrica. Para este tipo de sistemas, surgen problemas respecto al dimensionamiento y a la ubicación geográfica de estaciones de carga. Es posible que un sistema no cuente con una cantidad suficiente de puntos de carga y no alcance a suministrar la energía exigida, también, pueden generarse congestiones y altas demandas, lo que genera ineficiencia en el sistema. Por lo tanto, es importante el cálculo del dimensionamiento y la ubicación de las estaciones, para determinar la cantidad de energía que estará disponible, es decir, los puntos de carga, la cantidad de paneles solares y capacidad de almacenamiento en baterías. El correcto dimensionamiento en las estaciones de carga, permitirá que el sistema suministre la energía demandada, preste servicios de carga sin tener pérdidas económicas o energéticas y cumpla con un servicio y despacho eficiente.

En varios estudios reportados en la literatura, se considera que las estaciones de carga deben estar localizadas de tal forma que los usuarios o dueños de los vehículos eléctricos accedan de manera rápida al servicio de carga y que la desviación respecto al viaje hacia la estación sea mínima [12], [57]. Por esta razón, los autores implementan una optimización basada en programación lineal entera mixta (MILP- siglas en inglés), donde las variables binarias toman valores de 1 si la estación se encuentra disponible, o 0 si la estación se encuentra fuera de servicio. Basados en esto, se generan un conjunto de ubicaciones y de viajes de recarga y por medio de la minimización de costos totales de instalación y encuentran la infraestructura para cumplir con las demandas energéticas y las ubicaciones óptimas en un entorno urbano.

En [26] se propone una metodología para la ubicación y el dimensionamiento de estaciones de carga con generación fotovoltaica para botes eléctricos. Este desarrollo se basa en MILP, donde la función objetivo se describe como la minimización de la suma de costos, para este caso, los valores binarios se definen en términos de la capacidad de la batería y la disponibilidad de la estación. Igualmente, en [16] se muestra el cálculo de la infraestructura de estaciones de carga para la operación de botes eléctricos, esta investigación se basa en heurística constructiva para determinar la cantidad de paneles solares y las capacidades de almacenamiento energético, entre los resultados presentados, se encontraron con una capacidad de 46 kWh para el respaldo de baterías y una instalación de  $29m^2$  para los paneles solares fotovoltaicos.

### 2.4.3. Despacho óptimo de estaciones de carga

Diferentes desarrollos se han llevado a cabo para integrar las características sociales y las necesidades de transporte dentro del planteamiento y desarrollo de los sistemas de movilidad sostenible. En particular, el sistema de movilidad eléctrica multimodal, consta de la interacción entre los usuarios que tienen vehículos eléctricos, los operadores dueños de las estaciones de carga donde inciden los usuarios a realizar el servicio de carga y la conexión a la red eléctrica para la interacción sobre la compra y la venta energética. Muchas de las estrategias de optimización aplicadas giran en torno al cumplimiento de las necesidades de los usuarios y de los operadores que hacen parte de la sociedad, a pesar de ello, existen también problemáticas en la dinámica del sistema de movilidad, entre estas, la coordinación de los servicios de cargas para evitar congestiones, demoras en el servicio, tiempos largos de espera y de carga, entre otros. Por tal motivo, las estrategias de optimización para el control y la coordinación de los servicios de carga se han planteado como las heurísticas constructivas, [94], [35], modelo de control predictivo (MPC) para abordar la programación conjunta [37] y modelos de programación lineal entera mixta [14], [32]. Sin embargo, en los últimos años, se ha incrementado el interés por el desarrollo de las heurísticas constructivas y los modelos de programación lineal entera mixta (MILP), ya que estos exponen la alta capacidad de llevar el control y la coordinación de los servicios de carga para sistemas de movilidad eléctrica. La heurística constructiva es una estrategia de optimización que por medio de la incorporación de información de manera aleatoria y bajo criterios adaptativos encuentra soluciones óptimas a un problema particular. En la literatura se han abordado estrategias heurísticas constructivas como la optimización de colonias de hormigas [94], procedimientos de búsqueda adaptativa y aleatoria [35] y los modelos de colas estocásticas [90]. Entre estas, han logrado describir la coordinación óptima de los servicios de carga, teniendo en cuenta los eventos discretos respecto a las solicitudes de carga de los usuarios. Por otro lado, el MILP es una estrategia de optimización que considera modelos lineales con variables continuas y variables enteras, una función objetivo a optimizar y las restricciones donde por lo general algunos componentes tienen valores enteros. Se han abordado estrategias de optimización basadas en MILP secuenciales, iterativas y de horizonte finito [32], [36], logrando el desarrollo óptimo de los servicios de carga en la movilidad eléctrica.

En la literatura se presentan una gran cantidad de estrategias de optimización propuestas para la coordinación de los servicios de carga en estaciones de carga fotovoltaicas. La gran mayoría de estos trabajos se plantean estrategias metaheurísticas constructivas donde se refieren al procedimiento secuencial de carga en la estación por cada usuario. Estas estrategias consideran múltiples modelos de opciones de carga y de demandas de energía aleatorias. Sin embargo, la literatura describe problemas generales respecto a las cantidades limitadas de las instalaciones, los períodos extensos de carga y a los altos costos de carga, donde se retrasan los servicios y se originan colas de espera en las estaciones disminuyendo la productividad. Uno de los trabajos que llevó a cabo la implementación de estrategias metaheurísticas pa-

ra la coordinación de carga fue [94], a través del enfoque de optimización de colonias de hormigas, los autores reportan un enfoque multiobjetivo que garantiza que los tiempos de carga de los vehículos y los costos de carga sean mínimos, favoreciendo a los usuarios, sin embargo, se pone en cuestión la asistencia y evaluación de la autonomía de las estaciones en consideración de las utilidades del operador de la estación. Igualmente, en [35] los autores abordaron el problema de coordinación de carga por medio de la implementación de una estrategia heurística basada en procedimientos de búsqueda adaptativa y aleatoria para una distribución de estaciones de carga. Mediante una petición para el acceso al servicio de carga, aportan información de las rutas, la ubicación en tiempo real, el tiempo límite de inicio y finalización de carga proporcionando resultados favorables respecto a la minimización de los tiempos de espera y la minimización de los costos de operación, en virtud de favorecer al operador de la estación. Dado que la carga simultánea de vehículos eléctricos puede generar altas demandas energéticas, en [77] para la coordinación simultánea de servicios de carga en un conjunto de estaciones, se tiene en cuenta el desarrollo óptimo por medio de la estrategia metaheurística de enjambre de partículas, de esto se deriva la gestión de carga y la ubicación inicial de las estaciones. Muchos de los usuarios que requieren hacer uso del servicio se verán obligados a trasladarse de estación dadas las altas demandas y congestiones existentes. Para esto, se deben poner a prueba las eficiencias de la coordinación simultánea para cada estación, ante un conjunto de demandas energéticas. Al hablar de demandas aleatorias de energía en relación con las peticiones de los usuarios, los operadores de las estaciones tendrán que afrontar el reto de la disminución de la congestión, para esto, las estrategias más utilizadas son los modelos estocásticos de generación de colas [90], [65], principalmente describen las funciones de los tiempos de espera y permiten la aproximación y estimación de los tiempos de operación óptimo, también, dan evidencia de la importancia de la correcta asignación de servicios y la necesidad del cálculo de las ubicaciones, las infraestructuras y las capacidades de carga totales a instalar, para el correcto desarrollo del diseño de estrategias de optimización para sistemas multimodales de movilidad eléctrica.

Igualmente, algunos enfoques de la literatura pretenden minimizar el consumo de la energía de la red durante los periodos donde el precio de la energía es relativamente alto. El desarrollo de esta optimización se da por medio de un algoritmo del sistema de gestión de estacionamiento basado en una estación de producción de energía fotovoltaica como se muestra en [1], la distribución de este algoritmo indica valores respecto a las curvas de carga, la potencia extraída de la red y costos totales de la energía, a través de la adquisición de las características del vehículo, las distancias a recorrer, las cargas requeridas y el cálculo de los precios de tiempo de uso de la red eléctrica, el objetivo principal gira en torno a la toma de decisiones de consumo y de suministro para los vehículos en intervalos de tiempos definidos. También en [88], se analiza un caso similar de optimización para la minimización de los costos operativos de la estación de carga basados en la gestión de la energía en tiempo real, teniendo en cuenta la tasa de utilización de energía, pérdidas de las baterías y precios de la energía. Adicionalmente, en el desarrollo de las estrategias óptimas acerca de MILP, se han

encontrado soluciones para la asignación del servicio de carga para un sistema multimodal como se muestra en [32], la implementación de esta estrategia contempla la minimización de los costos de operación y maximizar los ingresos por servicios auxiliares alcanzando a planificar cada una de las solicitudes de carga en un periodo de tiempo determinado. No obstante, a pesar de que el sistema comprende la producción energética desde una planta solar y contiene un sistema de almacenamiento energético, este no contempla la interacción con la red eléctrica.

La Tabla 2.5 presenta algunos ejemplos de implementaciones de sistemas de gestión y despacho óptimo de energía, la mayoría de estas investigaciones consideran la maximización del beneficio de los operadores y la minimización de costos de operación y tiempos de carga. Favorecen a los usuarios (U) y/o operadores de estaciones de carga (0) y se muestra si el sistema cuenta con un sistema de generación fotovoltaica (PV), respaldo energético por baterías (BESS) o conexión a la red eléctrica (Red).

Estas investigaciones aproximan cada vez más la implementación de las estrategias de optimización en las interacciones que hay entre la estación de carga, los usuarios y la red eléctrica, con el objetivo principal de que la coordinación general de los servicios de carga sea eficiente. Sin embargo, ninguno de estos trabajos hace énfasis en la selección de métodos de optimización para la coordinación de carga en sistemas multimodales de movilidad eléctrica como nodos prosumidores compuestos por conjuntos de estaciones de carga con generación fotovoltaica y respaldo de almacenamiento energético para cada estación. Así mismo, no se precisa el monitoreo en tiempo de simulación de cada estación de carga en cuanto al consumo y la producción de energía y pocas investigaciones se centran simultáneamente en los intereses de los operadores de las estaciones y de los usuarios. Por otra parte, también se identifica que no existen sistemas de transporte multimodal compuesto por motocicletas eléctricas e híbridas y embarcaciones eléctricas que presten servicio público.

## 2.5. Resumen

Este capítulo presentó una revisión de las fuentes de modelos de consumo energético de vehículos eléctricos, métodos para el dimensionamiento y ubicación y el despacho óptimo de energía en las estaciones de carga. La sección 2.1 muestra las generalidades de la movilidad y el transporte en Colombia. Se muestra el desarrollo de los modos y medios de transporte a partir del año 2015 hasta el 2021, se clasificó los tipos de servicios y la cantidad de modos de transporte asociados y se presentan históricos comparativos de consumo de combustibles para identificar las deficiencias del sector de transporte colombiano, la Sección 2.2 presentó una revisión de las generalidades del transporte sostenible y la electromovilidad en Colombia, la necesidad de la integración de energías renovables en sistemas de transporte y una revisión de las fuentes del modelado del consumo energético de vehículos eléctricos, mediante la combinación de parámetros de diseño, en la Sección 2.3 se presentó una revisión de los simuladores redes de tráfico urbano más implementados, basados en modelos microscópicos,

macroscópicos y mesoscópicos y la selección SUMO como el simulador de movilidad urbana base para el desarrollo del sistema de transporte multimodal sostenible. Finalmente, la Sección 2.4 presentó una revisión de las fuentes de gestión de sistemas de transporte eléctrico, se muestra las generalidades del concepto de estación de carga y como se puede representar como un nodo prosumidor de energía, por medio de la compra y venta de energía a la red eléctrica. También, se muestran algunos desarrollos en relación a la ubicación, el dimensionamiento y despacho óptimo de energía, cuyas bases radican en la maximización de beneficios del operador y la minimización de costos de operación y tiempos de carga en la estación, favoreciendo a los operadores y usuarios de estaciones de carga, en su mayoría implementan métodos heurísticos y métodos basados en MILP. El siguiente capítulo presenta la descripción del modelado del sistema de transporte eléctrico multimodal y el modelado y simulación de vehículos eléctricos e híbridos (embarcaciones y motocicletas).

**Tabla 2-3.:** Investigaciones recientes en el desarrollo de modelos para el despacho energético; Usuarios (U), Operadores (O), Sistema de generación solar (PV), almacenamiento energético (BESS) y red eléctrica.

Cita	Carga	Objetivo	Métodos	U	O	PV	BESS	Red
[4]	Admission control using pricing policies.	Maximize operator's profit.	Charging Network Operator (CNO).	x	x	x	-	x
[35]	Non-linear charging behavior of EV's battery.	Maximize the number of accepted services.	GRASP1 based heuristic algorithm.	x	x	x	-	-
[76]	Uncoordinated coordinated, bidirectional.	Minimize cost, maximize Voltage stability index.	Chicken swarm optimization (CSO).	-	x	-	x	x
[95]	Battery swapping.	Electricity purchase cost, Penalty cost, Maximizing operator profit, Minimizing battery degradation cost, wapping cost.	Static optimization programming, Sequential decision-making formulation, Multi-objective optimization formulation.	x	x	-	x	x
[20]	Arrive.	Minimize the operational cost (OC), electricity price of the imported power from the power grid, CVaR.	Gurobi Solver in Python Environment MILP.	x	x	x	-	x
[38]	Scheduling algorithm updates.	Minimize costs and increasing revenue for the service providers.	Multi-parameters optimisation algorithm.	-	x	-	x	-
[75]	Deep reinforcement learning-based.	Maximize the revenue and the user satisfaction.	Reinforcement learning algorithms such as deep deterministic policy gradient.	x	x	-	-	x
[74]	Arrival time, Optimal mapping.	Minimize costs and maximize operational efficiency, while meeting EV charging demands.	Modified Rainbow-Based.	x	x	x	x	x
[3]	Load-following or cycle-charging.	NPC and COE.	HOMER.	-	x	x	x	x
[91]	Dynamic charging demand.	Maximize the charging demands, minimize the cost of electricity and the time consumed for charging.	Hybrid particle swarm optimization algorithm with the entropy-based technique for order preference by similarity to ideal solution method.	x	x	-	-	x

## 3. Modelado y simulación del transporte eléctrico multimodal

En el proceso de modelado y simulación de un sistema de transporte eléctrico multimodal sostenible, es fundamental realizar una descripción de la estructura y actores que hacen parte del sistema. También, es necesario describir la metodología de modelado del sistema de transporte y los modelos de consumo energético de los medios de transporte implicados. Este capítulo se divide en cuatro apartados correspondientes a una descripción detallada de la estructura general del sistema de transporte eléctrico multimodal, al modelado del sistema de transporte y a los modelos y simulaciones del consumo energético de vehículos eléctricos e híbridos, estos son descritos en las siguientes subsecciones. Al final de este capítulo se presenta un resumen.

### 3.1. Estructura del sistema de transporte eléctrico multimodal

El sistema de transporte multimodal sostenible, se compone de estaciones de carga, operadores de estación, medios de transporte, usuarios y puntos de acopio. En general, el sistema de transporte multimodal sostenible, se compone por una flota de vehículos eléctricos ubicados en puntos de acopio estratégicos a la espera de un viaje. Para que los usuarios accedan al servicio de transporte deben realizar una solicitud o petición de origen-destino, para indicarle al dueño del vehículo eléctrico entre qué puntos se quieren desplazar. Teniendo en cuenta la disponibilidad del vehículo eléctrico, el vehículo prestará el servicio de transporte entre los dos puntos solicitados. Al finalizar el viaje, si el vehículo eléctrico cuenta con una reducción considerable del nivel de energía, este realiza una petición de carga a la estación, que cuenta con sistema de almacenamiento, generación y distribución a la red para suplir la demanda solicitada. En caso tal de que no exista una reducción considerable del nivel energético del vehículo, este partirá al punto de acopio para esperar una nueva solicitud de viaje. Las estaciones, los usuarios, los operadores y los medios de transporte se describen a continuación:

- **Estaciones de carga** : son puntos situados en un entorno urbano que facilitan el despacho de energía a usuarios que realizan peticiones de carga. Las estaciones comprenden

generación solar fotovoltaica, sistema de respaldo de batería para el almacenamiento energético y conexión a la red eléctrica.

- **Usuarios del servicio de transporte** : son los usuarios que por medio de peticiones de origen-destino, acceden al servicio de transporte.
- **Usuarios del servicio de carga** : son los usuarios que por medio de peticiones, acceden al servicio de carga en la estación.
- **Puntos de acopio** : son puntos comunes entre usuarios del servicio de carga. En estos puntos, los dueños de vehículos eléctricos se encuentran a la espera de una petición de origen - destino por parte de los usuarios del servicio de transporte.
- **Operadores de la estación de carga** : es el agente encargado de asignar servicios y puntos de carga a los usuarios del servicio de carga. Dado que existe conexión a la red eléctrica, este puede tomar decisiones respecto a la compra y venta de energía a la red.
- **Medios de transporte** : el sistema de transporte multimodal cuenta con dos medios de transporte, como motocicletas híbridas y embarcaciones eléctricas.

Tener un alto nivel de detalle en el modelado y simulación del sistema de transporte eléctrico multimodal es fundamental, para aproximar la simulación a un entorno real. A continuación, se presenta el modelado del sistema de transporte multimodal basado en simulación microscópica.

## 3.2. Modelado y simulación del sistema de transporte

Algunas técnicas utilizadas para simular los sistemas de transporte urbano, se agrupan en simulaciones macroscópicas y microscópicas. Al considerar vehículos eléctricos, estaciones de carga y consumos energéticos, en esta sección se presenta el modelado y la simulación de un entorno de transporte basado en simulación microscópica, que considera parámetros intrínsecos de los vehículos, estaciones y calles.

### 3.2.1. Construcción de redes de tráfico

Para la simulación de redes de tráfico de ciudades, SUMO cuenta con una herramienta llamada OSM.WEB.WIZARD que puede conectarse con Open Street Maps para la adquisición de las redes de tráfico del mundo. Esta herramienta, permite generar mapas formato .xml con características específicas como las longitudes de las calles, los nombres de las calles, el número de carriles, las velocidades máximas permitidas y demás parámetros intrínsecos de una red de tráfico. Cabe notar, que SUMO asigna las direcciones a cada una de las vías,

lo que favorece la coordinación de vehículos para realizar recorridos a lo largo del entorno modelado. El formato .xml considera un parámetro de prioridad para direcciones de giro en intersecciones no semaforizadas.



**Figura 3-1.:** Red de tráfico de Medellín adquirida de SUMO

La Figura 3-1 presenta la red de tráfico de Medellín adquirida de SUMO. Esta red cuenta con las vías principales y alternas en el sector y cada vía se describe, por medio de una secuencia de números, letras y caracteres que SUMO puede traducir a coordenadas de latitud y longitud para determinar una ubicación específica en la red.

La herramienta NETEDIT, facilita la edición de redes de tráfico, permite adicionar y eliminar vías, agregar semáforos, cruces viales, etc. También, permite la asignación de los tipos de medios que puede circular sobre una red de tráfico.

### **Medios de transporte**

SUMO dispone de una alta diversidad de medios de transporte para la simulación de tráfico. La Figura 3-2, muestra los medios de transporte que contempla SUMO, para esta investigación, se propone la integración de motocicletas híbridas y de embarcaciones eléctricas como se pueden observar en círculos rojos. Por lo general, los modelos de motocicletas híbridas y embarcaciones eléctricas consisten en la parametrización de un modelo matemático, capaz de comportarse similar a un sistema real, estos son descritos por parámetros relacionados con las dinámicas reales, como el peso, la longitud, las fuerzas incidentes, etc. Además, los

modelos parametrizados, brindan una validación dinámica de un modelo real por medio de herramientas informáticas y algoritmos de programación complejos y facilitan la codificación y medición de su comportamiento.

	<input checked="" type="checkbox"/> passenger Default vehicle class		<input checked="" type="checkbox"/> motorcycle Two- or three-wheeled motor vehicle		<input checked="" type="checkbox"/> evehicle Future electric mobility vehicles
	<input checked="" type="checkbox"/> private A passenger car assigned for private use		<input checked="" type="checkbox"/> moped Motorcycle not allowed in motorways		<input checked="" type="checkbox"/> army Vehicle designed for military forces
	<input checked="" type="checkbox"/> taxi Vehicle for hire with a driver		<input checked="" type="checkbox"/> bicycle Human-powered, pedal-driven vehicle		<input checked="" type="checkbox"/> ship Basic class for navigating waterway
	<input checked="" type="checkbox"/> bus Urban line traffic		<input checked="" type="checkbox"/> pedestrian Person traveling on foot		<input checked="" type="checkbox"/> authority Vehicle of a governmental security agency
	<input checked="" type="checkbox"/> coach Overland transport		<input checked="" type="checkbox"/> tram Rail vehicle which runs on tracks		<input checked="" type="checkbox"/> vip A civilian security armored car used by VIPs
	<input checked="" type="checkbox"/> delivery Vehicles specialized to deliver goods		<input checked="" type="checkbox"/> rail_electric Rail electric vehicle		<input checked="" type="checkbox"/> hov High-Occupancy Vehicle (two or more passengers)
	<input checked="" type="checkbox"/> truck Vehicle designed to transport cargo		<input checked="" type="checkbox"/> rail_fast High-speed rail vehicle		<input checked="" type="checkbox"/> custom 1 Reserved for user-defined semantics
	<input checked="" type="checkbox"/> trailer Truck with trailer		<input checked="" type="checkbox"/> rail_urban Heavier than tram		<input checked="" type="checkbox"/> custom 2 Reserved for user-defined semantics
	<input checked="" type="checkbox"/> emergency Vehicle designated to respond to an emergency		<input checked="" type="checkbox"/> rail Heavy rail vehicle		

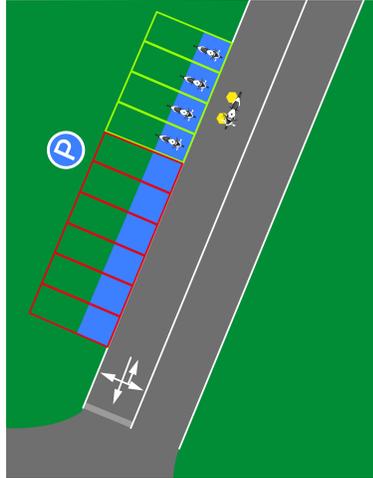
**Figura 3-2.:** Modos de transporte que ofrece SUMO

### Estaciones de carga y puntos de acopio

Dado que SUMO no cuenta con puntos de acopio y las estaciones de carga se encuentran en un desarrollo inicial, en esta tesis se utilizaron los parqueaderos con el fin de emular su comportamiento. La Figura 3-3 muestra la representación gráfica de las estaciones de carga y puntos de acopio para motocicletas en una red de tráfico simulada en SUMO. Esta estación cuenta con una cantidad limitada de puntos de carga, representados como un conjunto de celdas, si las celdas son de color rojo, están libres o disponibles, si son de color verde están ocupadas por motocicletas.

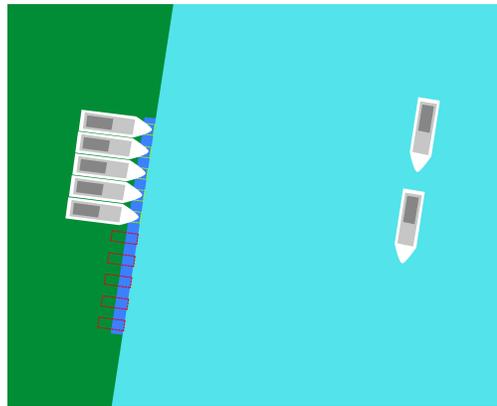
Teniendo en cuenta que SUMO puede conectarse con Python por medio de la librería TraCI (Traffic Control Interface), esta facilita la adquisición de valores de clases y objetos simulados y la manipulación de sus comportamientos. Cabe resaltar, que los vehículos son simulados como una clase de Python que permite integrar conjunto de datos y características y manipular su funcionalidad para la creación de nuevas instancias. Para los vehículos, se asigna una tasa de carga dependiendo del tiempo de simulación de SUMO, todo esto para permitir la carga total o parcial de un vehículo que ha cumplido con un servicio de transporte.

Así mismo, la Figura 3-4 muestra la representación gráfica de las estaciones de carga de las embarcaciones eléctricas. SUMO permite modificar la longitud de las celdas de parqueo, como la estación se simula como un parqueadero de embarcaciones, también, se puede modificar la cantidad de puntos de carga. Para las embarcaciones, se pueden modificar diferentes variables como el peso, la cantidad de pasajeros, la capacidad de carga eléctrica, etc. Igualmente, se



**Figura 3-3.:** Representación de los puntos de concentración y estaciones de carga en SUMO

puede coordinar la entrada y la salida de cada una de las embarcaciones y la cantidad de energía que se les puede suministrar por hora.



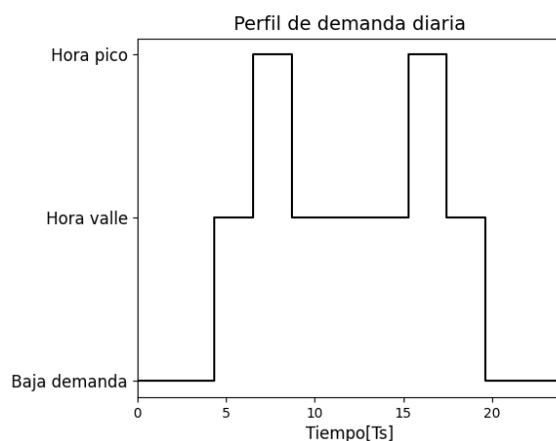
**Figura 3-4.:** Representación de las estaciones de carga de las embarcaciones simuladas en SUMO

En esta instancia, SUMO permite la interacción entre los pasajeros y las embarcaciones a lo largo de un afluyente simulado, en la Figura 3-4 se observa el afluyente como un área azul. De igual manera, SUMO favorece la adquisición de estados de carga del sistema, consumos energéticos, velocidades, aceleraciones y estados generales de las embarcaciones respecto a sus recorridos y sus estancias en las estaciones de carga.

### 3.2.2. Demanda de transporte - perfiles de peticiones de carga

La demanda de transporte se define como la cantidad de usuarios  $n$  que realizan una petición de un viaje entre dos puntos de la ciudad en un periodo de tiempo  $T_s$ . Para la generación del

perfil de demanda, inicialmente se seleccionaron 12 periodos del día con horas pico, horas valle y horas donde existe baja demanda, y con base en esto se generaron las peticiones de manera horaria. En las horas pico, el número de peticiones posibles se encuentra en el intervalo (4,10), esto significa que en horas pico a lo sumo existirán 10 peticiones de carga durante un intervalo de tiempo y mínimo 4 peticiones. Para las horas valle el número de peticiones posibles se encuentra en el intervalo (2,5), y para las horas de baja demanda el número de peticiones posibles se encuentra en el intervalo (0,2).



**Figura 3-5.:** Perfil de demandas de transporte

Por lo tanto, durante la creación de este perfil de demandas de transporte, se tuvo en cuenta que cada 2 horas se cambia el patrón de demanda, por lo que durante las 00:00 horas y las 04:00 horas permanece una baja demanda de peticiones, entre las 04:00 y las 06:00 horas se generan las peticiones realizadas en las horas valle y entre las 06:00 y las 09:00 horas se generan las peticiones realizadas en las horas pico. Durante el resto del día se tiene una nueva distribución de 12 periodos. Dado que se tiene una alta demanda de transporte al medio día, la demanda respecto a las peticiones cae durante un intervalo de tiempo entre las 09:00 horas y las 15:00 horas el cual representa las horas valle, entre las 15:00 y las 18:00 existe alta demanda de peticiones de transporte y al finalizar el día las demandas de transporte disminuyen.

Dado lo anterior, se construye un perfil de demanda de carga durante un día como se muestra en la Figura 3-6, con demandas de carga por cada hora transcurrida. Cada una de las demandas se representan con una barra vertical de color rojo, estas representan la cantidad de peticiones de carga en una hora específica. Al iniciar el día, los usuarios que realizan peticiones de carga, a partir de las 15:00 horas los usuarios que prestan el servicio de transporte se verán afectados por el estado de carga de la batería de sus vehículos, lo cual genera la necesidad de realizar una petición de carga, entre las 15:00 y las 17:00 horas se generan horas pico de peticiones de carga. Al finalizar el día, entre las 17:00 y las 20:00 horas se representan las

horas valle, donde existe una cantidad media de peticiones de transporte y entre las 20:00 y las 00:00 horas se presenta una baja demanda respecto a las peticiones de carga.

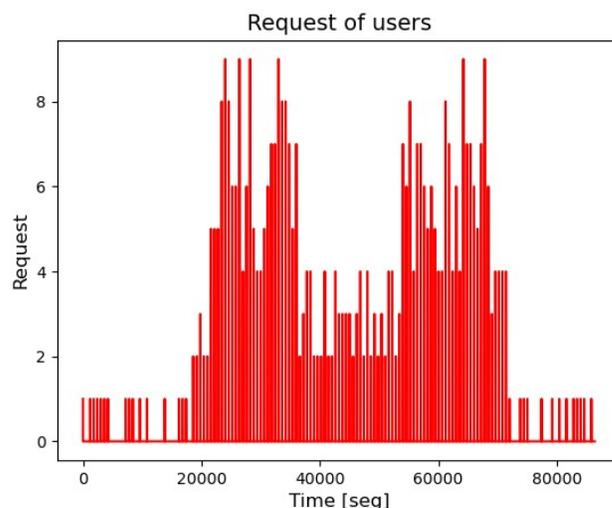


Figura 3-6.: Perfil de demandas de energías

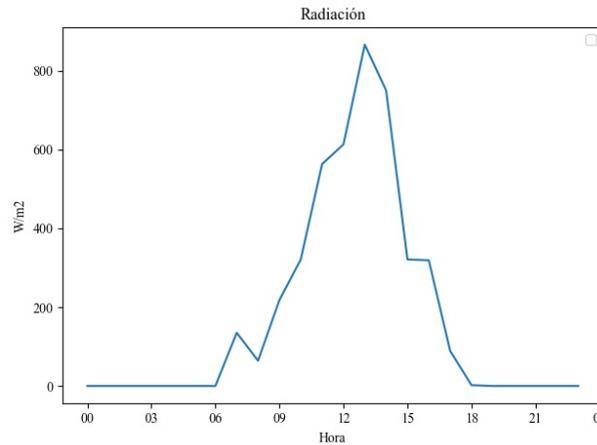
### 3.2.3. Perfiles de irradiancia

Respecto a la planta solar fotovoltaica, se considera un perfil nominal de irradiancia durante un mes adquirido de The National Solar Radiation Database [64]. Para describir la energía nominal que entrega la planta solar, se define esta energía como el producto de la irradiancia nominal durante una hora y la capacidad de potencia máxima de la planta fotovoltaica. Esta distribución energética se muestra en la Figura 3-7 para un periodo de tiempo de un día y el la Figura 3-8 para un periodo de tiempo de un mes.

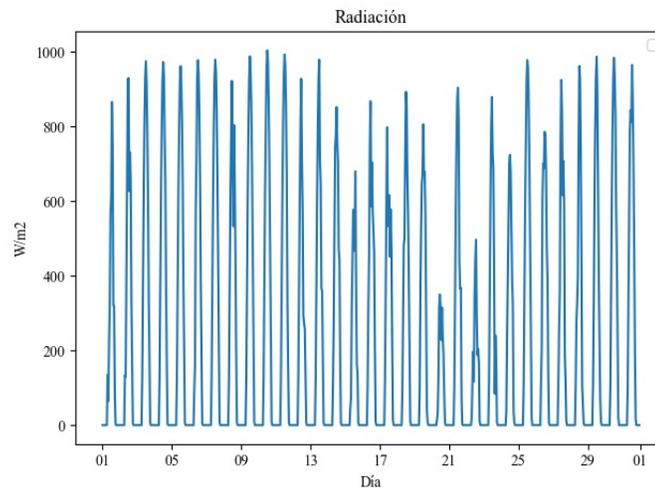
Estos perfiles de irradiancia servirán como insumo para el desarrollo de la gestión óptima respecto a la ubicación, dimensionamiento y despacho de energía.

## 3.3. Modelado y simulación del consumo energético de vehículos eléctricos

Para el modelado de los consumos energéticos de los medios de transporte, motocicletas híbridas y embarcaciones eléctricas, se tendrán en cuenta los análisis dinámicos de cada vehículo y su respectiva simulación en una red de tráfico simulada con SUMO, con un punto de origen y un punto de destino específico. En esta sección se presentan los modelos de consumo de las motocicletas híbridas y de las embarcaciones eléctricas, estos modelos se implementaron por medio de Python y de la herramienta TraCI, los modelos son simulados



**Figura 3-7.:** Perfil de radiación nominal de un día en Magangué



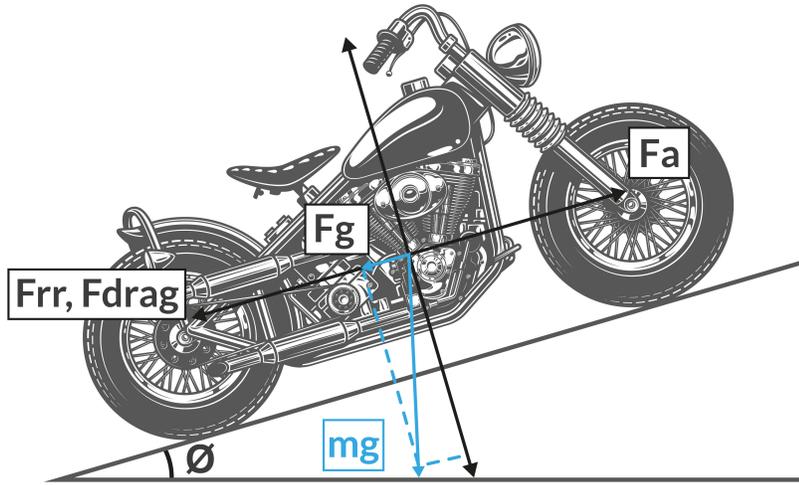
**Figura 3-8.:** Perfil de radiación nominal en un mes

en las redes de tráfico que entrega SUMO, para determinar las velocidades, los consumos energéticos y las trayectorias realizadas.

### 3.3.1. Consumo energético de motocicletas híbridas

En el marco de investigación del proyecto de movilidad sostenible de energética 2030, se desarrollaron diferentes investigaciones alrededor del modelado de vehículos eléctricos e híbridos. Entre estas investigaciones se encuentra el modelo de consumo energético de una motocicleta híbrida que depende de parámetros de energía cinética, energía potencial y energía rotacional. Por lo tanto, el modelo que se muestra a continuación, se basa en el modelo reportado en el informe científico llamado, Diseño Preliminar: Kit de conversión a tracción eléctrica para

movilidad terrestre [68]. A pesar de que SUMO cuenta con modelos de consumo para vehículos eléctricos, este aun no desarrolla en su totalidad modelos de consumo para motocicletas híbridas.



**Figura 3-9.:** Diagrama de cuerpo libre de las interacciones de una motocicleta.

La Figura 3-9 muestra el diagrama de cuerpo libre para una motocicleta híbrida considerada como una partícula. Este modelo de partícula se ve afectado por las fuerzas de resistencia aerodinámica, inercial, rotacional y gravitacional, el ángulo de inclinación de la carretera, densidad del aire, y coeficientes de resistencia al aire y a la rodadura. Basados en este diagrama y por medio de la sumatoria de fuerzas, se describe el consumo energético de la motocicleta a continuación.

$$F_v[k] = F_a[k] + F_r[k] + F_i[k] + F_g[k] \quad (3-1)$$

La ecuación (3-1) muestra que la fuerza actual total que experimenta el vehículo en un instante actual ( $k$ ), se describe como la suma de las fuerzas que inciden sobre la motocicleta, como la fuerza aerodinámica  $F_a[k]$ , la fuerza de rodadura  $F_r[k]$ , la fuerza inercial  $F_i[k]$  y la fuerza gravitacional  $F_g[k]$  en el instante  $k$ .

$$F_a[k] = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_d \cdot v[k]^2 \quad (3-2)$$

La ecuación (3-2) describe la fuerza aerodinámica en términos de la densidad del aire  $\rho$ , el área frontal del vehículo  $A$ , el coeficiente de resistencia aerodinámica  $c_d$  y el cuadrado de la velocidad de la motocicleta  $v[k]^2$ .

$$F_r[k] = g \cdot m \cdot c_r \cdot \cos \theta \quad (3-3)$$

La ecuación (3-3) describe la fuerza de rodadura en términos de la masa del vehículo  $m$ , la constante gravitacional  $g$ , el coeficiente de resistencia a la rodadura  $c_r$  y el coseno del ángulo de inclinación de la carretera  $\theta$ .

$$F_i[k] = m \cdot \Delta v \quad (3-4)$$

La ecuación (3-4) describe la fuerza inercial en términos de la masa del vehículo  $m$ , el cambio en la velocidad  $\Delta v$  o la aceleración del vehículo.

$$F_g[k] = g \cdot m \cdot \sin \theta \quad (3-5)$$

La ecuación (3-5), describe la fuerza gravitatoria en términos de la masa del vehículo  $m$ , la constante gravitacional  $g$  y el seno del ángulo de inclinación de la carretera  $\theta$ .

$$F_v[k] = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_d \cdot v[k]^2 + g \cdot m \cdot c_r \cdot \cos \theta + m \cdot \Delta v[k] + g \cdot m \cdot \sin \theta \quad (3-6)$$

Reemplazando las ecuaciones (3-2), (3-3), (3-4) y (3-5) en la ecuación (3-1), se obtiene la ecuación (3-6). Esta representa la fuerza total que experimenta la motocicleta híbrida en función de la velocidad en el instante  $k$ .

$$P_m[k] = F_v[k] \cdot v[k] \quad (3-7)$$

La potencia mecánica de la motocicleta se representa por medio del producto de la fuerza en función de la velocidad y la velocidad en el instante  $k$ , como se muestra en la ecuación (3-7).

$$P_e[k] = \frac{P_m[k] \cdot H}{\mu_m} \quad (3-8)$$

$$P_{em}[k] = \frac{P_m[k] \cdot C}{\mu_{mc}} \quad (3-9)$$

La potencia eléctrica se define en la ecuación (3-8), como el producto entre la potencia mecánica en función de la velocidad y el aporte porcentual del motor eléctrico  $H$ , sobre la eficiencia del motor eléctrico  $\mu_m$ . Así mismo, se define la potencia requerida por el motor

de combustión (3-9), como el producto entre la potencia mecánica y el aporte porcentual del motor de combustión  $C$ , sobre la eficiencia del motor de combustión  $\mu_{mc}$ . Finalmente, las potencias requeridas al motor eléctrico y al motor de combustión quedan descritas por las ecuaciones (3-10) y (3-11) respectivamente.

$$P_e[k] = \frac{(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_d \cdot v[k]^2 + g \cdot m \cdot c_r \cdot \cos \theta + m \cdot \Delta v[k] + g \cdot m \cdot \sin \theta) \cdot v[k] \cdot H}{\mu_m} \quad (3-10)$$

$$P_{em}[k] = \frac{(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot c_d \cdot v[k]^2 + g \cdot m \cdot c_r \cdot \cos \theta + m \cdot \Delta v[k] + g \cdot m \cdot \sin \theta) \cdot v[k] \cdot C}{\mu_{mc}} \quad (3-11)$$

En la Tabla **3-1** se describen los parámetros respecto a la potencia eléctrica de la motocicleta. Con base en un perfil de velocidad adquirido de SUMO, se ejecuta la simulación del modelo de potencia.

Cabe resaltar que la motocicleta cuenta con dos baterías de almacenamiento, donde cada una tiene una capacidad de 25[Ah], voltaje de circuito abierto de 74[V] lo que genera una capacidad total de almacenamiento aproximadamente de 3700[Wh].

**Tabla 3-1.:** Parámetros dinámicos del modelo de motocicleta

<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidades</i>
$\rho$	1.21	[Kg/m <sup>3</sup> ]
$A$	0.6	[m <sup>2</sup> ]
$c_d$	0.7	-
$g$	0.98	[m/s <sup>2</sup> ]
$m$	200	Kg
$c_r$	0.01	-
$H$	0.4	-
$C$	0.6	-
$\mu_m$	0.7	-
$\mu_{mc}$	0.2	-

Inicialmente se realiza la simulación de una red de tráfico para que la motocicleta realice un trayecto determinado. La Figura **3-10**, describe una red de tráfico simulada en SUMO, esta red de tráfico está representada por calles y cruces viales por los cuales recorrerá la motocicleta híbrida. Un usuario se encarga de solicitar el servicio de transporte desde un punto de origen (Círculo morado Figura **3-10**) hasta un punto de destino (Círculo azul Figura **3-10**). La motocicleta situada en un punto de acopio (Círculo verde Figura **3-10**), realizará el respectivo viaje con la finalidad de recoger al pasajero en el punto de origen

y transportarlo hasta el punto de destino. El trayecto realizado por la motocicleta híbrida se puede ver en la Figura 3-10, este considera una distancia de 7.2 km y la red de tráfico representa el municipio de Magangué, la cual se extrajo de SUMO.



**Figura 3-10.:** Trayectoria recorrida por la motocicleta en SUMO

La Figura 3-11 representa la dinámica de la motocicleta al circular por el trayecto definido, aquí se muestra la velocidad de la motocicleta, donde esta permanece en un estado de reposo durante 100 segundos. Al transcurrir 100 segundos, el usuario que solicita el servicio de transporte realiza una petición de origen-destino, de esta forma la motocicleta pasa de un estado de reposo a un estado dinámico donde se traslada hasta el punto de origen. La motocicleta llega al punto de origen a los 320 segundos, permanece 10 segundos en reposo mientras recoge al pasajero, pasados 10 segundos la motocicleta se dirige hacia el punto de destino solicitado, a este punto llega a los 520 segundos, donde permanece 10 segundos mientras el usuario termina su servicio y posterior a esto, la motocicleta es dirigida al punto de acopio para esperar otro servicio de transporte (origen-destino).

La Figura 3-12 muestra el consumo energético de la motocicleta, la cual comienza en su estado máximo de carga 3700[Wh] y al transcurrir el proceso de viaje de origen-destino, es evidente que el consumo va aumentando, por lo que la cantidad de energía disminuye en el sistema de almacenamiento aproximadamente a 3500[Wh]. Además, se muestra la potencia por cada segundo de simulación transcurrido. Igualmente, esta figura muestra en consumo de combustible (gasolina) [galones] durante el trayecto definido, y el aporte de combustión en [kW] el cual considera picos de alto consumo a medida que la motocicleta híbrida aumenta su velocidad.

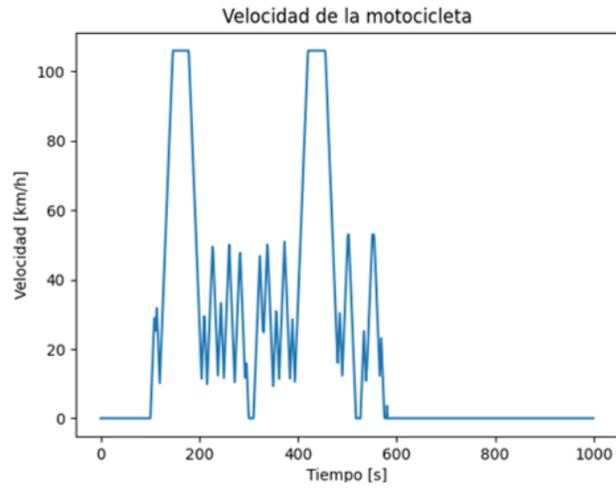


Figura 3-11.: Perfil de velocidad de la motocicleta híbrida

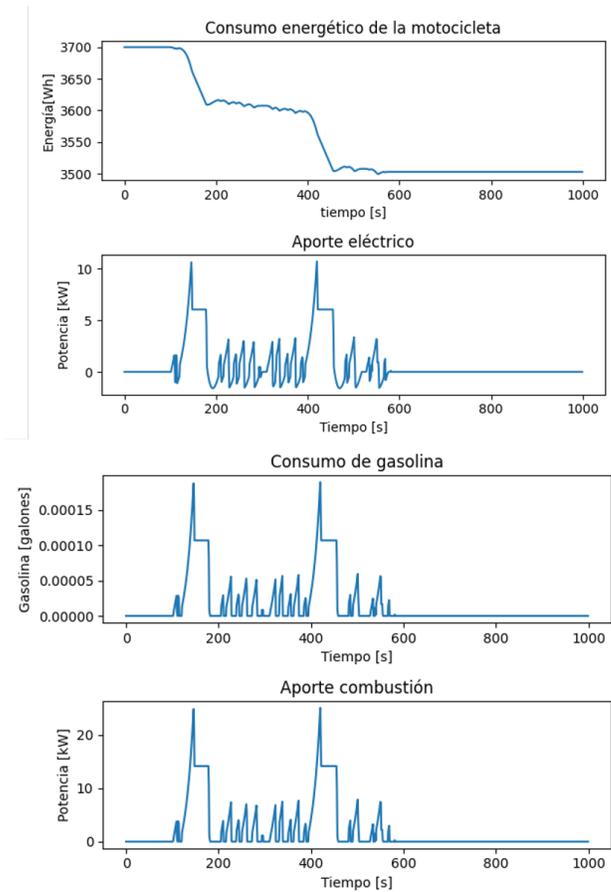


Figura 3-12.: Perfil de potencia eléctrica, consumo energético y consumo de gasolina de la motocicleta híbrida

En el Anexo A, se muestra un modelo alternativo, basado en aproximación de mínimos cuadrados, para el consumo energético en un trayecto específico.

### 3.3.2. Embarcaciones eléctricas

Para describir el consumo energético de la embarcación eléctrica, se tiene en cuenta la distribución del flujo de propulsión del sistema compuesto por el convertidor de potencia, el motor eléctrico, la transmisión y la hélice del sistema con sus respectivas eficiencias y pérdidas, esta distribución permite especificar la potencia eléctrica y el consumo energético de la embarcación. El modelo a continuación se basa en los modelos reportados en [43] y en el informe científico del proyecto de movilidad de energética 2030 llamado, Fabricación de prototipo de la Embarcación Electro-Solar (Parte II) [73]. SUMO cuenta un modelo de embarcación eléctrica, sin embargo, este modelo no cuenta con una curva de resistencia hidrodinámica para aproximar la dinámica de la embarcación a una operación real.

Inicialmente se plantea la potencia mecánica efectiva del bote en un instante actual ( $k$ ) como se muestra en la ecuación (3-12), la cual depende de la curva de resistencia hidrodinámica en función de la velocidad del bote (3-13) y de la velocidad general del bote.

$$P_m(k) = F_a(k) \cdot v(k) \quad (3-12)$$

$$F_a(k) = 1,4v(k)^3 - 66,3v(k)^2 + 1109,4v(k) + 452,6 \quad (3-13)$$

Al reemplazar la ecuación (3-13) de resistencia hidrodinámica en la ecuación (3-12) de potencia mecánica efectiva, se obtiene la potencia efectiva en función de la velocidad del bote como se muestra en (3-14). Esta representa la cantidad de energía consumida al superar las fuerzas mecánicas externas de la embarcación eléctrica.

$$P_m(k) = v(k) \cdot (1,4v(k)^3 - 66,3v(k)^2 + 1109,4v(k) + 452,6) \quad (3-14)$$

Así mismo, se describe la potencia eléctrica como la cantidad de energía por unidad de tiempo a la cual opera la embarcación, como el inverso de las eficiencias del convertidor de potencia, del motor eléctrico, de la transmisión y multiplicado por la razón entre la potencia mecánica efectiva y eficiencia de la hélice de la embarcación como se puede ver en la ecuación (3-15).

$$P_e(k) = \frac{P_m(k)}{\eta_D} \cdot \frac{1}{\eta_m} \cdot \frac{1}{\eta_T} \cdot \frac{1}{\eta_p} \quad (3-15)$$

Al reemplazar la ecuación (3-14) en la ecuación (3-15) y realizando operaciones algebraicas necesarias, se obtiene la potencia eléctrica en función de la velocidad del bote y las eficiencias del sistema descrita en la ecuación (3-16).

$$P_e(k) = \frac{1,4v(k)^4 - 66,3v(k)^3 + 1109v(k)^2 + 452,6v(k)}{\eta_D \cdot \eta_m \cdot \eta_T \cdot \eta_p} \quad (3-16)$$

A continuación, en la Tabla **3-2** se describen los parámetros respecto a las eficiencias del convertidor, del motor, de la transmisión y de la hélice. Bajo estos parámetros y un perfil de velocidad adquirido de SUMO se ejecuta la simulación del modelo de consumo energético de la embarcación eléctrica.

**Tabla 3-2.:** Eficiencias del modelo de consumo

<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>
$\eta_D$	0.75
$\eta_m$	0.95
$\eta_T$	0.931
$\eta_p$	0.98

Cabe resaltar que, la embarcación cuenta con una cantidad de 368 baterías de Litio NMC (Níquel - Manganeso - Cobalto) de 1,2 kg c/u. Cada una con una capacidad de 87[Ah] y 3,7[V], lo que genera una capacidad total de 118,459, 2[Wh]. El modelo de consumo energético de la embarcación eléctrica se simula en Python y por medio de SUMO donde previamente se diseñó el modelo de la red hídrica, se adquieren las velocidades en el trayecto. Para este desarrollo se tiene en cuenta un tiempo de simulación de 700 segundos y se programa la embarcación tal que pueda realizar una trayectoria a lo largo de la red hídrica simulada. La Figura **3-13**, muestra la red hídrica simulada donde el círculo azul representa el punto de partida, el círculo rojo representa el punto de llegada o destino y el círculo morado representa a una estación de carga intermedia. Cabe resaltar que la red hídrica adquirida de SUMO representa el recorrido fluvial entre los municipios Magangué y Pinillos con un recorrido de 58 km.

La Figura **3-14** muestra la velocidad y el consumo energético de la embarcación eléctrica a lo largo de un trayecto por la red hídrica. Entre los 0 segundos y los 1000 segundos la embarcación permanece en estado de reposo, por lo que la velocidad es igual a 0 [km/h], cabe resaltar que el pico inicial de velocidad representa la llegada de la embarcación al puerto. A partir de los 1000 segundos la embarcación eléctrica inicia su trayecto por el afluente con una velocidad de 34.0 [km/h]. Dado que el consumo energético corresponde a la velocidad aplicada a lo largo de la red hídrica, se considera que, a partir de los 1000 segundos, donde la embarcación inicio su recorrido, el consumo va aumentando con una misma tasa a medida

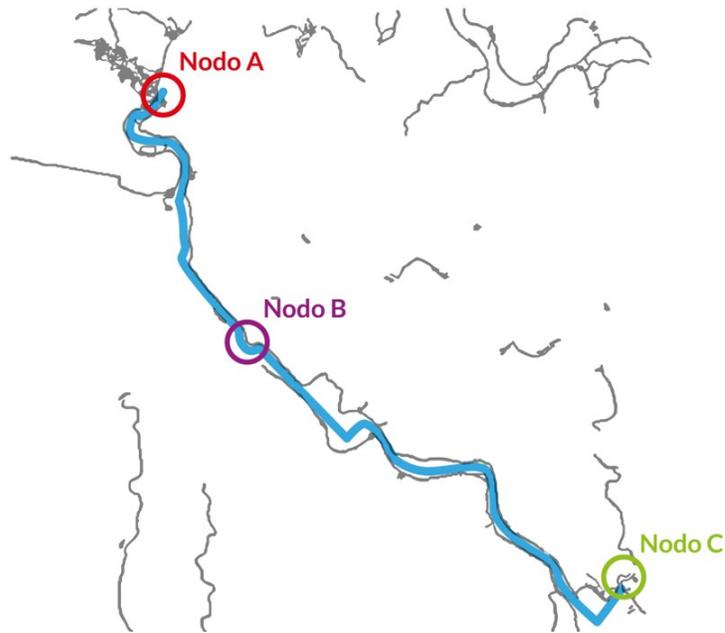


Figura 3-13.: Trayectoria recorrida por la embarcación en SUMO

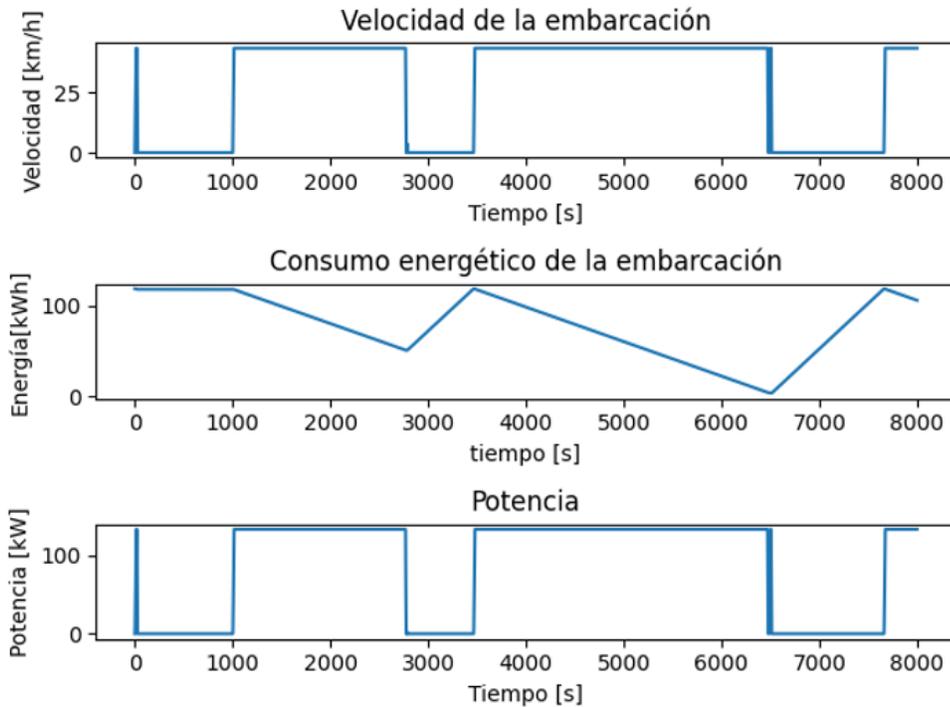


Figura 3-14.: Perfil de velocidad, potencia eléctrica y consumo energético

que la velocidad permanece constante en  $34.0 [km/h]$ . Por esta razón, en la Figura 3-14, se muestra como el consumo energético de la embarcación va reduciendo, pasando de  $118 [kWh]$

hasta  $50[kWh]$  con una potencia aproximadamente de  $130[kW]$ . Al considerar este nivel de energía, la embarcación llega a una estación de carga intermedia donde realiza su respectiva carga, en la figura puede notarse como entre los 2500 y los 3500 segundos la cantidad de energía en el sistema de almacenamiento va aumentando hasta llegar a su máximo, de esta manera la embarcación continuará con su recorrido hasta el puerto de Pinillos, donde llevará a cabo otro proceso de carga del sistema.

### 3.4. Resumen

Este capítulo presentó una descripción de la estructura del sistema de transporte eléctrico multimodal, se describieron los tipos de usuarios del sistema, las estaciones de carga, los tipos de vehículos, los puntos de acopio y los operadores de las estaciones. También, mostró las descripciones y la simulación de las redes de tráfico propuestas y presentó los perfiles de peticiones de transporte y carga y los perfiles de irradiancia. Por otra parte, se presentan los modelos paramétricos de consumo energético para las motocicletas híbridas y para embarcaciones eléctricas, donde, dada una trayectoria se analizó la velocidad y el respectivo consumo energético y la potencia instantánea en tiempo de simulación. Principalmente, los modelos presentados en esta sección, facilitarán la programación de la gestión de carga en estaciones de carga, dependiendo del trayecto realizado, de la velocidad y de la cantidad de energía consumida, el dueño de un vehículo eléctrico, deberá de realizar una petición de carga para suministrar de energía a su vehículo, la estación debe de tener la disponibilidad energética para cumplir con la respectiva demanda. En la siguiente sección se presentará la gestión del sistema de transporte eléctrico multimodal, relacionado con la ubicación, el dimensionamiento de estaciones de carga.

## 4. Ubicación y dimensionamiento óptimo de las estaciones de carga

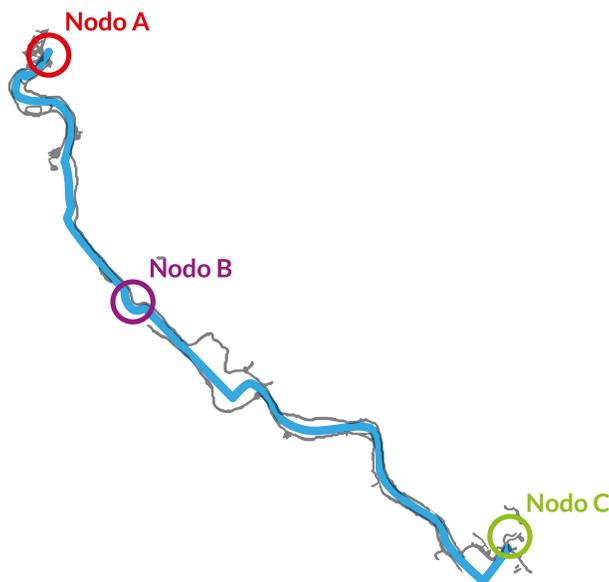
Las estaciones de carga de un sistema de transporte eléctrico multimodal están al servicio de los usuarios que tienen vehículos eléctricos y de la red eléctrica debido al consumo y a la venta de energía. Necesariamente, las estaciones se componen por un ente agregador que tiene el objetivo principal de controlar el suministro, el almacenamiento, la producción y la venta de energía, así mismo, la entrada, la salida y la carga de vehículos eléctricos. Para que el beneficio del agregador aumente respecto al servicio de la estación, la ubicación estratégica y el dimensionamiento de la infraestructura se convierten en una necesidad. Este capítulo se divide en dos apartados correspondientes a la ubicación y al dimensionamiento óptimo de las estaciones de carga, basados en la formulación y solución del problema de programación lineal entera mixta (MILP por sus siglas en inglés). Al final de cada sección se presentan los principales resultados de la ubicación y el dimensionamiento y al final de este capítulo se presenta un resumen.

### 4.1. Ubicación y dimensionamiento óptimo de las estaciones de carga de embarcaciones eléctricas

En el marco de investigación del proyecto de movilidad sostenible de energética 2030, se implementó un método de optimización basado en un algoritmo de ramificación y poda para la ubicación de las estaciones de carga, el dimensionamiento y la operación óptima. En esta sección se presenta el modelo reportado en el informe científico de Diseño y desarrollo - Sistema integrado de movilidad eléctrica multimodal (Moto+Bote+Estación) [69], del cual se resalta la ubicación y el dimensionamiento de las estaciones de carga para las embarcaciones. Para realizar el dimensionamiento y la ubicación de estaciones de carga para embarcaciones eléctricas, se define  $N = \{0, \dots, n\}$  como los puntos donde puede instalarse una estación de carga, 0 y  $n$  representan el embarcadero y desembarcadero de las embarcaciones. Dado que las estaciones de carga a instalar cuentan con almacenamiento y generación fotovoltaica, se define  $C_{pc}$  como el costo de la estación de carga teniendo en cuenta la potencia de carga  $Q_b$ ,  $C_{cb}$  es el costo considerando las capacidades  $E_b$  de las baterías y  $C_{pv}$ ,  $P_i$ , representan el costo de la configuración de paneles y la cantidad de paneles a instalar.

Principalmente, se define la función objetivo de la ubicación, dimensionamiento y operación

como la minimización de los costos totales, teniendo en cuenta, los costos de operación, los costos de inversión del sistema de almacenamiento y costos de la energía comprada a la red eléctrica, esto se puede ver en el informe científico del proyecto de movilidad sostenible [69]. El método de ramificación de poda, utiliza una estructura de árbol para determinar una optimización exacta, este se representa por un conjunto de ramas que representan posibles soluciones óptimas y un conjunto de reglas de poda que considera valores binarios y donde, si la regla es igual a 1, no se poda la rama, lo que significa que no se descarta la posible solución, si la regla es 0 se descarta o se poda la rama que contiene la solución. Se define  $S$  como una lista donde se almacenan las soluciones encontradas por el método, para esto, se definen las ramas, la primera representa el conjunto de posibles nodos o puntos donde se va a instalar una estación de carga y la segunda representa el conjunto de potencias de carga, el número de paneles y las capacidades del respaldo de almacenamiento energético a instalarse en una estación de carga. Para este desarrollo se considera una cantidad de 3 nodos ( $A, B, C$ ) para la ubicación de las estaciones de carga. Teniendo en cuenta estas ramas y los nodos propuestos, el método selecciona para los 3 nodos, capacidades de almacenamiento, un número de paneles a considerar en cada nodo y las potencias de carga, considerando la minimización de costos totales. Finalmente, el método comienza con el proceso de poda y selección de posibles soluciones óptimas relacionadas con el costo mínimo para el arreglo de estación de carga más óptimo.

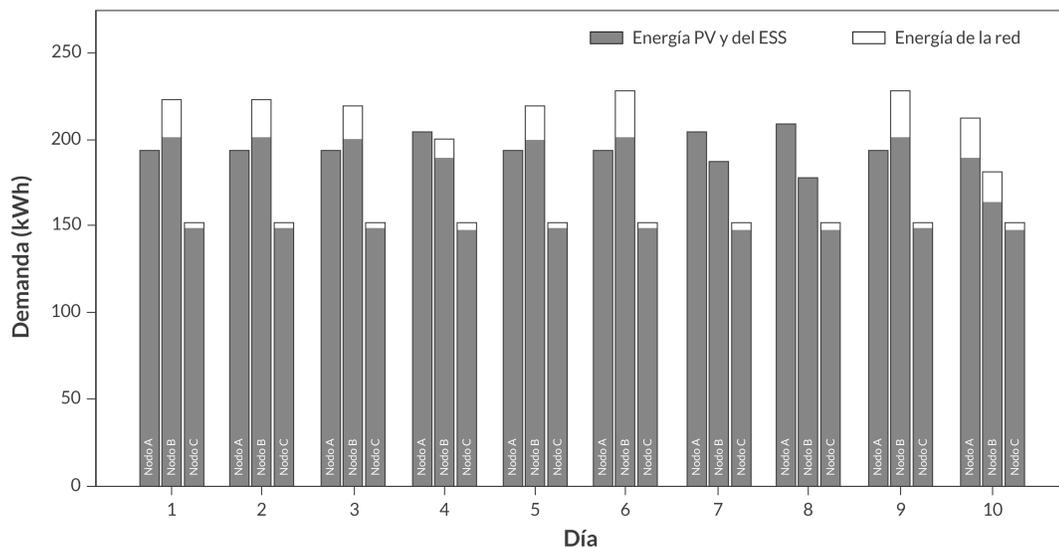


**Figura 4-1.:** Ubicación de las estaciones de carga para embarcaciones eléctricas

Para la ubicación de las estaciones se consideran reglas de poda para los nodos, donde se determina si la embarcación eléctrica puede recorrer la distancia entre dos nodos continuos y reglas de poda para las estaciones, la cual evalúa la configuración de instalación de cantidad

de paneles, capacidades de almacenamiento y potencias de carga. Cabe resaltar, que las embarcaciones realizan recorridos desde el nodo *A* hasta el nodo *C* y viceversa, con un nodo intermedio *B* para facilitar la carga energética en caso tal de que no puedan transportarse de un nodo *A* al *C*. Para la ubicación y el dimensionamiento de estaciones de carga, se aprecia un escenario base, donde el nodo *A* se encuentra a una distancia de  $110\text{km}$  del nodo *C*, en los  $55\text{km}$  se encuentra situado el nodo *B* como estación de carga, para facilitar la carga durante el trayecto. Esto se puede ver en la Figura 4-1. Así mismo, el nodo *A* y el nodo *B* son estaciones de carga.

Para el dimensionamiento de las estaciones de carga, el nodo *A* considera una instalación de 14 paneles solares, una instalación de  $130[\text{kWh}]$  de capacidad de almacenamiento y  $130[\text{kW}]$  para las potencias de carga. Para el nodo *B*, se consideran 14 paneles solares, una instalación de  $65[\text{kWh}]$  de capacidad de almacenamiento y  $130[\text{kW}]$  para las potencias de carga. Para el nodo *C*, se consideran 14 paneles solares, una instalación de  $65[\text{kWh}]$  de capacidad de almacenamiento y  $130[\text{kW}]$  para las potencias de carga. Este dimensionamiento para los 3 nodos tuvo un costo de  $269123[\text{USD}]$ , donde, aproximadamente el 83% hace referencia al costo de instalación de paneles solares, aproximadamente el 12% a los costos asociados a instalación de potencia y capacidad energética del respaldo de baterías y el 4,6% en energía comprada a la red [69].



**Figura 4-2.:** Energía tomada de la red, paneles y almacenamiento. Elaboración propia con base a la información encontrada en [69]

En la Figura 4-2 se muestran las cantidades energéticas tomadas en los nodos propuestos durante 10 días. Puede notarse como, para la minimización de los costos totales, la estación de carga evita comprar una mayor cantidad de energía a la red eléctrica y aprovecha la generación fotovoltaica para suministrar energía demandada y para almacenar parte de la

energía generada para posteriormente suministrarla. Además, se puede notar que muchas de las demandas energéticas son solicitadas en la estación intermedia (*nodoB*). Las estaciones de carga propuestas, representan estaciones de carga completamente dependientes de la generación fotovoltaica y del almacenamiento energético, lo que representa una alta sostenibilidad del sistema de transporte.

## 4.2. Ubicación y dimensionamiento óptimo de estaciones de carga de las motocicletas híbridas

En el marco de investigación del proyecto de movilidad sostenible de energética 2030, se implementó un método de optimización (MILP) para la ubicación óptima de las estaciones de carga de un sistema de transporte eléctrico multimodal. Por lo tanto, en esta sección se presenta el modelo reportado en el informe científico, Diseño y desarrollo - Sistema integrado de movilidad eléctrica multimodal (Moto+Bote+Estación) [69].

El objetivo del método es determinar la ubicación óptima de estaciones de carga para un sistema de transporte multimodal en una ciudad intermedia o ciudad pequeña en el territorio colombiano.

En el reporte científico del proyecto de energética 2030, realizan la minimización de la suma costos totales, particularmente, costos de inversión y costos anualizados de compra de energía a la red, para determinar el dimensionamiento y la ubicación óptima. En esta investigación se hace énfasis en el desarrollo para la ubicación de estaciones de carga. A continuación, se presenta el modelo de optimización presentado en [69].

La ecuación (4-1), muestra representación matemática de la minimización de costos totales. Las variables de decisión se describen como disponibilidad de la estación de carga  $x_j \in \{0, 1\}$ , cantidad de puntos de carga  $y_j$ , cantidad de paneles solares  $v_j$  y potencia requerida de la red  $w_{jt}$ . Para estas variables  $j \in M$  donde  $M$  son los puntos candidatos para instalar las estaciones de carga,  $t \in T$  representa los momentos en un día donde se distribuye energía a los usuarios que realizan peticiones de carga.

$$\underset{x_j, y_j, v_j, w_{jt}}{\text{minimizar}} \quad J = \sum_{j \in M} (x_j \cdot f_j + y_j \cdot k + v_j \cdot c) + \sum_{j \in M} \sum_{t \in T} w_{jt} \cdot g_j \cdot \phi \cdot \Delta \quad (4-1)$$

Sujeto a:

$$y_j \leq q_j \cdot x_j \quad \forall j \in M \quad (4-2)$$

La restricción (4-2) representa la cantidad máxima de puntos de carga  $q_j$  que se pueden instalar en una estación de carga.

$$y_j \cdot e \leq w_{jt} + v_j \cdot p_{jt} \quad \forall t \in T, \forall j \in M \quad (4-3)$$

La restricción (4-3) representa la cantidad de energía que se puede comprar a la red, donde  $e$  es la potencia de carga de la moto.

$$\beta_{ij} \leq u_{ij} \quad \forall i \in N, \forall j \in M \quad (4-4)$$

La restricción (4-4) indica que no se puede asignar un punto de acopio a una estación que no esté disponible donde  $\beta_{ij} \in \{0, 1\}$  y  $u_{ij} \in \{0, 1\}$  representan la atención de puntos de acopio.

$$\sum_{i \in N} \sum_{j \in M} h_{ij} \geq b \quad (4-5)$$

La restricción (4-5) representa la atención a un número de motos  $b$  según su necesidad de carga.

$$v_j \leq l_j \cdot x_j \quad \forall j \in M \quad (4-6)$$

La restricción (4-6) limita el área de los paneles solares respecto a la cantidad de paneles.

$$\sum_{i \in N} h_{ij} \leq y_j \cdot a_j \quad \forall j \in M \quad (4-7)$$

La restricción (4-7) asocia la cantidad de cargadores con la capacidad de atención de la estación.

$$h_{ij} \leq \beta_{ij} \cdot m_i \quad \forall i \in N, \forall j \in M \quad (4-8)$$

La restricción (4-8) no permite asignar motocicletas que no puedan ser atendidas por la estación de carga.

$$\sum_{j \in M} h_{ij} \leq m_i \quad \forall i \in N \quad (4-9)$$

La restricción (4-9) no permite que se atiendan motocicletas que estén ubicadas en un punto de acopio.



**Figura 4-3.:** Ubicación de estaciones y puntos de acopio para motocicletas híbridas

Para esta optimización, se consideró que la distancia máxima a la que una estación puede atender a un punto de acopio es de  $1km$ , esto para que los vehículos puedan acceder fácilmente y de manera rápida al servicio de carga.

Los resultados muestran que, para el sistema de transporte eléctrico, hay una cantidad de 4 estaciones de carga con 22 paneles solares y 10 puntos de carga y con un costo de 80,397, 89 [USD]

En la Figura 4-3 se muestra la ubicación de las estaciones de carga (círculos rojos), para un conjunto de punto de acopio (círculos azules) en un entorno urbano. Hay 3 puntos de acopio que tienen su propia estación de carga, el cuarto punto de acopio se encuentra a  $250 m$  de uno de los puntos de acopio con estación de carga y el quinto y sexto punto de acopio se encuentran a una distancia de  $800m$  y  $1km$  de la cuarta estación de carga respectivamente. Cabe resaltar, que en esta sección se muestran las ubicaciones óptimas y parte del dimensionamiento de la estación. Sin embargo, este dimensionamiento, no cuenta con una capacidad energética para para la red eléctrica. A continuación, se presenta el dimensionamiento de una estación de carga fotovoltaica para motocicletas híbridas con respaldo de baterías y conexión a la red eléctrica.

#### **Ubicación y dimensionamiento óptimo de estaciones de carga con respaldo de baterías y conexión a la red eléctrica**

El dimensionamiento óptimo de estaciones de carga permite encontrar las capacidades de operación que garantizan el suministro de energía demandada y la existencia del equilibrio

energético al interior de la estación, teniendo en cuenta la energía almacenada, comprada y vendida a la red. Algunos problemas a nivel de estación de carga se representan como altas demandas y una baja generación fotovoltaica por parte de la estación, si el sistema de almacenamiento no cuenta con la energía necesaria para suministrar la energía demandada, esta realizará compras a la red eléctrica lo que genera una reducción en el beneficio del operador de la estación. Para este caso, contar con las cantidades necesarias de generación fotovoltaica, almacenamiento y conexión a la red permite dar solución y reducir los problemas a nivel de estación. Dado que la solución de estos problemas está basada en simulación, se considerará un tiempo  $h$  de simulación en horas.

Para dar solución al problema, se define inicialmente a  $n$  como la cantidad de usuarios que realizan la petición de carga en el transcurso de un periodo de tiempo. También, se tiene en cuenta las motocicletas eléctricas donde sus variables  $V_m[h]$  y  $I_m[h]$  representan los vectores de capacidades de voltaje y corriente de las baterías de las motocicletas respectivamente. De esta manera, se puede definir la capacidad de carga nominal de la estación en términos de la cantidad de usuarios que realizan la petición y la capacidad de las baterías como  $E_{dem}[h] = (V_m[h].I_m)[h].n$ , esta capacidad es el valor de partida que representa la demanda energética por  $n$  usuarios en la estación de carga. Dado que en la estación se considera la intervención de la producción de energía mediante el aprovechamiento de energías renovables por medio de una planta solar fotovoltaica, se requiere garantizar el abastecimiento de energía para la operación de carga de la estación, por esto, se define  $P_{vmax}$  como la capacidad de potencia máxima de la planta fotovoltaica. Igualmente, se definen  $C_i^{pv}$  y  $C_o^{pv}$  como los costos de inversión para la construcción de la planta fotovoltaica y de operación para la producción de energía respectivamente. También, se considera que el problema pretende describir mediante el dimensionamiento de la estación de carga, cómo puede alcanzar a suplir la energía de los usuarios, por esto, se define  $P_v[h]$  como el vector de potencias fotovoltaicas programadas, que representa la energía que será entregada a cada uno de los usuarios desde la planta solar y  $P_{vnom}$  es la potencia nominal fotovoltaica la cual da una aproximación de cuanta energía fotovoltaica es necesaria en la instalación para que pueda suplir la energía demandada  $E_{dem}$ .

En este estudio, se considera el respaldo por un banco de baterías en inglés Battery Energy Storage Systems (BESS), que cumple con la función de almacenar y distribuir la energía en los instantes donde la irradiancia es mínima, además sirve para posibilitar la venta de la energía excedente a la red. Se define  $P_{bmax}$  como la potencia máxima de almacenamiento. Al igual que el sistema solar instalado, en este caso se consideran los costos de inversión  $C_i^b$ , los costos de operación  $C_o^b$  y los costos de inversión de la capacidad energética del BESS  $C_i^{Eb}$ . Estos costos permitirán dimensionar con cuánto respaldo de energía se contará cuando no sea posible inyectar energía solar fotovoltaica a los usuarios. Al tratarse de un banco de baterías, para prolongar su vida útil se debe definir la máxima profundidad de descarga permitida  $P_{fmax}$ , la mínima profundidad de descarga  $P_{fmin}$ , la eficiencia  $\eta_b$  y la capacidad normalizada  $Q_b$  del BESS.

Para los usuarios que realizan una petición en los instantes del transcurso del día, donde no hay producción de energía solar fotovoltaica, la operación de carga para las motos híbridas debe contar con parte de la cantidad total de energía instalada y almacenada para el BESS, para esto se describe la potencia nominal  $P_{\text{bnom}}$ , el vector de potencias medias extraídas  $P_{\text{b}}[h]$  almacenadas, la energía nominal  $E_{\text{bnom}}$  y la energía del BESS  $E_{\text{b}}$  de la cual harán uso los usuarios. También se considera que cuando hay baja demanda de usuarios o no hay demanda, la planta solar fotovoltaica realiza la carga del BESS, entonces para describir la dinámica del BESS se consideran la potencia de carga y de descarga de las baterías del sistema como  $P_{\text{c}}$  y  $P_{\text{dc}}$  respectivamente.

Además, es necesaria la conexión a la red eléctrica con el fin de suplir la demanda de energía, en especial cuando la energía solar y la extraída del BESS no sean suficientes para cubrir la demanda y los posibles excedentes donde puede existir baja demanda y existirá energía almacenada en el BESS la cual podría ser vendida a la red, para esto, se especifican  $C_{\text{cv}}^{\text{r}}$  e  $C_{\text{i}}^{\text{r}}$  como el costo de compra y venta de energía a la red y los costos de inversión relacionados a la conexión con la red respectivamente y  $P_{\text{rnom}}$  como la capacidad nominal de conexión a la red. Mediante estas variables se describe la interacción y el posible compromiso que puede recaer sobre el operador para mantener la utilidad de la estación y poder maximizar sus ganancias. Igualmente, se definen  $P_{\text{r}}[h]$  como el vector de potencias estimadas inyectadas a la red, si  $P_{\text{r}}[h] \geq 0$  (venta) o tomada de la red si  $P_{\text{r}}[h] \leq 0$  (compra).

Por otra parte, se define la potencia no suministrada como  $E_{\text{ns}}$  que representa el volumen de energía que no se entrega a los usuarios, esta variable depende de la energía demandada por los usuarios, la potencia media extraída, la potencia fotovoltaica programada y la potencia estimada, ya sea inyectada o extraída de la red, esto se representará de la siguiente manera  $E_{\text{ns}}(E_{\text{dem}}[h], P_{\text{b}}[h], P_{\text{v}}[h], P_{\text{r}}[v])$  también, se define su costo como  $C_{\text{f}}$ . De igual manera,  $P_{\text{ver}}[h]$  representa el vector de energía renovable vertida o la energía que se produce mediante la planta solar pero que no es consumida ni almacenada, esta variable depende de la potencia nominal fotovoltaica, la irradiancia y la potencia fotovoltaica programada  $P_{\text{ver}}[h](P_{\text{vnom}}, I_{\text{r}}[h], P_{\text{v}}[h])$  y  $C_{\text{h}}$  se define como el costo de la potencia de descarga. Para este análisis utilizamos datos de la irradiancia solar  $I_{\text{r}}[h]$  adquirida de The National Solar Radiation Database [64].

El objetivo principal de garantizar el suministro energético y aumentar el beneficio de la estación, es determinar el dimensionamiento óptimo de todos los componentes de la estación de carga. Por otra parte, generar un cumplimiento de carga óptimo por medio de los sistemas de producción de energía solar y de almacenamiento de energía y garantizar el despacho óptimo para la maximización de las utilidades de la estación, para que se maximicen las ganancias del operador de la estación. Por esta razón, la función objetivo busca minimizar la suma de los costos totales representados por los costos de inversión  $C_1(C_{\text{i}}^{\text{pv}}, P_{\text{vnom}}, C_{\text{i}}^{\text{b}}, C_{\text{i}}^{\text{Eb}}, P_{\text{bnom}}, E_{\text{bnom}}, C_{\text{i}}^{\text{r}}, P_{\text{rnom}})$ , los costos de operación y mantenimiento  $C_2(C_{\text{o}}^{\text{pv}}, P_{\text{vnom}}, C_{\text{o}}^{\text{b}}, P_{\text{bnom}})$ , costos de interrupción energética  $C_3(C_{\text{f}}, E_{\text{ns}})$ , costos de energía renovable vertida  $C_4(C_{\text{h}}, P_{\text{ver}}[h])$  y maximizar el beneficio del operador de la estación de

carga  $G(E_{\text{dem}}[h], E_{\text{ns}}, C_{\text{cv}}^r, P_r[h])$ .

### 4.2.1. Formulación del problema de optimización

El problema de optimización de esta investigación, descrito anteriormente, se modela por medio de la optimización matemática lineal entera mixta. Este método ejecuta una enumeración de soluciones alternativas de un problema de optimización lineal mixto de variables enteras  $b \in \{0, 1\}$ . Dado que el sistema cuenta con un sistema de respaldo de baterías para el almacenamiento, este no puede realizar la carga y la descarga simultánea de energía, por lo tanto, se propone relajar las restricciones de carga por medio de variables binarias.

Sean  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $C_3$  y  $C_4$  los costos totales a minimizar y sea  $G$  el beneficio del operador de la estación de carga y sea  $M$  el instante de tiempo en los cuales se realizan las peticiones. El problema de minimización restrictivo en el contexto de variables de decisiones enteras mixtas puede ser expresado por las siguientes ecuaciones y restricciones.

La Ecuación (4-10), representa la minimización de los costos totales y la maximización de los beneficios del operador de la estación de carga ( $J$ ). Las variables de decisión son

$$P_{\text{vnom}}, P_{\text{bnom}}, P_{\text{rnom}}, E_{\text{bnom}}, b \quad \underset{\text{minimizar}}{\quad} \quad J = \sum_{j \in M} (C_{1j} + C_{2j} + C_{3j} + C_{4j} - G_j) \quad (4-10)$$

sujeto a

$$C_1 = C_i^{\text{pv}} \cdot P_{\text{vnom}} + C_i^{\text{b}} \cdot P_{\text{bnom}} + C_i^{\text{Eb}} \cdot E_{\text{bnom}} + C_i^{\text{r}} \cdot P_{\text{rnom}} \quad (4-11)$$

$$C_2 = C_o^{\text{pv}} \cdot P_{\text{vnom}} + C_o^{\text{b}} \cdot P_{\text{bnom}} \quad (4-12)$$

$$C_3 = C_f \cdot E_{\text{ns}} \quad (4-13)$$

$$C_4 = C_h \cdot P_{\text{ver}}[h] \quad (4-14)$$

$$G = p_u \cdot (E_{\text{dem}}[h] - E_{\text{ns}}) + C_{\text{cv}}^r \cdot P_r[h] \quad (4-15)$$

Las restricciones (4-11), (4-12), (4-13) y (4-14) se relacionan con los costos totales de inversión, operación, costos de energía no suministrada y costos de energía renovable vertida o perdida. Asimismo, se describe la restricción (4-15) como la utilidad o beneficio de la

estación de carga para que el operador mantenga un estado estable del funcionamiento de la estación y maximice sus ganancias. Cabe resaltar que el parámetro  $p_u$  es el precio de la energía vendida a los vehículos.

$$\vec{0} \leq P_v[h] \quad (4-16)$$

$$P_v[h] \leq P_{vnom} \cdot I_r[h] \quad (4-17)$$

$$0 \leq P_{vnom} \quad (4-18)$$

Las restricciones (4-16), (4-17) y (4-18) muestra como la potencia generada por los paneles solares fotovoltaicos no pueden sobrepasar de su operación nominal, donde  $I_r$  es la irradiancia. También, (4-16) y (4-18) se consideran como restricciones de no negatividad, tanto para la potencia generada como para la potencia nominal de operación.

$$0 \leq P_c \quad (4-19)$$

$$0 \leq P_{dc} \quad (4-20)$$

$$P_c \leq P_{bnom} \quad (4-21)$$

$$P_{dc} \leq P_{bnom} \quad (4-22)$$

$$0 \leq P_{bnom} \quad (4-23)$$

$$P_b[h] == P_{dc} - P_c \quad (4-24)$$

$$-b \cdot M \leq P_c \quad (4-25)$$

$$-(1 - b) \cdot M \leq P_{dc} \quad (4-26)$$

$$P_c \leq b \cdot M \quad (4-27)$$

$$P_{dc} \leq (1 - b) \cdot M \quad (4-28)$$

$$E(0) = (1 - P_{fmin}) \cdot E_{bnom} \quad (4-29)$$

$$\sum_{i=1}^{T_s} E(i) = E(i - 1) + \eta_b \cdot P_c(i) - (1/\eta_b) \cdot P_{dc}(i) \quad (4-30)$$

$$(1 - P_{fmax}) \cdot E_{bnom} \leq E \quad (4-31)$$

$$E \leq (1 - P_{fmin}) \cdot E_{bnom} \quad (4-32)$$

$$(P_c + P_{dc}) \leq Q_b \cdot E_{bnom} \quad (4-33)$$

Las restricciones desde (4-19) hasta la (4-33) hacen referencia al sistema BESS. Las ecuaciones (4-19), (4-20), (4-21), (4-22) y (4-23), representan los límites de operación y la no negatividad de las restricciones de carga y descarga del sistema de almacenamiento. Para

el desarrollo de este se debe tener en cuenta que las baterías de almacenamiento no pueden cargar y descargar a la misma vez, por lo que se hizo necesario restringir las variables  $P_c$  y  $P_{dc}$  mediante una variable auxiliar para relajar la restricción de carga y descarga simultánea, sea  $x = P_c$  y sea  $y = P_{dc}$  entonces la para relajar la restricción se tiene que  $x \cdot y == 0$ , para esto se utiliza una restricción complementaria más fuerte tal que  $-b \cdot M \leq x \leq b \cdot M$  y  $-(1-b) \cdot M \leq y \leq (1-b) \cdot M$  siendo  $M$  un numero grande positivo y  $b$  una variable de tipo booleana como se puede ver en las restricciones (4-24), (4-25), (4-26), (4-27) y (4-28). Así mismo, se describen las restricciones (4-29) y (4-30) como la energía del BESS entregada a los usuarios, donde  $T_s$  es el tiempo de simulación, la cual depende de las tasas de carga  $\eta_b$  y descarga  $1/\eta_b$ , y las profundidades máximas y mínimas de carga de las baterías que describirán en que momentos y sobre que límites deberán operar. Las ecuaciones (4-31), (4-32) y (4-33) representan los límites en los cuales debe de estar la energía del sistema de almacenamiento, teniendo en cuenta las capacidades nominales a instalar y las profundidades de descarga mínima y máxima. Además, se muestra que las potencias de carga y de descarga no deben de sobrepasar las capacidades energéticas de instalación de la estación.

$$-P_{rnom} \leq P_r[h] \quad (4-34)$$

$$P_r[h] \leq P_{rnom} \quad (4-35)$$

$$0 \leq P_{rnom} \quad (4-36)$$

Las restricciones desde (4-34) hasta la (4-36) describen los aportes y valores nominales entre los cuales debe estar la potencia estimada, ya sea la vendida o la comprada a la red y la no negatividad de la capacidad nominal.

$$0 \leq P_{ver}[h] \quad (4-37)$$

$$P_{ver}[h] = (P_{vnom} \cdot I_r[h] - P_v[h]) \quad (4-38)$$

$$0 \leq E_{ns} \quad (4-39)$$

$$E_{ns} = E_{dem}[h] - P_b[h] - P_v[h] + P_r[h] \quad (4-40)$$

Las restricciones desde (4-37) hasta la (4-40) se refieren a cuál es la energía vertida o que se pierde desde la producción de la planta fotovoltaica, también, se describe la restricción  $E_{ns}$  la cual representa la energía no suplida por el sistema, es decir la diferencia de la energía demandada y la energía suministrada por la planta solar, por el BESS y por la red.

Para el desarrollo de este método, se implementa una simulación para encontrar la cantidad de energía a instalar en la estación de carga. El algoritmo basado en MILP se implementó en Python (Python 3.8.5) y se ejecutó en un ordenador con un procesador Intel Core i5 8th y con sistema operativo Windows de 64 bits.

### 4.2.2. Resultados

En esta sección se presenta los resultados de la solución del método MILP para el dimensionamiento de las estaciones de carga. Como insumo para este desarrollo, se utilizó un perfil base de peticiones de usuarios durante un periodo de tiempo de 1 día, 5 días y 1 mes. Se extrajo un perfil de irradiancia como se presentó en el Capítulo 3. El objetivo principal, es que las demandas se cubran en su totalidad por el sistema de carga, se minimicen los costos, se maximice la ganancia del operador y se encuentren las dimensiones energéticas de la estación de carga.

Se define la demanda por cada petición como  $E_{\text{dem}}[h] = (V_m[h] \cdot I_m[h]) \cdot n$ , en esta simulación se considera que las motocicletas híbridas tienen una batería con una capacidad máxima de  $V_m[0] = 74[V]$  y  $I_m[0] = 25[Ah]$ . Una aproximación a la demanda total por cada petición realizada, se representa como la cantidad de peticiones  $n$  en el transcurso de un periodo de tiempo por la capacidad máxima de la baterías de los usuarios ( $E_{\text{dem}}[h] = n \cdot 3700[Wh]$ ).

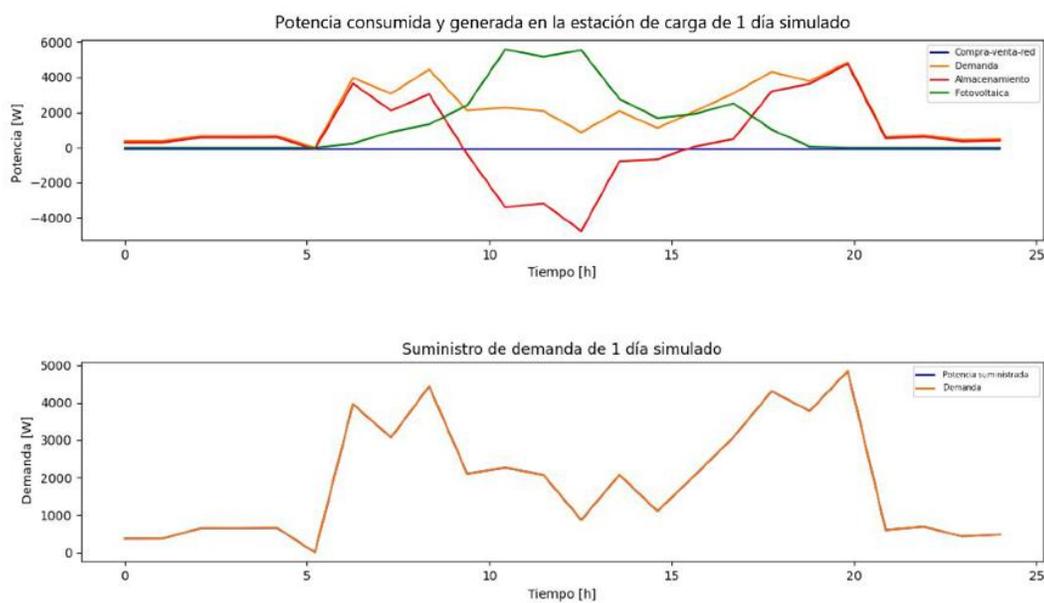
De acuerdo a cotizaciones realizadas en el marco del proyecto de energética 2030 se estimaron los costos relacionados con el desarrollo de la estación. En la Tabla 4-1 se presentan los costos y los parámetros de la optimización.

**Tabla 4-1.:** Parámetros de la formulación del problema de optimización

<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>	<i>Unidades</i>
$C_i^{\text{pv}}$	0.0996	[USD/W]
$C_i^{\text{r}}$	22	[USD/W]
$C_i^{\text{b}}$	0.0420	[USD/W]
$C_i^{\text{Eb}}$	0.0420	[USD/W]
$C_o^{\text{pv}}$	4.7e-07	[USD/W]
$C_o^{\text{b}}$	0.0420	[USD/W]
$C_f$	0.0022	[USD/W]
$C_h$	0.0022	[USD/W]
$C_{\text{cv}}^{\text{r}}$	0.0440	[USD/W]
$p_u$	0.11	[USD/W]
$\eta_b$	0.9	-
$M$	50000	-

La Figura 4-4 muestra el balance energético y la demanda suministrada para un tiempo de simulación de 1 día. Con base en el perfil de demanda, la estación debe suministrar la cantidad de energía de tal forma que minimice los costos totales y maximice el beneficio del usuario de la estación de carga. Cabe notar como entre las 0 horas y las 5 horas, existe una baja demanda que se suministra del sistema de almacenamiento, a partir de las 5 horas hasta las 10 horas, comienza a existir una mayor demanda de usuarios, por lo que el sistema

de almacenamiento y la energía fotovoltaica generada suministran las cantidades energéticas necesarias. Entre las 10 horas y las 15 horas, hay una demanda media de carga, la cual se puede suministrar con la energía fotovoltaica generada y a su vez realizar la carga del respaldo energético de baterías. Debido a la alta demanda de transporte en horas pico, entre las 15 horas y las 20 horas aumentan las demandas de carga a la estación, esta es suministrada por medio del sistema de respaldo de baterías, finalmente entre las 20 horas y las 30 horas al ser un horario de baja demanda de transporte, las demandas de carga son bajas, estas se pueden suministrar con el sistema de almacenamiento energético. En esta instancia, la función objetivo hace referencia a la minimización de costos totales, para este caso, la energía comprada a la red es mínima y a lo largo del día no se efectúan ventas de energía a la red, esto se refiere a la restricción (4-40), esta indica que el costo del balance energético o el costo de la diferencia entre la demanda y el suministro debe ser mínimo, es se traduce en el cumplimiento total del despacho de energía para satisfacer las demandas de cargas de los usuarios.



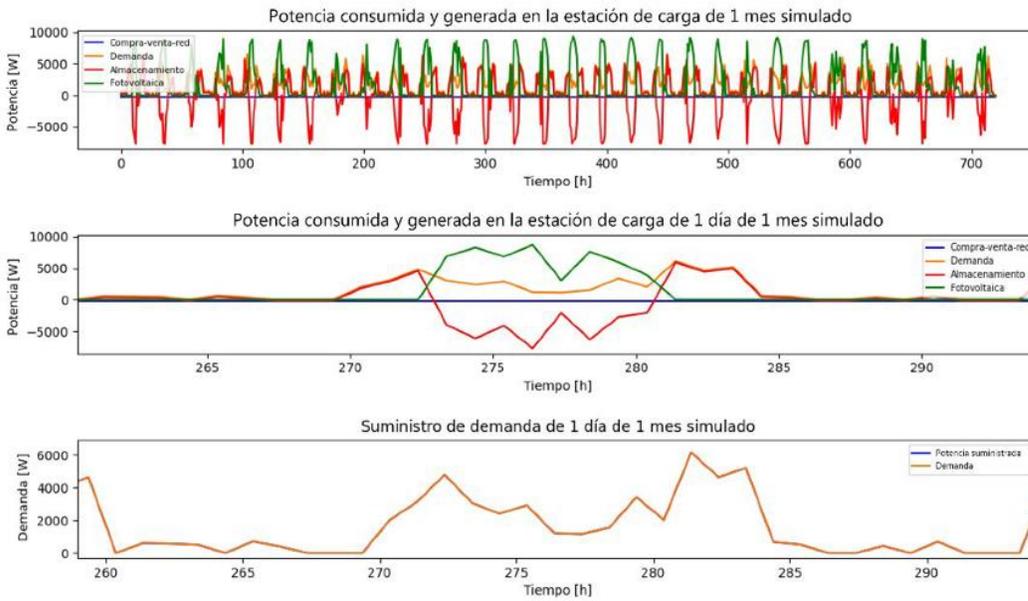
**Figura 4-4.:** Perfil de demanda y balance energético para 1 día

En la Tabla 4-2 se muestra los valores óptimos encontrados. Para una simulación de 1 día se encuentra que, para suministrar la demanda solicitada, la estación de carga debe contar con un sistema de respaldo de baterías con una potencia nominal de  $4476,26[W]$ , una cantidad energética de  $27318,70[Wh]$  y una capacidad de  $10000[W]$  para la conexión a la red eléctrica. Esta instalación comprende un costo de  $221966,45USD$  entre inversión, mantenimiento, operación, interrupción energética y energía vertida, durante 1 día. Por otra parte, se encuentra que el beneficio máximo que puede adquirir el operador de la estación de carga durante 1 día, bajo las condiciones de demanda, costos y energía instalada es de

**Tabla 4-2.:** Dimensiones óptimas encontradas para una operación de 1 día

Potencia del BESS total instalada ( $P_{bnom}[W]$ )	Potencia fotovoltaica total instalada ( $P_{vnom}[W]$ )	Capacidad total de la red instalada ( $P_{rnom}[W]$ )	Energía total del BESS instalada ( $E_{bnom}[Wh]$ )	Costos [ $USD$ ]	Beneficio [ $USD$ ]
4476.26	6316.99	10000	27318.70	221966.45	141.95

141,95USD. Con una operación de aproximadamente 4.2 años, se recuperan la inversión inicial del sistema. Cabe resaltar que no se están considerando costos de arriendo, personal y seguros.



**Figura 4-5.:** Perfil de demanda y balance energético para 1 mes

**Tabla 4-3.:** Dimensiones óptimas encontradas para una operación de 1 mes

Potencia del BESS total instalada ( $P_{bnom}[W]$ )	Potencia fotovoltaica total instalada ( $P_{vnom}[W]$ )	Capacidad total de la red instalada ( $P_{rnom}[W]$ )	Energía total del BESS instalada ( $E_{bnom}[Wh]$ )	Costos [ $USD$ ]	Beneficio [ $USD$ ]
7706.82	10000	10000	80302.81	225524.05	9890.59

La Figura 4-5 muestra el balance energético y el suministro de demandas en la estación de

carga para un tiempo de simulación de 1 mes. La operación del despacho de energía para la minimización de costos y maximización del beneficio, es similar a la operación de 1 día de simulación, entre las horas 275 y 280, la generación fotovoltaica tiene una disminución, por lo que se ve afectada la carga del sistema de almacenamiento energético, sin embargo, no es un impedimento para que el sistema cuenta con el respaldo para el suministro de energía durante la noche. La Tabla 4-3 muestra las capacidades energéticas instaladas, el beneficio y los costos para 1 mes de simulación, la instalación de potencia y la energía del sistema de almacenamiento son de 7706,82[w] y 80302,81[Wh] respectivamente. Además, para 1 mes de operación, la estación de carga cuenta con un sistema de generación fotovoltaica con una potencia nominal de 10000[w]. También, los costos totales son 3557USD más que los costos de 1 día de operación. Bajo estas condiciones de instalación, el operador de la estación de carga podrá recibir un beneficio de 159969,76USD y obteniendo una tasa de rendimiento de la estación del 4,38 %.

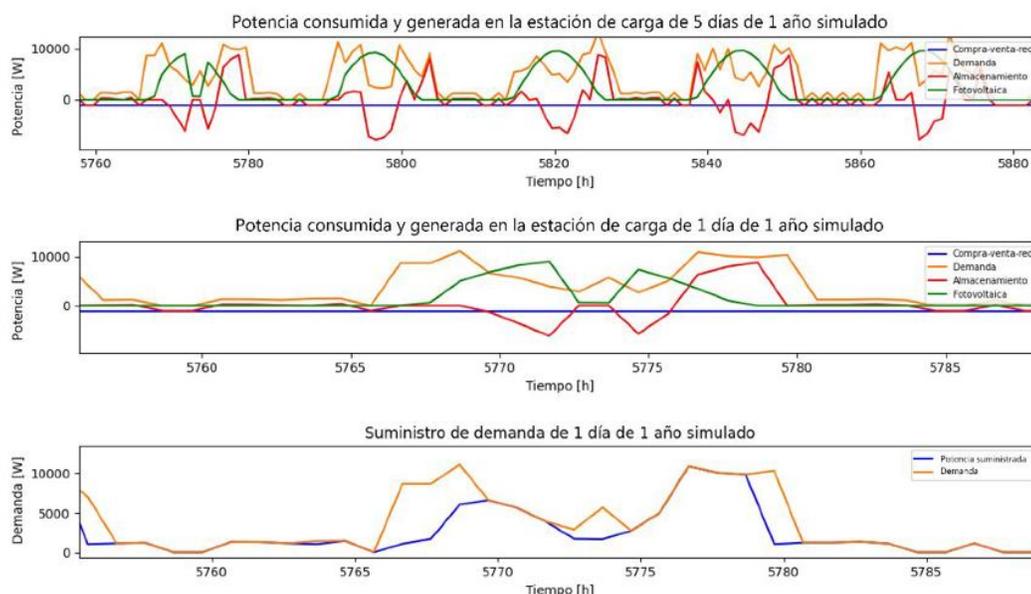


Figura 4-6.: Perfil de demanda y balance energético para 1 año

Tabla 4-4.: Dimensiones óptimas encontradas para el transcurso de 1 año

Potencia del BESS total instalada ( $P_{bnom}[W]$ )	Potencia fotovoltaica total instalada ( $P_{vnom}[W]$ )	Capacidad total de la red instalada ( $P_{rnom}[W]$ )	Energía total del BESS instalada ( $E_{bnom}[Wh]$ )	Costos [USD]	Beneficio [USD]
38798.406	12000	63317.176	525508.843	1416438.121	605030.970

La Figura 4-6 muestra los resultados de la optimización en un tiempo de simulación de 1 año. Para 1 año de simulación, no se alcanza a notar detalladamente las dinámicas respecto a la demanda, el almacenamiento, la red y la generación fotovoltaica, por esto, se realiza un acercamiento a 5 días del año simulado. Se puede ver como la demanda no se suministra en su totalidad. Entre las horas 5770 y 5775 los datos de generación presentan una disminución en la generación lo que impide que la batería se cargue en ese intervalo de tiempo y no alcance a suministrar la demanda. Una de las restricciones del sistema representa la cantidad de energía que no es suministrada al usuario, donde su costo es un objetivo a minimizar. A pesar de que, esta restricción representa el cumplimiento del servicio de carga al usuario al minimizar su costo, el sistema prefiere, no suministrar la totalidad de la demanda con el fin de no incrementar los costos al comprar energía a la red eléctrica. La Tabla 4-4 muestra que el costo total es de  $1416438,121[USD]$ , el beneficio es de  $605030,970[USD]$ , por lo tanto, la tasa de rendimiento es aproximadamente del 42,71 %. Teniendo en cuenta que no se alcanza a suministrar la demanda en 1 año de simulación, son necesarias capacidades de instalación mayores para el sistema de generación, de almacenamiento y una disminución en el costo de compra a la red. Un sistema con mayores capacidades de instalación permite el funcionamiento óptimo y el suministro total de las demandas aumentando el beneficio del operador de la estación de carga, sin embargo, esto aumentaría los costos.

### 4.3. Resumen

En esta sección se presentó la definición formal del problema de localización y dimensionamiento de estaciones de carga para embarcaciones eléctricas y motocicletas híbridas. Los métodos de solución seleccionados son el algoritmo de ramificación y poda para embarcaciones y la programación lineal entera mixta para motocicletas híbridas, los experimentos realizados y los principales resultados. El método seleccionado para la localización y el dimensionamiento de estaciones de carga para embarcaciones eléctricas, consiste en una estructura de árbol, donde cada rama del árbol representa una posible solución al problema de optimización, si la posible solución no cumple con la función objetivo se descarta (poda), en este caso, cada rama representaba las cantidades energéticas a instalar y los nodos de instalación. Se localizaron 3 estaciones de carga en un entorno fluvial propuesto y se determinó que las estaciones más lejanas están a una distancia de 110 km con una estación intermedia a 55 km. También, cada estación contaba con una capacidad de almacenamiento de 130 [kWh], 65 [kWh] y 65[kWh], cada una contaba con un arreglo de 14 paneles solares y una capacidad de potencias de carga de 130 [kW], el costo final de estas instalaciones fue de 269123 [USD]. El método de solución seleccionado para la localización y el dimensionamiento de las motocicletas híbridas consiste en la optimización matemática lineal entera mixta el cual considera tanto valores enteros, como binarios para la carga y descarga del sistema de almacenamiento, este sistema es capaz de tomar decisiones óptimas, evaluando la relación rigurosa del modelado y las funciones lineales. De esta forma, para una cantidad de 6 puntos de acopio,

---

se localizaron 4 estaciones de carga a no más de 1 km de distancia para que las motocicletas puedan acceder de forma fácil y rápida al servicio de carga. También, se realizaron simulaciones para la operación de la estación en 1 día, 1 mes y 1 año y se analizó la cantidad energética a instalar por cada componente de la estación (almacenamiento, generación fotovoltaica y conexión a la red), minimizando los costos y maximizando el beneficio del operador. También, se mostraron los costos por cada tiempo de simulación y se consideran los beneficios del operador de la estación bajo las condiciones de instalación y el tiempo de operación, los costos para una operación de 1 año son de 1416438 [USD], con un beneficio de 605030 [USD] y una tasa de rendimiento de 42,71 % por cada estación de carga localizada. La estación de carga, cuenta con sistema de generación, de almacenamiento y de conexión a la red, es necesario realizar la distribución de energía de tal forma que el beneficio del operador aumente y se suministre la energía demandada. Dado esto, es necesario determinar la operación óptima de tal forma que la estación pueda comprar, generar y disponer de la energía del almacenamiento para suministrar la demanda y que el beneficio no se vea afectado por la compra a la red eléctrica en momentos donde no exista generación, ni energía almacenada. En el siguiente capítulo se presenta la gestión óptima del despacho energético.

## 5. Sistema de toma de decisiones para el despacho óptimo de energía

Al considerar un sistema de transporte eléctrico multimodal sostenible y los actores relacionados a su operación, se considera la estación de carga, la cual presta un servicio energético para la carga de vehículos eléctricos. En general, las peticiones de carga de los usuarios realizadas al operador a cargo de una estación, se describen en términos de la energía demandada, esta energía debe ser suministrada desde la estación de carga compuesta por un sistema solar fotovoltaico, un sistema de respaldo de almacenamiento de energía y la conexión a la red eléctrica. Por lo tanto, el operador de una estación de carga de vehículos eléctricos tiene bajo su responsabilidad la gestión de los recursos energéticos con el objetivo de suministrar la energía necesaria a los usuarios que se dirigen con su vehículo eléctrico a la estación de carga. En este capítulo se aborda el problema de la gestión de transporte y asignación de puntos de carga para vehículos híbridos y eléctricos que realizan una petición a la estación de carga, por medio de una formulación lineal entera mixta (MILP) al tratar variables reales y variables binarias. También, se plantea el problema de optimización del despacho de energía en las estaciones de carga solares fotovoltaicas. Este problema de optimización está basado en la teoría de control predictivo basado en modelo (MPC) y la programación cuadrática (QP) donde se desean controlar variables futuras respecto a un horizonte de predicción.

### 5.1. Gestión de transporte

En el desarrollo del sistema de transporte eléctrico multimodal a nivel de estación de carga, se contemplan problemas relacionados con la gestión y la operación controlada de carga, con los tiempos de espera prolongados debido a la cantidad limitada de puntos de carga, la alta demanda energética y las congestiones al ingreso de la estación. Debido a esto, es esencial considerar un sistema de control capaz de asignar de forma óptima y ordenada los puntos de carga dependiendo de las peticiones realizadas y que pueda minimizar los tiempos de espera o las colas generadas al ingreso de la estación, con el objetivo principal de suministrar la mayor cantidad de energía a los usuarios sin alcanzar el desabastecimiento en la estación de carga. A continuación, se presenta el desarrollo del problema de optimización reportado en el informe científico llamado, Estado del arte y marco teórico - Modelos económicos aplicables a los nodos prosumidores de la red eléctrica [72] del proyecto de movilidad sostenible de energética 2030 el cual fue un desarrollo propio para esta tesis.

Se define a  $n$  como la cantidad de vehículos del sistema de transporte. El vector  $v$  es una cadena de caracteres de dimensión  $(1 \times n)$  que representa el índice de cada vehículo considerado en el sistema, como se muestra en la ecuación (5-1). Sea  $m$  la cantidad de puntos de carga del sistema de transporte y el vector  $p$  una cadena de caracteres dimensión  $(1 \times m)$  que representa el índice de cada punto de carga del sistema, se puede ver en la ecuación (5-2). El vector  $d$  mostrado en la (5-3) tiene entradas binarias ( $d_i \in [0, 1]$ ), es de tamaño  $(1 \times n)$  y representa la demanda de peticiones realizadas por los vehículos  $v_i$  a las estaciones de carga, donde  $d_i = 0$  indica que el vehículo  $v_i$  no ha realizado una solicitud o petición de carga a la estación, por el contrario, si  $d_i = 1$  indica que el vehículo  $v_i$  está realizando un solicitud o petición de carga a la estación donde  $i \in n$  y  $j \in m$ . En la ecuación (5-4) se define el vector  $e$  como una cadena de número enteros de tamaño  $(1 \times n)$  donde cada entrada  $e_i$  indica la cantidad de energía o estado de carga en el que se encuentran los vehículos  $v_i$ .

$$v = [v_1, v_2, \dots, v_i, \dots, v_n]; \quad (5-1)$$

$$p = [p_1, p_2, \dots, p_j, \dots, p_m]; \quad (5-2)$$

$$d = [d_1, d_2, \dots, d_i, \dots, d_n] \quad (5-3)$$

$$e = [e_1, e_2, \dots, e_i, \dots, e_n] \quad (5-4)$$

El vector  $c_p$  mostrado en la (5-5) tiene entradas binarias ( $c_{pj}^{v_i} \in [0, 1]$ ) de tamaño  $(1 \times nm)$ , indica en que punto de carga  $p_j$  se encuentran los vehículos  $v_i$ , si  $c_{pj}^{v_i} = 0$  representa que el vehículo  $v_i$  no se encuentra en el punto de carga  $p_j$ , por el contrario, si  $c_{pj}^{v_i} = 1$  indica que el vehículo  $v_i$  se encuentra en el punto de carga  $p_j$  para su respectiva carga. En la ecuación (5-6), el vector  $s$  tiene entradas binarias ( $s_i \in [0, 1]$ ), es de tamaño  $(1 \times n)$  y representa las colas o congestiones al ingreso de las estaciones de carga o los vehículos que no se han asignado a un punto de carga pero han realizado una petición de carga, si  $s_i = 0$  indica que el vehículo  $v_i$  ha realizado una solicitud o petición de carga  $d_i$  y se le ha asignado un punto de carga  $p_j$ , por el contrario, si  $s_i = 1$  indica que el vehículo  $v_i$  ha realizado una solicitud o petición de carga  $d_i$  pero no se le ha asignado un punto de carga  $p_j$ . En la ecuación (5-7), el vector  $k$  tiene entradas binarias ( $k \in [0, 1]$ ), es de tamaño  $(1 \times nm)$  verifica que los vehículos  $v_i$  estén en su respectivo punto de carga  $p_j$ , si  $k_{j,i} = 0$  verifica que el vehículo  $v_i$  no se encuentra en la estación  $p_j$ , por el contrario, si  $k_{j,i} = 1$  representa que el vehículo  $v_i$  se encuentra en la estación  $p_j$ .

$$c_p = [c_{p1}^{v_1}, \dots, c_{p1}^{v_n}, \dots, c_{pj}^{v_i}, \dots, c_{pm}^{v_1}, \dots, c_{pm}^{v_n}] \quad (5-5)$$

$$s = [s_1, s_2, \dots, s_i, \dots, s_n] \quad (5-6)$$

$$k = [k_{1,1}, \dots, k_{1,n}, \dots, K_{j,i}, \dots, k_{m,1}, \dots, k_{m,n}] \quad (5-7)$$

La ecuación (5-8) define el modelo lineal de asignación de puntos de carga  $p_j$  a vehículos  $v_i$ . Principalmente, un vehículo  $v_i$  realiza una petición de carga  $d_i = 1$  a la estación de carga. La estación puede asignar un punto de carga  $p_j$  al vehículo, desde que tenga puntos de carga disponibles. En caso tal de que la estación no tenga puntos de carga disponibles, al vehículo  $v_i$  no se le será asignado un punto de carga, esto significa que  $c_{pj}^{v_i} = 0$ . De esta forma, el modelo asigna el vehículo  $v_i$  a una cola de espera  $s_i = 1$  para ser atendido. La matriz  $A_1$  es una matriz con entradas binarias de tamaño  $(n \times nm)$  compuesta por matrices identidad como se muestra en la ecuación (5-9), esta permite la asignación de puntos de carga para cada vehículo.

Sin embargo, para que se lleve a cabo una asignación óptima de puntos de carga a vehículos, es necesario implementar un modelo de optimización que tenga en cuenta variables binarias.

$$A_1 c_p + s = d \quad (5-8)$$

$$A_1 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \dots & 1 & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & & & \vdots & \ddots & \\ 0 & 0 & 1 & \dots & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (5-9)$$

La programación lineal entera mixta está basada en métodos de ramificación y acotamiento, donde el espacio de variables enteras se divide dando lugar a subproblemas lineales que se resuelven en diferentes nodos. Por lo general, MILP es un método que considera modelos lineales y variables enteras y binarias [30]. Su formulación estándar se describe en la ecuación (5-10). Donde  $x$  y  $y$  son los vectores de variables enteras y binarias de optimización respectivamente. Las matrices  $\mathbf{c}$  y  $\mathbf{d}$  se utilizan para definir una función objetivo lineal general y las matrices  $\mathbf{A}$  y  $\mathbf{B}$  se utilizan para definir las restricciones lineales.

$$\begin{aligned} \underset{x,y}{\text{minimizar}} \quad & J = \mathbf{c}^T x + \mathbf{d}^T y \\ \text{sujeto a} \quad & Ax + By \leq b, \\ & x \in Z. \\ & y \in [0, 1]. \end{aligned} \quad (5-10)$$

Al considerar un modelo lineal con variables binarias, se define el método MILP donde la función objetivo es la minimización de la sumatoria de las entradas del vector  $s$  como función de costo  $J$ , esto se muestra en la ecuación (5-11). El objetivo principal es minimizar la cola de espera en los puntos de carga. La variable de decisión es  $c_p$  que modifica la asignación de puntos de carga a los vehículos.

$$J = \sum_{i \in n} (s_i) \quad (5-11)$$

Por lo tanto, la formulación MILP queda descrita en la ecuación (5-12). La restricción  $A_1 c_p + s = d$  permite asignar vehículos a los puntos de carga dispuestos en el sistema multimodal, cabe resaltar que esta restricción es el mismo modelo lineal de asignación de puntos de carga. Sin embargo, existe la posibilidad de que a dos vehículos se le asignen un mismo punto de carga, lo cual no puede ser posible.

Por esto, se define la segunda restricción  $A_2 c_p \leq z$ , que depende del vector  $z$  donde todas sus entradas son iguales a 1, con dimensión  $(1 \times m)$  y la matriz  $A_2$  es una matriz con entradas binarias  $A_{2 \times m \times nm} \in [0, 1]$  de tamaño  $(m \times nm)$  el producto de esta matriz con  $c_p$  asigna a un vehículo un solo punto de carga, de esta forma, se evita que dos vehículos hagan uso de un mismo punto de carga. La restricción  $A_3 c_p = k$  depende de la matriz  $A_3$  es una matriz con entradas binarias  $A_{3 \times nm \times nm} \in [0, 1]$ , de tamaño  $(nm \times nm)$  y de  $k$  donde  $k \in [0, 1]$ , esta restricción verifica que un vehículo esté en el punto de carga asignado y que no pertenezca a 2 puntos de carga diferentes.

$$\begin{aligned} \underset{c_p}{\text{minimizar}} \quad & J = \sum_{i \in n} (s_i) \\ \text{sujeto a} \quad & A_1 c_p + s = d, \\ & A_2 c_p \leq z, \\ & A_3 c_p = k. \end{aligned} \quad (5-12)$$

En primera instancia, se consideran una cantidad de 4 vehículos ( $v = [v_1, v_2, v_3, v_4]$ ), cada una con un estado de carga porcentual ( $e = [1110[W], 1850[W], 2220[W], 2590[W]]$ ). Para este escenario se considera una cantidad de 3 puntos de carga ( $p = [p_1, p_2, p_3]$ );, los cuales carga una cantidad de potencia que, durante una hora, entregaría la capacidad completa de una batería. Por otra parte, al considerar que cada vehículo no se encuentra en el 100% de la carga  $3700[W]$ , los 4 vehículos están realizando peticiones de carga de forma simultánea ( $d = [1, 1, 1, 1]$ ).

## Resultados

En el tiempo  $t = 0$ , los vehículos  $v_1, v_2, v_3$  y  $v_4$  se encuentran realizando un solicitud de carga por lo que ( $d = [1, 1, 1, 1]$ ), dado que la estación de carga cuenta con 3 puntos de carga, la

estación toma la decisión en orden de petición para programarle el punto de carga al primero vehículo. En este caso, los primeros 3 vehículos que realizaron la petición de carga fueron  $v_1$ ,  $v_2$  y  $v_3$ , de esta forma los puntos de carga son asignados de la siguiente manera, a  $v_1$  se le asigna el punto de carga  $p_1$ , a  $v_2$  se le asigna el punto de carga  $p_3$  y a  $v_4$  se le asigna el punto de carga  $p_2$ . Además, la cantidad de energía de los vehículos indica la cantidad de tiempo de carga, a  $v_1$  se le asignó la carga desde  $t = 0s$  hasta  $t = 2520s$ , en este intervalo de tiempo,  $v_1$  lleva a cabo el servicio de carga para alcanzar el estado máximo de carga. Igualmente, a  $v_2$  se le asigna un tiempo de carga de  $1800s$  y a  $v_3$  un tiempo de carga de  $1440s$ . Para  $v_4$ , dado que no hay más puntos de carga para asignar, este es asignado a la cola de espera  $s$ , hasta que uno de los tres vehículos asignados al servicio de carga, desocupen un punto de carga. Lo esperado es que en el mínimo tiempo de carga entre  $v_1$ ,  $v_2$  y  $v_3$  se lleve a cabo la asignación de un punto de carga a  $v_4$  esto se puede ver en la Tabla 5-1.

**Tabla 5-1.:** Resultados para  $t$  igual a 0 segundos.

$v$	$C[w]$	$d$	$t_i[s]$	$t_f[s]$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$s$
$v_1$	1110	1	0	2520	x	-	-	-
$v_2$	1850	1	0	1800	-	-	x	-
$v_3$	2220	1	0	1440	-	x	-	-
$v_4$	2590	1	-	-	-	-	-	x

Dado que  $v_3$  tiene el menor tiempo de carga, en el tiempo  $t = 1440s$ ,  $v_3$  finaliza su proceso de carga y por lo tanto,  $p_2$  pasa de un estado ocupado a disponible y es asignado a los vehículos que están en la cola a la espera de un servicio de carga. El vehículo  $v_4$  se encontraba en estado de espera, por lo tanto, la estación de carga asigna el punto de carga  $p_2$  a  $v_4$  con un intervalo de tiempo de  $1440s$  hasta  $2520s$ . Al transcurrir 1440 segundos la energía de  $v_1$  y  $v_2$  ha aumentado como lo muestra la Tabla 5-2.

**Tabla 5-2.:** Resultados para  $t$  igual a 1440 segundos.

$v$	$C[w]$	$d$	$t_i[s]$	$t_f[s]$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$s$
$v_1$	2590	1	0	2520	x	-	-	-
$v_2$	3330	1	0	1800	-	-	x	-
$v_3$	3700	0	0	0	-	-	-	-
$v_4$	2590	1	1440	2520	-	x	-	-

La Tabla 5-3, muestra como en  $t = 1800s$ ,  $v_2$  alcanza su carga máxima liberando  $p_3$ . Sin embargo, no hay más vehículos en estado de espera y los puntos de carga libres estarán disponibles ante una nueva petición de carga. Los vehículos  $v_1$  y  $v_4$  continúan con el proceso de carga hasta el tiempo final donde llegaron a su estado de carga máximo ( $t = 2520s$ ).

**Tabla 5-3.:** Resultados para  $t$  igual a 1800 segundos.

$v$	$C[w]$	$d$	$t_i[s]$	$t_f[s]$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$s$
$v_1$	2960	1	0	2520	x	-	-	-
$v_2$	3700	0	0	0	-	-	-	-
$v_3$	3700	0	0	0	-	-	-	-
$v_4$	2958	1	1440	2520	-	x	-	-

**Tabla 5-4.:** Resultados para  $t$  igual a 2520 segundos.

$v$	$C[w]$	$d$	$t_i[s]$	$t_f[s]$	$P_1$	$P_2$	$P_3$	$s$
$v_1$	3700	0	0	0	-	-	-	-
$v_2$	3700	0	0	0	-	-	-	-
$v_3$	3700	0	0	0	-	-	-	-
$v_4$	3700	0	0	0	-	-	-	-

En  $t = 2520s$ , los vehículos  $v_1$  y  $v_4$  terminan su proceso de carga, alcanzando su estado de carga máximo ( $3700[W]$ ) como se muestra en la Tabla 5-4. En este desarrollo se describe la operación óptima respecto a la asignación de puntos de carga y minimización de colas de espera, teniendo en cuenta que la cantidad de vehículos es mayor a la cantidad de puntos de carga. Este método permite adquirir las demandas horarias realizadas a la estación de carga, las cuales son de vital importancia para el despacho energético. A continuación, se presenta el despacho energético.

## 5.2. Despacho energético

La planeación operativa del despacho de energía para vehículos híbridos y eléctricos es fundamental en términos económicos. Así entonces, se deben efectuar predicciones para tomar decisiones sobre los momentos oportunos para comprar energía (cuando el precio esté bajo), para venderla a la red (cuando el precio esté alto) o almacenarla para venderla (cuando el precio aumente). Por esta razón, se define un sistema óptimo basado en control predictivo y el cual se resuelve por medio de programación cuadrática con el objetivo de predecir y tener control sobre las variables como la compra y venta de energía a la red, el almacenamiento energético dentro de la estación y el despacho de energía a los usuarios. Así, la operación de un sistema de movilidad eléctrico bajo condiciones y restricciones controladas, puede reducir los costos y los tiempos de carga generando independencia respecto a la compra de energía a la red, además, permite corregir las características adversas a la congestión, al desabastecimiento energético y genera una demanda eficiente de energía eléctrica para satisfacer las necesidades de carga y la sostenibilidad financiera de los usuarios y de los operadores.

Por lo tanto, se define a  $G(k)$  como la ganancia del operador de la estación de carga en el instante  $k$  que depende de  $P_1(k)$  que es el precio de venta de energía a los usuarios en el

instante  $k$ , de  $P_2(k)$  que es el precio de compra y venta de energía a la red en el instante  $k$ , de la entrada  $D(k)$  que representa la demanda energética a la estación de carga en el instante  $k$ , de  $e(k)$  que representa el error entre la oferta y la demanda en la estación en el instante  $k$  y de  $E_r(k)$  que representa la cantidad de energía comprada o vendida a la red eléctrica en el instante  $k$  donde,  $E_r(k) \geq 0$  significa que se vende energía y si  $E_r(k) \leq 0$  significa que se compra energía a la red. La ecuación (5-13) corresponde a la dinámica de las ganancias del operador de la estación donde  $D(k)$  es una perturbación conocida y  $e(k)$ ,  $E_r(k)$  son entradas que se controlan para garantizar la sostenibilidad económica en la estación.  $G(k)$  es la salida del sistema, que depende de las entradas controlables y de las perturbaciones.

$$G(k) = P_1(k)D(k) + P_1(k)e(k) + P_2(k)E_r(k) \quad (5-13)$$

Por otro lado, se describe  $E_b(k+1)$  como la cantidad de energía almacenada en la estación de carga en el instante  $k+1$ , depende de  $E_b(k)$  la cantidad de energía en el instante actual sumado con  $E_c(k)$  que representa la cantidad de energía que se suministra si  $E_c(k) \geq 0$  o se extrae si  $E_c(k) \leq 0$  del sistema de almacenamiento. La ecuación (5-14) representa la dinámica de carga y descarga del sistema de almacenamiento donde  $E_c(k)$  es una de las variables controladas.

$$E_b(k+1) = E_b(k) + E_c(k) \quad (5-14)$$

Las ecuaciones (5-13) y (5-14) describen la dinámica del despacho de energía de la estación de carga, donde las entradas controladas son  $E_c(k)$ ,  $e(k)$  y  $E_r(k)$  y el único estado descrito es la ganancia  $G(k)$ .

Las ecuaciones (5-15), (5-16) y (5-17) son condiciones necesarias para la operación óptima del despacho de energía, la ecuación (5-15) representa el balance energético en la estación de carga donde  $E_f(k)$  es la energía solar fotovoltaica generada, este balance indica que debe existir un equilibrio energético entre la energía que ingresa a la estación, como la energía solar  $E_f(k)$  y la energía comprada a la red  $E_r(k) \leq 0$  y la energía que suministra la estación como la demanda de energía  $D(k)$ , la energía vendida a la red  $E_r(k) \geq 0$  y la energía entregada por el sistema de almacenamiento  $E_c(k)$ , también, la variable  $e(k)$  describe la diferencia que hay entre la energía que ingresa y la energía que suministra la estación de carga. La ecuación (5-16) representa la condición de no negatividad del error, al igual que la ecuación (5-17) que representa la condición de no negatividad de la energía almacenada.

$$E_f(k) - E_c(k+1) - E_r(k) - e(k) - D(k) = 0 \quad (5-15)$$

$$e(k) \geq 0 \quad (5-16)$$

$$E_b(k+1) \geq 0 \rightarrow E_b(k) + E_c(k) \geq 0 \quad (5-17)$$

La operación económica de la estación de carga está representada por el modelo discreto de las ganancias del operador y las condiciones necesarias para su operación. Por lo tanto, dado que se desea controlar la cantidad de energía comprada, vendida, almacenada y suministrada, se propone implementar una estrategia de MPC, que permite calcular una trayectoria de una variable manipulada para optimizar el comportamiento futuro de un sistema en tiempo discreto [89].

Los modelos usados en el control predictivo son diseñados teniendo en cuenta modelos matemáticos en tiempo discreto representados por variables de estados. Las ecuaciones (5-18) y (5-19) muestran la formulación estándar de un modelo matemático discreto, donde  $x_m$  representa los estados del sistema,  $u$  representa las entradas o variables manipuladas,  $w$  representa las perturbaciones y  $y$  representa las salidas del sistema que dependen de los estados.

$$x(k+1) = Ax(k) + Bu(k) + B_b w(k) \quad (5-18)$$

$$y(k) = Cx(k) + Du(k) + D_b w(k) \quad (5-19)$$

Dado que la salida del sistema es  $G(k)$  y esta no depende directamente de los estados  $x(k)$  entonces la salida del sistema se puede describir como se muestra en la ecuación (5-20).

$$y(k) = Du(k) + D_b w(k) \quad (5-20)$$

Puesto que se desea construir un modelo de predicción, se describe la trayectoria de control futura como se muestra en la ecuación (5-21), estas ecuaciones resultan de expandir la salida del sistema mostrada en la ecuación (5-20). En estas ecuaciones,  $D$  y  $D_b$  son las matrices del sistema relacionadas a la salida del sistema que depende de los las entradas y las perturbaciones. También,  $k$  se refiere al instante de muestreo donde  $x(k)$  se puede medir y proporciona información sobre el sistema y  $N_p$  y  $N_c$  representan los horizontes de predicción y control respectivamente.

$$\begin{bmatrix} y(k+1) \\ y(k+2) \\ \vdots \\ y(k+N_p) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Du(k) \\ Du(k+1) \\ \vdots \\ Du(k+N_p-1) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_b w(k) \\ D_b w(k+1) \\ \vdots \\ D_b w(k+N_p-1) \end{bmatrix} \quad (5-21)$$

Dadas las trayectorias de control futuras  $y(k+N_p)$ , su representación en espacio de estados está descrita por la ecuación (5-22).

$$Y = \Phi U + \Psi W, \quad (5-22)$$

Este espacio de estados, describe la predicción de la salida  $Y$  del sistema en un instante  $K + 1$  hasta  $K + N_p$  como se muestra en (5-23), también, el vector de predicción de variables manipuladas o controladas se muestra en la ecuación (5-24) en un instante  $K$  hasta  $K + N_c - 1$  al igual que el vector de perturbaciones en una misma ventana de tiempo en la ecuación (5-25).

$$Y = [y(k + 1), y(k + 2), y(k + 3), \dots, y(k + N_p)]^T \quad (5-23)$$

$$U = [u(k), u(k + 1), u(k + 2), \dots, u(k + N_c - 1)]^T \quad (5-24)$$

$$W = [w(k), w(k + 1), w(k + 2), \dots, w(k + N_c - 1)]^T \quad (5-25)$$

Finalmente, las matrices  $\Phi$  y  $\Psi$  del modelo de espacio de estados de predicción quedan descritas en términos de las matrices del espacio de estados de la salida del sistema original presentadas en (5-20). Las ecuaciones (5-26) y (5-27) muestran las matrices  $\Phi$  y  $\Psi$ .

$$\Phi = \begin{bmatrix} D & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & D & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & D & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & D \end{bmatrix} \quad (5-26)$$

$$\Psi = \begin{bmatrix} D_b & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & D_b & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & D_b & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & D_b \end{bmatrix} \quad (5-27)$$

Para implementar el modelo de predicción en la estación de carga, primero se debe representar el modelo discreto de la estación en espacio de estados como se muestra en la ecuación (5-28). Cabe resaltar que en la ecuación (5-28) en el modelo de espacio de estados la matriz  $C$  es igual a cero debido a que la ganancia del operador no depende de los instantes de ganancia

actuales por lo que  $C = \mathbf{0}$ , de esta forma, el sistema en espacio de estados queda descrito por las matrices  $D$  que depende del precio suministro, compra y venta de energía  $P_1(k)$  y  $P_2(k)$  y  $D_b$  que depende de  $P_1(k)$ . Así mismo, el vector de variables manipuladas  $u(k)$  que depende de  $E_c(k)$ ,  $e(k)$ , y  $E_r(k)$  y el vector de perturbaciones  $w(k)$  que depende de la demanda energética a la estación  $D(k)$ . Por otra parte, se tiene en cuenta que la salida del sistema es igual a la ganancia del operador de la estación de carga  $y(k) = G(k)$ .

$$\underbrace{\begin{bmatrix} G(k) \end{bmatrix}}_{y(k)} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & P_1(k) & P_2(k) \end{bmatrix}}_D \underbrace{\begin{bmatrix} E_c(k) \\ e(k) \\ E_r(k) \end{bmatrix}}_{u(k)} + \underbrace{\begin{bmatrix} P_1(k) \end{bmatrix}}_{D_b} \underbrace{D(k)}_{w(k)} \quad (5-28)$$

De esta forma, teniendo las matrices  $D$  y  $D_b$  del sistema, reemplazando en las ecuaciones (5-26) y (5-27) y reescribiendo el sistema matricial como se muestra en la ecuación (5-22), el sistema en espacio de estados de predicción de ganancia del operador de la estación queda descrito en la ecuación (5-29), considerando un horizonte de predicción  $N_p$ .

$$\underbrace{\begin{bmatrix} G(0) \\ \vdots \\ G(N_p) \end{bmatrix}}_Y = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & P_1(0) & P_2(0) & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & P_1(N_p) & P_2(N_p) \end{bmatrix}}_\Phi \underbrace{\begin{bmatrix} E_c(0) \\ e(0) \\ E_r(0) \\ \vdots \\ E_c(N_p) \\ e(N_p) \\ E_r(N_p) \end{bmatrix}}_U + \underbrace{\begin{bmatrix} P_1(0) & 0 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & P_1(N_p) \end{bmatrix}}_\Psi \underbrace{\begin{bmatrix} D(0) \\ \vdots \\ D(N_p) \end{bmatrix}}_W \quad (5-29)$$

Descrito el modelo de predicción, como función objetivo se desea maximizar la ganancia del operador de la estación de carga y se desea minimizar el error que existe entre la oferta y la demanda. Por lo tanto, se plantea un método de optimización basado en programación cuadrática donde su formulación estándar se muestra en la ecuación (5-30), donde  $J_T$  es la función objetivo,  $x$  es el vector de variables de optimización y la matriz  $P$  y el vector  $q$  se utilizan para definir una función objetivo cuadrática general sobre estas variables [18].

Las matrices y vectores  $G$ ,  $A$  y  $h$ ,  $b$  respectivamente, son las restricciones de desigualdad e igualdad del problema de optimización.

$$\begin{aligned} \underset{x}{\text{minimizar}} \quad & J_T = \frac{1}{2} x^T P x + q^T x \\ \text{sujeto a} \quad & Gx \leq h, \\ & Ax = b. \end{aligned} \quad (5-30)$$

Dado que se desea maximizar las ganancias y minimizar el error, las ecuaciones (5-31) y (5-32) describen las funciones a minimizar y a maximizar respectivamente.

El error está descrito por una matriz  $M$  multiplicada por el vector de variables manipulables y las ganancias están descritas por la variable  $Y$  del modelo de predicción. Cabe resaltar que, maximizando las ganancias del modelo de predicción se maximiza las ganancias del operador de la estación en un horizonte de predicción  $N_p$ .

$$e(k) = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}}_M \underbrace{\begin{bmatrix} E_c(k) \\ e(k) \\ E_r(k) \end{bmatrix}}_U \quad (5-31)$$

$$Y = \Phi U + \Psi W \quad (5-32)$$

Las funciones objetivo  $J_1$  y  $J_2$  se muestran en las ecuaciones (5-33) y (5-34), la primera se describe como la norma dos del vector de predicción de ganancias, donde la norma se puede convertir a la forma QP como se muestra en la ecuación (5-33) representado por el modelo de predicción transpuesto por la matriz  $Q_1$  de ponderación multiplicado por el modelo de predicción.

De igual forma sucede para  $J_2$ , se muestra la norma dos del vector de error, donde la norma se puede convertir a la forma QP como se muestra en la ecuación (5-34) representado por el modelo del error transpuesto por la matriz  $Q_2$  de ponderación multiplicado por el modelo del error.

$$J_1 = \|Y\| = (\Phi U + \Psi W)^T Q_1 (\Phi U + \Psi W) \quad (5-33)$$

$$J_2 = \|e(k)\| = (MU)^T Q_2 (MU) \quad (5-34)$$

De esta forma, se puede representar la función objetivo total  $J_T$  como la suma de  $-J_1$  con  $J_2$ . Cabe aclarar que  $J_1$  debe ser negativo para maximizarlo. Reemplazando  $J_1$  y  $J_2$  en  $J_T$  se obtiene la ecuación (5-35).

$$J_T = -J_1 + J_2 = -(\Phi U + \Psi W)^T Q_1 (\Phi U + \Psi W) + (MU)^T Q_2 (MU) \quad (5-35)$$

Por medio de operaciones matriciales elementales y resolviendo (5-35), se obtiene la ecuación (5-36).

$$J_T = -(U^T \Phi^T + W^T \Psi^T) Q_1 (\Phi U + \Psi W) + (U^T M^T) Q_2 (MU) \quad (5-36)$$

Por medio de la propiedad distributiva de matrices aplicada en (5-36) se obtiene (5-37).

$$J_T = -U^T \Phi^T Q_1 \Phi U - U^T \Phi^T Q_1 \Psi W - W^T \Psi^T Q_1 \Phi U - W^T \Psi^T Q_1 \Psi W + U^T M^T Q_2 M U \quad (5-37)$$

Dado que la expresión  $W^T \Psi^T Q_1 \Psi W$  no afecta a  $U$  es posible omitirla. También, teniendo en cuenta que las matrices de la expresión  $(U^T \Phi^T Q_1 \Psi W)$  son simétricas entonces esta expresión se puede transponer sin afectar el valor óptimo de  $U$ , esto se puede notar en las ecuaciones (5-38) y (5-39).

$$J_T = -U^T \Phi^T Q_1 \Phi U - (U^T \Phi^T Q_1 \Psi W)^T - W^T \Psi^T Q_1 \Phi U - W^T \Psi^T Q_1 \Psi W + U^T M^T Q_2 M U \quad (5-38)$$

$$J_T = -U^T \Phi^T Q_1 \Phi U - W^T \Psi^T Q_1 \Phi U - W^T \Psi^T Q_1 \Phi U + U^T M^T Q_2 M U \quad (5-39)$$

Organizando y resolviendo factores comunes en (5-39), se obtiene (5-40).

$$J_T = U^T (M^T Q_2 M - \Phi^T Q_1 \Phi) U - 2W^T \Psi^T Q_1 \Phi U \quad (5-40)$$

La ecuación (5-40) se puede multiplicar por una constante positiva  $\frac{1}{2}$  la cual no cambia el valor del óptimo  $U$ . Esto se puede notar en la ecuación (5-41).

$$J_T = [U^T (M^T Q_2 M - \Phi^T Q_1 \Phi) U - 2W^T \Psi^T Q_1 \Phi U] * \frac{1}{2} \quad (5-41)$$

Cancelando términos semejantes, agrupando y organizando la ecuación (5-41), se obtiene la ecuación (5-42).

Se puede notar que la ecuación (5-42) está descrita en la forma estandar de la programación cuadrática presentada en la ecuación (5-30). Con base en esto, se describen las variables  $P = (M^T Q_2 M - \Phi^T Q_1 \Phi)$  y  $q^T = -W^T \Psi^T Q_1 \Phi$ .

$$J_T = \frac{1}{2} U^T \underbrace{(M^T Q_2 M - \Phi^T Q_1 \Phi)}_P U - \underbrace{W^T \Psi^T Q_1 \Phi}_q U \quad (5-42)$$

Para describir las restricciones de desigualdad, se tienen en cuenta las ecuaciones (5-16) y (5-17) de no negatividad del error y del estado de carga del sistema de almacenamiento. Dado que las restricciones se deben de llevar a la forma estándar mostrada en (5-30), las ecuaciones (5-16) y (5-17) se modifican y quedan descritas como se muestran en (5-43) y (5-44) respectivamente.

$$-e(k) \leq 0 \quad (5-43)$$

$$-E_c(k) \leq E_b(k) \quad (5-44)$$

Las ecuaciones (5-43) y (5-44) se encuentran descritas en la forma estándar del QP. Por lo tanto, su representación matricial se describe en la ecuación (5-45) para un horizonte de predicción igual a  $N_p$ .

$$\underbrace{\begin{bmatrix} -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & & & & & \\ -1 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & -1 & 0 \end{bmatrix}}_G \underbrace{\begin{bmatrix} E_c(0) \\ e(0) \\ E_r(0) \\ \vdots \\ E_c(N_p) \\ e(N_p) \\ E_r(N_p) \end{bmatrix}}_U \leq \underbrace{\begin{bmatrix} E_b(0) \\ \vdots \\ E_b(N_p) \\ 0 \\ \vdots \\ 0 \end{bmatrix}}_h \quad (5-45)$$

Para describir la restricción de igualdad, se tiene en cuenta la ecuación 5-15 que representa el balance energético en la estación de carga. Dado que la restricción se debe llevar a la forma estándar mostrada en (5-30), la ecuación (5-15) se modifica y queda descrita como se muestran en (5-46).

$$E_f(k) - D(k) = E_c(k) + E_r(k) + e(k) \quad (5-46)$$

La ecuación (5-46) se encuentra descrita en la forma estándar del QP. Por lo tanto, su representación matricial se describe en la ecuación (5-47) para un horizonte de predicción igual a  $N_p$ .

$$\underbrace{\begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \ddots & & & & & \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} E_c(0) \\ e(0) \\ E_r(0) \\ \vdots \\ E_c(N_p) \\ e(N_p) \\ E_r(N_p) \end{bmatrix}}_U = \underbrace{\begin{bmatrix} E_f(0) - D(0) \\ \vdots \\ E_f(N_p) - D(N_p) \end{bmatrix}}_b \quad (5-47)$$

Finalmente, la optimización queda descrita en la ecuación (5-48), donde la función objetivo es la minimización del error y la maximización de las ganancias del operador de la estación de carga. Todo esto sujeto a las restricciones de no negatividad del error y el estado de carga de la batería y a las restricciones de igualdad del balance energético de la estación de carga.

$$\begin{aligned} \underset{u}{\text{minimizar}} \quad J_T &= \frac{1}{2} U^T \underbrace{(M^T Q_2 M - \Phi^T Q_1 \Phi)}_P U - \underbrace{W^T \Psi^T Q_1 \Phi}_q U \\ \text{sujeto a} \quad &GU \leq h, \\ &AU = b. \end{aligned} \tag{5-48}$$

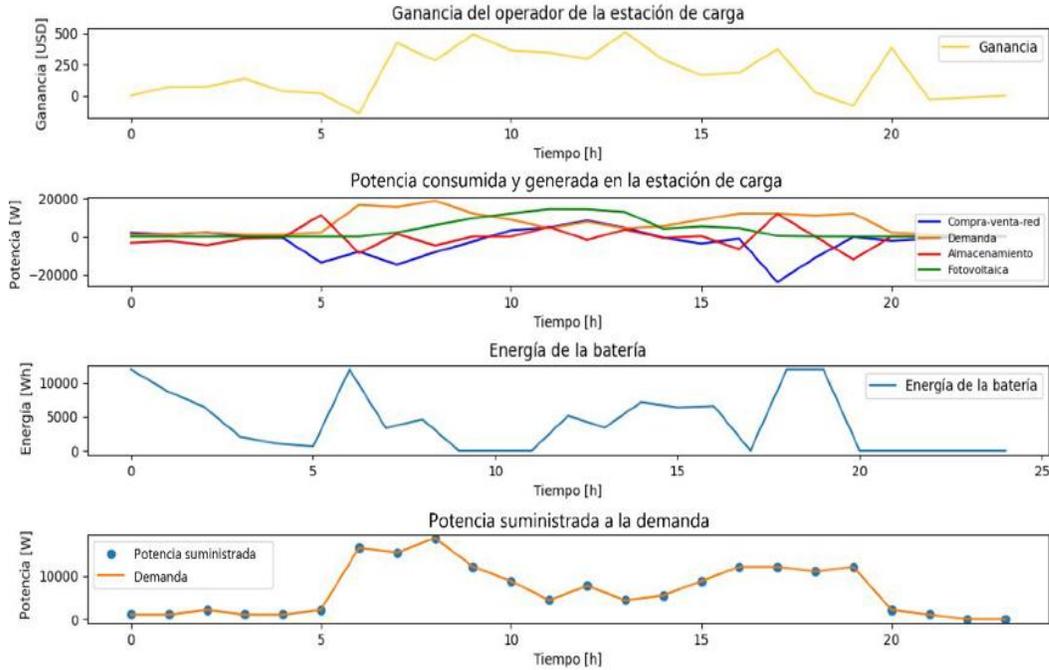
La programación de este problema de optimización se realiza por medio de Python (Python 3.8.5), importando la librería "quadprog" para resolver el problema y se ejecutó en un ordenador con un procesador Intel Core i5 8th, con sistema operativo Windows de 64 bits.

## Resultados

Con el fin de maximizar la ganancia del operador de la estación de carga, es necesario definir el horizonte de predicción, las cantidades energéticas de carga y de descarga del respaldo energético, la cantidad de energía vendida y comprada a la red, y el error entre la energía suministrada y la energía demandada por los usuarios. Para esto se consideran 4 escenarios de simulación, con diferentes valores de horizonte de predicción, tiempo de simulación y el precio de compra a la red eléctrica. Considerando un modelo predictivo para las ganancias del operador, en esta tesis se asumen que los perfiles de irradiancia, precios de compra y demandas energéticas son conocidos en el horizonte de predicción. Por lo tanto, se hace uso de dos perfiles, uno de irradiancia ( $E_f(k)$ ) y uno de los precios de energía ( $P_2(k)$ ). Por otra parte, el perfil de demandas de carga ( $D(k)$ ) que se utiliza en esta sección se basa en el perfil base de demandas de carga presentado en el Capítulo 3. Estos perfiles servirán para realizar la predicción de la ganancia del operador de la estación de carga.

Para obtener la ganancia máxima del operador de la estación, se considera un escenario donde el tiempo de simulación es de 24 horas, el horizonte de predicción ( $N_p$ ) es de 2 horas, se considera un sistema de respaldo de baterías de 12000 [Wh], un precio de venta al usuario ( $P_1(k)$ ) de 0,033[USD] y un precio de compra y venta a la red de ( $P_2(k)$ ). Cabe resaltar, que la ganancia se calcula para cada instante de simulación.

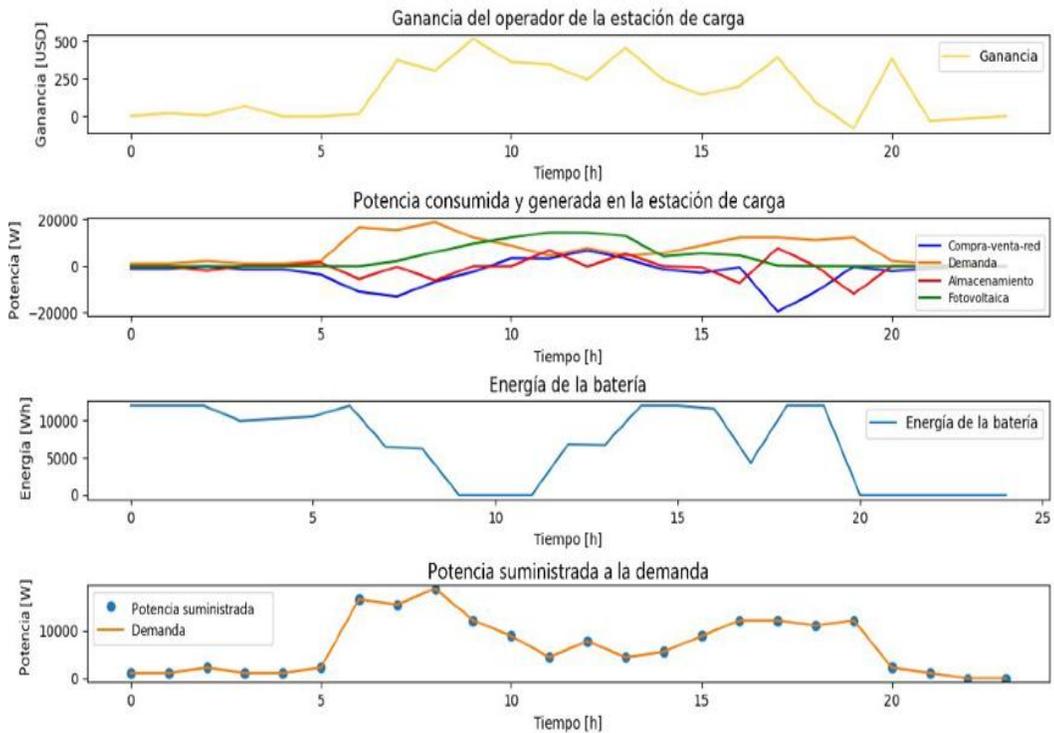
La Figura 5-1 muestra la simulación de 1 día de operación de la estación de carga, donde las altas demandas de carga se dan entre las 5 y las 10 horas y las 15 y las 20 horas. La estación de carga entre las 0 y las 5 horas, utiliza la energía del respaldo de baterías para venderla a la red eléctrica para aumentar la ganancia del operador de la estación. A partir de las 5 horas hasta las 10, la estación de carga decide realizar la compra de energía a la red eléctrica para abastecer el respaldo de baterías y para suministrar la demanda energética en ese intervalo de tiempo. Sin embargo, la estación no cuenta con una generación



**Figura 5-1.:** Resultados para 1 día de simulación con  $N_p = 2$

significativa de energía fotovoltaica, esto genera que la estación entre las 5 y las 6 horas no presente ganancias debido a la compra realizada. Entre las 10 y las 15 horas, la estación de carga cuenta con generación de energía fotovoltaica, por lo que en este intervalo de tiempo aprovecha esta energía para venderla a la red eléctrica y para suministrar al respaldo de baterías, donde aumenta la ganancia del operador. Entre las 15 y 20 horas, donde cae la tarde, la generación de energía tiende a reducirse. En este intervalo la estación de carga no posee energía en el respaldo de baterías, por esta razón, toma la decisión de comprar energía a la red eléctrica, lo que representa un decrecimiento en la ganancia del operador de la estación. La ganancia del operador de la estación de carga para 1 día de operación bajo las condiciones de generación, almacenamiento, compra y venta es de  $4184,57[USD]$ . Teniendo en cuenta que la optimización, maximiza las ganancias y minimiza el error entre la energía demandada y la energía suministrada, el operador da prioridad al suministro de demanda y a la venta de energía a la red. El error entre la energía suministrada y la demanda es de menor al 1%.

La Figura 5-2 muestra la simulación de 1 día de operación de la estación de carga esta cuenta con un horizonte de predicción de 24 horas. En este caso, el horizonte de predicción es igual al tiempo de simulación, por lo tanto, el operador de la estación de carga toma la decisión de no aumentar sus ganancias entre las 0 y las 5 horas. Por el contrario, en este intervalo de tiempo, el operador se anticipa a almacenar energía para suministrarla en el momento en el que la demanda es mayor. Sin embargo, no es suficiente la cantidad energética para suplir la demanda, en este caso, el operador realiza la compra a la red eléctrica para cumplir con la



**Figura 5-2.:** Resultados para 1 día de simulación con  $N_p = 24$

demanda. El error entre la energía suministrada es menor al 1% y la ganancia total durante un día bajo las condiciones dadas es de  $4035,60[USD]$ , menor al resultado de la simulación de 1 día con  $N_p = 2$ . Esto representa que un mayor horizonte de predicción no mejora los resultados respecto a la ganancia total del operador.

La Figura 5-3 muestra la simulación de 5 días de operación de la estación de carga, esta cuenta con un horizonte de predicción de 20 horas. Para este caso, se puede notar que la ganancia se reduce en horas donde el pico de demanda se reduce, sin embargo, para el primer día al finalizar el día la ganancia aumenta, debido a la variación del precio de compra de energía, en el balance energético se puede notar que el primer día el operador de la estación realizó una compra de energía el cual se representa con un pico azul entre las 0 y las 20 horas, el precio de compra de la energía en ese instante de tiempo era menor a  $0,02[USD]$  como se puede ver en la Figura 5-4. Para este caso se encontró una ganancia total de  $8178,19[USD]$  y un error entre el suministro y la demanda menor al 1%.

La Figura 5-5 muestra la simulación de 1 mes de operación de la estación de carga, esta cuenta con un horizonte de predicción de 24 horas. Para este caso, se puede notar un decrecimiento de la ganancia a medida que pasa el tiempo, debido a las compras de energía realizadas y al desabastecimiento del respaldo energético de baterías. A pesar de esto, la diferencia entre la energía suministrada y la demanda es al rededor del 1%, esto da a entender, la importancia del cumplimiento del servicio de carga por parte del operador a los usuarios.

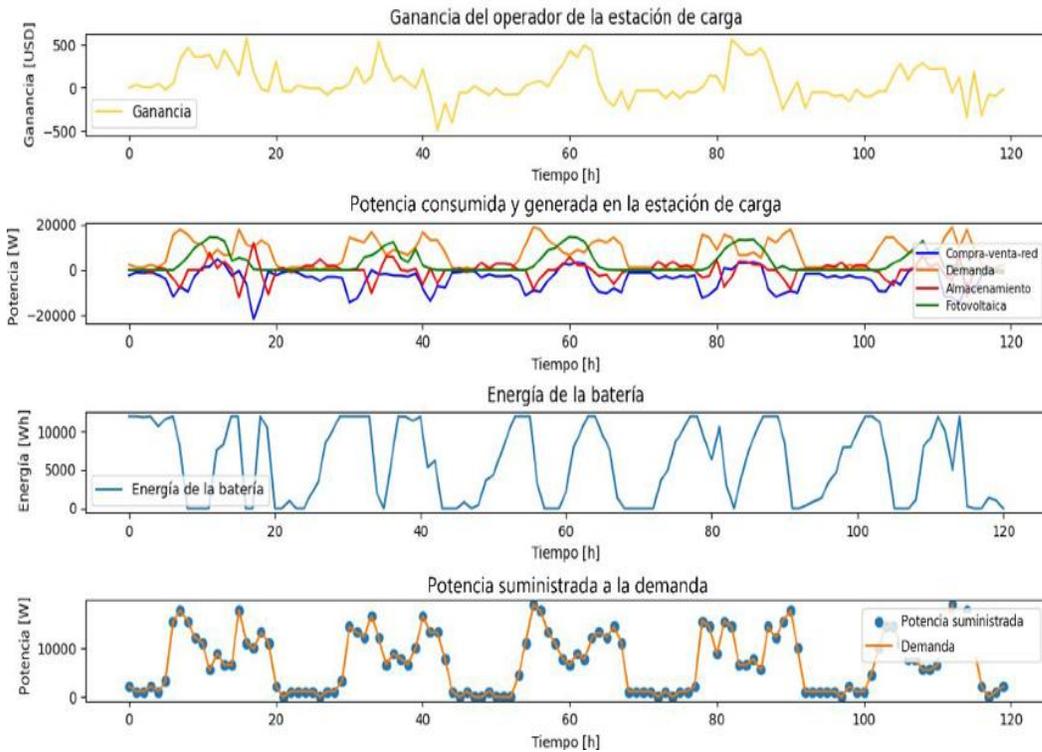


Figura 5-3.: Resultados para 5 días de simulación con  $N_p = 20$

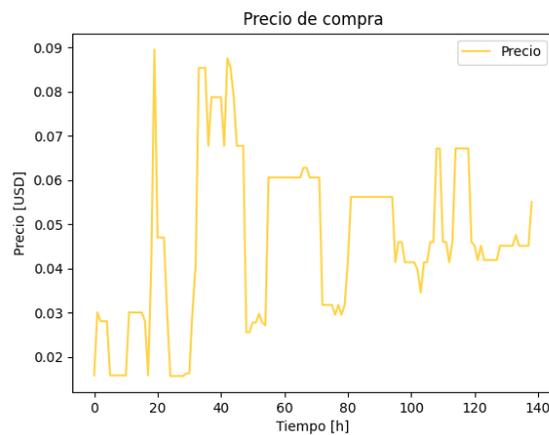
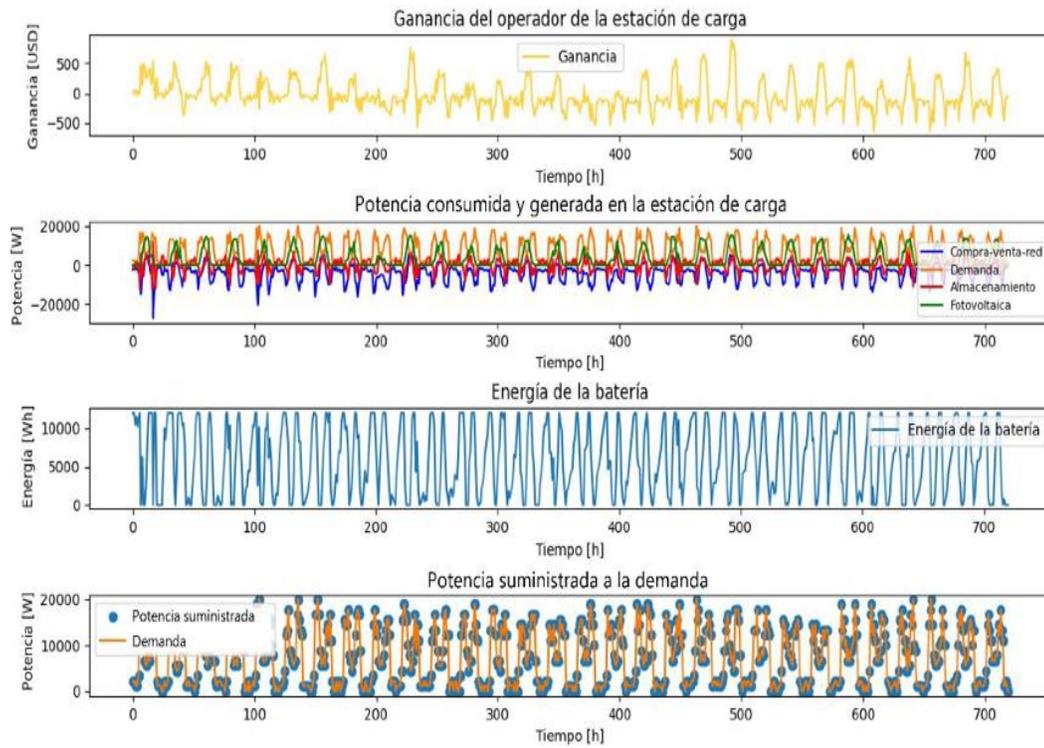


Figura 5-4.: Precio de la energía

Para este escenario se encontró una pérdida de  $28402,93[USD]$ .

Un caso contrario se muestra en Figura 5-6, donde bajo el mismo escenario de simulación de 1 mes con  $N_p = 24$ , se obtienen ganancias mucho más notables a medida que transcurre el tiempo de simulación, en este caso, el precio de venta al usuario se incrementa a  $0,11[USD]$ , lo que genera un aumento en la ganancia.

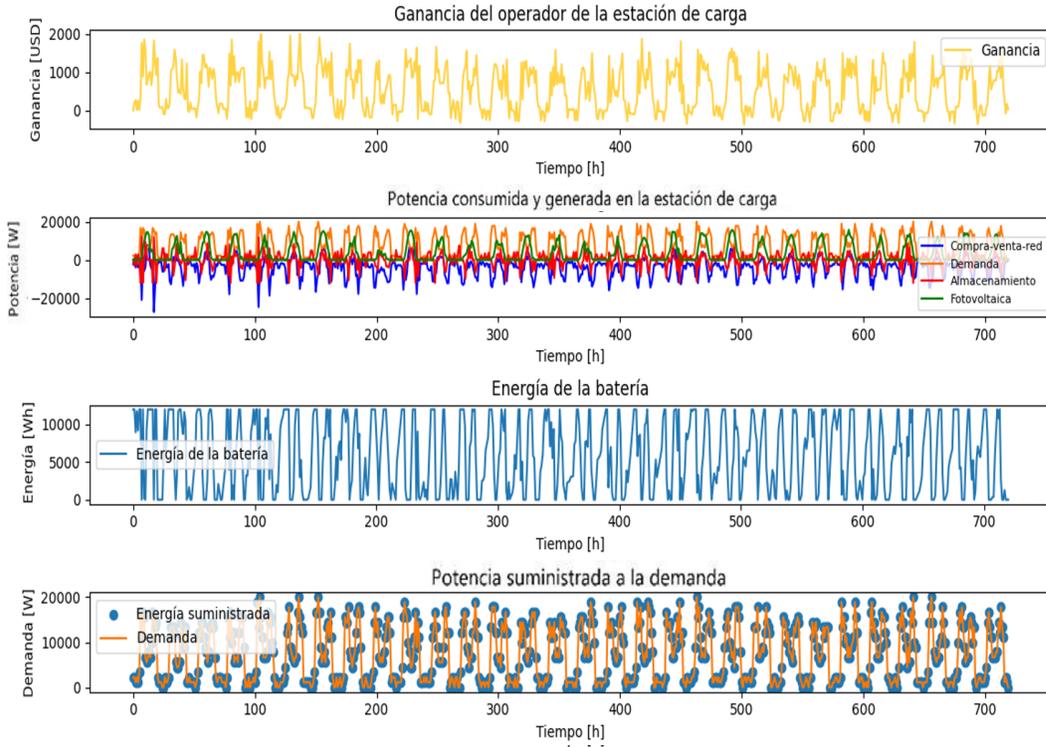


**Figura 5-5.:** Resultados para 1 mes de simulación con  $N_p = 24$

Para los 5 escenarios propuestos, existen ventajas a favor de los usuarios de la estación, claramente se nota que el sistema tiene prioridad sobre el suministro de energía y según sean las variaciones del precio de compra de energía, este incrementa las ganancias del operador. Además, algunas limitaciones del sistema, giran en torno al precio de venta al usuario, más allá de la venta a la red eléctrica, este es un factor crítico que puede determinar un mayor aumento en las ganancias que no se considera en esta tesis. Aun así, para estos escenarios se obtienen ganancias considerables. También es necesario resaltar la importancia del sistema de almacenamiento, el sistema prioriza a este sistema de tal forma que la compra a la red sea mínima para maximizar la ganancia, sin embargo, dada una alta demanda, la estación compra energía para suministrar al respaldo y a la demanda.

### 5.3. Resumen

Este capítulo presentó el método de solución lineal entero mixto para resolver el problema de optimización que integra variables binarias como variables de decisión. Los resultados muestran que el MILP alcanza a tomar decisiones de manera óptima, asignando de forma ordenada puntos de carga a los vehículos que realicen una petición y minimizando las colas de espera en las estaciones de carga. Así mismo, se presentó el despacho energético respecto a la planeación operativa del despacho carga por parte del operador de la estación, por



**Figura 5-6.:** Perfil de demanda para 1 mes

medio de un modelo discreto de predicción, combinado con el método de optimización de programación cuadrática con el fin de maximizar las ganancias del operador y minimizar el error entre la energía suministrada y la energía demandada por los usuarios, para este caso particular, se encontró que el error entre el suministro y la demanda para los diferentes casos de simulación se encontraban al rededor del 0% y el 1%. Además, se encontraron ganancias para 1 día de simulación con un horizonte de predicción de 2 horas y un horizonte de predicción de 24 horas, donde predominó el caso con  $N_p = 2$ . Así mismo, se encontraron que las ganancias para un tiempo de simulación de 5 días son de  $8178,19[USD]$  y para un tiempo de simulación de 1 mes, las pérdidas fueron de  $28402,93[USD]$ , y al aumentar el precio de venta del usuario hasta  $0,11[USD]$ , las ganancias aumentaron para un mismo escenario de simulación. Es conveniente mencionar que el método basado en modelo de predicción, admite entradas futuras, por lo que es necesario realizar un modelo de predicción basado en aprendizaje supervisado y no supervisado. Para el modelo de predicción presentado en este capítulo, se supone que los perfiles de demanda, radiación y precio de energía son conocidos.

## **6. Validación del sistema de transporte eléctrico multimodal propuesto en un caso de estudio**

Un sistema de transporte multimodal sostenible, se puede validar en un entorno de micro-simulación el cual tiene un alto nivel de detalle respecto a las redes de tráfico y a todos los actores del transporte en general. La validación de los modelos y métodos propuestos en los capítulos anteriores, se realiza por medio del software SUMO, la herramienta TraCI y programación en Python en redes de tráfico de ciudades intermedias de Colombia. En este capítulo se presenta la integración y simulación del sistema de transporte energético multimodal, la ubicación, el dimensionamiento y las gestiones de energía y transporte con aplicación en ciudades intermedias.

### **6.1. Simulación del sistema de transporte multimodal sostenible**

Los principales aportes de la investigación en ingeniería, radican en la solución de problemáticas de desarrollo económico, social y político; entre estos se encuentra el sector de transporte, donde su principal consecuencia es la contaminación medioambiental. Así mismo, al proponer un método de solución sostenible para mitigar las consecuencias, el sector de transporte se ve en la obligación de evolucionar, respecto a los energéticos incluidos en su proceso de movilidad y a su operación. Por tal motivo, es necesario tener en cuenta características intrínsecas de sistemas de transporte eléctricos multimodales sostenibles, como el nivel de detalle que debe considerar para aproximarse a un sistema de transporte convencional y que obedezca a las necesidades de transporte. En esta sección se presenta una descripción general de la simulación para validar el sistema de transporte multimodal propuesto. En las Figuras **6-1** y **6-2**, se muestran los mapas descriptivos del desarrollo de la simulación e integración de los métodos de solución propuestos para la ubicación, el dimensionamiento, la gestión energética y la gestión de transporte.

### 6.1.1. Dimensionamiento y ubicación

La Figura 6-1 describe el proceso de integración para la ubicación y el dimensionamiento óptimo de estaciones de carga de motocicletas híbridas y embarcaciones eléctricas con las redes de tráfico de SUMO. Por medio del método de programación lineal entera mixta, se obtiene la ubicación y el dimensionamiento óptimo de estaciones de carga para motocicletas híbridas en un entorno urbano propuesto. Así mismo, se obtiene la ubicación y el dimensionamiento de estaciones para las embarcaciones eléctricas por medio del método de ramificación y poda. Teniendo en cuenta las redes de tráfico simuladas en SUMO y el dimensionamiento y la ubicación de estaciones de carga previamente encontradas, pueden ser ubicadas en una red de tráfico en SUMO para facilitar los procesos de solicitudes de carga, despacho energético y gestiones en el sistema.

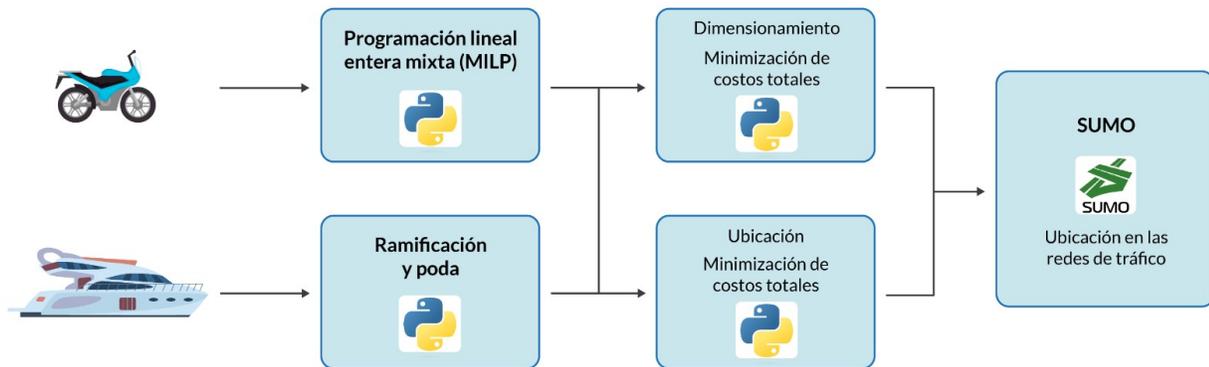


Figura 6-1.: Mapa descriptivo de la ubicación y el dimensionamiento

### 6.1.2. Gestión de peticiones de carga

La Figura 6-2, muestra que los modelos de consumo energético son el insumo principal para determinar las gestiones en la estación de carga. La simulación de los modelos de consumo energético se realiza por medio de SUMO, que al contar con datos de microsimulación de redes de tráfico, puede determinar la velocidad de un vehículo particular en un trayecto específico en tiempo de ejecución. Los modelos de consumo energético de motocicletas híbridas y embarcaciones eléctricas son simulados como una clase de Python con atributos respecto a la velocidad, aceleración, capacidad energética y estado actual de transporte. Por medio de TraCI - SUMO, se pueden adquirir características respecto a las coordenadas de ubicación y la velocidad de trayectos específicos en una red de tráfico particular. Así mismo, las estaciones de carga son simuladas como parqueaderos de SUMO, por medio de TraCI y Python, se generan una clase para la estación de carga, con instancias u objetos que describen los atributos respecto a la cantidad de puestos, la longitud, la capacidad energética de la estación, la cantidad de energía fotovoltaica generada y las características respecto a

la carga y descarga del respaldo de baterías y compra y venta de energía a la red eléctrica. Estos atributos son compatibles con atributos propios de SUMO, lo que permite realizar la simulación y la validación del sistema de transporte eléctrico multimodal sostenible. Cabe resaltar que, para adquirir los atributos de los vehículos, SUMO cuenta con una amplia variedad de redes de tráfico del mundo, particularmente ciudades intermedias de Colombia. Con este escenario propuesto, surge la necesidad de determinar la gestión de transporte teniendo en cuenta que los vehículos realizan una petición de carga. Para esto, se implementa un algoritmo de programación lineal entera mixta en Python por medio de la librería `cvxpy`, para asignar puntos de carga a usuarios que realicen una petición de carga a la estación y se puedan minimizar las colas de espera al ingreso de la estación en caso tal de que la demanda sea más alta que las capacidades de la estación. El principal insumo para este método de optimización son la cantidad de vehículos simulados, los estados de carga o el consumo para determinar los tiempos de carga, la cantidad de puntos de carga y el tiempo de simulación. De esta forma, se simula un entorno de movilidad para la gestión del transporte y para la asignación óptima, teniendo en cuenta los atributos de los vehículos, las estaciones de carga y las redes de tráfico simuladas.

### 6.1.3. Despacho de estaciones de carga

El método implementado de programación cuadrática permite determinar la demanda energética a la estación por cada hora de simulación transcurrida. Se diseña un modelo discreto de predicción de las ganancias del operador de la estación de carga en Python, las cuales dependen de la predicción de las demandas por hora a la estación, la predicción de los perfiles de radiación y predicción del perfil del precio de la energía. Así mismo, el modelo de predicción esta sujeto a variaciones respecto a la compra y venta de energía a la red eléctrica, carga y descarga del respaldo de baterías y al suministro energético. De esta forma, teniendo el modelo de predicción de ganancia del operador simulado en Python, por medio de la librería `quadprog` en Python, se propone un método de programación cuadrática, para maximizar las ganancias del operador de la estación de carga y minimizar el error entre la energía suministrada y la energía demandada por los usuarios.

De todo lo anterior, el sistema de transporte multimodal sostenible se puede simular por medio de SUMO y Python, integrando cada método desarrollado, para alcanzar los objetivos propuestos en esta tesis. A continuación, se define un caso de estudio social en ciudades intermedias, estos se representan como redes de tráfico en SUMO.

### 6.1.4. Descripción general del caso de estudio

Las ciudades intermedias en Colombia, son ciudades con una población reducida a lo largo del territorio colombiano. Por lo general, la ciudades intermedias se centran en actividades relacionadas con el turismo y cuentan con un alto desarrollo urbano en comparación con

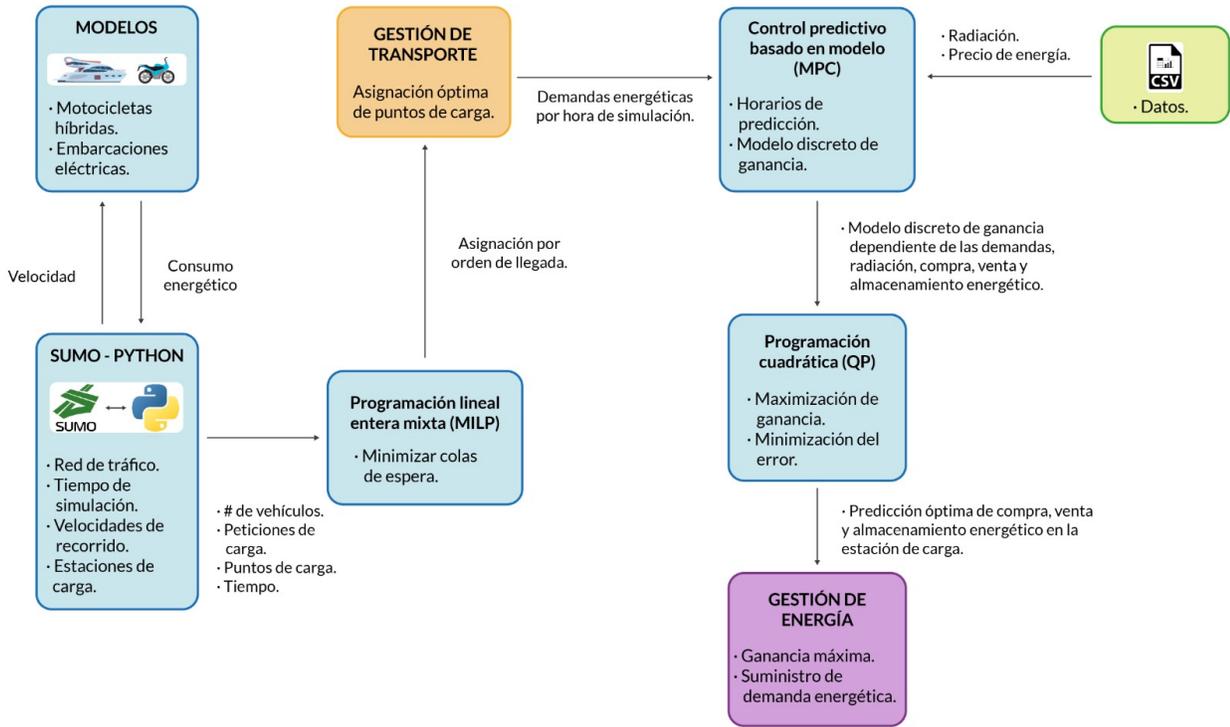


Figura 6-2.: Mapa descriptivo de la integración de modelos y métodos

algunos pueblos del país; sin embargo, no se desarrollan actividades significativas alrededor de la economía y actividades productivas [85]. Dado que en esta investigación se considera un sistema de transporte multimodal sostenible compuesto por motocicletas híbridas y embarcaciones eléctricas, se hace énfasis en las ciudades intermedias donde puedan desarrollarse este tipo de sistemas. Se proponen las ciudades de Magangué y Sincelejo de Colombia como un caso de estudio para validar los métodos propuestos.

## Magangué

El municipio de Magangué se encuentra ubicado en el departamento de Bolívar, Colombia. La ciudad limita con Pinillos Coyongal al oriente, con Magdalena al norte y con el departamento de Sucre al occidente. Esta ciudad cuenta aproximadamente con 124000 habitantes y una extensión del territorio aproximadamente de 1.568 km. Además, Magangué cuenta con un puerto fluvial de 5 km de extensión en la ribera del río Magdalena, donde las comunidades realizan actividades en relación al transporte de productos, carga de minerales, productos agrícolas, ganado, entre otros. Magangué cuenta aproximadamente con 2050 embarcaciones menores. Sin embargo, el transporte fluvial en Magangué y sus puertos son reconocidos por ser de los menos tecnificados. Por otra parte, por medio de las vías de Magangué, transitan alrededor de 25000 motocicleta convencionales, utilizados para el transporte en general [70].

## Sincelejo

La ciudad de Sincelejo es la capital del departamento de Sucre. La ciudad limita con el departamento de Córdoba al sur, con el municipio de Palmito al occidente, con el municipio de Tolú al norte y con el municipio de Corozal al oriente. Esta ciudad cuenta con una extensión de 28504 hectáreas y cuenta con 301126 habitantes. La economía de Sincelejo se relaciona principalmente con actividades administrativas, comerciales y terciarias. En el sector de transporte de Sincelejo, los principales medios de transporte son las motocicletas, donde aproximadamente el 38 % de los medios de transporte se dedica al mototaxismo siendo este el porcentaje más alto. Cabe resaltar que Sincelejo cuenta con aproximadamente 29000 motocicletas en su zona urbana [70].

Para esta investigación, se eligen las ciudades de Magangué y Sincelejo como casos de estudio dada su importancia en el sector de transporte fluvial y terrestre. Conviene enfatizar, que en la simulación de las redes de tráfico de Magangué se integra un sistema de transporte multimodal (motocicletas híbridas y embarcaciones eléctricas) y en la red de Sincelejo solamente se aplica un sistema de transporte compuesto por motocicletas híbridas. En la siguiente sección se muestran los modelos de las redes de tráfico para las dos ciudades.

### 6.1.5. Simulación de las redes de tráfico de Magangué y Sincelejo

Por medio de la herramienta OSM.WEB.WIZARD de SUMO, se extraen las redes de tráfico de Magangué y Sincelejo como se muestra a continuación. La ubicación y el dimensionamiento de estaciones de carga para Sincelejo se basa en los recursos reportados en el informe científico [69] del proyecto de movilidad sostenible de energética 2030.

### Magangué y Sincelejo

En la Figura 6-3, se muestra gráficamente como se mapea Magangué en SUMO, en este mapa se detallan características específicas de las calles, acceso desde otros municipios, la conexión con el río Magdalena, describe y se muestran las vías principales. Igualmente, la Figura 6-4 muestra la red de tráfico de Sincelejo. Python cuenta con la librería TraCI, que permite la conexión e interacción de los algoritmos de modelos de consumo energético de vehículos eléctricos y métodos de optimización con las redes de tráfico que entrega SUMO. Teniendo los mapas de las redes de tráfico de las ciudades, en la siguiente sección se presenta el dimensionamiento y la ubicación óptima de las estaciones de carga.

### 6.1.6. Dimensionamiento y ubicación

En el capítulo 4 se presentó el dimensionamiento y la ubicación de las estaciones de carga, para ciudades intermedias. En función de este desarrollo, a continuación, se localizan y se dimensionan las estaciones de carga para las redes de tráfico de Magangué y Sincelejo. Para



**Figura 6-3.:** Mapa de Magangué modelado en SUMO



**Figura 6-4.:** Red de tráfico de Sincelejo simulada en SUMO

este caso, se consideran peticiones de carga durante un 1 mes de simulación la cual obedece a las dinámicas presentadas en el Capítulo 3, Sección 3.2.

## Magangué

Las ubicaciones de las estaciones de carga están representadas por círculos rojos en la Figura 6-5, estas estaciones de carga alcanzan a cubrir la demanda energética de las motocicletas híbridas en cualquier instante del día, de esta forma se considera que las capacidades por estación de carga para la operación de 1 mes son de 7706.82 W para la potencia del respaldo de baterías, 10000 W para la potencia fotovoltaica, 10000 W para la conexión a la red eléctrica y 80302.81 Wh para la energía del respaldo de baterías. Para la operación de 1 año se encontró que las capacidades deben de ser mayores para alcanzar a suministrar la demanda energética. Por otra parte, independientemente donde se encuentre ubicada la motocicleta híbrida a lo largo de la red de tráfico de Magangué, al realizar una petición de carga, el sistema multimodal la redirecciona hacia la estación más cercana para su respectiva carga energética.

De los recursos mencionados, para el caso de Magangué, las ubicaciones de los puntos de concentración están representadas por círculos azules en la Figura 6-5, cada una de estas ubicaciones representa un punto de alta demanda de transporte público y por lo general son puntos de comercio de los habitantes de Magangué. Estos puntos están ubicados en centros, parques principales y en el puerto de embarque principal de Magangué, esto permite la conexión y multimodalidad entre motocicletas y embarcaciones.

## Magangué - Pinillos

Para la operación fluvial de Magangué, se ubica el municipio de Pinillos como el municipio más cercano por vía fluvial a Magangué. Las embarcaciones eléctricas se encuentran en las instancias del río Magdalena por medio del cual se lleva a cabo el transporte de una embarcación eléctrica hasta el municipio de Pinillos. Para el diseño fluvial, se ubicaran 3 estaciones de carga entre Magangué y Pinillos - Coyongal representadas por círculos rojos como se puede ver en la Figura 6-6 dos de estas estaciones ubicadas en Magangué y Pinillos respectivamente se utilizarán para el embarque y desembarque de pasajeros y para la carga de la embarcación, por el contrario, la estación que se encuentra en la mitad del recorrido Magangué-Pinillos, solo se utilizará como estación de paso para la carga de las embarcaciones. Además, la estación de carga en Magangué cuenta con 130 [kWh] de capacidad de almacenamiento energético, 14 paneles solares fotovoltaicos y 130 [kWh] de potencias de carga. La estación de carga en Pinillos cuenta con 65 [kWh] de capacidad de almacenamiento energético, 14 paneles solares fotovoltaicos y 130 [kWh] de potencias de carga. La estación de carga intermedia cuenta con 65 [kWh] de capacidad de almacenamiento energético, 14 paneles solares fotovoltaicos y 130 [kWh] de potencias de carga. Estos atributos de dimensionamiento, pertenecen a una instancia del modelo de estación de carga simulado en SUMO - Python.

SUMO permite la interacción entre los pasajeros y las embarcaciones a lo largo del río Magdalena modelado como se puede observar como una línea azul que parte desde Magangué



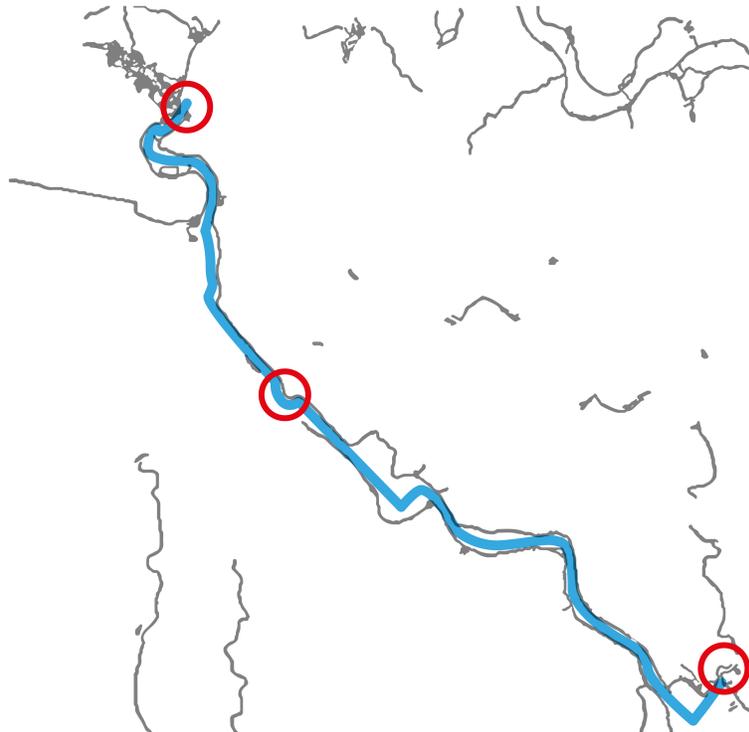
**Figura 6-5.:** Ubicación de las estaciones y puntos de acopio en la red de tráfico de Magangué simulada en SUMO

y finaliza en Pinillos en la Figura 6-6. De igual manera, SUMO favorece la adquisición de estados de carga del sistema, consumos energéticos, velocidades, aceleraciones y estados generales de las embarcaciones respecto a sus recorridos y sus estancias en las estaciones de carga.

### **Sincelejo**

Para la ubicación y el dimensionamiento, en el caso de Sincelejo, se ubicaron 4 puntos de concentración de las motocicletas representados por círculos azules como lo muestra la Figura 6-7, estos puntos representan, los lugares más concurridos por los habitantes de Sincelejo como la Plaza de los Fundadores, la Plaza Cultural de Majagual, entre otros.

Se ubicaron 4 estaciones de carga representadas con círculos rojos en la Figura 6-7, estas estaciones cuentan con el mismo dimensionamiento presentado para Magangué por cada estación de carga. Además, se pueden adquirir variables relacionadas con los estados de las estaciones, cuanta cantidad de energía están entregando a los usuarios o propietarios de los vehículos híbridos y que disponibilidad respecto a los puntos de carga poseen para tomar decisiones óptimas respecto a los tiempos de carga energética. A diferencia de Magangué,



**Figura 6-6.:** Ubicación de las estaciones y puntos de acopio en la red de tráfico de Magangué-Pinillos simulada en SUMO

Sincelejo solo contará con el modo de transporte terrestre.

### 6.1.7. Demanda de transporte y de energía - peticiones

Como se mencionó anteriormente, existen dos tipos de usuarios en el sistema de transporte multimodal, los usuarios del transporte que realizan una petición de origen-destino a las motocicletas híbridas y los usuarios de carga u operadores de las motocicletas que realizan una petición de carga a la estación. De acuerdo con la cantidad de peticiones de origen y destino y de carga realizadas durante un día, a continuación, se muestra la creación de los perfiles de peticiones de origen y destino y los perfiles de carga.

#### Peticiones de transporte

Las peticiones origen destino son generadas por medio de las direcciones de las calles de las redes de tráfico simuladas. Para la adquisición de los archivos de IDs de las calles de la red de tráfico de Magangué, se tomó la decisión de dividir el municipio en 3 zonas como las que se muestran en la Figura 6-8. Con la ayuda de la herramienta NETEDIT de SUMO, se realizaron tres polígonos para la adquisición de las direcciones de las calles de las 3 zonas denominadas ZONA 1 que comprende la comuna 5, ZONA 2 comprende las comunas

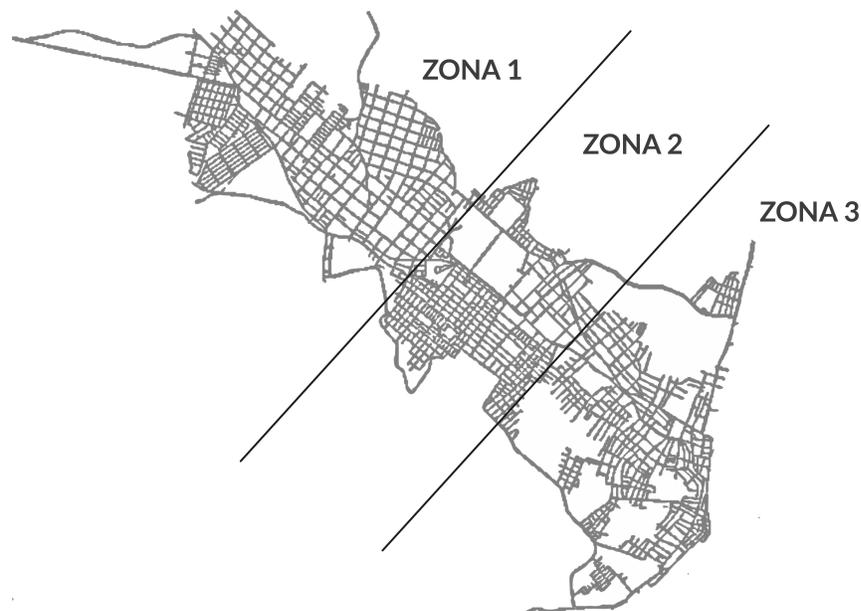


**Figura 6-7.:** Ubicación de las estaciones y puntos de acopio en la red de tráfico de Sincelejo simulada en SUMO

3 y 4 y ZONA 3 que comprende las comunas 2 y 1 de Magangué, para estas áreas se generan 3 archivos ZONA1.csv, ZONA2.csv y ZONA3.csv lo cuales tienen las listas de calles representativas para la creación de los vectores de origen y destino.

Ciertamente, las ZONA 2 y la ZONA 3 hacen parte de los lugares más concurridos por los habitantes de Magangué. Las peticiones de carga durante el transcurso de la mañana se generan con orígenes en la ZONA 1 y destinos en la ZONA 2 y la ZONA 3. para el transcurso de la tarde, se genera un perfil de peticiones de origen y destino entre las 3 zonas y al transcurrir la noche, la mayoría de peticiones de origen estarán ubicados en la ZONA 3 y las peticiones de destino en la ZONA 1 y la ZONA 2. Esto representa el día a día de una persona que para ir a su trabajo en la mañana realiza una petición de origen en su hogar y destino en el lugar de trabajo, realiza sus labores durante la tarde y en la noche realiza una petición para regresar a su hogar. Por este motivo, el perfil de peticiones de origen - destino, esta sujeto a la dinámica del perfil de demandas de transporte presentado en el Capítulo 3, Sección 3.2.

Iguammente en la Figura 6-9 se muestran la zona de mayor concurrencia de los usuarios de



**Figura 6-8.:** Zonas de Magangué

Sincelejo. Al igual que en Magangué, el perfil de peticiones de transporte se representa como el perfil base de demandas de transporte presentado en el Capítulo 3, Sección 3.2.

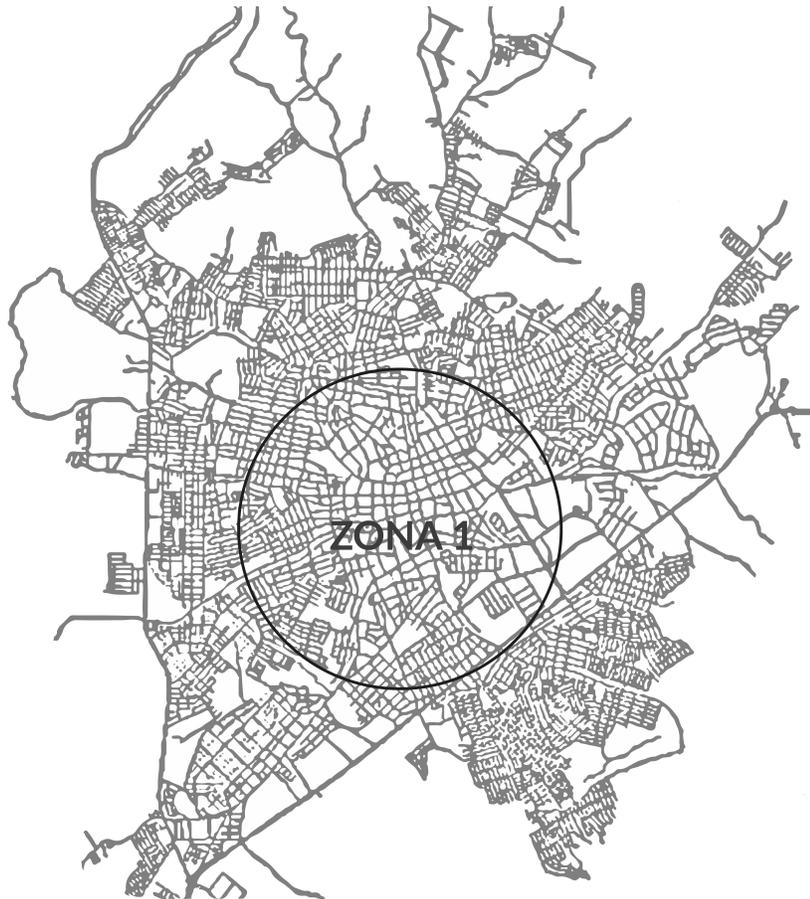
### **Peticiones de carga**

Los perfiles de peticiones de carga se generan como vectores que obedecen a la dinámica de perfiles mostrada en el Capítulo 3, Sección 3.2 y a los viajes establecidos para cada red de tráfico (Magangué y Sincelejo). La Figura 6-10 muestra la cantidad de peticiones de carga realizadas durante un día de simulación y también se muestran las respectivas demandas para cada hora dependiendo del número de peticiones realizadas. En esta instancia el vector de demanda se genera como un vector donde sus entradas son el número de peticiones durante 1 día, este vector es multiplicado por el estado de carga que tenga el vehículo eléctrico que realiza la petición en una hora determinada.

## **6.2. Gestión del despacho de energía**

La gestión óptima del despacho de energía, requiere un modelo de predicción que permita tomar las mejores decisiones que maximicen las ganancias del operador de la estación de carga. Para esto, consideré los perfiles de generación de energía fotovoltaica y el precio de la energía de compra a la red eléctrica como se muestra en la Figura 6-11.

Conviene enfatizar, que el sistema de gestión energética para el despacho óptimo se basa en un modelo de predicción y programación cuadrática, por lo tanto, para el desarrollo de esta



**Figura 6-9.:** Zonas de Sincelejo

tesis, se asume que los perfiles de generación fotovoltaica, el precio y la demanda energética son conocidos.

Bajo el contexto del caso de estudio, en la Figura **6-12** se muestra la toma de decisiones respecto al despacho óptimo de energía para una de las estaciones de carga ubicadas en la red de tráfico de Magangué. La estación de carga realiza compra de energía a la red eléctrica en horas pico de demandas energéticas, en los otros intervalos de tiempo donde la demanda es baja, se aprovecha la energía del respaldo de baterías para ser vendida a la red eléctrica y la solar fotovoltaica para cargar el respaldo de baterías.

Por otra parte, para la simulación de las dinámicas de la estación de carga respecto a la compra, venta y almacenamiento de energía se muestra en la Figura **6-13**. Para este caso en particular, la demanda energética de usuarios entre las 10 horas y las 15 horas aumenta como se muestra en la Figura, un instante antes el respaldo de baterías se encontraba en su máxima capacidad, por lo que, este pico de demanda fue suplido por el respaldo. Sin embargo, la ganancia en ese intervalo se reduce. El error entre la diferencia de la energía suministrada y la energía demandada es del 0% y la ganancia en el transcurso del día es de 16876.42 USD.

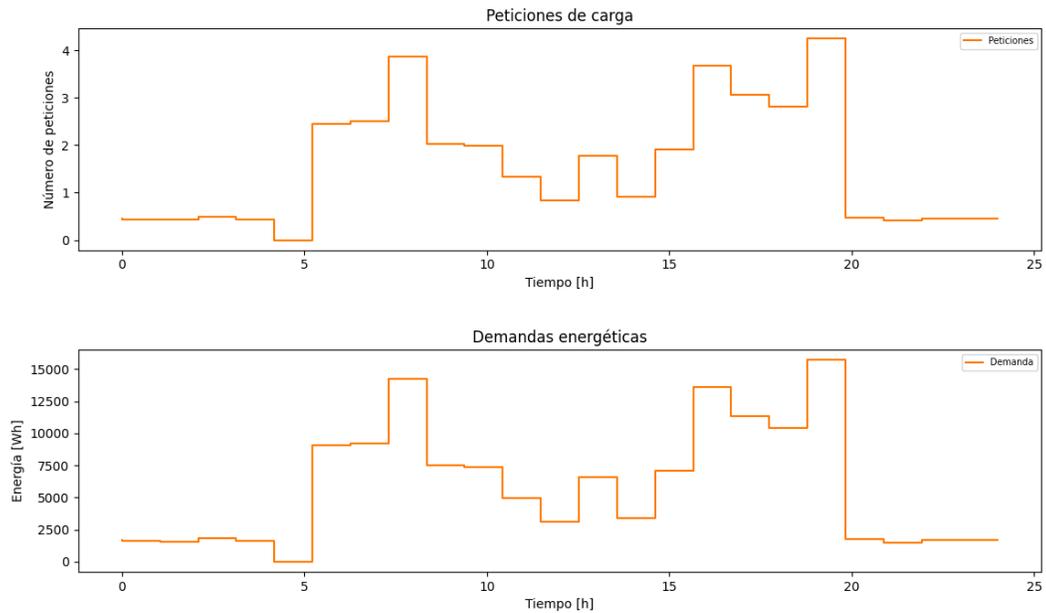


Figura 6-10.: Peticiones de carga y demanda energética

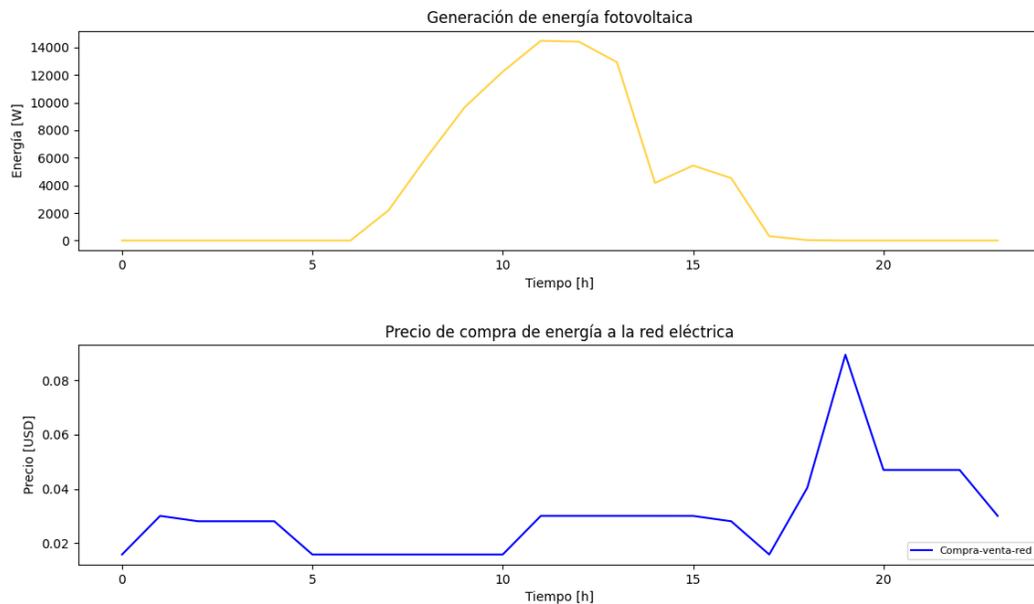
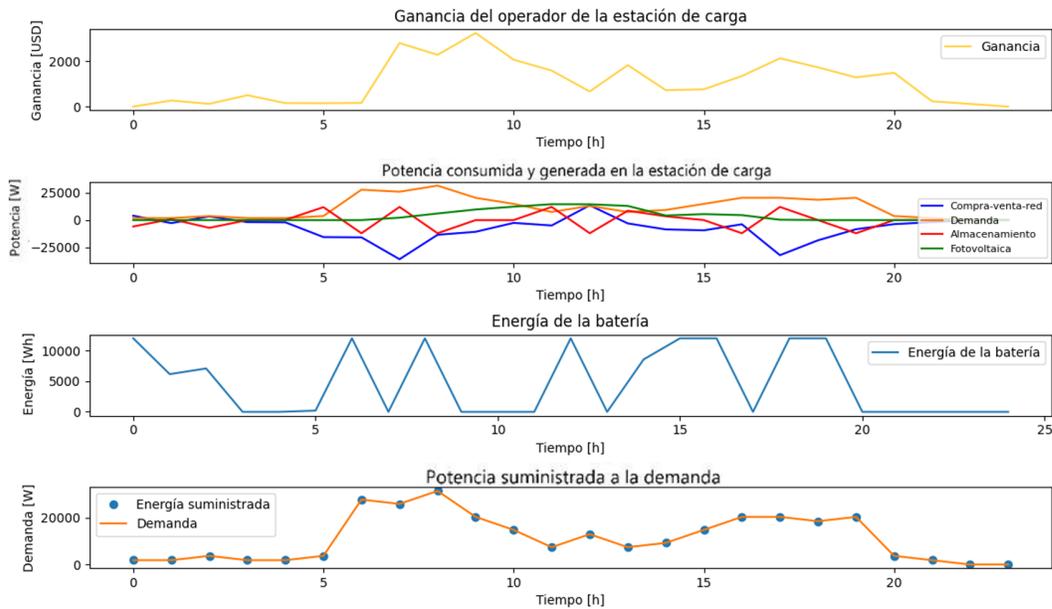
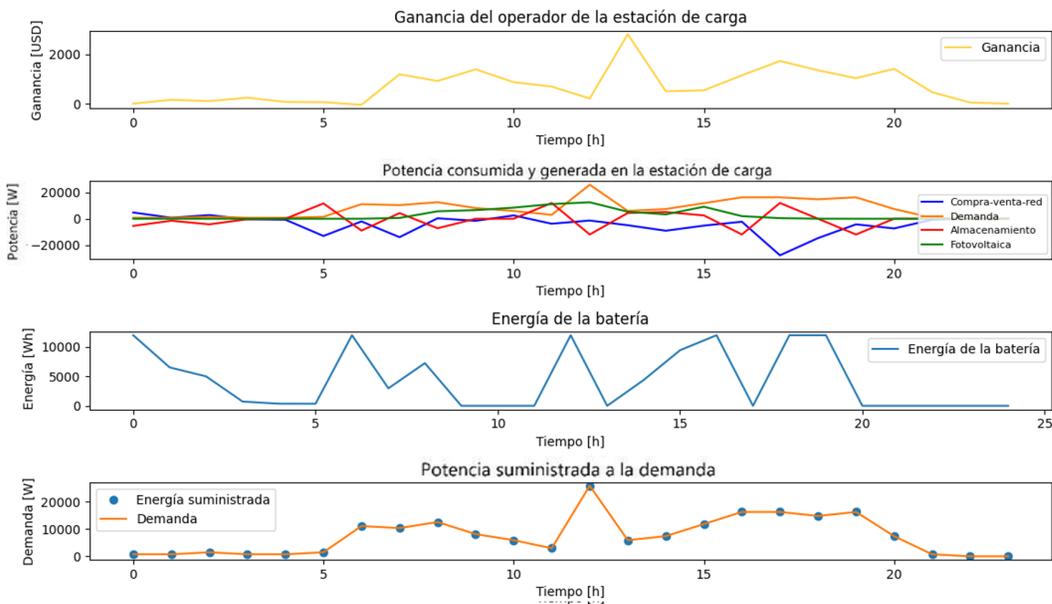


Figura 6-11.: Generación de energía fotovoltaica y perfil de precios de compra

En el informe científico reportado en [69], se determinan las demandas energéticas para la estación de carga intermedia entre Magangué y Pinillos. La embarcación eléctrica realiza 4 paradas durante todo el día en la estación intermedia. Las demandas corresponden a 42470 W a las 11 horas, 44330 W a las 13 horas, 91580 W a las 15 horas y 44330 W a las 17 horas, esto se puede ver en la Figura 6-14.



**Figura 6-12.:** Resultados de 1 día de simulación para Magangué



**Figura 6-13.:** Resultados de 1 día de simulación para Sincelejo

Para la estación de carga de embarcaciones eléctricas ubicada entre Magangué y Pinillos, se encuentra una ganancia de 20291.75 USD y un error en la diferencia entre la energía suministrada y la demandada entre el 0,5 % y el 1%. En vista de que el precio de venta a los usuarios es mayor al precio de compra de energía a la red, las ganancias aumentan considerablemente.

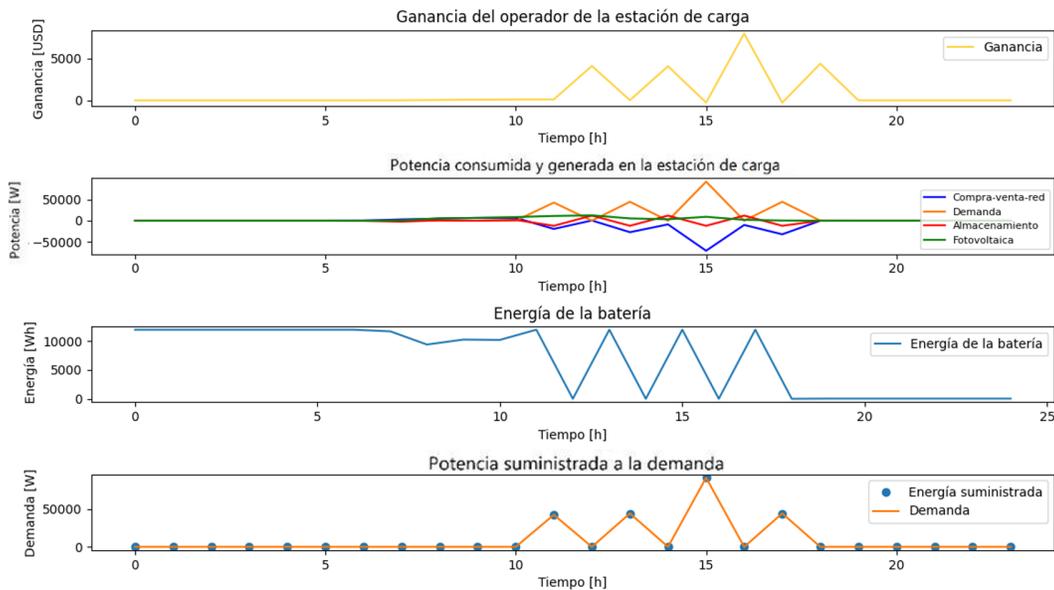


Figura 6-14.: Resultados de 1 día de simulación para Magangué-Pinillos

### 6.3. Resumen

En esta sección se presentó la validación del sistema de transporte eléctrico multimodal sostenible por medio de simulación en Python con Simulación de movilidad urbana, especialmente microsimulación de vehículos eléctricos y redes de tráfico. Los modelos de los vehículos eléctricos se simularon por medio de Python y SUMO, mediante la herramienta TraCI, es posible manipular los atributos de los vehículos eléctricos y tener una visualización en SUMO. Además, en este capítulo se presentaron dos casos de estudio, aplicados en las redes de tráfico simuladas de Magangué y Sincelejo, la localización y el dimensionamiento de estaciones de carga para las ciudades propuestas. De igual manera, se presentaron las peticiones de transporte por medio de solicitudes de origen y destino, teniendo en cuenta las zonas de las redes de tráfico y las peticiones de carga que dependen del estado de carga y el número de peticiones realizadas por cada hora de simulación. Finalmente, este capítulo presenta como se lleva a cabo la gestión del despacho de energía en 3 escenarios diferentes, para una de las estaciones de carga de las redes de tráfico de Magangué y Sincelejo y en la estación de carga de embarcaciones eléctricas entre Magangué y Sincelejo. En general este capítulo muestra la integración de cada uno de los modelos y métodos propuestos. A continuación, se presentan las conclusiones de la tesis.

# 7. Conclusiones

Esta tesis desarrolló un sistema de toma de decisiones de ubicación, dimensionamiento y despacho óptimo de las estaciones de carga para el abastecimiento energético de un sistema de transporte multimodal. Este sistema tiene como objetivo tomar decisiones oportunas que afectan al sistema de transporte y a las condiciones medioambientales.

Este capítulo resume las principales conclusiones de la tesis y también presenta las recomendaciones, el trabajo futuro y los resultados de la investigación.

## 7.1. Conclusiones

Esta tesis fue desarrollada en el marco del proyecto Energética 2030 en el objetivo P03 de movilidad sostenible. Primeramente, se realizó la revisión en la literatura donde se identificó al sector de transporte colombiano como el responsable de la utilización del 91 % de combustibles líquidos. Además, se expuso el bajo desarrollo en la integración de vehículos eléctricos para sobrellevar la degradación ambiental en Colombia debido al transporte convencional. En virtud de esto, se implementó un sistema de transporte multimodal que integra vehículos eléctricos, particularmente motocicletas híbridas y embarcaciones eléctricas para contribuir a la integración, desarrollo y cuidado medioambiental en Colombia. Además, se identificó que los sistemas de transporte sostenible cuentan con problemas a nivel de estación de carga relacionados con los tiempos de espera prolongados, el desabastecimiento energético y altas demandas energéticas. En consideración a estos problemas, se desarrollaron dos herramientas basadas en optimización, con el propósito de localizar, dimensionar y asistir a las estaciones de carga de un sistema de transporte eléctrico multimodal sostenible basado en simulación, donde también se consideraron modelos de consumo energético de motocicletas híbridas y embarcaciones eléctricas, que describen con un alto nivel de detalle el consumo energético dependiente de la velocidad. Los costos relacionados con el diseño de una estación de carga, el suministro energético y el beneficio del operador de la estación son los objetivos de optimización de este problema.

En el proceso de ubicación y dimensionamiento de estaciones de carga fotovoltaicas, con respaldo de baterías y conexión a la red eléctrica, se encontró una metodología basada en programación lineal entera mixta. Esta ha sido utilizada en la literatura para determinar la ubicación y el dimensionamiento de estaciones minimizando los costos relacionados a la operación, inversión y mantenimiento. En esta tesis se valida la metodología basada en programación lineal entera mixta, en dos casos de estudio representados por las redes de tráfico

de ciudades intermedias de Magangué y Sincelejo, para esto se tuvieron en cuenta datos relacionados con perfiles de irradiancia y perfiles de demandas energéticas y la aplicación del software de simulación de movilidad urbana SUMO. En la validación se encontraron las localizaciones de estaciones de tal forma que los vehículos tengan un acceso rápido y fácil a la estación de carga, así mismo, se dimensionaron las estaciones de carga que permitía el suministro de energía demandada a los usuarios. Teniendo en cuenta esto, para la ubicación y el dimensionamiento de estaciones de carga fluviales se instalan 3 estaciones de carga con un costo de 269123 [USD], estos resultados se basaron en métodos heurísticos y exactos. Igualmente, para la ubicación y el dimensionamiento de estaciones de carga terrestres, se instalan 4 estaciones de carga, donde los costos para una operación de 1 año son de 1416438 [USD], con un beneficio de 605030 [USD] y una tasa de rendimiento de 42.71 %.

En esta tesis se diseñó un sistema de toma de decisiones óptimas del despacho de energía respecto a la cantidad de energía comprada y vendida a la red eléctrica, almacenada en el respaldo de baterías y a la energía fotovoltaica generada. Se encontró que el error entre el suministro y la demanda para los diferentes casos de simulación estaba al rededor del 0 % y el 1 %, donde predomina  $N_p = 2$  en la simulación del MPC. También, se encontró que las ganancias para un tiempo de simulación de 5 días fueron de 81778.19 [USD] y para un tiempo de simulación de 1 mes, las pérdidas fueron de 28402.93[USD]. Considerando que el precio inicial de venta de energía al usuario era de 0,033 [USD] se obtuvieron pérdidas por parte del operador de la estación. Al aumentar el precio de venta del usuario hasta 0.11 [USD] las ganancias aumentaron.

Este sistema demostró ser oportuno a la hora de atender peticiones de carga, por lo general el sistema tenía prioridad sobre el suministro de energía demandada, sin embargo, superaron las expectativas respecto a la maximización de ganancias del operador de la estación de carga. Esta herramienta de optimización del despacho energético en conjunto con la herramienta de ubicación y dimensionamiento óptimo se diseñaron de tal forma que puedan ser flexibles y escalables a diferentes entornos de movilidad y transporte urbanos. SUMO cuenta con una alta variedad de modelos de redes de tráfico del todo el mundo, lo que facilitaría la implementación de estas herramientas en diferentes entornos teniendo en cuenta las necesidades técnicas, económicas y sociales de transporte.

En el contexto de movilidad colombiana resulta de vital importancia suministrar este tipo de herramientas, para el desarrollo social y económico del sector de transporte colombiano, promoviendo la multimodalidad y la sostenibilidad.

## 7.2. Recomendaciones y trabajo a futuro

En el desarrollo del modelo predictivo de ganancia del operador de la estación, es necesario considerar modelos de predicción para la generación solar fotovoltaica, el precio de energía y las demandas energéticas, para tener mayor precisión respecto a la toma de decisiones de carga y descarga y compra y venta de energía. Además, en el diseño de transporte multimodal

es necesario integrar una metodología que cuente con una variación en la tarifa del servicio de carga

SUMO dispone de modelos eléctricos para estimar el consumo energético de algunos vehículos. Sin embargo, cuenta con muy bajo desarrollo de modelos de vehículos híbridos los cuales representan una alternativa de solución a la problemática de la contaminación. También, realizar integración de diferentes alternativas de transporte, como buses eléctricos o tranvías eléctricos con aplicación en diferentes redes de tráfico resulta ser indispensable para esta investigación.

# A. Modelo de consumo energético de una motocicleta híbrida

Teniendo en cuenta los entornos de simulación construidos es necesario el desarrollo de la estimación del estado de consumo energético de la motocicleta híbrida bajo un escenario de simulación en SUMO, puesto que, la importancia del cálculo del consumo puede dar indicios de características de los estados de carga de la batería de la motocicleta además de esto permite disminuir la carga computacional de la simulación y finalmente permite que el sistema multimodal sea capaz de tomar una decisión óptima bajo restricciones particulares, por ejemplo, en que momentos realizar la carga de un vehículo, en que momentos el vehículo debe seguir prestando el servicio de transporte a los usuarios. Para el planteamiento inicial del problema se tuvo en cuenta el desarrollo del modelo dinámico de la moto híbrida reportado en el informe [71] del proyecto de movilidad sostenible de energética 2030. Del modelo se adquirieron las velocidades, aceleraciones y dinámicas respecto al consumo energético del sistema general de la moto híbrida como el SOC.

Inicialmente se define la estimación del comportamiento del consumo energético de la motocicleta con los siguientes modelos,  $E_r(k)$  hace referencia al modelo de energía regenerativa debido al frenado de la moto y  $E_c(k)$  representa el modelo de energía consumida debido a la velocidad y la aceleración de la motocicleta.

$$\hat{E}(k+1) = \hat{E}(k) + E_r(k) - E_c(k) \quad (\text{A-1})$$

La ecuación A-1 representa el modelo de consumo energético estimado en el instante  $k+1$ , este depende de los instantes actuales estimados respecto al consumo energético de la moto y de los modelos  $E_r(k)$  y  $E_c(k)$  descritos.

$$E_r(k) = a_0 \cdot a(k)^- \quad (\text{A-2})$$

La ecuación A-2 representa el modelo  $E_r(k)$  que depende de la aceleración negativa que representa los momentos donde la motocicleta aplica el freno regenerativo del sistema, también depende del parámetro  $a_0$  para la descripción aproximada del modelo de consumo energético de la motocicleta híbrida.

A continuación, se describe la aceleración negativa  $a^-(k)$  como una función a tramos, si se tiene en cuenta que la aceleración de la motocicleta es positiva entonces el valor de la aceleración negativa es cero, y si la aceleración de la motocicleta es negativa entonces, la aceleración negativa va a adquirir el valor real de la aceleración.

$$a(k)^- = \begin{cases} 0 & a(k) \geq 0 \\ a(k) & a(k) < 0 \end{cases} \quad (\text{A-3})$$

$$E_c(k) = a_1 \cdot v(k) + a_2 \cdot v(k)^2 + a_3 \cdot a(k) + a_4 \cdot a(k)^2 \quad (\text{A-4})$$

La ecuación A-4 representa el modelo  $E_c(k)$  que depende tanto de la velocidad, el cuadrado de la velocidad, la aceleración, el cuadrado de la aceleración de la motocicleta híbrida y los parámetros  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $a_3$  y  $a_4$  para la descripción aproximada del modelo de consumo energético de la motocicleta híbrida.

$$\hat{E}(k+1) = \hat{E}(k) + a_0 \cdot a(k)^- - a_1 \cdot v(k) - a_2 \cdot v(k)^2 - a_3 \cdot a(k) - a_4 \cdot a(k)^2 \quad (\text{A-5})$$

La ecuación A-5 resulta de reemplazar las ecuaciones A-4 y A-2 en la ecuación A-1 y se define el estado estimado  $\hat{E}(k+1)$  siendo la energía estimada en el instante  $k+1$  y el estado estimado en el instante actual  $\hat{E}(k)$  siendo la energía estimada en el instante actual. Esta ecuación permite determinar la estimación del consumo energético de la motocicleta híbrida dependiendo de la velocidad y la aceleración de la motocicleta híbrida.

El método de mínimos cuadrados es un análisis numérico que se basa en la optimización matemática, utilizada para calcular el promedio de las diferencias entre los valores reales y los que se estiman por medio de una recta. Lo cual lleva a una recta de regresión lineal, que efectúa predicciones sobre el valor de una variable “Y” dependiente, con respecto a un conjunto de valores de “X” que en este caso vendría siendo la variable independiente [54]. Para la solución y desarrollo del modelo de consumo energético se determinó utilizar el teorema de mínimos cuadrados matricial para sistemas en ecuaciones de estados [40].

El conjunto de soluciones de mínimos cuadrados de  $Ax = b$  coincide con el conjunto de soluciones no vacío del sistema A-6

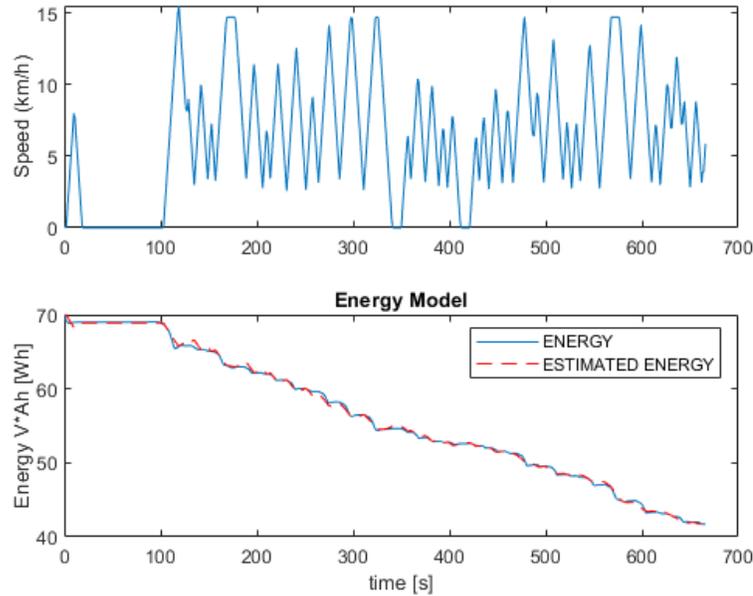
$$A^T Ax = A^T b \quad (\text{A-6})$$

Si la matriz  $A^T A$  es invertible, el sistema  $A^T Ax = A^T b$  tiene solución única y está dada por:

$$x_0 = (A^T A)^{-1} A^T b \quad (\text{A-7})$$

Tabla A-1.: Resultados

<i>Parámetros</i>	<i>Valor</i>
$a_0$	3.13094
$a_1$	-0.0003
$a_2$	0.000000000006747
$a_3$	3.37232
$a_4$	-0.000004018788753



h

Figura A-1.: Estimación del consumo energético y velocidad de la motocicleta

Por medio de estas ecuaciones se dará solución a la aproximación de parámetros para los modelos reducidos de las dinámicas energéticas y posteriormente la estimación del consumo energético de la motocicleta híbrida. En la Tabla A-1 se muestra el resultado de la aproximación por medio de mínimos cuadrados a la dinámica real de la motocicleta híbrida. Para los resultados obtenidos se considera la matriz  $A$  como la matriz de valores de velocidad y aceleración, el vector  $b$  como el vector de consumo energético general del sistema y el vector  $x_0$  como el vector de parámetros  $a_0, a_1, a_2, a_3, a_4$ . En la Tabla A-1 se resumen los parámetros encontrados por el método de mínimos cuadrados que aproximan al modelo real del consumo energético de la motocicleta híbrida.

Para esto, como insumo de entrada se ingresó un perfil de velocidad el cual se muestra en la Figura A-1 como una línea continua azul, bajo este perfil actúa el modelo real de la motocicleta híbrida y se extraen las velocidades y las aceleraciones que servirán como insumo

de entrada al modelo construido de consumo energético. También se extrajo el consumo energético real de la motocicleta híbrida y se comparó con la dinámica del modelo construido como se observa en la Figura **A-1**.

Finalmente, al considerar el consumo energético como una variable importante de la simulación, cada una de las motocicletas simuladas en SUMO, contarán con una variable propia de consumo energético la cual dependerá de los trayectos que realice, de las velocidades que pueda alcanzar en una vía, del tráfico urbano que pueda existir, de la aleatoriedad de los semáforos del municipio, de los tiempos de espera de carga en las estaciones de carga y de las posibles peticiones realizadas por los usuarios en el transcurso de un día.

# Bibliografía

- [1] A. K. MATHUR, S. Charan T. ; YEMULA, P. K.: Optimal Charging Schedule for Electric Vehicles in Parking Lot with Solar Power Generation. En: *Int. Conf. Innov. Smart Grid Technol* (2018)
- [2] A. SCIARRETTA, P. Dewangan P. C.and Tona E. N.D. Bergshoeff C. Bordons L. Charm-pa Ph Elbert L. Eriksson T. Hofman M. Hubacher P. Isenegger F. Lacandia A. Laveau H. Li D. Marcos T. Nüesch S. Onori P. Pisu J. Rios E. Silvas M. Sivertsson L. Triboli- van der A. J. H. ; WU, M.: A control benchmark on the energy management of a plug-in hybrid electric vehicle. En: *Control Engineering Practice* (2014)
- [3] ABDULLA AL WAHEDI, Yusuf B.: Techno-economic optimization of novel stand-alone renewables-based electric vehicle charging stations in Qatar. En: *Energy* 243 (2022). – ISSN 0360–5442
- [4] AHMADREZA MORADIPARI, Mahnoosh A.: Pricing and Routing Mechanisms for Dif-ferentiated Services in an Electric Vehicle Public Charging Station Network. En: *IEEE TRANSACTIONS ON SMART GRID* (2019)
- [5] AHN, Kyoungho ; RAKHA, Hesham A.: A simple hybrid electric vehicle fuel consumption model for transpor- tation applications. En: *Applied Electromechanical Devices and Machines for Electric Mobility Solutions* (2020), p. 1–15
- [6] ET AL, G. L. Z.: Fast Charging Lithium Batteries: Recent Progress and Future Pros-pects. En: *Small* (2019)
- [7] ALI WIRASINGHA, Sanjaka G.and E.: Classification and review of control strategies for plug-in hybrid electric vehicles. En: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* (2011)
- [8] ANATOLE DESREVEAUX, Rochdi Trigui Elodie C. ; KLEIN, John: Impact of the Ve-locity Profile on Energy Consumption of Electric Vehicles. En: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 68 (2019), p. 1–1
- [9] ANDREA DI MARTINO, Seyed Mahdi Miraftebzadeh \*. ; LONGO, Michela: Review Strategies for the Modelisation of Electric Vehicle Energy Consumption: A Review. En: *Energies* (2022)

- 
- [10] BAHRAMI, Ali: EV Charging Definitions, Modes, Levels, Communication Protocols and Applied Standards Technical Report. En: *Technical report, BorgWarner Corporate* (2020)
- [11] BAKIRTZIS A. G. VAGROPOULOS, S. I.: Optimal bidding strategy for electric vehicle aggregators in electricity markets. En: *IEEE Transactions on Power Systems* (2013)
- [12] BARIS YILDIZ, Ahmet S.: The urban recharging infrastructure design problem with stochastic demands and capacitated charging stations. En: *Transportation Research Part B* (2019)
- [13] BAYRAM, George Devetsikiotis M.: Unsplittable Load Balancing in a Network of Charging Stations Under QoS Guarantees. En: *IEEE Transactions on Smart Grid* 6 (2015), p. 1292–1302. – ISSN 19493053
- [14] C. BIAN, F. Wallin A. Avelin L. L. ; YU, Z.: Finding the optimal location for public charging stations - A GIS-based MILP approach. En: *Energy Procedia*, (2019)
- [15] CAICEDO, C. R. P. ; OVIEDO, J. J. E.: Desarrollo de un modelo dinámico de tráfico multimodal (automóviles, articulados, peatones y bicicletas) con fines de control. (2015)
- [16] CAMILO VÉLEZ, Daniel V. ; MONTOYA, Alejandro: Infrastructure Estimation for a Freight/Personal Transport peration with an Electric Boat on the Magdalena River. En: *Springer Nature Switzerland AG 2020* (2020)
- [17] CANDELA. *The journey how we redefined boating.* .  
<https://candelaspeedboat.com/company/>
- [18] CARON, Stéphane. *Quadratic programming in Python*
- [19] CEDRIC DE CAUWER, Thierry Coosemans Saphir F. ; MIERLO, Joeri V.: A data-driven method for energy consumption prediction and energy-efficient routing of electric vehicles in real-world conditions. En: *Energies* 10 (2017)
- [20] CHEN, Xiao XuWeihao HuWen LiuYuefang DuRui HuangQi H.: Risk management strategy for a renewable power supply system in commercial buildings considering thermal comfort and stochastic electric vehicle behaviors. En: *Energy Conversion and Management* (2021)
- [21] CHIARA FIORI, Kyounggho A. ; RAKHA, Hesham A.: Microscopic series plug-in hybrid electric vehicle energy consumption model: Model development and validation. En: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* (2018), p. 175–185

- [22] CLARA MARINA MARTINEZ, Dongpu Cao Efstathios Velenis Bo G. ; WELLERS, Matthias: Energy management in plug-in hybrid electric vehicles: Recent progress and a connected vehicles perspective. En: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* (2016)
- [23] CUMBAL SIMBA, J. R.: Análisis del desempeño de una vanet mediante el uso de protocolos de enrutamiento y la ubicación óptima de la infraestructura rsu para alcanzar un throughput eficiente en escenarios urbanos. (2017)
- [24] CÁCERES, J. A. C. ; CASTELLANOS, J. A.: Simulación Microscópica De Tráfico Urbano Y Su Aplicación En Un Área De La Ciudad De Zaragoza. En: *Cea-Ifac.Es*, (2004)
- [25] D. A. HOWEY, B. C. ; LYTTON, L.: Comparative measurements of the energy consumption of 51 electric, hybrid and internal combustion engine vehicles. En: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* (2011), p. 459–464
- [26] DANIEL VILLA, Alejandro M. ; HERRERA, Aura M.: The Electric Riverboat Charging Station Location Problem. En: *Journal of Advanced Transportation* (2020)
- [27] DAVID JIMÉNEZ, Jesús Fraile-Ardanuy Javier Serrano Rubén F. ; ÁLVAREZ, Federico: Modelling the effect of driving events on electrical vehicle energy consumption using inertial sensors in smartphones. En: *Energies* 11 (2018), p. 412
- [28] DE LORENZO M. G. CONSOLIDANI M. MUZI, F.: New concepts on microgrid-prosumer nodes interaction. En: *2019 AEIT International Annual Conference* (2019)
- [29] DUNCAN E. SMITH, Diana-Andra Borca-Tasciuc: Towards a standard approach for annual energy production of concentrator-based building-integrated photovoltaics. En: *Renewable Energy* (2022)
- [30] E.GROSSMANN, José A. Caballero. I.: Una revisión del estado del arte en optimización. En: *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial RIAI* (2007)
- [31] ERDELIC, T ; CARIC, T: A Survey on the Electric Vehicle Routing Problem: Variants and Solution Approaches. En: *Journal of Advanced Transportation* (2019), p. 1–48
- [32] G. PIAZZA, F. D. ; SIRI, S.: Optimal design of electric mobility services for a Local Energy Community. En: *Sustain. Energy, Grids Networks*, (2021)
- [33] GIYEON HWANG, Jongmyung Kim Kyu-Jin Lee-Sangyul L. ; 1, Minjae K.: Energy management optimization of series hybrid electric bus using an ultra-capacitor and novel efficiency improvement factor. En: *Sustainability* (2020), p. 7345
- [34] GLYNN, Gary W Escalona-H J.: Ingeniería ambiental. En: *Environmental Science and Engineering* (1999). ISBN 970–17–0266–2

- [35] GÓMEZ, Isabel C.: Coordinated Charging Strategy for a Network of Photovoltaic Charging Stations (PVCSS): a trade-off between Stations Operator and Electric Vehicles (EVs) users. (2020)
- [36] H. JAMSHIDI, J. T. van E. ; NÖKEL, K.: Dynamic planning for simultaneous recharging and relocation of shared electric taxis: A sequential MILP approach. En: *Transp. Res. Part C Emerg. Technol* (2020)
- [37] H. VINCENT POOR, H. D. Tuan A. V. S. ; DUONG, T. Q.: Model predictive control for smart grids with multiple electric-vehicle charging stations. En: *IEEE Trans. Smart Grid*, (2019)
- [38] HAODONG WANG, Zan Liu Songwei Zhang Zhiguo Li Tie Q.: Multi-parameters dynamic scheduling with energy management for electric vehicle charging stations. (2022)
- [39] I. SAGAAMA, W. T. ; KAMOUN, F.: Evaluation of the Energy Consumption Model Performance for Electric Vehicles in SUMO. En: *Proc. - 2019 IEEE/ACM 23rd Int. Symp. Distrib. Simul. Real Time Appl. DS-RT 2019*, (2019)
- [40] J. SALAS, A. TORRENTE: *Mínimos cuadrados*. 2021. – <http://ocw.uc3m.es/matematicas/algebralineal>.
- [41] JIANGBO WANG, and Toshiyuki Y.: Improving electricity consumption estimation for electric vehicles based on sparse GPS observations. En: *Energies* 10 (2017), p. 19–22
- [42] JIN LI, Feng W. ; HE, Yu: Electric Vehicle Routing Problem with Battery Swapping Considering Energy Consumption and Carbon Emissions. En: *Sustainability* (2020), p. 10537
- [43] JUAN-DAVID MIRA, Esteban B. ; MEJÍA-GUTIÉRREZ, Ricardo: Preliminary Sizing of a Propulsion Unit for an Electrically-Powered Vessel Using a Screw Propellers Performance Comparison Tool. En: *WEA 2020. Communications in Computer and Information Science* (2018)
- [44] JUAN-DAVID MIRA, Esteban B. ; MEJÍA-GUTIÉRREZ, Ricardo: Preliminary Sizing of a Propulsion Unit for an Electrically-Powered Vessel Using a Screw Propellers Performance Comparison Tool. En: *Applied Computer Sciences in Engineering* (2020)
- [45] KAI LIU, Toshiyuki Yamamoto Takayuki M.: Exploring the interactive effects of ambient temperature and vehicle auxiliary loads on electric vehicle energy consumption. En: *Applied Energy* 227 (2018), p. 324–331
- [46] KASPRZYK, Leszek: Modelling and analysis of dynamic states of the lead-acid batteries in electric vehicles. En: *Maintenance and Reliability* 19 (2017), p. 229–236

- [47] KONG, Bhaskar Prasad Bhattarai Bishnu P. Devetsikiotis M.: Cloud-Based Charging Management of Electric Vehicles in a Network of Charging Stations. En: *IEEE International Conference on Communications* (2018). – ISBN 9781538631805
- [48] KONSTANTINOS N.GENIKOMSAKIS, Georgios M.: A computationally efficient simulation model for estimating energy consumption of electric vehicles in the context of route planning applications. En: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 50 (2017), p. 98–118
- [49] KURCZVEIL, López P.A. Schnieder E.: Implementation of an Energy Model and a Charging Infrastructure in SUMO. In: Behrisch, M., Krajzewicz, D., Weber, M. (eds.) *Simulation of Urban Mobility. Lecture Notes in Computer Science*. En: *Springer* (2014), p. 33–43
- [50] LI PENG ZHANG, Wei L. ; QI, Bing N.: Energy optimization of multi-mode coupling drive plug-in hybrid electric vehicles based on speed prediction. En: *Energy* (2020)
- [51] LIU, Wenqian Yuan Xiaoling Niu M.: Reserving Charging Decision-Making Model and Route Plan for Electric Vehicles Considering Information of Traffic and Charging Station. En: *Sustainability* 2018 10 (2018), p. 1324. – ISSN 2071–1050
- [52] LUIN, Petelin S. ; AL-MANSOUR, F: Microsimulation of Electric Vehicle Energy Consumption. En: *Energy* 174 (2019)
- [53] LUIS EDUARDO CHAVEZ PERDOMO, José Luis Alba A.: Ministerio de transporte superintendencia de puertos y transporte superintendencia delegada de puertos proyecto de investigación infraestructura fluvial.
- [54] MANUEL MOLINA: *La distancia más corta. El método de los mínimos cuadrados*. 2020. – <https://anestesiario.org/2020/la-distancia-mas-corta-el-metodo-de-los-minimos-cuadrados>
- [55] ÁNGELA MARÍA OROZCO GÓMEZ, Camilo Pabón Almanza Clara Margarita Montilla Herrera Edith Aristide Galvis Fredy David Gil R.: Transporte en Cifras 2021 Anuario Nacional de Transporte. (2022). – ISSN 2954–5730
- [56] MATOS M. A. BESSA, R. J.: Global against divided optimization for the participation of an ev aggregator in the day-ahead electricity market. En: *Part I: Theory. Electric Power Systems Research* (2013)
- [57] MD ABDUL QUDDUS, Mohammad M.: Modeling electric vehicle charging station expansion with an integration of renewable energy and Vehicle-to-Grid sources. En: *Transportation Research Part E* (2019)

- [58] MILLAR, Jussi Lehtonen Matti Saarijarvi Eero Degefa Merkebu Koivisto M.: Probabilistic prosumer node modeling for estimating planning parameters in distribution networks with renewable energy sources. En: *58th Annual International Scientific Conference on Power and Electrical Engineering of Riga Technical University, RTUCON 2017 - Proceedings* (2017), p. 1–8. ISBN 9781538638460
- [59] MINAMI, Shigeyuki ; YAMACHIKA, Naoki: A practical theory of the performance of low velocity boat. En: *Journal of Asian Electric Vehicles* (2004), p. 535–539
- [60] MIRI, Fotouhi A. ; EWIN, N: Electric vehicle energy consumption modelling and estimation—A case study. En: *International Journal of Energy Research* (2020)
- [61] MONTAZERI-GH, Morteza ; MAHMOODI-K, Mehdi: Optimized predictive energy management of plug-in hybrid electric vehicle based on traffic condition. En: *Journal of cleaner production* (2016)
- [62] MUQEET, Intisar Ali Ahmad Aftab Iqbal Muhammad Muzaffar Ali Saqib Guerrero Josep M.: Optimal Operation of Energy Storage System for a Prosumer Microgrid Considering Economical and Environmental Effects. En: *RAEE 2019 - International Symposium on Recent Advances in Electrical Engineering* (2019), p. 8887002. ISBN 9781728130729
- [63] NEERAJ RAMA, Joshua Orlando Darrell R. ; CHEN, Bo: Route-optimized energy management of connected and automated multi-mode plug-in hybrid electric vehicle using dynamic programming. En: *SAE Technical Paper* (2019)
- [64] NSRDB: *NSRDB Data Viewer*. 2020. – <https://maps.nrel.gov/nsrdb-viewer>, Accedido en septiembre de 2019
- [65] P. XU, J. Wang J. Li W. Z. ; LIU, H.: Dynamic pricing at electric vehicle charging stations for waiting time reduction. En: *ACM Int. Conf. Proceeding Ser* (2018)
- [66] PROGRAMME D. NATIONS U. NATIONS, U.: Energy, the environment and human health. (1973)
- [67] RICARDO BARRERO, Xavier T. ; MIERLO, Joeri V.: Quasi-static simulation method for evaluation of energy consumption in hybrid light rail vehicles. En: *2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference* (2008)
- [68] RICARDO MEJIA-GUTIERREZ, Jorge Hernán Córdoba Morales Mauricio Fernández-Montoya Simón Polanía Restrepo Laura María Moreno Durango Federico Tirado Escoba Javier Emilio Sierra Carrillo Boris Alexander Medina Salgado José López Tatiana Manrique Espíndola Gustavo Andrés Moreno Edgar Rincón Gil Juan Camilo Tejada Orjuela Jhon Fernando Vargas Jaramillo Andrés Palacio Velásquez Felipe Henao Ramírez Felipe

- Mendoza G.: Diseño Preliminar: Kit de conversión a tracción eléctrica para movilidad terrestre / Universidad EAFIT. Medellín, 2023. – Informe de Investigación
- [69] RICARDO MEJÍA-GUTIÉRREZ, Camilo Vélez Erick Santiago Gómez Oviedo Sara López Valentina Gómez Juan Pablo González Christian Portilla Felipe V.: Diseño y desarrollo - Sistema integrado de movilidad eléctrica multimodal (Moto+Bote+Estación) / Universidad EAFIT. Medellín, 2021. – Informe de Investigación
- [70] RICARDO MEJÍA-GUTIÉRREZ, Jorge Hernán Córdoba Morales Gustavo Andrés Moreno Juan Camilo Tejada Javier Emilio Sierra Boris Alexander Medina José Lopéz Esteban Betancur Mauricio Fernandez Harvy Correa Santiago Henao Alejandro Castaño Juan Manuel Posada Felipe Mendoza Laura María Moreno Felipe Henao Federico T.: Investigación de las condiciones y necesidades para la implementación del sistema de movilidad eléctrica terrestre en Magangué y Sincelejo / Universidad EAFIT. Medellín, 2021. – Informe de Investigación
- [71] RICARDO MEJÍA-GUTIÉRREZ, Jorge Hernán Córdoba Morales Laura María Moreno Durango Federico Tirado Escobar Mauricio Fernández Montoya Alejandro Castaño Posada Isabella Vera Arias1 Maria José Gallego Molina Tatiana Manrique Espíndola Jhon Fernando Vargas J.: Diseño de Detalle: Kit de conversión a tracción eléctrica para movilidad terrestre / Universidad EAFIT. Medellín, 2023. – Informe de Investigación
- [72] RICARDO MEJÍA-GUTIÉRREZ, Juliana Carolina Acosta Jácome Alejandro Mora C.: Estado del arte y marco teórico - Modelos económicos aplicables a los nodos prosumidores de la red eléctrica / Universidad EAFIT. Medellín, 2022. – Informe de Investigación
- [73] RICARDO MEJÍA-GUTIÉRREZ, Manuela Montoya Rivera Gilberto Osorio Gómez Maria Antonia Zapata Pérez Luisa Fernanda Ruiz Navarrete David Nicolás Márquez Navarrete Sara Restrepo Muñoz Juan Felipe Sanchez Arbeláez Jorge Luis Moreno Sabogal Juan Pablo Palacio Uribe Carlos Arturo Cepeda Coley Juan Camilo Giraldo Cano Juan-David Mira Pineda Felipe Mendoza Giraldo Mauricio Fernández Montoya Laura Flores Llano Maria Alejandra Cervera Robles Camilo Villa Tamayo Andrés Felipe Guerra Jimenez Juan Carlos Osorio M.: Fabricación de prototipo de la Embarcación Eléctro-Solar, parte II. / Universidad EAFIT. Medellín, 2021. – Informe de Investigación
- [74] RUI SHENG WANG, Qiang Xing Ziqi Z. ; ZHANG, Tian: A Modified Rainbow-Based Deep Reinforcement Learning Method for Optimal Scheduling of Charging Station. En: *Sustainability* (2022)
- [75] RUI YANG JINA, Chao Lub Jie S.: Deep reinforcement learning-based strategy for charging station participating in demand response Author links open overlay panel. En: *Applied Energy* (2022)

- [76] S. SACHAN, S.N. Singh P.P. Singh D.D. S.: Planning and operation of EV charging stations by chicken swarm optimization driven heuristics. En: *Energy Conversion and Economics* (2021)
- [77] S. SUGANYA, S. C. R. ; VENKATESH, P.: Simultaneous coordination of distinct plugin Hybrid Electric Vehicle charging stations: A modified Particle Swarm Optimization approach. En: *Energy* (2017)
- [78] SAMIA BOUBAKER, Ferid R. ; KALBOUSSI, Adel.: Estimating energy consumption of hybrid electric vehicle and gasoline classical vehicle. En: *2013 International Conference on Advanced Logistics and Transport, ICALT 2013* (2013), p. 221–226
- [79] SAVITSK, Daniel: Hydrodynamic design of planing hulls. En: *Marine Technology and SNAME News* 1 (1964), p. 71–95
- [80] SHAOBO XIE, Shanwei Qi Xiaolin Tang Kun Lang Zongke Xin James B.: Model Predictive Energy Management for Plug In Hybrid Electric Vehicles Considering Optimal Battery Depth of Discharge. En: *Energy* 173 (2019)
- [81] SIDDIQUI A. ROMAN T. G. S. SODER L. MOMBER, I: Risk averse scheduling by a pev aggregator under uncertainty. En: *IEEE Transactions on Power Systems* (2015)
- [82] SOINI, David Patel Martin K.: Impact of prosumer battery operation on the cost of power supply. En: *Journal of Energy Storage* 29 (2020). – ISSN 2352152X
- [83] TAO ZENG, Minghui Hu Yan Chen Changrong Yuan Jingrui C. ; ZHOU, Anjian: Modelling and predicting energy consumption of a range extender fuel cell hybrid vehicle. En: *Energy* (2018), p. 187–197
- [84] DE TRANSPORTE, MT M. ; BID: Plan maestro de transporte (2010 – 2032). (2022)
- [85] UNIÓN ANDINA: *¿Por qué vivir en una ciudad intermedia puede aumentar tu calidad de vida?* 2022. – <https://www.unionandinacolombia.com/blog/ciudades-intermedias-mejoran-calidad-de-vida/>: :text=%C2%BFQu%C3%A9%20son%20las%20ciudades%20intermedias,son%20de%20un%20tama%C3%B1o%20peque%C3%B1o.
- [86] UPME, Unidad de planeación minera e. *Plan Energético Nacional 2020-2050*. <https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Paginas/PEN.aspx>
- [87] VILLA, Daniel ; MONTOYA, Alejandro: A Taxonomy of Energy Consumption Models for Electric Vehicles. En: *MOVICI-MOYCOT 2018: Joint Conference for Urban Mobility in the Smart City* (2018), p. 1–7

- 
- [88] W. XIONG, X. Y. ; YANG, Y.: Energy Management Strategy of Photovoltaic Charging Station for Electric Vehicles in Commercial Area. En: *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng* (2018)
- [89] WANG, Liuping: *Model Predictive Control System Design and Implementation Using MATLAB*. Springer, 2009
- [90] WONG, P. ; ALIZADEH, M.: Congestion control and pricing in a network of electric vehicle public charging stations. En: *55th Annu. Allert. Conf. Commun. Control. Comput. Allert.* (2018)
- [91] XINGZHEN BAI, Lei Zou Hongjian Liu Qiao S. ; ALSAADI, Fuad E.: Electric vehicle charging station planning with dynamic prediction of elastic charging demand: a hybrid particle swarm optimization algorithm. En: *Complex Intelligent Systems* (2022)
- [92] XINMEI YUAN, Guokai Hong Xueqi Huang L.: Method for evaluating the real-world driving energy consumptions of electric vehicles. En: *Energy* 141 (2017), p. 1955–1968
- [93] XUEWEI QI, KanokBoriboonsomsin Matthew J.: Data-driven decomposition analysis and estimation of link-level electric vehicle energy consumption under realworld traffic conditions. En: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* (2017), p. 0–1
- [94] Z. MOGHADDAM, D. H. ; PHUNG, Q. V.: Smart Charging Strategy for Electric Vehicle Charging Stations. En: *IEEE Trans. Transp. Electrif* (2017)
- [95] ZHAN, Dingsong CuiZhenpo WangPeng LiuShuo WangDavid G. DorrellXiaohui L.: Operation optimization approaches of electric vehicle battery swapping and charging station: A literature review. En: *Energy* (2022)
- [96] ZHANG, Wang Z. Liu P. ; ZHANG, Z: Energy consumption analysis and prediction of electric vehicles based on real-world driving data. En: *Applied Energy* 174 (2020)
- [97] ZHENG, Yue Hill David J. Meng K.: Online Distributed MPC-Based Optimal Scheduling for EV Charging Stations in Distribution Systems. En: *IEEE Transactions on Industrial Informatics* 15 (2019), p. 638–649. – ISSN 15513203
- [98] ZONGGEN YI, Peter H. B.: Adaptive multiresolution energy consumption prediction for electric vehicles. En: *IEEE Transactions on Vehicular Technology* 66 (2017), p. 10515–10525