



Universidad del
Rosario

Escuela de Ingeniería,
Ciencia y Tecnología



Maestría en
Energías Renovables

**MODELO PARA LA EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE
MICROMOVILIDAD ELÉCTRICA EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ COLOMBIA**

Trabajo presentado para obtener el título de:
MAGÍSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES

Autor:
Johann Florez Rojas

**UNIVERSIDAD DEL ROSARIO
ESCUELA DE INGENIERÍA, CIENCIA Y TECNOLOGÍA
MAESTRIA EN ENERGÍAS RENOVABLES
BOGOTÁ COLOMBIA, JULIO DE 2023**



Universidad del
Rosario

Escuela de Ingeniería,
Ciencia y Tecnología



Maestría en
Energías Renovables

**MODELO PARA LA EVALUACIÓN DE LA IMPLEMENTACIÓN DE
MICROMOVILIDAD ELÉCTRICA EN LA CIUDAD DE BOGOTÁ COLOMBIA**

Trabajo presentado para obtener el título de:
MAGÍSTER EN ENERGÍAS RENOVABLES

Autor:

Johann Florez Rojas

Director:

Mauricio Becerra Fernández, PhD

**UNIVERSIDAD DEL ROSARIO
ESCUELA DE INGENIERÍA, CIENCIA Y TECNOLOGÍA
MAESTRIA EN ENERGÍAS RENOVABLES
BOGOTÁ COLOMBIA, JULIO DE 2023**

AGRADECIMIENTOS

Agradezco principalmente a mi familia por el continuo apoyo que me brindaron en el transcurso de esta maestría y al tutor quien, con su apoyo logramos darle un rumbo adecuado al presente proyecto.

ABSTRACT

The mobility in city of Bogotá is diversified for users in different public and private transport systems. For the mobility of users who are generally transported individually, an alternative for the use of one-person electric micromobility is proposed. For this, the system dynamics methodology is used to observe the behavior of mobility in the city of Bogotá when unipersonal electric micromobility is implemented, evidencing the results in the development of emissions of particulate matter and carbon monoxide added to the participation of charging stations with photovoltaic systems.

The migration of traditional mobility users to one-person electric micromobility systems makes it possible to demonstrate reductions in emissions resulting from the combustion of private vehicles and motorcycles, as well as the need for charging systems with photovoltaic systems. Therefore, it is important to implement policies and strategies that promote one-person electric micromobility for different transportation purposes, seeking to mitigate emissions from combustion and strengthen the implementation of photovoltaic technologies aimed at supplying energy for urban transportation in the city of Bogotá.

CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	3
ABSTRACT	4
CONTENIDO.....	5
INTRODUCCIÓN	11
1. OBJETIVOS Y RESULTADOS	13
1.1 Objetivo General	13
1.2 Objetivos específicos.....	13
1.3 Resultados.....	13
2. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN	14
2.1 Población en la ciudad de Bogotá	14
2.2 Sistemas de movilidad en la ciudad de Bogotá	14
2.2.1 Sistema de movilidad masivo SITP.....	15
2.2.2 Sistema de movilidad individual tipo taxi.....	15
2.2.3 Sistema de movilidad individual particular.....	16
2.3 Velocidad promedio en la ciudad de Bogotá.....	17
2.4 Impactos ambientales asociados a la movilidad en Bogotá.....	17
2.5 Consumo de combustibles para los sistemas de transporte de Bogotá.....	20
2.6 Costos de combustibles en Bogotá.....	21
2.7 Venta de scooters y bicicletas eléctricas	23
3. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE	24
3.1 Movilidad y transporte	24
3.1.1 Definiciones movilidad y transporte	24
3.1.2 Sistemas de transporte	24
3.1.3 Tipos de usuarios.....	25
3.1.4 Sistema vial urbano	26
3.1.5 Transporte público.....	27
3.2 Visualización de micromovilidad.....	28
3.3 Movilidad en Bogotá.....	28
3.3.1 Historia del transporte masivo en Bogotá	28

3.3.2	Uso de micromovilidad para alquiler en Bogotá.....	29
3.4	Estado del arte	29
3.4.1	Planeación de micromovilidad	29
3.4.2	Energía en la micromovilidad	31
3.4.3	Usuarios y seguridad vial en micromovilidad.....	32
3.4.4	Otros tipos de uso en micromovilidad.....	32
3.4.5	Impacto ambiental con proyección de micromovilidad	32
4.	METODOLOGÍA.....	34
4.1	Conceptualización del modelo	34
4.2	Diagrama causal	34
4.3	Diagrama de flujo	36
4.3.1	Usuarios de motos	37
4.3.2	Usuarios de vehículos particulares	37
4.3.3	Usuarios de micromovilidad eléctrica unipersonal	38
4.3.4	Cantidad de motos	38
4.3.5	Cantidad de vehículos particulares.....	38
4.3.6	Cantidad de vehículos eléctricos unipersonales	38
4.3.7	Emisiones (material particulado y monóxido de carbono) generada por combustión de motos	39
4.3.8	Emisiones de material particulado y monóxido de carbono generadas por combustión de vehículos particulares	39
4.3.9	Cantidad estaciones de carga con sistema fotovoltaico.....	40
4.3.10	Costo estaciones de carga con sistemas fotovoltaicos.....	40
4.4	Calibración y validación del modelo.....	41
4.4.1	Regresión y predicción de valores históricos	41
4.4.1	Resultado histórico comparado con el resultado de la simulación.....	41
4.4.1	Evaluación errores	45
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	46
5.1	Escenarios de evaluación para el modelo presentado.....	46
5.1.1	Escenario donde no existe política de inmersión fuerte de micromovilidad eléctrica unipersonal Business as Usual (BAU).....	46

5.1.2	Escenario donde existe política baja de inmersión de micromovilidad eléctrica unipersonal Business as Policy (BAP).....	46
5.1.3	Escenario donde existe política alta de inmersión de micromovilidad eléctrica unipersonal Business as Vision (BAV).....	46
5.2	Resultados del modelo sobre las variables establecidas.....	46
5.2.1	Variable usuarios de transporte	47
5.2.2	Variable inventario de vehículos para transporte de usuarios.....	49
5.2.3	Variable inventario de emisiones para transporte de usuarios	51
5.2.4	Variable cantidad de estaciones de carga fotovoltaica.....	54
CONCLUSIONES		57
REFERENCIAS		61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Población de la Ciudad de Bogotá y Proyección al 2035	14
Figura 2.	Inventario de vehículos tipo taxi	16
Figura 3.	Inventario de vehículos tipo particular y moto	16
Figura 4.	Velocidad Promedio vehicular para Bogotá	17
Figura 5.	Histórico de material particulado PM10 [μm]	18
Figura 6.	Histórico de dióxido de nitrógeno.....	19
Figura 7.	Histórico de monóxido de carbono	19
Figura 8.	Histórico de dióxido de azufre	20
Figura 9.	Consumo de combustible para movilidad año 2015	21
Figura 10.	Precios históricos para gasolina y ACPM.....	21
Figura 11.	Precios históricos gas natural vehicular	22
Figura 12.	Precios históricos energía eléctrica sector residencial Bogotá.....	22
Figura 13.	Relación entre sistemas de transporte, actividades y flujos	25
Figura 14.	Tipos de usuarios en movilidad	25
Figura 15.	Sistema Vial Urbano en Bogotá.....	26
Figura 16.	Evolución del sistema de transporte masivo en Bogotá.....	28
Figura 17.	Conceptualización del Modelo Movilidad Eléctrica Unipersonal	34
Figura 18.	Diagrama de Bucle Causal Movilidad Eléctrica Unipersonal	35
Figura 19.	Diagrama de Flujo Modelo Micromovilidad en Bogotá.....	36
Figura 20.	Validación Modelo Inventario Motos	42
Figura 21.	Validación Modelo Inventario Vehículos Particulares	42
Figura 22.	Validación Modelo Inventario Emisiones Material Particulado PM10 Generado por Motos	43
Figura 23.	Validación Modelo Inventario Emisiones Material Particulado PM10 Generado por Vehículos Particulares	43
Figura 24.	Validación Modelo Inventario Emisiones Monóxido de Carbono Generado por Motos .	44
Figura 25.	Validación Modelo Inventario Emisiones Monóxido de Carbono Generado por Vehículos Particulares	44

Figura 26. Validación Modelo Inventario Emisiones Monóxido de Carbono Generado por Vehículos Particulares	45
Figura 27. Comportamiento de usuarios transportados en Moto en los 3 escenarios	47
Figura 28. Comportamiento de usuarios transportados en Vehículos Particulares en los 3 escenarios	48
Figura 29. Comportamiento de usuarios transportados en Vehículos Eléctricos Unipersonales en los 3 escenarios.....	48
Figura 30. Comportamiento de Inventario de Motos en los 3 escenarios	49
Figura 31. Comportamiento de Inventario de Vehículos Particulares en los 3 escenarios	50
Figura 32. Comportamiento de Inventario de Vehículos Eléctricos Unipersonales en los 3 escenarios.....	50
Figura 33. Comportamiento de Inventario de Emisiones Material Particulado PM10 de Motos en los 3 escenarios.....	51
Figura 34. Comportamiento de Inventario de Emisiones Material Particulado PM10 de Vehículos Particulares en los 3 escenarios	52
Figura 35. Comportamiento de Inventario de Emisiones Monóxido de Carbono de Motos en los 3 escenarios.....	53
Figura 36. Comportamiento de Inventario de Emisiones Monóxido de Carbono de Vehículos Particulares en los 3 escenarios	54
Figura 37. Estimación de Cantidad de Estaciones de Carga PV en los 3 escenarios	55
Figura 38. Estimación Costo Implementación de Estaciones de Carga PV en los 3 escenarios....	56

LISTA DE TABLAS

Tabla 1.	Inventario de vehículos tipo bus.....	15
Tabla 2.	Descripción Variables del Diagrama Causal.....	35
Tabla 3.	Evaluación Errores de Pronóstico	45

INTRODUCCIÓN

La ciudad de Bogotá presenta su sistema de movilidad compuesto por diferentes tipos de transporte para usuarios. Estos desplazamientos de usuarios se suministran mediante sistemas de transporte masivo o sistemas de transporte individual.

La matriz de vehículos de transporte masivo está compuesta por más de 11 mil buses [Sistema Integrado de Transporte Público (SITP), 2022] lo que permite la movilidad masiva de usuarios y un componente de motos, taxis y vehículos particulares, participando en el desplazamiento de los usuarios de forma individual o compartida en menor escala. Este inventario de vehículos masivos e individuales generan emisiones producto del proceso de combustión y emiten toneladas de material particulado y monóxido de carbono en la ciudad de Bogotá.

Esta matriz que desplaza los diferentes usuarios de la ciudad de Bogotá podría ser complementada con micromovilidad eléctrica unipersonal donde, este cambio de tecnología de movilidad permita a los usuarios que se desplazan en movilidad individual tradicional (motos y vehículos particulares), tener otra alternativa de desplazamiento que como beneficio a obtener sea la mitigación de las emisiones de material particulado y monóxido de carbono emitido en la ciudad de Bogotá. Además, promover el uso de sistemas de carga con sistemas fotovoltaicos que busquen una movilidad sostenible en la ciudad de Bogotá.

La implementación de la micromovilidad eléctrica unipersonal en la matriz de movilidad de la ciudad de Bogotá se realiza mediante la aplicación de la metodología de dinámica de sistemas, donde se utilizaron caracterización de los diferentes inventarios de vehículos particulares, motos, emisiones de material particulado y monóxido de carbono para modelar el comportamiento de los mismos y contratarlos con los parámetros históricos registrados por las diferentes entidades que gestionan estos indicadores.

El resultado del modelo presentado con dinámica de sistemas, permite analizar diferentes escenarios de comportamiento de usuarios transportados en micromovilidad eléctrica unipersonal, los resultados de las emisiones producto de los vehículos convencionales (motos y vehículos

particulares), residuales circundantes en la movilidad de Bogotá, el inventario de vehículos que continúan formando parte del sistema de movilidad y la necesidad de sistemas de carga con sistemas fotovoltaicos.

En el capítulo 1, se mencionan los objetivos del presente documento donde se orientan al resultado de la evaluación de implementación de micromovilidad eléctrica unipersonal en la ciudad de Bogotá. En el capítulo 2, se observa la problemática y justificación del proyecto donde se mencionan los inventarios de flota de transporte de Bogotá, población, costos de diferentes energéticos que permiten la operación de los vehículos entre otros factores que intervienen en la movilidad de la ciudad de Bogotá. En el capítulo 3, se presenta el marco teórico y estado del arte donde se contemplan la estructuración de los sistemas de mallas viales y diversidad de actores en un sistema de movilidad urbana. Por otro lado, se presentan las lecturas de documentos que permiten identificar la evolución y aportes de la micromovilidad eléctrica unipersonal a nivel internacional. En el capítulo 4, se presentan los resultados de las simulaciones de escenarios cuando la micromovilidad eléctrica unipersonal toma un papel relevante en la matriz de movilidad de la ciudad de Bogotá y finalmente, el capítulo 5, permite observar los resultados y conclusiones a las cuales se llega basado en el modelo de dinámica de sistemas implementado.

1. OBJETIVOS Y RESULTADOS

1.1 Objetivo General

Evaluar la implementación de la micromovilidad eléctrica unipersonal en la ciudad de Bogotá Colombia, mediante el modelado con dinámica de sistemas considerando indicadores de emisiones y consumo energético fotovoltaico.

1.2 Objetivos específicos

- Identificar los referentes teóricos para el modelado de la micromovilidad eléctrica unipersonal en Bogotá Colombia.
- Establecer las características de los elementos que constituyen la micromovilidad eléctrica unipersonal en Bogotá Colombia, como base para el desarrollo del modelo de simulación con dinámica de sistemas.
- Analizar la micromovilidad eléctrica unipersonal en Bogotá Colombia para determinar los impactos en términos de emisiones y consumo energético fotovoltaico.

1.3 Resultados

Los principales resultados del trabajo presentado se presentan a continuación:

- Reducción en las toneladas de material particulado y monóxido de carbono emitidos en la ciudad de Bogotá cuando se presenta una introducción de la micromovilidad eléctrica unipersonal.
- La micromovilidad eléctrica unipersonal puede generar un desarrollo industrial basado en la optimización, diseño y nuevos productos de esta línea de transporte para la ciudad de Bogotá.
- Los sistemas de micromovilidad eléctrica unipersonal pueden ser un potencial para desarrollo de estaciones de carga con sistemas fotovoltaicos ya que, al aumentar la demanda de movilidad o desplazamientos en estos sistemas, se requiere aumentar la oferta energética para estos equipos.

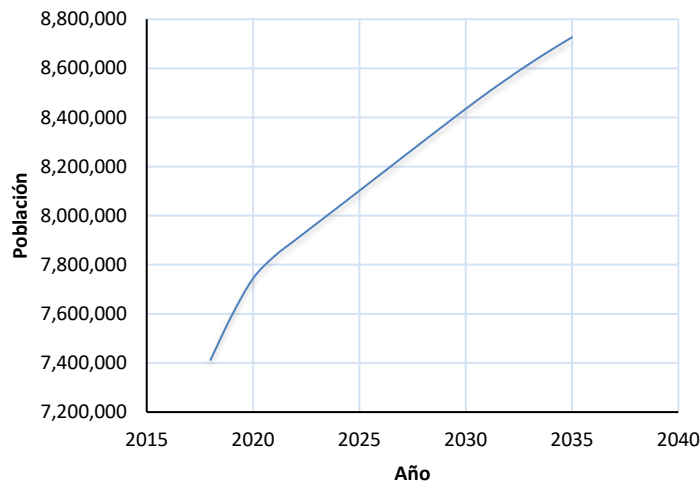
2. PROBLEMA Y JUSTIFICACIÓN

Para la fecha la movilidad de la mayoría de la población en la ciudad de Bogotá se realiza mediante sistemas masivos de transporte tipo bus y sistemas individuales de tipo público y privado, los cuales utilizan combustible fósil y alguna energía eléctrica que generan impactos ambientales en la ciudad, congestión y otras problemáticas asociadas.

2.1 Población en la ciudad de Bogotá

La ciudad de Bogotá presenta una población estimada para el año 2023 de 7'968.095 habitantes [2], la cual requiere desplazarse para atender sus actividades cotidianas de tipo laboral, educativas, comerciales, etc. Para el año 2035 se proyecta un crecimiento poblacional como se muestra en la siguiente figura:

Figura 1. Población de la Ciudad de Bogotá y Proyección al 2035



Fuente: El autor con base en DANE [2].

Con esta estimación poblacional y crecimiento alrededor del 8.6% para el año 2035 [2], se requiere dimensionar los sistemas de movilidad que suplan los desplazamientos de la ciudad de Bogotá.

2.2 Sistemas de movilidad en la ciudad de Bogotá

La población en la ciudad de Bogotá se desplaza de diferentes maneras como los son sistemas masivos, individuales, mecánicos, peatonal, entre otros [3], donde se establecen las siguientes volúmetrías de vehículos por sistema de servicio.

2.2.1 Sistema de movilidad masivo SITP

El sistema de movilidad masivo con infraestructura vial exclusiva e infraestructura mixta denominado SITP (Sistema Integrado de Transporte Público), cuenta con una serie de soportes físicos para la canalización de población y desplazamiento mediante buses de diferentes características que circulan por la malla vial exclusiva y malla vial mixta [1]. Este sistema tiene a disposición el inventario de buses que se muestra a continuación, para los diferentes traslados de personas en los horarios de operación del sistema.

Tabla 1. Inventario de vehículos tipo bus

Tipo Vehículo	(<) A EURO IV	ELÉC.	EURO II	EURO III	EURO IV	EURO V	Euro V - Eléctrico	EURO V- CON FILTRO	EURO VI	Euro VI - GNC	HÍBRIDO (DIESEL EURO V - ELÉCTRICO)	Total general
ALIMENTADOR (50)				1	12						13	
ALIMENTADOR (80)			8	25	354					50	437	
ALIMENTADOR (80) GAS								128			128	
ALIMENTADOR 50 E	73										73	
ALIMENTADOR 80 E-DV	284				3						287	
ALIMENTADOR ESP 80					1						1	
ARTICULADO			109	36	31	109		298				583
ARTICULADO GAS								179			179	
BIARTICULADO				5	40	317		403				765
BIARTICULADO GAS								563			563	
BUS (19)	113											113
BUS (40)	272				391	142						805
BUS (50)	621				593	1512			167	1		2894
BUS (50) ELECTRICO	672										672	
BUS (50) GAS										56		56
BUS (80)	30				2	1681	56		71	3		1843
BUS (80) ELECTRICO	450										450	
BUS (80) GAS										921		921
PADRON DUAL						43					230	273
Total	1036	1479	109	49	1083	4174	56	701	1108	981	280	11056

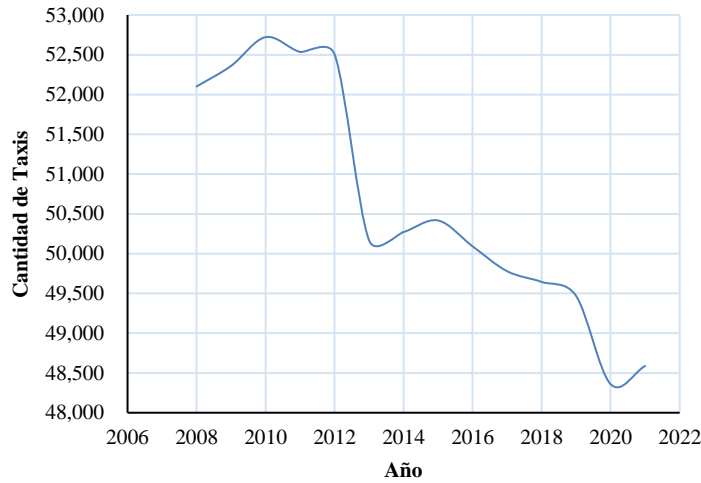
Fuente: El autor con base en información del SITP [1].

Con esta flota de vehículos de transporte masivo de personas (11056 buses), se garantiza la movilidad de las personas que opten por tomar este sistema de movilidad que para el año 2022 movilizó aproximadamente 1'422.834 personas [4] que representa el 18% de la población de la ciudad.

2.2.2 Sistema de movilidad individual tipo taxi

El sistema de movilidad individual tipo taxi cuenta con una operación de vehículos históricos que se presenta en la siguiente figura:

Figura 2. Inventario de vehículos tipo taxi



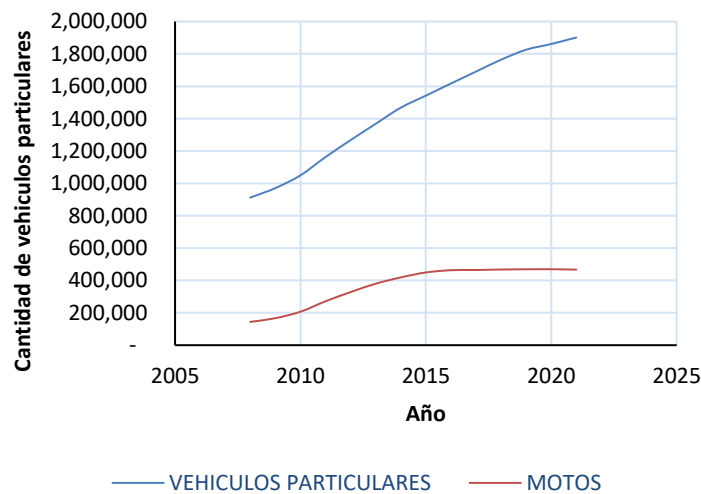
Fuente: El autor con base en información de la Secretaría de Movilidad [5].

Con esta flota de taxis, se transporta aproximadamente el 4% de la población de la ciudad (que representan 316000 personas).

2.2.3 Sistema de movilidad individual particular

El sistema de movilidad individual tipo vehículo particular (automóvil, camionetas, camperos, motos, etc.), moviliza una parte de la población que se desplaza en la ciudad de Bogotá mediante los siguientes inventarios de vehículos:

Figura 3. Inventario de vehículos tipo particular y moto



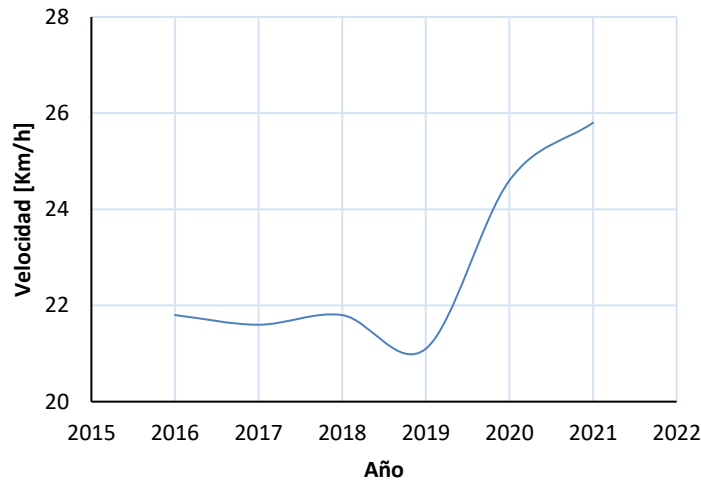
Fuente: El autor con base en datos de la Secretaría de Movilidad [5] y [6].

De acuerdo con la gráfica anterior, se evidencia que existe una tendencia creciente por parte de la población de la ciudad de Bogotá a movilizarse en vehículos particulares, con un crecimiento similar en la movilidad de tipo motocicleta [6] y [5]. Lo anterior derivado de una serie de restricciones al uso del carro particular implementadas por los gobiernos locales desde el año 1998.

2.3 Velocidad promedio en la ciudad de Bogotá

La población de Bogotá que busca desplazarse en movilidad de tipo individual sobre la zona de influencia de la ciudad, realiza estos traslados con una velocidad promedio que tiene un comportamiento detallado por horario, tipo de vía, desplazamientos, entre otros parámetros [3]. La velocidad promedio para vías mixtas de la ciudad de Bogotá se presenta en la siguiente figura:

Figura 4. Velocidad Promedio vehicular para Bogotá



Fuente: El autor con base en datos de la Secretaría de Movilidad [5].

Se observa una conducta constante de la velocidad hasta el año 2019 donde la población con capacidad de movilidad en la ciudad crecía [2]. Es de resaltar que para el año 2020 en adelante, se presenta una mejora en la velocidad de la ciudad que puede inferirse en los efectos que generó la pandemia a nivel mundial [7].

2.4 Impactos ambientales asociados a la movilidad en Bogotá

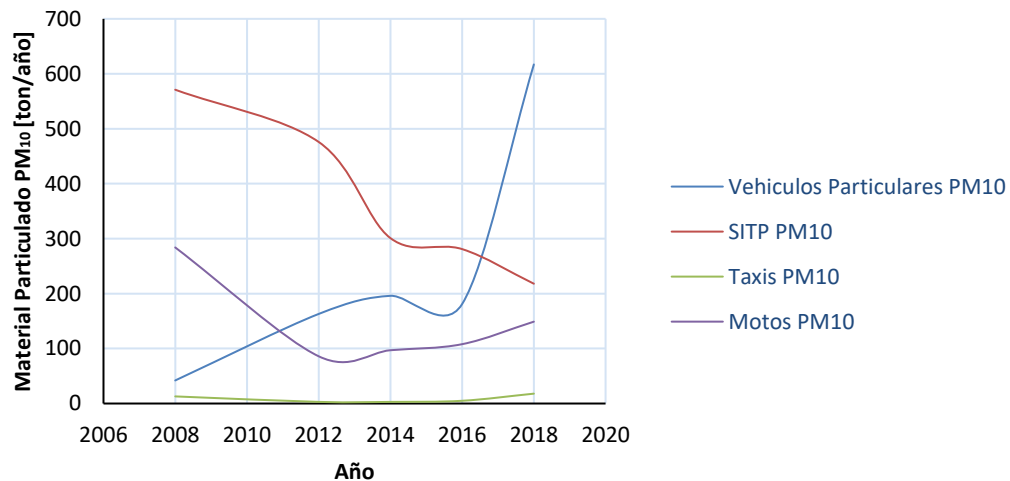
La demanda de movilidad en la ciudad de Bogotá para su población a través del inventario vehicular mostrado anteriormente, generan impactos ambientales por medio de las emisiones que se mencionan a continuación [8]:

- Material Particulado PM_{10} .

- Óxidos de Nitrógeno NOx.
- Monóxido de Carbono CO.
- Dióxido de Azufre SO₂.

Estas emisiones generadas en el proceso de combustión de los vehículos son registradas por la Secretaría de Movilidad de Bogotá, generando reportes para que se tomen las medidas de mitigación o planes de trabajo para la reducción de estos contaminantes. Los reportes históricos de la evolución de las emisiones generadas por el transporte de la ciudad de Bogotá se muestran a continuación [8]:

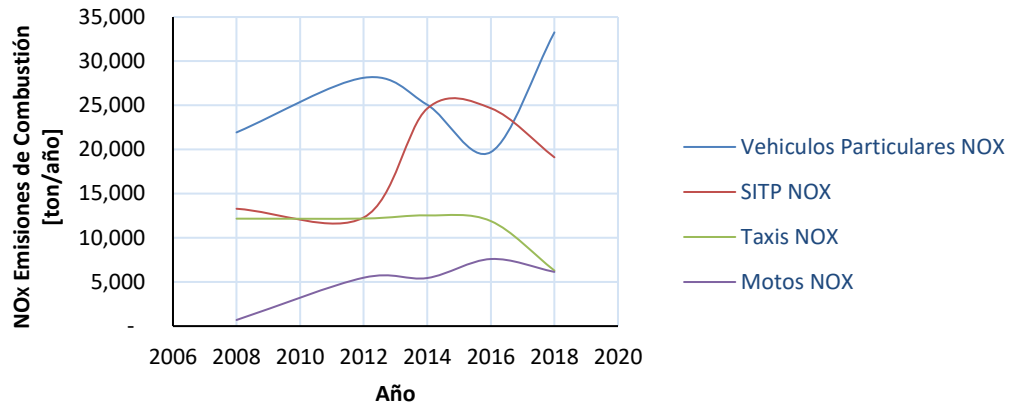
Figura 5. Histórico de material particulado PM10 [µm]



Fuente: Fuente: El autor con base en datos de la Alcaldía Mayor de Bogotá [8].

El material particulado en la ciudad de Bogotá generado por fuentes móviles tiene implicaciones en el deterioro a la salud por absorción de este material en los pulmones de la población [9], implicando posibles desarrollos de bronquitis aguda y/o problemas cardiacos [10]. Las emisiones históricas de dióxido de nitrógeno se muestran a continuación:

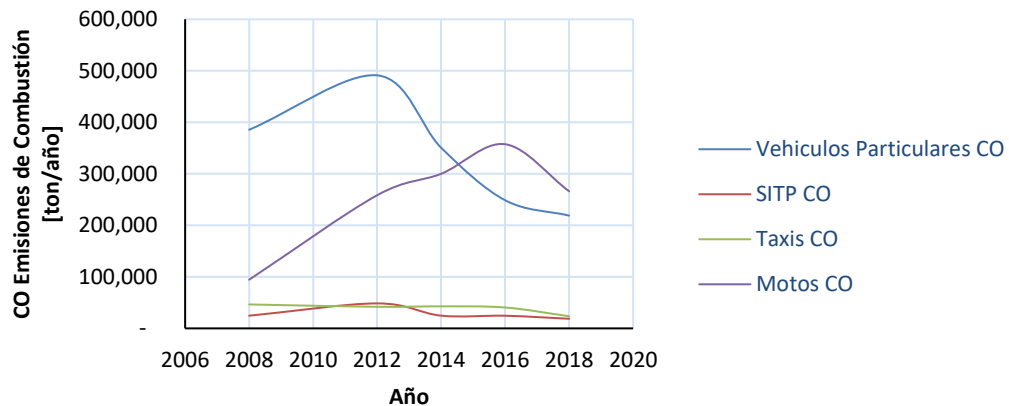
Figura 6. Histórico de dióxido de nitrógeno



Fuente: El autor con base en datos de la Alcaldía Mayor de Bogotá [8].

En la siguiente figura se muestra el comportamiento de las emisiones de monóxido de carbono en la ciudad de Bogotá, derivado de la inhalación de este tipo de gas se reduce la circulación de oxígeno por el torrente sanguíneo [11].

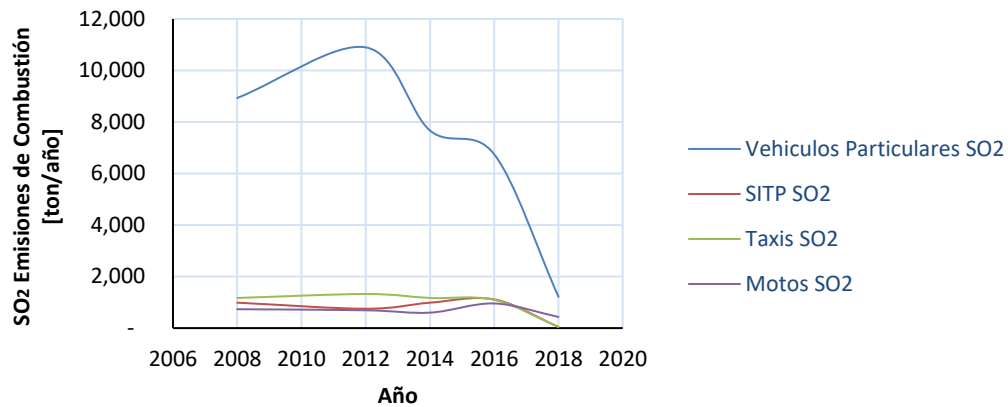
Figura 7. Histórico de monóxido de carbono



Fuente: El autor con base en datos de la Alcaldía Mayor de Bogotá [8]

Las emisiones de dióxido de azufre en la ciudad de Bogotá generado por fuentes móviles, implica daños ambientales de efecto invernadero [12]. El comportamiento histórico se muestra a continuación:

Figura 8. Histórico de dióxido de azufre



Fuente: El autor con base en datos de la Alcaldía Mayor de Bogotá [8].

Las emisiones presentadas anteriormente producto del transporte en la ciudad de Bogotá, muestra la cantidad de toneladas de emisiones emitidas a la atmosfera por año y que, si bien existe renovación en flotas de vehículos los cuales, presentan eficiencias en el proceso de combustión y reducción en las emisiones, se presenta un incremento de la flota vehicular en general tal que, la tendencia es a continuar con la contribución de las emisiones de gases a la atmosfera con la flota vehicular de combustión [8].

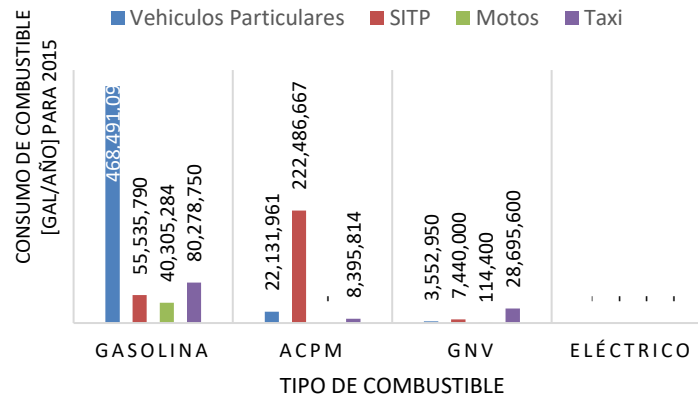
2.5 Consumo de combustibles para los sistemas de transporte de Bogotá

La energía necesaria para lograr la movilidad de la población de la ciudad de Bogotá se consume de acuerdo con el sistema a utilizar y como se ha presentado anteriormente, se establece en los siguientes tipos de movilidad:

- Movilidad masiva (SITP).
- Movilidad individual (Taxis).
- Movilidad particular (vehículos particulares y vehículos tipo moto).

Con estos sistemas de movilidad, se generan los siguientes consumos de recurso fósil para generar movilidad de las diferentes máquinas y así, lograr el desplazamiento de la población de la ciudad [13], [14].

Figura 9. Consumo de combustible para movilidad año 2015



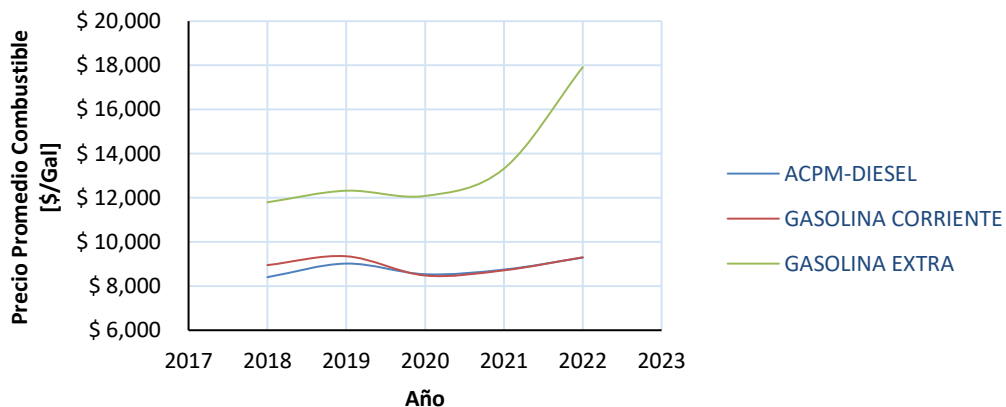
Fuente: El autor con base en datos de la UPME [13], [14].

Estos valores de consumo de combustible se dan siempre que, en los vehículos particulares se desplazan en promedio 1.5 personas y en la moto se desplazan en promedio 1.2 personas para la ciudad de Bogotá [13], [14].

2.6 Costos de combustibles en Bogotá

El desarrollo de los desplazamientos en la ciudad de Bogotá que implican el uso de alguno de los sistemas de movilidad mencionados anteriormente demanda un consumo de combustible fósil o energía eléctrica los cuales tienen costos asociados de acuerdo con la siguiente grafica [15]:

Figura 10. Precios históricos para gasolina y ACPM

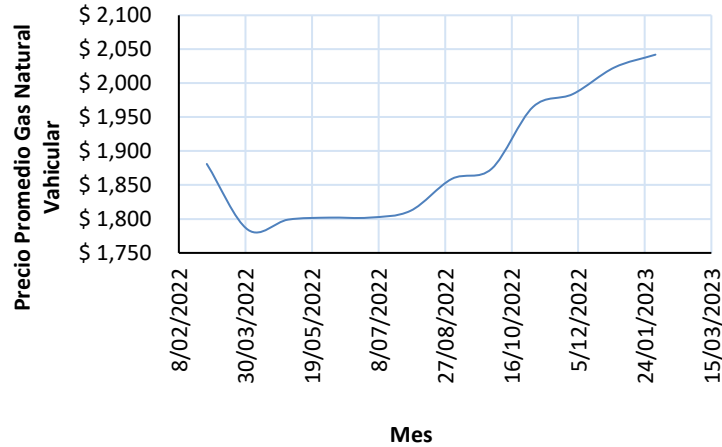


Fuente: Fuente:El autor con base en datos del Ministerio de Minas y Energía de Colombia [15]

El comportamiento para el gas natural vehicular presenta el siguiente comportamiento en precios [16] con precio promedio a febrero 2023 de \$ 2.057 [16]:

El comportamiento para el gas natural vehicular presenta el siguiente comportamiento en precios [16] con precio promedio a febrero 2023 de \$ 2.057 [16]:

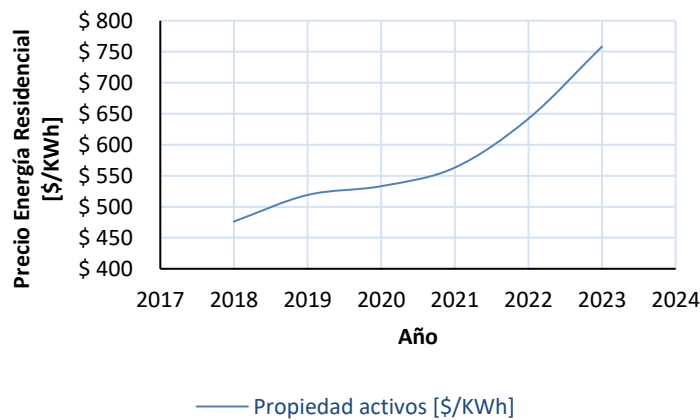
Figura 11. Precios históricos gas natural vehicular.



Fuente: Fuente:El autor con base en datos de Vanti [16].

Para los valores que se presentan en la energía eléctrica para la ciudad de Bogotá en la línea residencial, se presentan los siguientes valores con corte a febrero de cada año y que presenta la siguiente tendencia [17].

Figura 12. Precios históricos energía eléctrica sector residencial Bogotá



Fuente: Fuente:El autor con base en datos de Enel [17].

En el comportamiento de los diferentes combustibles utilizables actualmente para la movilidad de la ciudad de Bogotá, se observa que todos presentan consideraciones al crecimiento anualizado, sin embargo, las brechas de precios de combustibles que se pueden presentar entre los diferentes energéticos, puede ser un indicador de combustible a explotar a mediano y largo plazo.

2.7 Venta de scooters y bicicletas eléctricas

La evolución de la movilidad en la ciudad de Bogotá presenta cambios en busca de diversificar esta necesidad primaria de desplazarse por lo que, el mercado de venta y uso de patinetas o scooters ha presentado un aumento considerable entre el 100% y el 159% [18], tomando como referencia las ventas del año 2019 con respecto al año 2018. Por otro lado, la visión de ciudadanos de observar los tiempos de traslado en la ciudad ha fomentado también el cambio de pensamiento y toma de decisión en alguna población para cambiar el sistema de movilidad, sumado al desarrollo de infraestructura para este tipo de movilidad y apalancamiento del sector industrial [19].

3. MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE

A continuación, se presenta el marco teórico y estado del arte para la micromovilidad en los diferentes lugares del mundo.

3.1 Movilidad y transporte

Los sistemas de movilidad y transporte permiten observar el estado de desarrollo de un país o ciudad, ya que son los principales sistemas de intercomunicación entre lugares de interés, industria, y comercio.

3.1.1 Definiciones movilidad y transporte

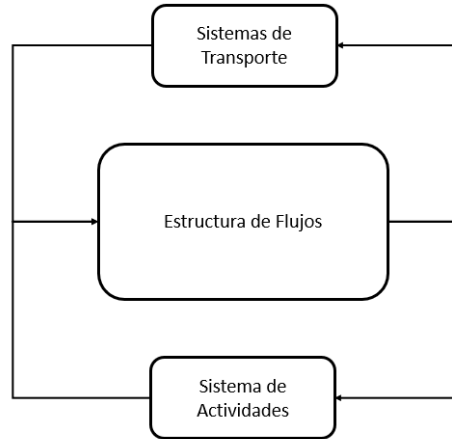
La movilidad comprende el desplazamiento de personas de un lugar a otro y para lo cual es importante definir los siguientes conceptos [20]:

- *Transporte*: Actividad de transportar personas o cosas de un lugar a otro.
- *Transportar*: Trasladar una persona o cosa de un lugar a otro por el precio pactado.
- *Transitar*: Traslado de personas o cosas de un lugar a otro mediante infraestructura como calles o vías de espacio público.
- *Transito*: Transitar por un lugar definido que se encuentra de un punto a otro.
- *Unidades Transportadoras*: Equipos, máquinas o sistemas que desplazan personas o cosas.
- *Conexiones o medios*: Infraestructura por la cual se desplazan las unidades móviles.
- *Terminales*: Zona donde inicia, culmina o existe cambio de unidad transportadora durante un desplazamiento.
- *Ubicación*: Proximidad a los sistemas de transporte y diversidad de tránsito.
- *Movilidad*: Capacidad del sistema de tránsito y la rapidez de transportarse.
- *Eficiencia*: Costos totales del transporte relacionados con la productividad del sistema.

3.1.2 Sistemas de transporte

Los sistemas de transporte de personas contemplan la totalidad de unidades móviles que están en capacidad de desplazar personas de un lugar a otro. Estos sistemas de transporte responden a la dinámica de transportar personas según sus actividades económica y sociales [20] y pueden ser representadas mediante el siguiente esquema:

Figura 13. Relación entre sistemas de transporte, actividades y flujos



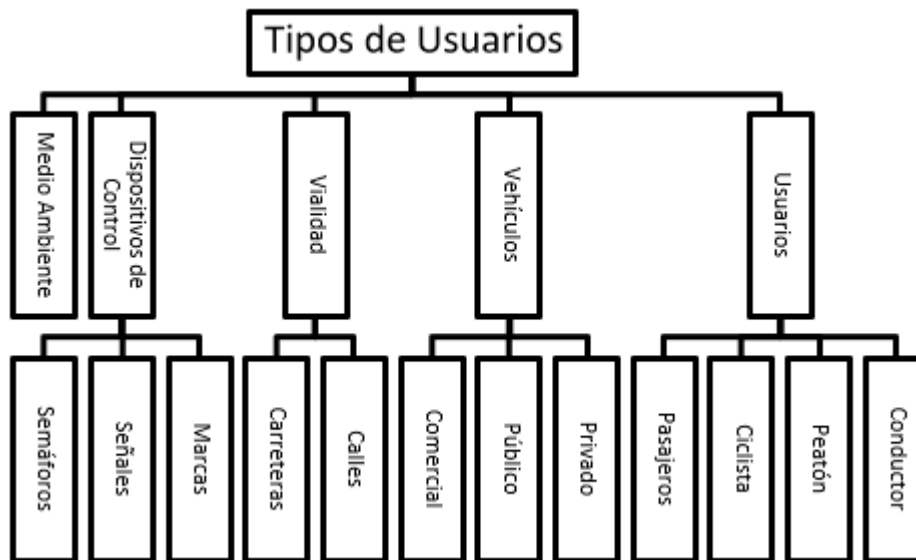
Fuente: El autor con base en R. Cal y J. Cárdenas [20].

En el esquema anterior, se representan las relaciones que interactúan entre los diferentes sistemas de transporte que responden a actividades económicas y que ingresan en un flujo donde interactúan variables complementarias que convergen en traslado de personas de un lugar a otro y las optimizaciones que puedan presentar los sistemas que se retroalimentan.

3.1.3 Tipos de usuarios

Las ciudades presentan diferentes tipos de actores en la movilidad de esta. Para el desarrollo adecuado de transportar personas o cosas, es conveniente definir los usuarios que se presentan a continuación:

Figura 14. Tipos de usuarios en movilidad



Fuente: El autor con base en R. Cal y J. Cárdenas [20].

Estos tipos de usuarios caracterizan el ejercicio de la movilidad y permiten planificar los modelos de movilidad, desarrollo urbanístico y optimización de los sistemas existentes de transporte.

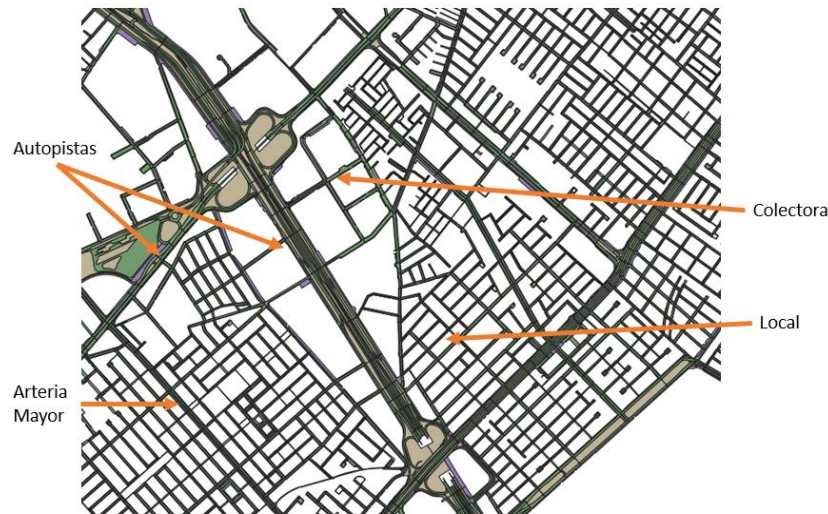
3.1.4 Sistema vial urbano

Las diferentes ciudades presentan un sistema vial jerárquico que, se integra entre sí para lograr la comunicación entre zonas residenciales, comerciales o industriales mediante los siguientes tipos de vías [20]:

- *Autopistas y vías rápidas*: Permiten la movilidad de muchos vehículos en función de hacer ágil y rápido su desplazamiento.
- *Calles Principales*: Buscan generar la movilidad adecuada en el entorno de la ciudad y se encuentran interconectadas entre sí.
- *Calles Colectoras*: Permiten la conexión entre las vías principales y las calles locales [20]
- *Calles Locales*: Infraestructura que permite el ingreso a viviendas, comercio o industria posterior a realizar el desplazamiento requerido [20].

Para la ciudad de Bogotá, se presenta el siguiente ejemplo de sistema vial existente actualmente:

Figura 15. Sistema Vial Urbano en Bogotá



Fuente: El autor con base en Fuente:El autor con base en R. Cal y J. Cárdenas [20] e IDECA [21].

3.1.5 Transporte público

Los sistemas de transporte público en los diferentes países del mundo están contemplados por diversos sistemas que permiten los desplazamientos de un lugar a otro. Entre estos sistemas que interconectan ciudades o países se encuentran los siguientes [20]:

- *Tren*: Permite el transporte masivo de carga y personas en una ruta específica.
- *Ferry*: Permite el transporte masivo de personas sobre una superficie acuática entre 2 puntos relativamente cercanos
- *Avión*: Permite el transporte masivo de personas y carga en grandes distancias a altas velocidades y con un importante impacto en las emisiones de combustión.

Para el entorno de ciudad, se usan los sistemas de transporte públicos urbanos, los cuales buscan permitir los desplazamientos de personas de un lugar a otro de forma eficiente. En estos sistemas, se destacan los siguientes [20]:

- *Autobús*: Flota de vehículos utilizados para transportar personas de un lugar a otro en zonas urbanas. Presentan una ventaja que es la flexibilidad en el despacho de rutas y disponibilidad de despacho de estos vehículos. Estos sistemas también podrían presentar optimizaciones con la construcción de sistemas BRT (Buses de tránsito rápido), lo cual implica mayor traslado masivo de personas con mejores velocidades.
- *Tranvía*: Sistemas de movilidad de personas sobre rieles donde, generalmente su sistema de energía es la electricidad y está en capacidad de movilizar mayor cantidad de personas de que los sistemas de autobuses.
- *Metro*: Sistema de movilidad masivo de personas que permite dar mayores opciones de movilidad en una ciudad. Generalmente estos sistemas de movilidad van separados de las vías ya sea de forma subterránea, aérea o a nivel con separación. Estos sistemas de movilidad están en capacidad de transportar grandes volúmenes de personas de forma simultánea.
- *Tren Ligero*: Estos sistemas de movilidad generalmente funcionan como complemento entre sistemas de tipo tren y sistemas de autobuses para complementar la red de movilidad de una ciudad.
- *Unidades Menores*: Son sistemas complementarios que movilizan pequeñas cantidades de personas en autobuses cortos, VAN, microbuses, etc.

3.2 Visualización de micromovilidad

La micromovilidad forma parte de la continua evolución de los sistemas de transporte que buscan las diferentes poblaciones de las ciudades para mejorar calidad de vida, costos, tiempo, etc. Por lo tanto, este nuevo complemento a los sistemas tradicionales de movilidad genera ampliación de los medios de transporte público, privado o compartido para las diferentes ciudades del mundo que adoptan estas nuevas tendencias [22].

Este tipo de movilidad está pensada en que su fuente primaria de energía sea electricidad con origen en sistemas renovables que permitan desarrollar los desplazamientos lo más amigable con el medio ambiente [22]. Los impactos ambientales positivos producto de la implementación de sistemas de micromovilidad desplazando los vehículos de combustión fósil, buscan ser diferenciales para el aporte de la mitigación de gases de efecto invernadero producto de la combustión y la congestión a las cuales se ven enfrentadas las grandes ciudades del mundo [22].

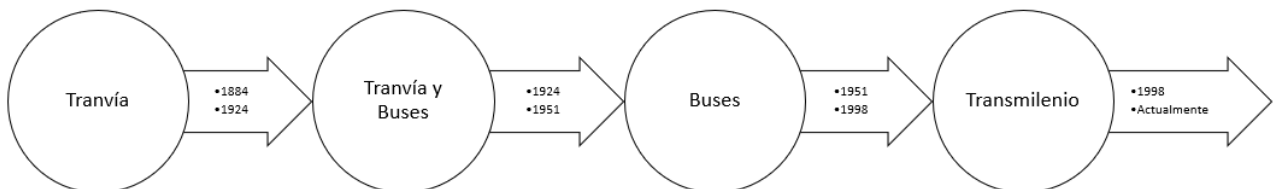
3.3 Movilidad en Bogotá

En la ciudad de Bogotá, se han modelado diferentes estrategias que orientan a la calidad de la movilidad en esta.

3.3.1 Historia del transporte masivo en Bogotá

La ciudad de Bogotá ha contado con diferentes sistemas de movilidad masivo que desplazan las personas de acuerdo con las diferentes épocas y características de ciudad en cada instante del tiempo. A continuación, se presenta la línea de tiempo de la movilidad masiva de personas en la ciudad de Bogotá [23]:

Figura 16. Evolución del sistema de transporte masivo en Bogotá



Fuente: El autor con base en P. Gómez [23].

Finalmente, se contempla el plan maestro de movilidad Bogotá, el cual busca interactuar la movilidad como un todo.

3.3.2 Uso de micromovilidad para alquiler en Bogotá

La ciudad de Bogotá como otras ciudades del mundo han optado por tener en cuenta micromovilidad como complemento a los sistemas de movilidad tradicionales. Para esto, público la resolución 209 de 2019, la cual indica los protocolos para el aprovechamiento económico del espacio público que se oriente a estos sistemas de movilidad [24]. En esta resolución, se mencionan algunas características técnicas que deben cumplir los equipos de micromovilidad ofrecidos en el sistema que son velocidades menores a 20 [Km/h], frenos, GPS, entre otros [24].

3.4 Estado del arte

Los sistemas de micromovilidad a nivel nacional e internacional presentan continuas evoluciones, que buscan generar mejora en la movilidad de ciudadanos, generar planeación entorno a la movilidad buscando descongestión, desarrollo de infraestructura enfocado a este tipo de sistemas de micromovilidad, unificación a sistemas tradicionales de movilidad, consumos de energía para la micromovilidad y resultados ambientales con la adopción de estos sistemas de micromovilidad. Por esto, se hace revisión de literatura enfocada a estos sistemas de micromovilidad con los siguientes resultados:

3.4.1 Planeación de micromovilidad

Al iniciar los sistemas de micromovilidad como alternativa de movilidad, se inicia verificando lo oportuno de la integración de estos sistemas de micromovilidad [25]. Esto se realiza mediante un análisis cualitativo comparativo que permite la toma de decisión en el momento de integrar la micromovilidad o no a los sistemas de movilidad en una ciudad.

La micromovilidad resulta asertiva como complemento de la movilidad de una ciudad, se inicia análisis de información para observar el potencial de como la micromovilidad puede sustituir la movilidad tradicional [26]. Esto se realiza mediante análisis de datos obtenidos de vehículos flotantes para observar y potencializar el cambio de movilidad tradicional por sistemas de movilidad pública complementada con micromovilidad eléctrica (movilidad multimodal).

Por otro lado, la micromovilidad puede ser visualizada como complemento de movilidad tradicional, de tal manera que esta combinación genere optimizaciones en la movilidad del individuo [27]. Esto es mediante encuestas de preferencias de sistemas de movilidad que buscan

observar la viabilidad de penetración de este sistema combinado de movilidad en el transporte de personas.

Con la formulación de la micromovilidad como alternativa o complemento de la movilidad, es necesario entender la micromovilidad y los factores que afectan el uso de este sistema en la demanda o usuarios [28]. Este análisis se realiza comprendiendo la movilidad de 9.000 scooters en 5 ciudades de Norte América donde se observaron comportamientos similares de uso y factores exógenos al uso de este tipo de micromovilidad.

Dentro de la planeación como ciudad integral, se encuentra la movilidad en la búsqueda de la descongestión de zonas de alta influencia y que puede ser atendida mediante zonas de afluencia de movilidad tradicional que cambiarían por micromovilidad eléctrica [29]. Esto se realiza mediante modelo logit que incorpora variables latentes y permite observar cómo los usuarios de movilidad observan perspectivas con respecto a temas de seguridad y gestión de disponibilidad de micromovilidad compartida.

Por otro lado, si bien se menciona la descongestión vehicular basado en micromovilidad y movilidad individual tradicional, es necesario fomentar desde la planeación el uso de transporte público y que este sea alimentado con micromovilidad para convergencia de personas a sistemas masivos de movilidad [30]. Esto se define mediante análisis de datos de estos sistemas de movilidad que indican la oportunidad de que estos sistemas de movilidad sean usados en horas pico para abastecer la movilidad masiva y que también sean usados como sistemas eficientes en desplazamientos.

La implementación de micromovilidad en ciudades generan una necesidad de orden y gestión de uso de estos sistemas, por lo que se promueve el uso de polígonos o espacios de uso en zonas públicas [31]. Esto se utiliza mediante el método Q para análisis de diversos puntos de vista y generar visión de necesidad de regulación y normatividad de estos sistemas de micromovilidad sumado a las cercas o polígonos de parqueo y zonas de uso.

El continuo crecimiento de estos sistemas de micromovilidad en las ciudades generan la necesidad de planear la integración de los diversos sistemas de movilidad o multimodal y su infraestructura necesaria para la micromovilidad [32]. Con esto se logra definir los criterios de planificación y diseño de infraestructura para la adopción y aumento del uso de la micromovilidad que lleva a generar análisis de datos y casos de estudio para el aprovechamiento de la micromovilidad.

Finalmente, la planeación de la movilidad debe contemplar la cobertura de las diferentes ciudades y una alternativa es ampliar la cobertura de movilidad basado en micromovilidad [33]. Esto se planea mediante análisis de datos de información móvil que permita ampliar la visión de los planificadores de movilidad en zonas urbanas.

3.4.2 Energía en la micromovilidad

La micromovilidad como alternativa de desplazamientos en las ciudades juega un papel importante para ser parte integral de la movilidad como sistemas de movilidad multimodales. Para estos sistemas de micromovilidad, se debe planificar su logística y dentro de esto se encuentra la energía que moverá estos sistemas, su acopio y disponibilidad de forma continua tal que, el sistema de micromovilidad siempre esté disponible para los diferentes usuarios. Por esto, se contempla la micromovilidad eléctrica como uno de los actores que impactan los objetivos de desarrollo sostenible de las naciones unidas en el sentido que estos sistemas de micromovilidad deben ser usuarios de los sistemas de energías renovables y que, por su propio sistema de operación, pueden ser almacenadores de este tipo de energías que se transforman en movilidad [34]. Esto se desprende de revisar la micromovilidad dentro de los diferentes objetivos de desarrollo sostenible donde, en cada uno genera una participación y resultado favorable para el cumplimiento de estos.

Si bien la micromovilidad es importante para el desplazamiento de personas, también es importante dimensionar la participación o consumo de energía de estos sistemas [35]. Para revisar esta energía, se deben validar escenarios de adopción de micromovilidad eléctrica compartida de tal forma que se logre visualizar un horizonte de reducción de energía en función a la micromovilidad. Finalmente, es importante considerar dentro de la introducción de micromovilidad en ciudades que puedan ser usados todos los tipos de infraestructura eléctrica que puedan ser orientados hacia la micromovilidad como optimización de las redes de distribución de baja tensión [36]. Esto se logra revisando la metodología para optimización de programación de carga y flujos de potencia que

busquen aceptar de forma adecuada la micromovilidad y conexión de esta en diferentes lugares de las ciudades.

3.4.3 Usuarios y seguridad vial en micromovilidad

El ingreso de la micromovilidad en las ciudades genera la consulta por el tipo de usuario que se desplazara en estos sistemas emergentes de movilidad y que otras características pueden ser observados en los usuarios tipo [37]. Esto se revisa mediante el modelo de efecto mixto lineal multinivel que genera la visión de políticas y diseño de entornos para la inclusión de diferentes tipos de usuarios a la micromovilidad.

Por otro lado, la interacción entre peatones y sistemas de micromovilidad deben ser verificados de tal manera que se generen espacios adecuados para los 2 actores mencionados y se de relacionamiento o entornos de seguridad vial [38]. Esto se realiza mediante simulaciones de interacciones entre peatones y sistemas de micromovilidad eléctrica que permitan visualizar el comportamiento de los conductores de micromovilidad en un entorno con peatones.

3.4.4 Otros tipos de uso en micromovilidad

En los diferentes contextos que pueda ser usado los sistemas de micromovilidad en las ciudades, no solo se observa la micromovilidad como respuesta a un desplazamiento para cumplir alguna actividad. También es observada como medio de transporte para turistas que requieran desplazamientos en sitios emblemáticos [39]. Esto se realiza mediante modelos de lógica binaria buscando la comprensión de planificación de micromovilidad urbana y estrategias comerciales para estos sistemas.

3.4.5 Impacto ambiental con proyección de micromovilidad

La incorporación de micromovilidad como sistemas de transporte busca revisar entre otros factores la respuesta en el impacto ambiental generado por la movilidad tradicional [40]. Esto se realiza mediante algoritmos de aprendizaje automático y sustitución de viajes por scooters que observan la respuesta favorable de emisiones de efecto invernadero con la entrada de la micromovilidad eléctrica.

Los programas de micromovilidad compartida generan la pregunta de si efectivamente esta participación de micromovilidad genera mitigación de emisiones de gases de efecto invernadero [41]. Por esto, se genera una perspectiva de evaluación del ciclo de vida de los equipos de micromovilidad que permitan la comprensión del impacto real final en los programas de micromovilidad compartida.

Otro efecto que puede visualizarse sobre la integración de micromovilidad en los sistemas de movilidad tradicionales es la calidad del aire [42]. Implementando un método cuantitativo para la toma de decisiones (AHP) se obtiene la mejor selección de los sistemas de micromovilidad a implementar en las diferentes zonas donde se requiera una priorización de implementación.

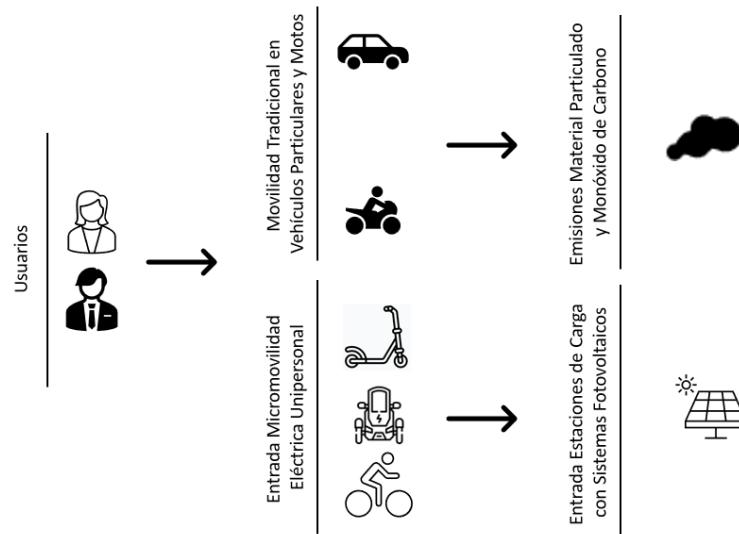
4. METODOLOGÍA

La metodología presentada con Dinámica de Sistemas permite observar el comportamiento de parámetros de la movilidad en la ciudad de Bogotá y como la introducción de micromovilidad eléctrica unipersonal busca promover políticas públicas que aporten en este sector, reduciendo la congestión vehicular, emisiones y viabilizar estaciones de carga con sistemas fotovoltaicos.

4.1 Conceptualización del modelo

La operación de la movilidad de personas en la ciudad de Bogotá se presenta por diferentes medios como se ha mencionado en capítulos anteriores. Para el presente modelo de Dinámica de Sistemas, se utiliza el siguiente concepto de introducción de tecnología (micromovilidad eléctrica) en el proceso de movilidad de personas que se transportan en vehículos particulares y motos, mostrado en la siguiente figura.

Figura 17. Conceptualización del Modelo Movilidad Eléctrica Unipersonal



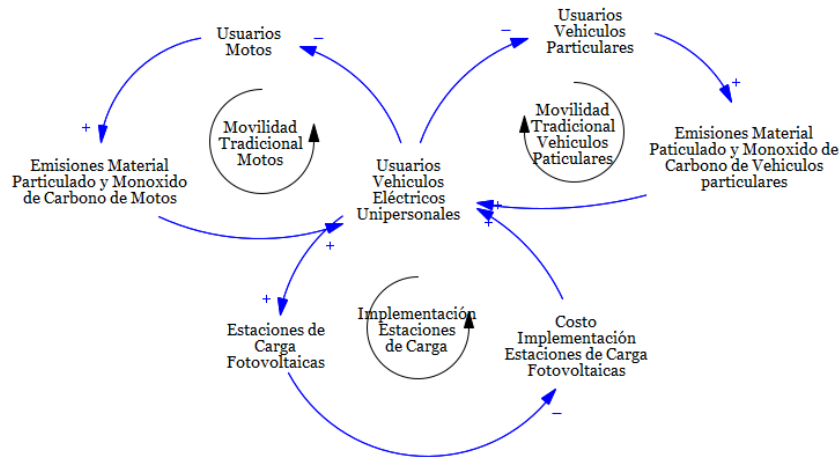
Fuente: El autor.

4.2 Diagrama causal

El modelo propuesto se basa en la hipótesis del ingreso de usuarios a la micromovilidad eléctrica unipersonal con la reducción de uso de vehículos particulares tradicionales y motos convencionales, realizando sus desplazamientos en función de la micromovilidad eléctrica

unipersonal y los diferentes desarrollos en estaciones de carga fotovoltaica que requiere este tipo de movilidad. A continuación, se presenta el diagrama de bucle causal:

Figura 18. Diagrama de Bucle Causal Movilidad Eléctrica Unipersonal



Fuente: El autor.

La descripción de las variables se presenta en la siguiente tabla:

Tabla 2. Descripción Variables del Diagrama Causal

Bucle de Retroalimentación	Variable	Descripción
Movilidad Tradicional Motos	Usuario de Motos	Usuarios de la ciudad de Bogotá que se transportan en motos convencionales
	Emisiones Material Particulado y Monóxido de Carbono de Motos	Emisiones generadas en el proceso de combustión de las motos
Movilidad Tradicional vehículos Particulares	Usuario de vehículos Particulares	Usuarios de la ciudad de Bogotá que se transportan en vehículos particulares convencionales
	Emisiones Material Particulado y Monóxido de Carbono de vehículos Particulares	Emisiones generadas en el proceso de combustión de los vehículos particulares
Implementación Estaciones de Carga	Estaciones de Carga Fotovoltaicas	Estaciones de carga para micromovilidad eléctrica unipersonal con sistemas fotovoltaicos
	Costo Implementación Estaciones de Carga Fotovoltaicas	Costo en dólares de implementación de las estaciones de carga fotovoltaicas
Movilidad Tradicional Motos y Movilidad Tradicional vehículos Particulares e Implementación Estaciones de Carga	Usuarios vehículos Eléctricos Unipersonales	Usuarios de la ciudad de Bogotá que se transportan en micromovilidad eléctrica unipersonal

Fuente: El autor.

Los bucles del modelo propuesto se explican a continuación:

- Movilidad Tradicional Motos:** El aumento de usuarios en sistema de transporte con vehículo tipo moto convencional, presenta un aumento en las emisiones de material particulado y monóxido de carbono producto de la combustión de este tipo de sistema de transporte. Esto, permitiría promover la micromovilidad eléctrica unipersonal lo cual

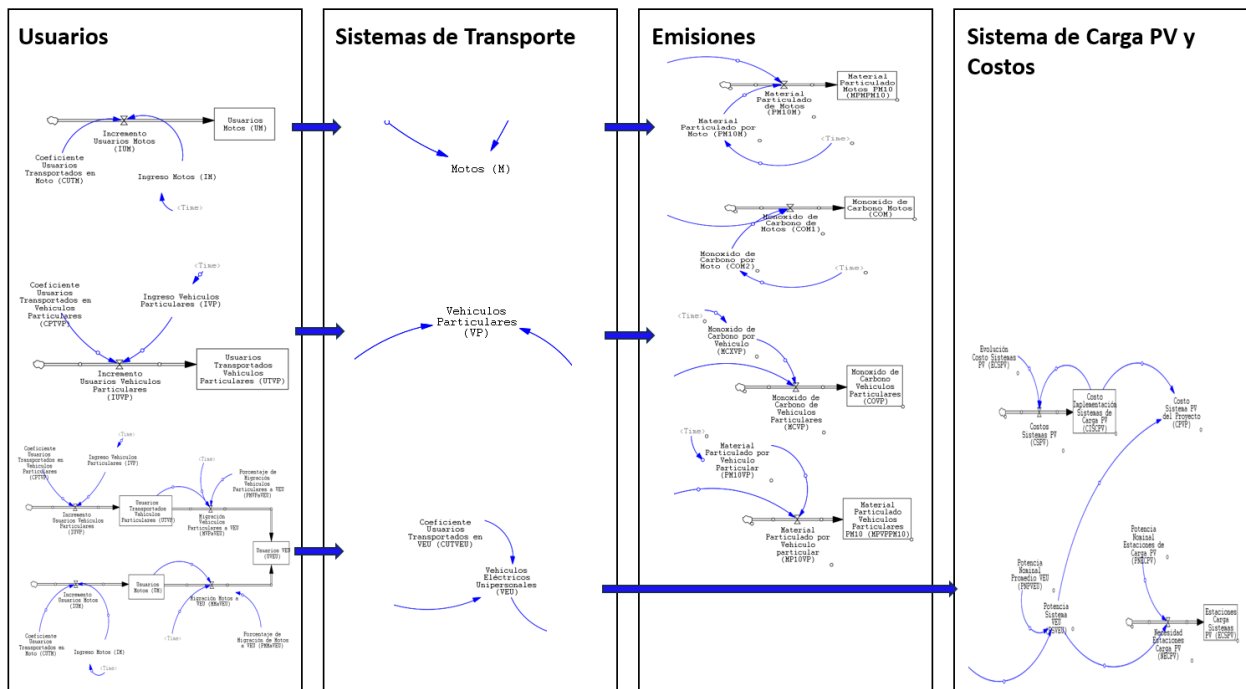
disminuiría los usuarios en motos convencionales y, por ende, las emisiones de este tipo de sistemas de transporte.

- Movilidad Tradicional Vehículos Particulares:** El aumento de usuarios en sistema de transporte con vehículo particular, presenta un aumento en las emisiones de material particulado y monóxido de carbono producto de la combustión de este tipo de sistema de transporte. Esto, permitiría promover la micromovilidad eléctrica unipersonal lo cual disminuiría los usuarios en vehículos particulares y, por ende, las emisiones de este tipo de sistemas de transporte.
- Implementación Estaciones de Carga:** El aumento en los sistemas de micromovilidad eléctrica unipersonal genera un aumento en la necesidad de carga de estos sistemas de transporte, lo cual implica aumento en las estaciones de carga y la reducción de los costos por implementación masiva.

4.3 Diagrama de flujo

El diagrama de flujos que permite la representación de la movilidad de usuarios en sistemas de movilidad tradicional a micromovilidad eléctrica unipersonal se presenta a continuación:

Figura 19. Diagrama de Flujo Modelo Micromovilidad en Bogotá



Fuente: El autor.

Este modelo genera interacciones que con ayuda del software Vensim, se logra representar las ecuaciones de cada interacción. Por lo tanto, Se presenta el siguiente Flujo con sus ecuaciones:

4.3.1 Usuarios de motos

La cantidad de usuarios transportados en motos en la ciudad de Bogotá, esta expresada como la diferencia entre los usuarios que se transportan en moto (IUM) menos los usuarios que migrarían a la movilidad eléctrica unipersonal ($MMaVEU$). Esta relación se expresa a continuación:

$$\frac{dUM}{dt} = IUM - MMaVEU \quad (1)$$

Donde, IUM está representada como el coeficiente de usuarios transportados en moto ($CUTM$) por la cantidad de motos que ingresan al sistema de movilidad anualmente (IM).

$$IUM = CUTM * IM \quad (2)$$

Por otro lado, $MMaVEU$ está representada como la cantidad de usuarios transportados en moto (UM) por la cantidad de usuarios que migrarían a la micromovilidad eléctrica unipersonal ($PMMaVEU$).

$$MMaVEU = \begin{cases} \text{Tiempo} < 2023; \\ \text{Tiempo} \geq 2023; \end{cases} \quad \begin{matrix} MMaVEU = 0 \\ MMaVEU = UM * PMMaVEU \end{matrix} \quad (3)$$

4.3.2 Usuarios de vehículos particulares

La cantidad de usuarios transportados en vehículos particulares en la ciudad de Bogotá, esta expresada como la diferencia entre los usuarios que se transportan en vehículos particulares ($IUVP$) menos los usuarios que migrarían a la movilidad eléctrica unipersonal ($MVPaVEU$). Esta relación se expresa a continuación:

$$\frac{dUTVP}{dt} = IUVP - MVPaVEU \quad (4)$$

Donde, $IUVP$ está representada como el coeficiente de usuarios transportados en vehículos particulares ($CPTVP$) por la cantidad de vehículos que ingresan al sistema de movilidad anualmente (IVP).

$$IUVP = CPTVP * IVP \quad (5)$$

Por otro lado, $MVPaVEU$ está representada como la cantidad de usuarios transportados en vehículos particulares ($UTVP$) por la cantidad de usuarios que migrarían a la micromovilidad eléctrica unipersonal ($MVPaVEU$).

$$MVPaVEU = \begin{cases} \text{Tiempo} < 2023; & MVPaVEU = 0 \\ \text{Tiempo} \geq 2023; & MVPaVEU = UTVP * PMVPaVEU \end{cases} \quad (6)$$

4.3.3 Usuarios de micromovilidad eléctrica unipersonal

La cantidad de usuarios transportados en micromovilidad eléctrica unipersonal en la ciudad de Bogotá, esta expresada como la suma entre los usuarios que migrarían de vehículos particulares ($MVPaVEU$) y los usuarios que migrarían a la movilidad eléctrica unipersonal de usuarios de motos ($MMaVEU$). Esta relación se expresa a continuación:

$$\frac{dUVEU}{dt} = MVPaVEU + MMaVEU \quad (7)$$

4.3.4 Cantidad de motos

La cantidad de motos en la ciudad de Bogotá, esta expresada como la relación entre los usuarios que se transportan en moto (UM) con el coeficiente de usuarios transportados en Moto ($CUTM$). Esta relación se expresa a continuación:

$$M = \frac{UM}{CUTM} \quad (8)$$

4.3.5 Cantidad de vehículos particulares

La cantidad de vehículos particulares en la ciudad de Bogotá, esta expresada como la relación entre los usuarios que se transportan en vehículos particulares ($UTVP$) con el coeficiente de usuarios transportados en vehículos particulares ($CPTVP$). Esta relación se expresa a continuación:

$$VP = \frac{UTVP}{CPTVP} \quad (9)$$

4.3.6 Cantidad de vehículos eléctricos unipersonales

La cantidad de vehículos eléctricos unipersonales en la ciudad de Bogotá, esta expresada como la relación entre los usuarios que se transportan en vehículos eléctricos unipersonales ($UVEU$) con

el coeficiente de usuarios transportados en vehículos eléctricos unipersonales (*CUTVEU*). Esta relación se expresa a continuación:

$$VEU = \frac{UVEU}{CUTVEU} \quad (10)$$

4.3.7 Emisiones (material particulado y monóxido de carbono) generada por combustión de motos

La cantidad de emisiones de material particulado y monóxido de carbono producto de la combustión de motos en la ciudad de Bogotá, esta expresada como la relación entre la cantidad de motos en Bogotá (*M*) con el coeficiente de material particulado y monóxido de carbono emitido por cada moto en Bogotá (*PM10M*) y (*COM2*). Estas relaciones se expresan a continuación:

$$MPMPM10 = \sum PM10M * M \quad (11)$$

$$COM = \sum COM1 * M \quad (12)$$

Donde, *PM10M* está representada como el coeficiente de material particulado emitido por cada moto y *COM1* está representado como el coeficiente de monóxido de carbono emitido por cada moto.

4.3.8 Emisiones de material particulado y monóxido de carbono generadas por combustión de vehículos particulares

La cantidad de emisiones de material particulado y monóxido de carbono producto de la combustión de vehículos particulares en la ciudad de Bogotá, esta expresada como la relación entre la cantidad de vehículos particulares en Bogotá (*VP*) con el coeficiente de material particulado y monóxido de carbono emitido por cada vehículo particular en Bogotá (*PM10VP1*) y (*MCXVP*). Estas relaciones se expresan a continuación:

$$PM10VP = \sum PM10VP1 * VP \quad (13)$$

$$MCVP = \sum MCXVP * VP \quad (14)$$

Donde, $PM10VPI$ está representada como el coeficiente de material particulado emitido por cada vehículo particular y $MCXVP$ está representado como el coeficiente de monóxido de carbono emitido por cada vehículo particular.

4.3.9 Cantidad estaciones de carga con sistema fotovoltaico

La cantidad de estaciones de carga para la ciudad de Bogotá que suplirán la necesidad de potencia eléctrica para la micromovilidad eléctrica unipersonal, esta expresada como la relación entre la cantidad de potencia total necesaria por los vehículos eléctricos unipersonales ($PSVEU$) con la potencia nominal que debe contar cada estación fotovoltaica ($PNECPV$). Estas relaciones se expresan a continuación:

$$ECSPV = \left[\sum PNECPV * PSVEU \right] - ECSPV_{t-1} \quad (15)$$

Donde, $PSVEU$ está representada como la interacción entre la cantidad de vehículos eléctricos unipersonales (VEU) por la potencia nominal promedio de cada vehículo eléctrico unipersonal ($PNPVEU$). Esta relación se expresa a continuación:

$$PSVEU = VEU * PNPVEU \quad (16)$$

4.3.10 Costo estaciones de carga con sistemas fotovoltaicos

El costo de implementación de las estaciones de carga para la ciudad de Bogotá que suplirán la necesidad de potencia eléctrica para la micromovilidad eléctrica unipersonal, esta expresada como la relación entre la necesidad de estaciones de carga ($NECPV$) con el costo de implementación de sistemas fotovoltaicos ($CISCPV$). Estas relaciones se expresan a continuación:

$$CEPV = (NECPV * CISCPV) - CEPV_{t-1} \quad (17)$$

$$CEPV = (NECPV * CISCPV) - CEPV_{t-1} \quad (18)$$

Donde, $CISCPV$ está representada como la interacción entre la evolución de los costos de implementación de sistemas fotovoltaicos ($ECSPV$) por el costo de implementación de sistemas fotovoltaicos en el tiempo ($CISCPV$). Esta relación se expresa a continuación:

$$CISCPV = ECSPV * CISCPV_{t-1} \quad (19)$$

Donde, $NECPV$ está representada como la cantidad de potencia eléctrica que requiere el sistema ($PSVEU$) dividido en la potencia nominal de cada estación de carga ($PNECPV$) menos la cantidad de estaciones que ya se encuentren en operación ($ECSPV$). Esta relación se expresa a continuación:

$$NECPV = \frac{PSVEU}{PNECPV} - ECSPV_{t-1} \quad (20)$$

4.4 Calibración y validación del modelo

El modelo de micromovilidad eléctrica unipersonal presentado, realizó el siguiente procedimiento de calibración y validación:

4.4.1 Regresión y predicción de valores históricos

Se realizó regresión no lineal con el software R, utilizando la función `lm` y `predict` para determinar los valores de ingreso al modelo de las siguientes variables:

- Ingreso Vehículos Particulares (IVP).
- Ingreso Motos (IM).
- Material Particulado por Vehículo Particular ($PM10VP1$).
- Material Particulado por Moto ($PM10M$).
- Monóxido de Carbono por Vehículo Particular ($MCXVP$).
- Monóxido de Carbono por Moto ($COM2$).

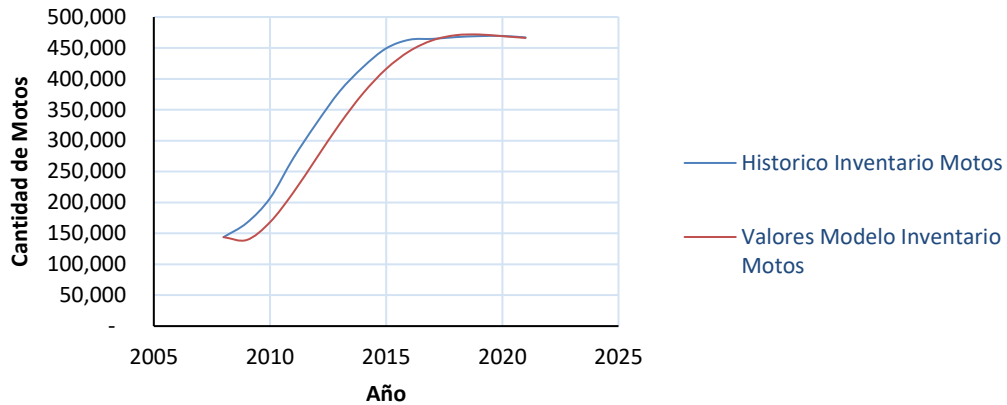
Las regresiones y predicciones permitieron ingresar los valores por cantidad de vehículos particulares y motos al modelo.

4.4.1 Resultado histórico comparado con el resultado de la simulación

A continuación, se presenta los resultados de la simulación con los valores históricos de las diferentes variables encontrando los siguientes resultados:

- **Comportamiento de Inventario de Motos:** Se presenta la comparación del inventario de motos en la ciudad de Bogotá con los resultados del modelo de micromovilidad eléctrica unipersonal presentando el siguiente comportamiento:

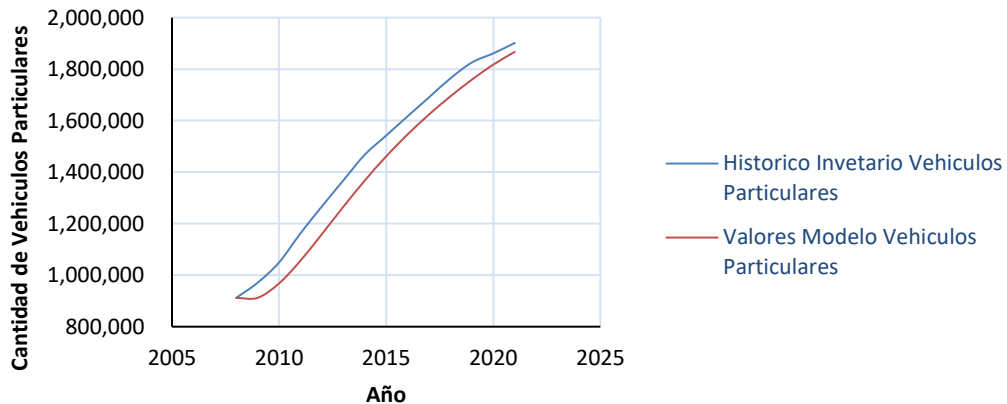
Figura 20. Validación Modelo Inventario Motos



Fuente: El autor.

- Comportamiento de Inventario de Vehículos Particulares:** Se presenta la comparación del inventario de vehículos particulares en la ciudad de Bogotá con los resultados del modelo de micromovilidad eléctrica unipersonal presentando el siguiente comportamiento:

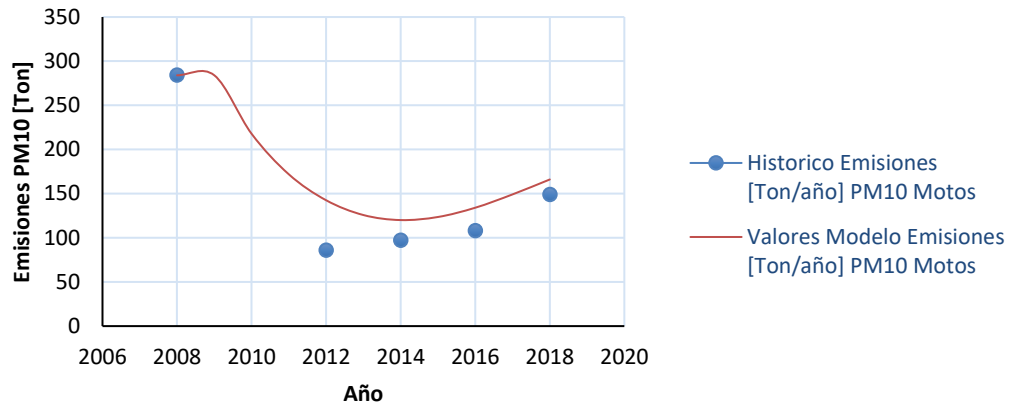
Figura 21. Validación Modelo Inventario Vehículos Particulares



Fuente: El autor.

- Comportamiento de Inventario de Material Particulado PM10 Generado por Motos:** Se presenta la comparación del inventario de emisiones de material particulado *PM10* generado por la combustión de motos en la ciudad de Bogotá con los resultados del modelo de micromovilidad eléctrica unipersonal presentando el siguiente comportamiento:

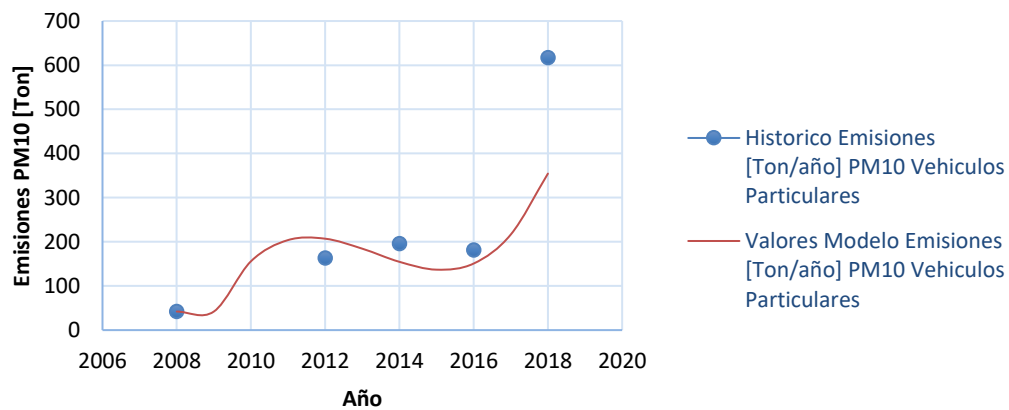
Figura 22. Validación Modelo Inventario Emisiones Material Particulado PM10 Generado por Motos



Fuente: El autor.

- Comportamiento de Inventario de Material Particulado PM10 Generado por Vehículos Particulares:** Se presenta la comparación del inventario de emisiones de material particulado *PM10* generado por la combustión de vehículos particulares en la ciudad de Bogotá con los resultados del modelo de micromovilidad eléctrica unipersonal presentando el siguiente comportamiento:

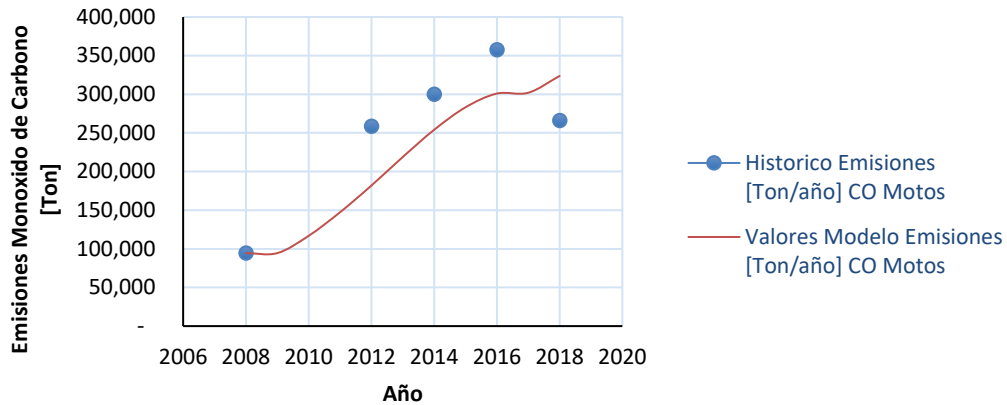
Figura 23. Validación Modelo Inventario Emisiones Material Particulado PM10 Generado por Vehículos Particulares



Fuente: El autor.

- Comportamiento de Inventario de Monóxido de Carbono Generado por Motos:** Se presenta la comparación del inventario de emisiones de monóxido de carbono generado por la combustión de motos en la ciudad de Bogotá con los resultados del modelo de micromovilidad eléctrica unipersonal presentando el siguiente comportamiento:

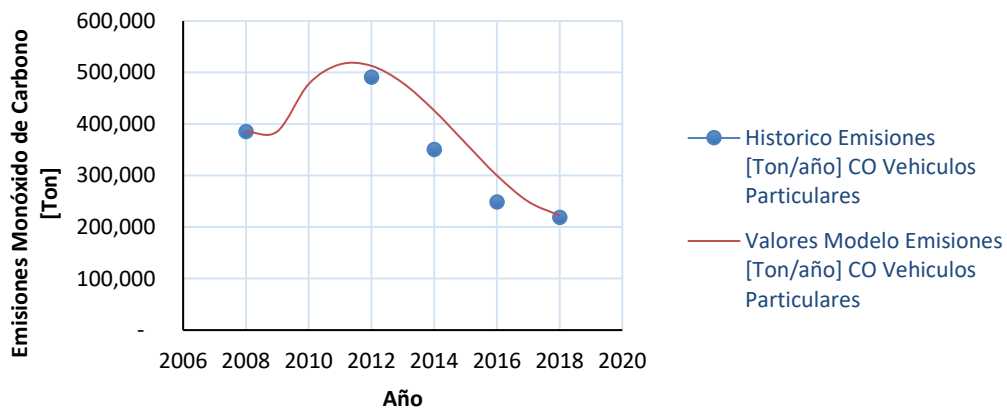
Figura 24. Validación Modelo Inventario Emisiones Monóxido de Carbono Generado por Motos



Fuente: El autor.

- Comportamiento de Inventario de Monóxido de Carbono Generado por Vehículos Particulares:** Se presenta la comparación del inventario de emisiones de monóxido de carbono generado por la combustión de vehículos particulares en la ciudad de Bogotá con los resultados del modelo de micromovilidad eléctrica unipersonal presentando el siguiente comportamiento:

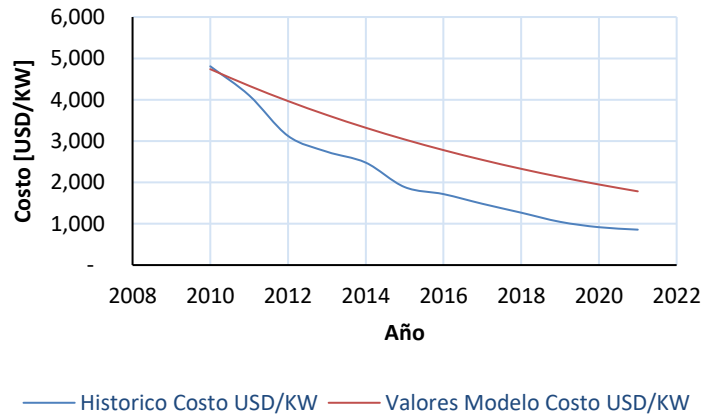
Figura 25. Validación Modelo Inventario Emisiones Monóxido de Carbono Generado por Vehículos Particulares



Fuente: El autor.

- Comportamiento de costos por implementación de sistemas fotovoltaicos:** Se presenta la comparación de la evolución de los costos asociados a implementación de proyectos fotovoltaicos [43] con los resultados del modelo de micromovilidad eléctrica unipersonal presentando el siguiente comportamiento:

Figura 26. Validación Modelo Inventario Emisiones Monóxido de Carbono Generado por Vehículos Particulares



Fuente: El autor.

4.4.1 Evaluación errores

Se presenta la evaluación de los errores de pronóstico de las diferentes variables comparadas con los valores históricos, encontrando los siguientes resultados:

Tabla 3. Evaluación Errores de Pronóstico

Variable	MSE	RMSE	MAD	MAPE	Accuracy
Inventario Motos	1.043.529.441,79	32.303,71	23.898,07	7,9%	92,1%
Inventario de Vehículos Particulares	5.849.678.167,00	76.483,19	70.692,00	5,1%	94,9%
Material Particulado PM10 Motos	938,79	30,64	24,53	25,0%	75,0%
Material Particulado PM10 Vehículos Particulares	14.693,94	121,22	75,62	21,5%	78,5%
Monóxido de Carbono Motos	2.903.318.488,80	53.882,45	47.380,80	16,5%	83,5%
Monóxido de Carbono Vehículos Particulares	1.775.066.656,20	42.131,54	30.505,40	9,7%	90,3%
Costo USD/KW	840.394,13	916,73	854,94	58,62%	41,38%

Fuente: El autor.

En la tabla anterior se observa un comportamiento del error absoluto medio (MAPE) por debajo del 25% en la mayor cantidad de variables comparadas a excepción de la variable de evolución del costo de implementación de tecnología fotovoltaica, la cual presentó una desviación mayor. En conclusión, el promedio del error absoluto medio de todas las variables evaluadas corresponde al 20.6%, lo que confirma aproximadamente un 80% de comportamiento del modelo acorde a los valores históricos presentados en la simulación.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con el modelo de dinámica de sistemas presentado en el desarrollo del proyecto, se contemplan escenarios que permiten observar comportamientos en las variables que afectan parte de la movilidad de la ciudad de Bogotá.

5.1 Escenarios de evaluación para el modelo presentado

Los escenarios presentan alternativas de inmersión de la micromovilidad eléctrica unipersonal en la movilidad de la ciudad de Bogotá y se detallan a continuación:

5.1.1 Escenario donde no existe política de inmersión fuerte de micromovilidad eléctrica unipersonal Business as Usual (BAU)

Este escenario representa continuidad en los sistemas de transporte como las motos y vehículos particulares tradicionales, sin una inmersión de manera importante sobre el sistema de movilidad por parte de la micromovilidad eléctrica unipersonal.

5.1.2 Escenario donde existe política baja de inmersión de micromovilidad eléctrica unipersonal Business as Policy (BAP)

Este escenario representa continuidad en los sistemas de transporte como las motos y vehículos particulares tradicionales con una inmersión de manera baja sobre el sistema de movilidad por parte de la micromovilidad eléctrica unipersonal.

5.1.3 Escenario donde existe política alta de inmersión de micromovilidad eléctrica unipersonal Business as Vision (BAV)

Este escenario representa continuidad en los sistemas de transporte como las motos y vehículos particulares tradicionales con una inmersión de manera fuerte sobre el sistema de movilidad por parte de la micromovilidad eléctrica unipersonal.

5.2 Resultados del modelo sobre las variables establecidas

Los escenarios permiten observar el comportamiento de las siguientes variables:

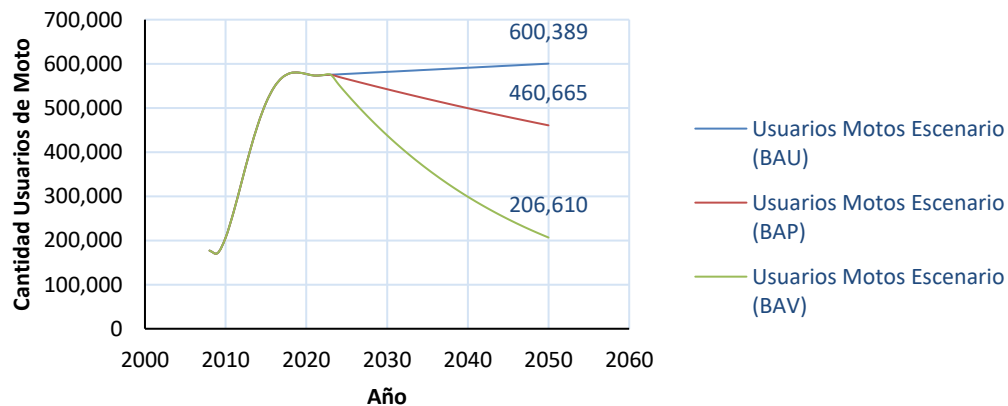
5.2.1 Variable usuarios de transporte

En esta variable se puede observar el comportamiento de los usuarios que se transportan en moto, vehículo particular y aquellos usuarios que migrarían a movilidad eléctrica unipersonal en los tres escenarios propuestos encontrando los siguientes resultados:

- **Usuarios transportados en moto**

Los usuarios transportados en moto presentan los siguientes comportamientos evaluando los 3 escenarios propuestos, donde se observa una reducción progresiva de los usuarios transportados en moto, cuando se realiza el ingreso de los escenarios de entrada de la micromovilidad eléctrica unipersonal, presentando en el escenario (BAU) para el año 2050 una reducción de usuarios transportados en moto del 23.3% y en el escenario (BAV) para el año 2050 una reducción de los usuarios transportados en moto del 65.6%.

Figura 27. Comportamiento de usuarios transportados en Moto en los 3 escenarios

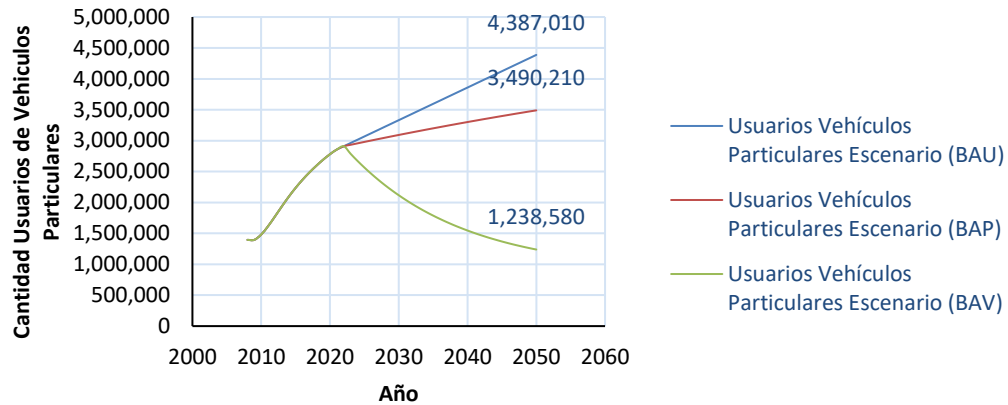


Fuente: El autor.

- **Usuarios transportados en vehículos particulares**

Los usuarios transportados en vehículos particulares presentan los siguientes comportamientos evaluando los 3 escenarios propuestos, donde se observa una reducción progresiva de los usuarios transportados en vehículos particulares, cuando se realiza el ingreso de los escenarios de entrada de la micromovilidad eléctrica unipersonal, presentando en el escenario (BAP) para el año 2050 una reducción de usuarios transportados en vehículos particulares del 20.0% y en el escenario (BAV) para el año 2050 una reducción de los usuarios transportados en vehículos particulares del 71.6%.

Figura 28. Comportamiento de usuarios transportados en Vehículos Particulares en los 3 escenarios

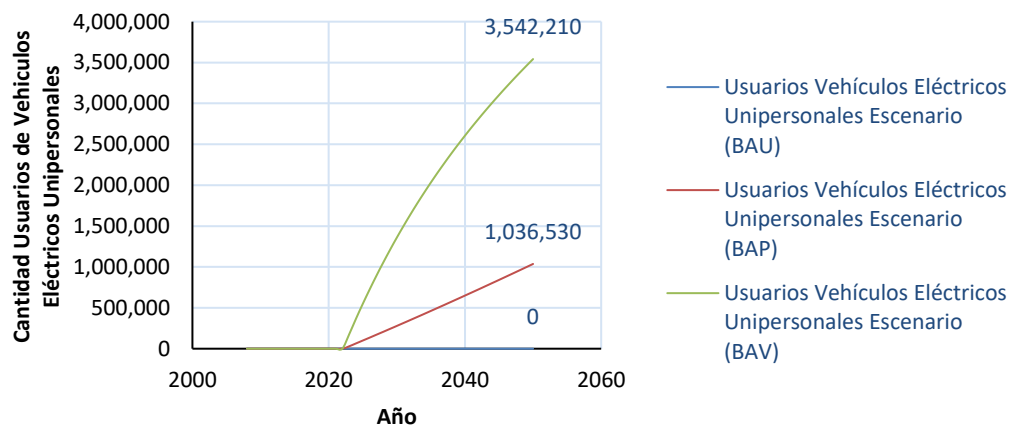


Fuente: El autor.

- **Usuarios transportados en vehículos eléctricos unipersonales**

Los usuarios transportados en vehículos eléctricos unipersonales presentan los siguientes comportamientos evaluando los 3 escenarios propuestos, donde se observa un crecimiento progresivo de los usuarios transportados en vehículos eléctricos unipersonales, cuando se realiza el ingreso de los escenarios de entrada de la micromovilidad eléctrica unipersonal, presentando en el escenario (BAP) para el año 2050 un aumento de usuarios transportados en vehículos eléctricos unipersonales del 100.0% y en el escenario (BAV) para el año 2050 un aumento de los usuarios transportados en vehículos eléctricos unipersonales del 100%.

Figura 29. Comportamiento de usuarios transportados en Vehículos Eléctricos Unipersonales en los 3 escenarios



Fuente: El autor.

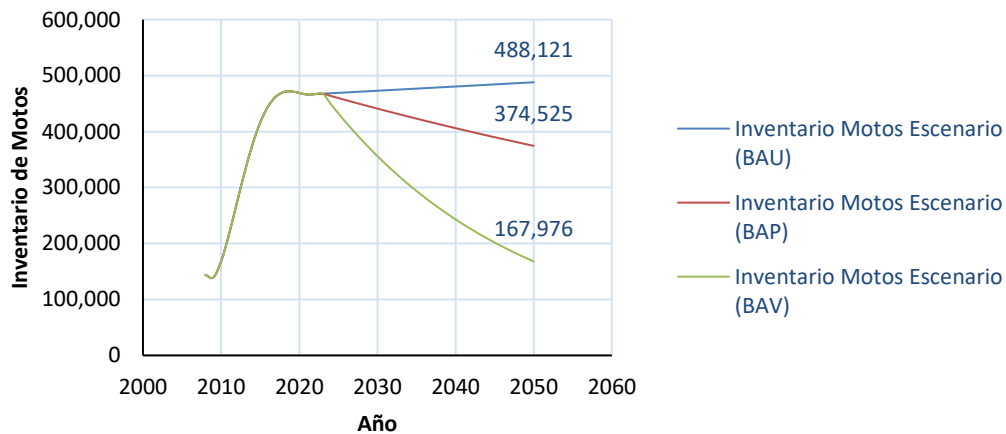
5.2.2 Variable inventario de vehículos para transporte de usuarios

En esta variable se puede observar el comportamiento del inventario de motos, vehículos particulares y micromovilidad eléctrica unipersonal para el transporte de los diferentes usuarios de Bogotá y se representa así:

- **Inventario de Motos**

La cantidad de motos que estarían presentes en el sistema de movilidad de Bogotá con los 3 diferentes escenarios, donde se observa una reducción progresiva en la cantidad de motos que circularían en el sistema de movilidad de Bogotá, cuando se realiza el ingreso de los escenarios de entrada de la micromovilidad eléctrica unipersonal, presentando en el escenario (BAP) para el año 2050 una reducción de motos del 23.3% y en el escenario (BAV) para el año 2050 una reducción de motos del 65.6%.

Figura 30. Comportamiento de Inventario de Motos en los 3 escenarios

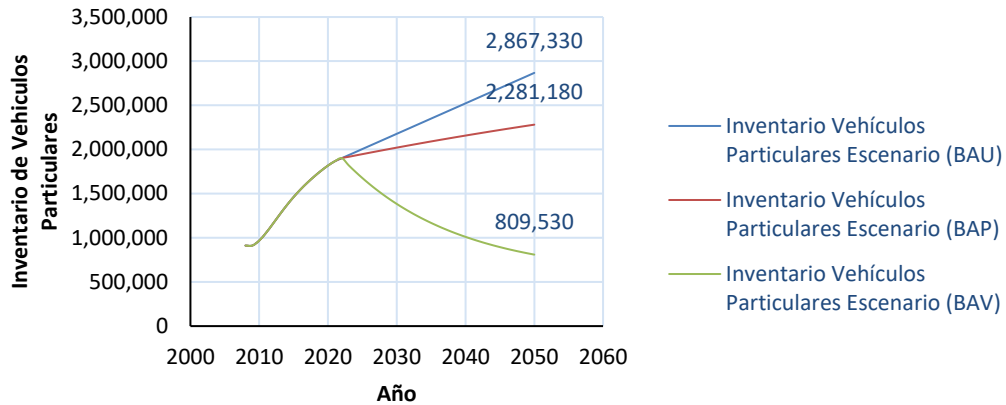


Fuente: El autor.

- **Inventario de vehículos particulares**

La cantidad de vehículos particulares que estarían presentes en el sistema de movilidad de Bogotá con los 3 diferentes escenarios, donde se observa una reducción progresiva en la cantidad de vehículos particulares que circularían en el sistema de movilidad de Bogotá, cuando se realiza el ingreso de los escenarios de entrada de la micromovilidad eléctrica unipersonal, presentando en el escenario (BAP) para el año 2050 una reducción de vehículos particulares del 20.4% y en el escenario (BAV) para el año 2050 una reducción de vehículos particulares del 71.7%.

Figura 31. Comportamiento de Inventario de Vehículos Particulares en los 3 escenarios

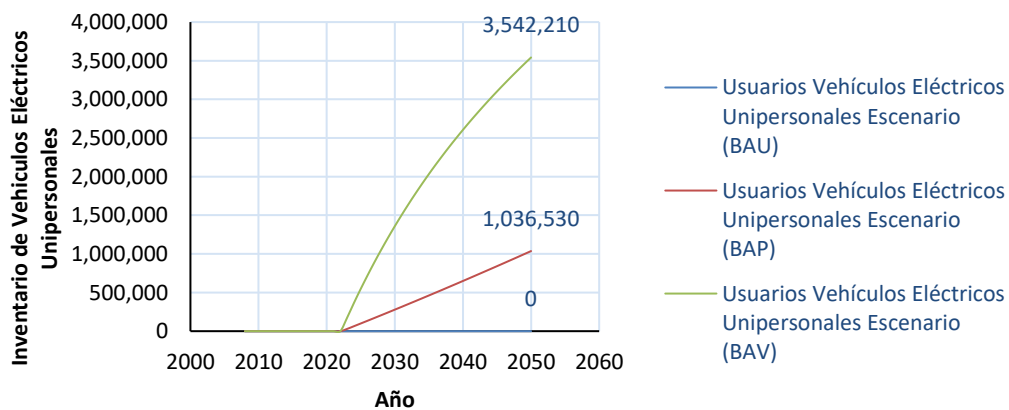


Fuente: El autor.

- **Inventario de vehículos eléctricos unipersonales**

La cantidad de micromovilidad eléctrica unipersonal que estarían presentes en el sistema de movilidad de Bogotá con los 3 diferentes escenarios, donde se observa un crecimiento progresivo del inventario de la micromovilidad eléctrica unipersonal, cuando se realiza el ingreso de los escenarios de entrada de la micromovilidad eléctrica unipersonal, presentando en el escenario (BAP) para el año 2050 un aumento de usuarios transportados en vehículos eléctricos unipersonales del 100.0% con un total de infraestructura de vehículos eléctricos unipersonales de 1'036.530 y en el escenario (BAV) para el año 2050 un aumento de los usuarios transportados en vehículos eléctricos unipersonales del 100% con una infraestructura de vehículos eléctricos unipersonales de 3'542.210 circulando en la ciudad de Bogotá.

Figura 32. Comportamiento de Inventario de Vehículos Eléctricos Unipersonales en los 3 escenarios



Fuente: El autor.

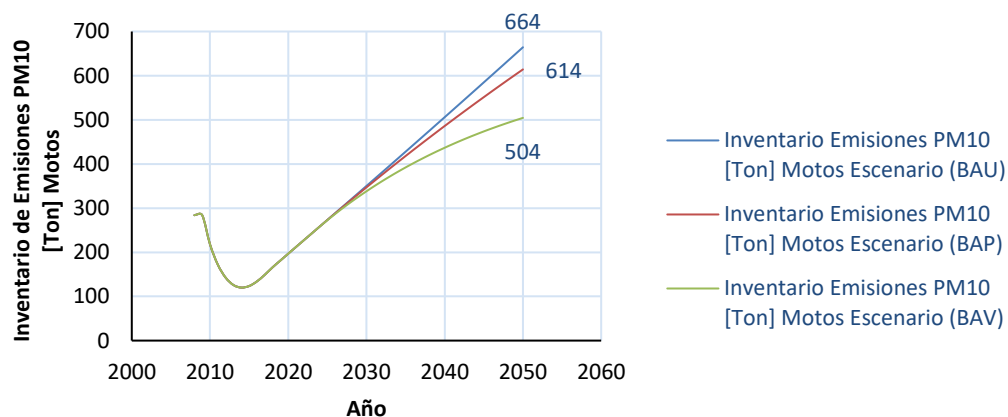
5.2.3 Variable inventario de emisiones para transporte de usuarios

En esta variable se puede observar el comportamiento del inventario de emisiones generadas en el proceso de combustión de las motos y vehículos particulares para el transporte de los diferentes usuarios de Bogotá y se representa así:

- **Inventario emisiones material particulado PM10 generado por combustión de motos**

La cantidad material particulado (PM10) generado por la combustión de motos que estarían presentes en el sistema de movilidad de Bogotá con los 3 diferentes escenarios, donde se observa una reducción progresiva en la cantidad de emisiones de material particulado generado en el proceso de combustión de las motos que circularían en el sistema de movilidad de Bogotá, cuando se realiza el ingreso de los escenarios de entrada de la micromovilidad eléctrica unipersonal, presentando en el escenario (BAP) para el año 2050 una reducción de emisiones de material particulado de motos del 7.5% que representa reducción de 50 toneladas de material particulado y en el escenario (BAV) para el año 2050 una reducción de emisiones de material particulado generado por motos del 24.1%, que representa la reducción de 160 toneladas de material particulado.

Figura 33. Comportamiento de Inventario de Emisiones Material Particulado PM10 de Motos en los 3 escenarios



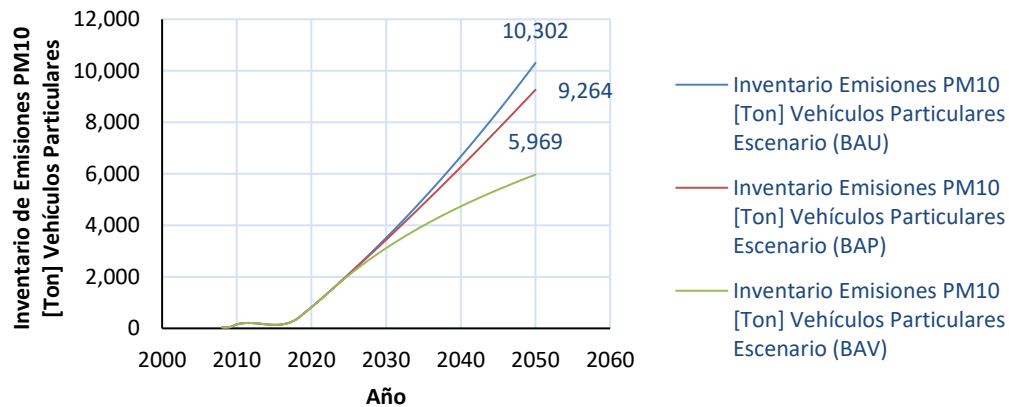
Fuente: El autor.

- **Inventario emisiones material particulado PM10 generado por combustión de vehículos particulares**

La cantidad de material particulado (PM10) generado por la combustión de vehículos particulares que estarían presentes en el sistema de movilidad de Bogotá con los 3 diferentes escenarios, donde se observa una reducción progresiva en la cantidad de emisiones de material particulado generado en el proceso de combustión de los vehículos particulares que circularían en el sistema de movilidad

de Bogotá, cuando se realiza el ingreso de los escenarios de entrada de la micromovilidad eléctrica unipersonal, presentando en el escenario (BAP) para el año 2050 una reducción de emisiones de material particulado de vehículos particulares del 10.1% que representa reducción de 1.038 toneladas de material particulado y en el escenario (BAV) para el año 2050 una reducción de emisiones de material particulado generado por vehículos particulares del 42.1%, que representa la reducción de 4.333 toneladas de material particulado.

Figura 34. Comportamiento de Inventario de Emisiones Material Particulado PM10 de Vehículos Particulares en los 3 escenarios

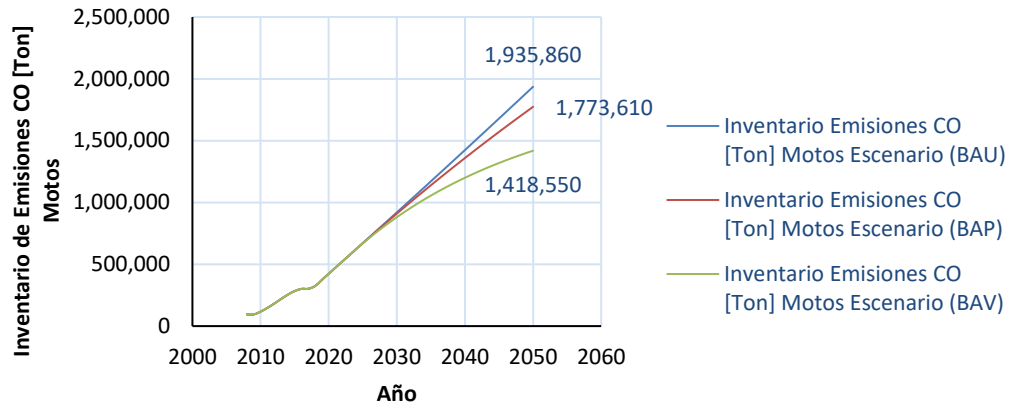


Fuente: El autor.

- **Inventario emisiones monóxido de carbono generado por combustión de motos**

La cantidad de monóxido de carbono generado por la combustión de motos que estarían presentes en el sistema de movilidad de Bogotá con los 3 diferentes escenarios, donde se observa una reducción progresiva en la cantidad de emisiones de monóxido de carbono generado en el proceso de combustión de las motos que circularían en el sistema de movilidad de Bogotá, cuando se realiza el ingreso de los escenarios de entrada de la micromovilidad eléctrica unipersonal, presentando en el escenario (BAP) para el año 2050 una reducción de emisiones de monóxido de carbono de motos del 8.4% que representa reducción de 162.250 toneladas de monóxido de carbono y en el escenario (BAV) para el año 2050 una reducción de emisiones de monóxido de carbono generado por motos del 26.7%, que representa la reducción de 517.310 toneladas de monóxido de carbono.

Figura 35. Comportamiento de Inventario de Emisiones Monóxido de Carbono de Motos en los 3 escenarios

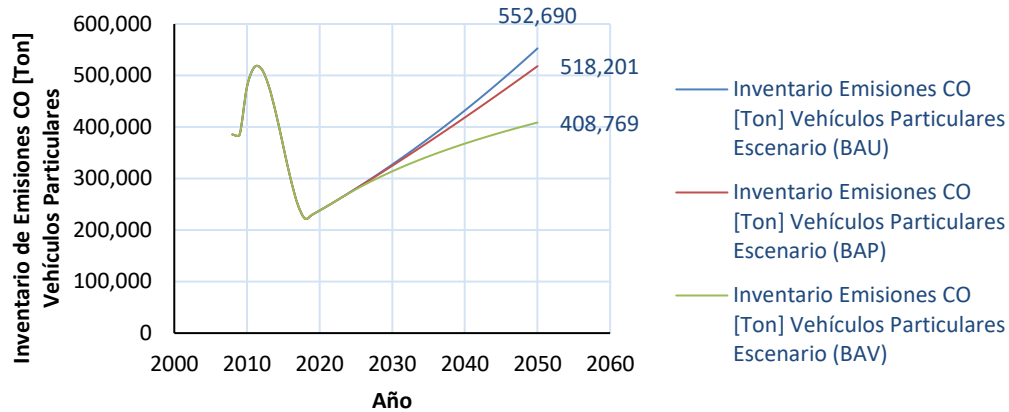


Fuente: El autor.

- Inventario emisiones monóxido de carbono generado por combustión de vehículos particulares**

La cantidad de monóxido de carbono generado por la combustión de vehículos particulares que estarían presentes en el sistema de movilidad de Bogotá con los 3 diferentes escenarios, donde se observa una reducción progresiva en la cantidad de emisiones de monóxido de carbono generado en el proceso de combustión de los vehículos particulares que circularían en el sistema de movilidad de Bogotá, cuando se realiza el ingreso de los escenarios de entrada de la micromovilidad eléctrica unipersonal, presentando en el escenario (BAP) para el año 2050 una reducción de emisiones de monóxido de carbono de vehículos particulares del 6.2% que representa reducción de 34.489 toneladas de monóxido de carbono y en el escenario (BAV) para el año 2050 una reducción de emisiones de monóxido de carbono generado por vehículos particulares del 26.0%, que representa la reducción de 143.921 toneladas de monóxido de carbono.

Figura 36. Comportamiento de Inventario de Emisiones Monóxido de Carbono de Vehículos Particulares en los 3 escenarios



Fuente: El autor.

5.2.4 Variable cantidad de estaciones de carga fotovoltaica

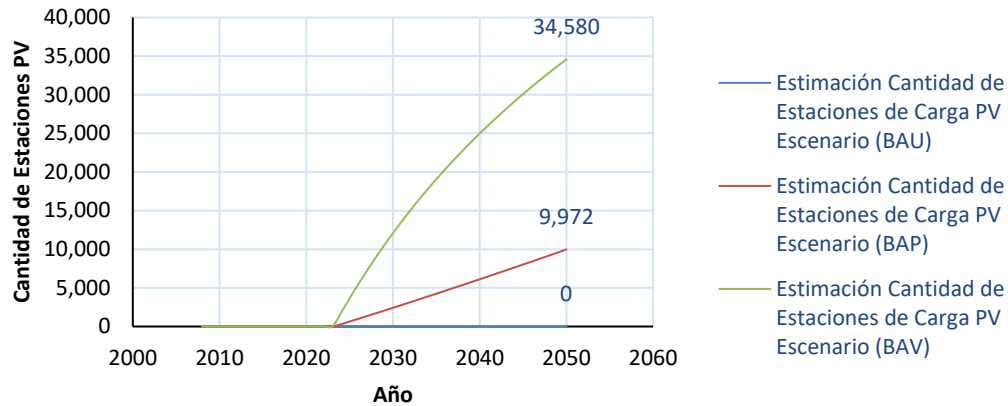
En esta variable se pueden observar las tendencias de la cantidad de estaciones de carga con sistemas fotovoltaicos dependiendo de la cantidad de micromovilidad eléctrica unipersonal que entre al sistema de movilidad de la ciudad de Bogotá. Además, el comportamiento del costo de implementación de estas, basado en la evolución del costo de UDS por kilovatio puesto en operación.

- Estimación de cantidad de estaciones fotovoltaicas para sistemas de micromovilidad eléctrica unipersonal en Bogotá**

Los sistemas de micromovilidad eléctrica unipersonal ingresan como alternativa de movilidad en la ciudad de Bogotá, los cuales requieren sistemas que permitan garantizar la potencia eléctrica necesaria para alimentar estos sistemas de movilidad eléctrica unipersonal. Por lo tanto, se establece la potencia nominal promedio de los equipos de micromovilidad eléctrica unipersonal actuales que se encuentra en 680 [W], los cuales se distribuyen en estaciones de 100 vehículos eléctricos unipersonales, donde se observa un aumento progresivo en la cantidad de estaciones de carga con sistemas fotovoltaicos para energizar los sistemas de micromovilidad eléctrica unipersonal que circularían en el sistema de movilidad de Bogotá. Cuando se realiza el ingreso de los escenarios de entrada de la micromovilidad eléctrica unipersonal, se presenta el escenario (BAP) para el año 2050 con un aumento de estaciones de carga con sistemas fotovoltaicos del 100%, que representa aumento de 9.972 estaciones de carga con sistemas fotovoltaicos y en el escenario (BAV) para el año 2050 con un aumento de estaciones de carga con sistemas

fotovoltaicos del 100%, que representa el aumento de 34.580 estaciones de carga nuevas en sistemas fotovoltaicos en la ciudad de Bogotá.

Figura 37. Estimación de Cantidad de Estaciones de Carga PV en los 3 escenarios



Fuente: El autor.

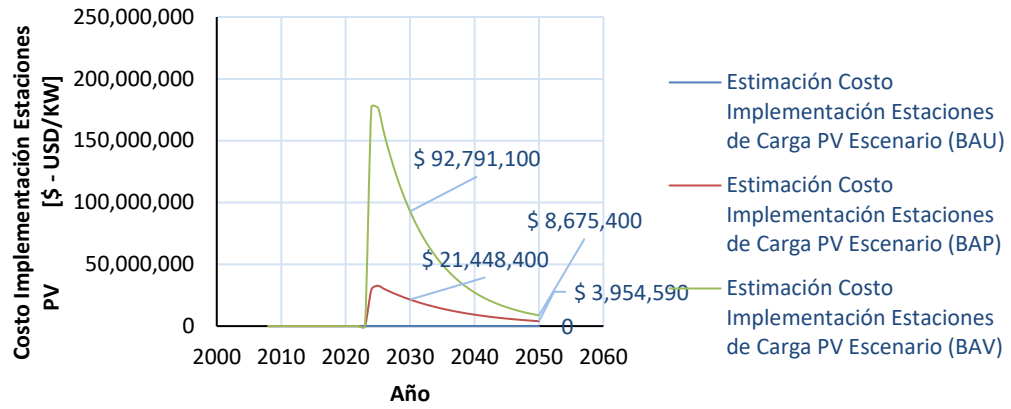
- **Estimación costo de implementación estaciones de carga con sistemas fotovoltaicos**

Las estaciones de carga con sistemas fotovoltaicos necesarios para la operación de los sistemas de micromovilidad eléctrica unipersonal serán viables a medida que la evolución económica de implementación de esta tecnología fotovoltaica presente reducciones en el tiempo. A continuación, se muestra la curva de costo de implementación de las estaciones de carga con sistemas fotovoltaicos, donde el comportamiento económico de la implementación de estaciones de carga basado en sistemas fotovoltaicos permite observar que se presentan eficiencias económicas en el valor de instalación de esta tecnología en el tiempo.

Con la entrada de los escenarios de micromovilidad eléctrica unipersonal, se presenta el escenario (BAP) para la ventana de tiempo del año 2023 al año 2050, con un aumento de estaciones de carga fotovoltaica de 290 a 390 estaciones por año en el periodo de tiempo evaluado, se observa una reducción económica del 81.6% cuando se evalúa el costo de las estaciones fotovoltaicas para el año 2030 y 2050. Es decir, que la implementación de la misma cantidad de estaciones de carga para el año 2030 y para el año 2050 presenta una reducción de 17.5 millones de dólares.

Para el escenario (BAV) en la misma ventana de tiempo se observa un comportamiento de reducción más pronunciado en los costos de implementación de las estaciones fotovoltaicas, presentando un ahorro del 90.6% que corresponde a un valor cercano a los 84 millones de dólares.

Figura 38. Estimación Costo Implementación de Estaciones de Carga PV en los 3 escenarios



Fuente: El autor.

CONCLUSIONES

La micromovilidad eléctrica unipersonal permite observar una alternativa complementaria a los sistemas de movilidad tradicionales para usuarios en las principales ciudades del mundo, donde continuamente se abre camino e incrementa su participación para diferentes tipos de uso como movilidad multimodal en inicio y fin de viajes. Otro tipo de uso que se observa a nivel internacional consiste en que la micromovilidad eléctrica unipersonal sea complemento a sistemas masivos de movilidad como metros, trenes, entre otros.

También se observan propuestas de uso de micromovilidad eléctrica compartida donde se inician los viajes en este tipo de sistemas de micromovilidad y culminado los desplazamientos el equipo queda disponible en zonas autorizadas para otros usuarios. Este tipo de uso de la micromovilidad se identifica para propuestas de movilidad de turistas y se contempla desde la planeación de la evolución de las ciudades y sus sistemas de movilidad.

Es importante ver que la orientación a la implementación de sistemas de micromovilidad eléctrica unipersonal donde la planeación permita garantizar la seguridad vial de los usuarios que utilizan la micromovilidad eléctrica unipersonal y a los usuarios adyacentes al sistema.

Es de resaltar que el continuo crecimiento de la micromovilidad eléctrica unipersonal muestra algunos beneficios en el impacto de emisión por efecto de combustión en diferentes países que transforman los sistemas de transporte o complementan el mismo con este tipo de tecnologías.

Los parámetros recolectados en el desarrollo del presente proyecto, permite observar el comportamiento de la movilidad de la ciudad de Bogotá con respecto al inventario de vehículos particulares, los cuales presentan un crecimiento anualizado en el transcurso del tiempo y las motos de combustión que se estabilizan, generando un sistema de movilidad de usuarios individual compuesto por vehículos particulares y motos que tiende a un continuo crecimiento, produciendo una repuesta positiva en el proceso de combustión de estos sistemas de transporte que emite material particulado y monóxido de carbono en el aire circundante en la ciudad de Bogotá y que generan efectos negativos sobre la salud de las personas de la ciudad y daños ambientales.

Estas señales observadas en los parámetros de movilidad históricos generan la necesidad de crear planes de acción que busquen mitigar la respuesta de la combustión asociada a la movilidad de usuarios en la ciudad de Bogotá por lo que, es una alternativa contemplar la micromovilidad eléctrica unipersonal como apoyo o modelo para transporte en la ciudad de Bogotá y así, buscar mejoras en las emisiones o mitigación de estas.

La movilidad de la ciudad de Bogotá para usuarios que se transportan en vehículos de forma individual como tipo vehículo particular o motos, presenta un continuo crecimiento en inventario y esto permitió observar la tendencia o estimación del comportamiento de estos medios de transporte en el tiempo. Con esto, se logró observar la respuesta en emisiones de material particulado y monóxido de carbono asociado al inventario de vehículos que participan en la movilidad de los usuarios de la ciudad de Bogotá, observando que las emisiones presentan una tendencia de crecimiento si continuamos con un comportamiento de movilidad habitual.

Con las características de comportamiento del sistema habitual, proyectado en el tiempo basado en sus históricos y el modelo planteado, se introduce la combinación de usuarios que potencialmente podrían migrar a la micromovilidad eléctrica unipersonal donde se observan respuestas de estimación de cambios en el inventario de vehículos de combustión circulando por la ciudad de Bogotá, lo cual implica reducción de emisiones generadas por el transporte de usuarios en la ciudad de Bogotá y a su vez, genera una necesidad de energía eléctrica la cual puede ser suministrada por sistemas fotovoltaicos que pueden ser distribuidos de forma estratégica en diferentes zonas de afluencia de personas en la ciudad de Bogotá y que de continuarse con la tendencia de reducción de costos de implementación de este tipo de tecnología en el tiempo, cada vez será más factible la implementación de este tipo de sistemas de carga para la micromovilidad en la ciudad de Bogotá.

El modelo de micromovilidad eléctrica unipersonal para la ciudad de Bogotá presento 3 escenarios, los cuales permitían observar el comportamiento del inventario de vehículos (motos y vehículos particulares), emisiones, usuarios, estaciones de carga fotovoltaica y costos de implementación. Para el escenario Business as Usual (BAU), se observa un comportamiento de usuarios que confirman el uso de motos y vehículos particulares en los diferentes tipos de usuarios, lo que implica un continuo crecimiento en el inventario de estos dos parques de sistemas de movilidad.

Por otro lado, este tipo de sistemas de movilidad continuarían generando emisiones de forma creciente de material particulado y monóxido de carbono que implican problemas en la salud de las personas e impactos ambientales negativos y finalmente, no se desarrolla de forma fuerte la industria de la micromovilidad en Bogotá que impulse estos tipos de sistemas de transporte generando la no necesidad de estaciones de carga fotovoltaica para este tipo de sistemas de transporte.

Para el escenario Business as Policy (BAP), se observa un comportamiento de usuarios que introducen de forma conservadora el uso de micromovilidad eléctrica unipersonal para reemplazar los desplazamientos en la ciudad de Bogotá con motos y vehículos particulares, lo que implica un cambio en el comportamiento del inventario de estos dos sistemas de movilidad. Por otro lado, este tipo de sistemas de movilidad generan mitigación en la generación de emisiones de material particulado y monóxido de carbono basado en el reemplazo tecnológico del sistema de movilidad que implican problemas en la salud de las personas e impactos ambientales negativos y finalmente, se iniciaría un desarrollo en la industria de la micromovilidad en Bogotá que impulse estos tipos de sistemas de transporte y su continua evolución de productos, generando a su vez, la necesidad de estaciones de carga fotovoltaica para este tipo de sistemas de transporte que por sus bajos consumos se harían viables cada vez más y su tendencia de reducción de costo en la implementación de sistemas fotovoltaicos (\$/KW).

Para el escenario Business as Vision (BAV), se observa un comportamiento de usuarios que introducen de forma importante el uso de micromovilidad eléctrica unipersonal para reemplazar los desplazamientos en la ciudad de Bogotá con motos y vehículos particulares, lo que implica un cambio en el comportamiento del inventario de estos dos sistemas de movilidad. Por otro lado, este tipo de sistemas de movilidad generan mitigación en la generación de emisiones de material particulado y monóxido de carbono basado en el reemplazo tecnológico del sistema de movilidad que implican problemas en la salud de las personas e impactos ambientales negativos y finalmente, se iniciaría un desarrollo fuerte en la industria de la micromovilidad en Bogotá que impulse estos tipos de sistemas de transporte y su continua evolución de productos, generando a su vez, la necesidad de estaciones de carga fotovoltaica para este tipo de sistemas de transporte que por sus bajos consumos, se harían viables cada vez más y su tendencia de reducción de costo en la

implementación de sistemas fotovoltaicos (\$/KW). Además, sería una solución paralela en los sistemas fotovoltaicos que buscan generación para entrega a los sistemas de distribución local y que en algún momento puedan llegar a presentar congestión y la no recepción de esta energía.

El presente proyecto permite dar a sus diferentes lectores una visión como usuario de la importancia de la transformación del sistema de movilidad en la ciudad de Bogotá y brinda la alternativa e importancia de la micromovilidad eléctrica unipersonal entre todas las gamas de soluciones de movilidad actuales. Además, presenta escenarios de ingreso de este tipo de movilidad como aporte a los compromisos de mitigación de emisiones generadas en los procesos de combustión para mitigar la generación de material particulado y monóxido de carbono en el proceso de transporte en la ciudad de Bogotá.

Este trabajo resalta la micromovilidad eléctrica unipersonal como una industria que puede ser partícipe de manera importante en la movilidad de los usuarios de la ciudad de Bogotá, generando empleos desde la parte de diseño y eficiencia de los equipos de micromovilidad eléctrica unipersonal, fabricación de componentes, ensamble, comercialización, entre otras oportunidades que podría brindar esta industria.

Las estaciones de recarga para movilidad actualmente están en desarrollo y por las características de los vehículos eléctricos actuales, demandan sistemas de potencia considerables que la tecnología fotovoltaica presentaría como restricciones y baja competitividad contra la red eléctrica tradicional. Sin embargo, para alimentación de sistemas de micromovilidad eléctrica tradicional donde las potencias a suministrar son bajas podrían llegar a ser una buena solución para suministro de energía eléctrica

Finalmente, este trabajo se presenta como punto de partida a investigaciones futuras para la implementación de un proyecto de micromovilidad eléctrica unipersonal integral para la ciudad de Bogotá. Como áreas de análisis e investigación, se observa la necesidad de estudiar curvas de demanda, generación y almacenamiento para sistemas de micromovilidad en la ciudad de Bogotá y complemento a este estudio, es importante definir en investigaciones futuras la creación de un posible indicador de movilidad en la ciudad de Bogotá que represente la cantidad de kilómetros con energía sostenible realizados en la ciudad de Bogotá.

REFERENCIAS

- [1] Sistema Integrado de Transporte Público, “Buses-en-operacion-noviembre-2022,” 2022. Accessed: Feb. 13, 2023. [Online]. Available: <https://datosabiertos.bogota.gov.co/dataset/buses-del-sistema-integrado-de-transporte-publico-en-operacion/resource/aabb4dcc-ffdd-48cd-8330-9a2901369c92>
- [2] DANE, “Proyecciones de población desagregadas por localidades 2018-2035,” 2021. Accessed: Feb. 07, 2023. [Online]. Available: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/demografia-y-poblacion/proyecciones-de-poblacion/proyecciones-de-poblacion-bogota>
- [3] G. Rodríguez Valbuena -Coordinador David Ricardo González Jiménez Ángela Rocío Mendoza Rincón, F. Gabriel Fonseca Daza Fotografías Germán Rodríguez Valbuena Federico Gabriel Fonseca Daza Jorge Armando Moreno Pinilla Shutterstock Alcalde Mayor de Bogotá Enrique Peñalosa Londoño, J. Pablo Bocarejo Suescún Sergio Eduardo Martínez Jaimes Adriana Ruth Iza Certuche, and S. Eduardo Martínez Jaimes, “Observatorio de Movilidad 2017,” 2017.
- [4] DANE, “Boletín Técnico Encuesta de Transporte Urbano de Pasajeros (ETUP) Cuarto trimestre de 2022 Encuesta de Transporte Urbano de Pasajeros (ETUP),” 2022. Accessed: Feb. 13, 2023. [Online]. Available: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/transporte/encuesta-de-transporte-urbano-etup>
- [5] Secretaria de Movilidad, “Promedio de velocidad anual (km/hora) en Bogotá, 2016 - 2021,” 2021. Accessed: Feb. 10, 2023. [Online]. Available: <https://bogotacomovamos.org/datos/movilidad/>
- [6] Secretaria de Movilidad, “Movilidad en Cifras 2015,” 2017. Accessed: Feb. 14, 2023. [Online]. Available: https://www.movilidadbogota.gov.co/web/SIMUR/ARCHIVOS/Movilidad_Cifras_2015_V4_marzo2017.pdf
- [7] D. V. R. Lara, P. Pfaffenbichler, and A. N. Rodrigues da Silva, “Modeling the resilience of urban mobility when exposed to the COVID-19 pandemic: A qualitative system dynamics approach,” *Sustain Cities Soc*, vol. 91, p. 104411, Apr. 2023, doi: 10.1016/j.scs.2023.104411.

- [8] A. Mayor De Bogotá *et al.*, “Inventario de Emisiones de Bogotá Contaminantes Atmosféricos,” 2018. Accessed: Feb. 14, 2023. [Online]. Available: <https://www.ambientebogota.gov.co/documents/10184/397082/Inventario+de+Emisiones+de+Bogota+portal+nuevo.pdf/972994eb-7f58-42c2-a801-0f8579937919>
- [9] Secretaria Distrital de Ambiente, “Material particulado es el que más contamina en Bogotá,” 2019. Accessed: Feb. 27, 2023. [Online]. Available: <https://oab.ambientebogota.gov.co/material-particulado-es-el-que-mas-contamina-en-bogota/>
- [10] el Tiempo, “Contaminación por dióxido de nitrógeno bajó 27 % en Bogotá,” 2020. Accessed: Feb. 27, 2023. [Online]. Available: <https://www.ccb.org.co/Clusteres/Cluster-de-Energia-Elctrica/Noticias/2020/Mayo-2020/Contaminacion-por-dioxido-de-nitrogeno-bajo-27-en-Bogota#:~:text=El%20di%C3%B3xido%20de%20nitr%C3%B3geno%2C%20adem%C3%A1s,pulmones%2C%20problemas%20card%C3%ADacos%20y%20c%C3%A1ncer.>
- [11] Secretaria Distrital de Salud, “Monoxido de Carbono,” 2007, Accessed: Feb. 27, 2023. [Online]. Available: http://saludcapital.gov.co/DCRUE/Boletines%20Epidemiolgicos/2007/BOLETIN_CRU_Vol_01_No.9%202007.pdf
- [12] Secretaria de Ambiente, “Dioxido de Azufre,” 2021. Accessed: Feb. 27, 2023. [Online]. Available: <https://bogota.gov.co/mi-ciudad/ambiente/nube-de-dioxido-de-azufre-llega-colombia-afectara-bogota>
- [13] R. E. Beu, S. Transporte, and UPME, “Primer balance de Energía Útil para Colombia y Cuantificación de las Perdidas energéticas relacionadas y la brecha de eficiencia energética,” 2019. Accessed: Feb. 15, 2023. [Online]. Available: https://www1.upme.gov.co/DemandayEficiencia/Documents/Balance_energia_util/BEU-Transporte.pdf
- [14] UPME, “PROYECCIÓN DE DEMANDA DE COMBUSTIBLES EN EL SECTOR TRANSPORTE EN COLOMBIA,” 2015.
- [15] Ministerio Minas y Energía, “Precios Historicos Gasolina,” 2023. Accessed: Feb. 17, 2023. [Online]. Available: <https://www.sicom.gov.co/index.php/consulta-de-precios>

- [16] Vanti, “Precio Histórico de Gas Natural Vehicular en un periodo de un año ,” 2023. Accessed: Feb. 17, 2023. [Online]. Available: <https://www.grupovanti.com/gas-natural-vehicular-gnv/precio-historico-del-gas-natural-vehicular/>
- [17] Enel, “Tarifas Energía Eléctrica Bogotá,” 2023. Accessed: Feb. 18, 2023. [Online]. Available: <https://www.enel.com.co/es/personas/tarifas-energia-enel-distribucion.html>
- [18] Revista Semana, “Venta de Scooters,” 2020. Accessed: Mar. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.semana.com/empresas/articulo/como-le-ha-ido-a-la-venta-de-patinetas-electicas-en-colombia/281003/>
- [19] Revista Semana, “Patinetas eléctricas: colombianos pasaron de alquilarlas a comprarlas,” 2022. Accessed: Mar. 04, 2023. [Online]. Available: <https://www.semana.com/economia/empresas/articulo/patinetas-electricas-colombianos-pasaron-de-alquilarlas-a-comprarlas/202238/>
- [20] R. M. C. J. Cal Rafael, *Ingeniería de Transito Fundamentos y Aplicaciones*. 2007.
- [21] Infraestructura de Datos Espaciales para el Distrito Capital (IDECA), “Malla Vial de Bogotá,” 2023. Accessed: Mar. 05, 2023. [Online]. Available: <https://www.ideca.gov.co/recursos/mapas/mapa-de-referencia-para-bogota-dc>
- [22] Gomez Pep, *Redondea. Repensando la Movilidad Urbana de una Forma Sostenible*. 2020.
- [23] J. G. J. F. M. A. R. F. Dangond Claudia, *Del Transporte a la Movilidad Urbana en Bogotá*. 2013.
- [24] Secretaria Distrital de Movilidad, “Protocolo para el Aprovechamiento Económico del Espacio Público para las Actividades de Alquiler, Prestamo o Uso Compartido, A titulo Oneroso o Gratuito, de Bicicletas o Patinetas ,” 2019. Accessed: Mar. 10, 2023. [Online]. Available: <chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.movilidadbogota.gov.co/web/sites/default/files/Paginas/2019-05-29/RESOLUCION%20209%20DE%202019.pdf>
- [25] C. Medina-Molina, N. Pérez-Macías, and J. L. Fernández-Fernández, “The use of micromobility in different contexts. An explanation through the multilevel perspective and QCA,” *Technol Forecast Soc Change*, vol. 188, p. 122295, Mar. 2023, doi: 10.1016/J.TECHFORE.2022.122295.

- [26] M. Nigro *et al.*, “Exploiting floating car data to derive the shifting potential to electric micromobility,” *Transp Res Part A Policy Pract*, vol. 157, pp. 78–93, Mar. 2022, doi: 10.1016/J.TRA.2022.01.008.
- [27] X. Yan, X. Zhao, A. Broaddus, J. Johnson, and S. Srinivasan, “Evaluating shared e-scooters’ potential to enhance public transit and reduce driving,” *Transp Res D Transp Environ*, vol. 117, 2023, doi: 10.1016/j.trd.2023.103640.
- [28] M. Abouelela, E. Chaniotakis, and C. Antoniou, “Understanding the landscape of shared-e-scooters in North America; Spatiotemporal analysis and policy insights,” *Transp Res Part A Policy Pract*, vol. 169, 2023, doi: 10.1016/j.tra.2023.103602.
- [29] D. Hong, S. Jang, and C. Lee, “Investigation of shared micromobility preference for last-mile travel on shared parking lots in city center,” *Travel Behav Soc*, vol. 30, pp. 163–177, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.TBS.2022.09.002.
- [30] L. Cheng, J. Huang, T. Jin, W. Chen, A. Li, and F. Witlox, “Comparison of station-based and free-floating bikeshare systems as feeder modes to the metro,” *J Transp Geogr*, vol. 107, 2023, doi: 10.1016/j.jtrangeo.2023.103545.
- [31] A. Nikiforiadis, I. C. Martín, J. M. S. Grau, G. Ayfantopoulou, and S. Basbas, “Geofencing and city dashboards for micromobility: Identifying the needs of cities, operators and technology providers,” *Transportation Research Procedia*, vol. 69, pp. 663–670, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.TRPRO.2023.02.221.
- [32] M. Ignaccolo, G. Inturri, E. Cocuzza, N. Giuffrida, M. Le Pira, and V. Torrisi, “Developing micromobility in urban areas: network planning criteria for e-scooters and electric micromobility devices,” *Transportation Research Procedia*, vol. 60, pp. 448–455, Jan. 2022, doi: 10.1016/J.TRPRO.2021.12.058.
- [33] A. Sanguinetti and E. Alston-Stepnitz, “Using emerging mobility data to advocate equitable micromobility infrastructure in underserved communities,” *Transp Res D Transp Environ*, vol. 117, p. 103613, Apr. 2023, doi: 10.1016/J.TRD.2023.103613.
- [34] A. G. Olabi *et al.*, “Micromobility: Progress, benefits, challenges, policy and regulations, energy sources and storage, and its role in achieving sustainable development goals,” *International Journal of Thermofluids*, vol. 17, 2023, doi: 10.1016/j.ijft.2023.100292.

- [35] B. Sun, V. Garikapati, A. Wilson, and A. Duvall, “Estimating energy bounds for adoption of shared micromobility,” *Transp Res D Transp Environ*, vol. 100, p. 103012, Nov. 2021, doi: 10.1016/J.TRD.2021.103012.
- [36] B. Ravanbach, P. Klement, B. Hanke, K. Von Maydell, J. Helms, and L. Granja, “Automatic topology identification of weak low voltage networks and load management strategies for micro-mobility applications,” in *2020 15th International Conference on Ecological Vehicles and Renewable Energies, EVER 2020*, 2020. doi: 10.1109/EVER48776.2020.9243050.
- [37] J. Cubells, C. Miralles-Guasch, and O. Marquet, “Gendered travel behaviour in micromobility? Travel speed and route choice through the lens of intersecting identities,” *J Transp Geogr*, vol. 106, p. 103502, Jan. 2023, doi: 10.1016/J.JTRANGEO.2022.103502.
- [38] Y.-C. Liu, A. Jafari, J. K. Shim, and D. A. Paley, “Dynamic Modeling and Simulation of Electric Scooter Interactions With a Pedestrian Crowd Using a Social Force Model,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 23, no. 9, pp. 16448–16461, 2022, doi: 10.1109/TITS.2022.3150282.
- [39] M. Jażdżewska-Gutta, A. Szmelter-Jarosz, and P. Borkowski, “Micromobility in tourist single- and multimodal travels at destination,” *Research in Transportation Business & Management*, p. 100956, Feb. 2023, doi: 10.1016/J.RTBM.2023.100956.
- [40] H. Peng, Y. Nishiyama, and K. Sezaki, “Assessing environmental benefits from shared micromobility systems using machine learning algorithms and Monte Carlo simulation,” *Sustain Cities Soc*, vol. 87, p. 104207, Dec. 2022, doi: 10.1016/J.SCS.2022.104207.
- [41] S. Sun and M. Ertz, “Can shared micromobility programs reduce greenhouse gas emissions: Evidence from urban transportation big data,” *Sustain Cities Soc*, vol. 85, p. 104045, Oct. 2022, doi: 10.1016/J.SCS.2022.104045.
- [42] A. M. Psarrou Kalakoni, Z. Christoforou, and N. Farhi, “A novel methodology for micromobility system assessment using multi-criteria analysis,” *Case Stud Transp Policy*, vol. 10, no. 2, pp. 976–992, Jun. 2022, doi: 10.1016/J.CSTP.2022.03.010.
- [43] IRENA, “Agencia Internacional Energías Renovables (IRENA),” 2023. Accessed: Jun. 19, 2023. [Online]. Available: Agencia Internacional de Energías Renovables