

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

**ANÁLISIS DE ESCENARIOS DE PENETRACIÓN DE ENERGÍAS
RENOVABLES PARA PROMOVER LA MOVILIDAD SOSTENIBLE EN
LA CIUDAD DE QUITO**

**ANÁLISIS DE ESCENARIOS DE PENETRACIÓN DE VEHÍCULOS
ELÉCTRICOS EN EL PARQUE AUTOMOTOR EN LA CIUDAD DE
QUITO, SU PROSPECTIVA ENERGÉTICA Y HUELLA DE CARBONO**

**TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR PRESENTADO COMO
REQUISITO PARA LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERA
MECÁNICA**

KATHERIN NICOLE ZAVALA MORA

katherin.zavala@epn.edu.ec

DIRECTOR: SANTIAGO DAVID VACA JIMÉNEZ

santiago.vaca@epn.edu.ec

DMQ, Agosto 2024

CERTIFICACIONES

Yo, Katherin Nicole Zavala Mora declaro que el trabajo de integración curricular aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

KATHERIN NICOLE ZAVALA MORA

Certifico que el presente trabajo de integración curricular fue desarrollado por Katherin Nicole Zavala Mora, bajo mi supervisión.

SANTIAGO DAVID VACA JIMÉNEZ
DIRECTOR

DECLARACIÓN DE AUTORÍA

A través de la presente declaración, afirmamos que el trabajo de integración curricular aquí descrito, así como el (los) producto(s) resultante(s) del mismo, son públicos y estarán a disposición de la comunidad a través del repositorio institucional de la Escuela Politécnica Nacional; sin embargo, la titularidad de los derechos patrimoniales nos corresponde a los autores que hemos contribuido en el desarrollo del presente trabajo; observando para el efecto las disposiciones establecidas por el órgano competente en propiedad intelectual, la normativa interna y demás normas.

Katherin Nicole Zavala Mora

Santiago David Vaca Jiménez

DEDICATORIA

A mis padres, Magali y Marco, base fundamental para conseguir cada una de las metas que me he planteado en la vida. No hay palabras para agradecerles, ni forma de retribuirles todo el amor que me han dado.

A Mayerly y Amy, por ser mi apoyo y mi fortaleza.

A David, por nunca dejarme sola y por ese amor tan incondicional.

A mis amigos y futuros colegas, por siempre estar presentes. Por los buenos y malos momentos a lo largo de esta importante etapa.

A mi persona, por no desmayar a lo largo del camino. Por entender que el sacrificio de hoy es la recompensa de mañana.

AGRADECIMIENTO

A mi Dios, gracias por ser mi fuerza y mi fortaleza durante todo este camino. Gracias por todas las pruebas, porque me enseñaron lo lejos que podía llegar.

Gracias a mi familia, por creer en mí y nunca dejarme sola. Por secarme las lágrimas cada vez que lo necesitaba y sonreír a mi lado en cada triunfo. Esto es suyo, sin su apoyo no hubiera podido conseguir nada de lo que ahora tengo y soy.

Gracias a mis amigos y a mi persona especial, por todo el cariño y el amor. Por las ocurrencias hasta en los momentos más cruciales y porque siempre me motivaron a creer más en mí.

A todos los maestros que desde la infancia supieron dejar en mí marcas imborrables, miles de enseñanzas y ejemplos que sin duda forjaron mi camino.

Al Dr. Freddy Ordoñez, por los consejos y el acompañamiento durante toda esta etapa.

Y un agradecimiento especial al Dr. Santiago Vaca, por su amor a la enseñanza, por ser una guía indispensable durante todo este tiempo.

ÍNDICE DE CONTENIDO

| | |
|---|------|
| CERTIFICACIONES | I |
| DECLARACIÓN DE AUTORÍA | II |
| DEDICATORIA | III |
| AGRADECIMIENTO | IV |
| ÍNDICE DE CONTENIDO | V |
| RESUMEN | VII |
| ABSTRACT | VIII |
| 1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO..... | 1 |
| 1.1 Objetivo general..... | 2 |
| 1.2 Objetivos específicos | 2 |
| 1.3 Alcance | 2 |
| 1.4 Marco teórico | 3 |
| 2 METODOLOGÍA..... | 9 |
| 2.1 Estimación del requerimiento energético en vehículos de combustión interna | 9 |
| 2.2 Estimación del requerimiento energético en vehículos eléctricos | 13 |
| 2.3 Estimación de las emisiones de CO ₂ -eq de vehículos de combustión interna | 14 |
| 2.4 Estimación de las emisiones de CO ₂ -eq de vehículos eléctricos | 14 |
| 2.5 Definición de escenarios | 15 |
| 2.6 Definición de sub-escenarios | 17 |
| 2.7 Estimación de la demanda energética al introducir movilidad eléctrica | 18 |
| 3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 20 |
| 3.1 Resultados | 20 |
| 3.2 Discusión de Resultados..... | 28 |
| 3.3 Conclusiones | 31 |
| 3.4 Recomendaciones | 32 |
| 4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 33 |
| 5 ANEXOS | 37 |
| ANEXO I. Comparación de datos de gasolina distribuida..... | 37 |
| ANEXO II. Distribución de gasolina en Ecuador y Pichincha para el sector transporte | 38 |
| ANEXO III. Requerimiento energético y motriz de un vehículo de combustión interna | 39 |

| | |
|--|----|
| ANEXO IV. Requerimiento energético y motriz de un vehículo eléctrico | 39 |
| ANEXO V. Demanda de consumo de vehículos eléctricos en el DMQ para el año 2050 (S & A) – Escenario BAU - Pe | 40 |
| ANEXO VI. Demanda de consumo de vehículos eléctricos en el DMQ para el año 2050 (S & A) – Escenario Med - Op | 40 |
| ANEXO VII. Demanda de consumo de vehículos eléctricos en el DMQ para el año 2050 (S & A) – Escenario Med - Pe | 41 |
| ANEXO VIII. Demanda de consumo de vehículos eléctricos en el DMQ para el año 2050 (S & A) – Escenario Min – Op | 41 |
| ANEXO IX. Demanda de consumo de vehículos eléctricos en el DMQ para el año 2050 (S & A) – Escenario Min - Pe..... | 42 |
| ANEXO X. Emisiones de CO _{2-eq} por vehículo de combustión interna..... | 42 |
| ANEXO XI. Emisiones de CO _{2-eq} de un vehículo eléctrico..... | 42 |
| ANEXO XII. Emisiones de CO _{2-eq} generadas por vehículos tipo SUV y Automóviles en el DMQ para el año 2050 – Escenario BAU – Op..... | 43 |
| ANEXO XIII. Emisiones de CO _{2-eq} generadas por vehículos tipo SUV y Automóviles en el DMQ para el año 2050 – Escenario Med – Op | 43 |
| ANEXO XIV. Emisiones de CO _{2-eq} generadas por vehículos tipo SUV y Automóviles en el DMQ para el año 2050 – Escenario Med – Pe | 44 |
| ANEXO XV. Emisiones de CO _{2-eq} generadas por vehículos tipo SUV y Automóviles en el DMQ para el año 2050 – Escenario Min – Pe..... | 44 |
| ANEXO XVI. Vehículos eléctricos y de combustión interna..... | 45 |
| Escenario BAU – Op..... | 45 |
| ANEXO XVII. Vehículos eléctricos y de combustión interna..... | 46 |
| Escenario BAU – Pe | 46 |
| ANEXO XVIII. Vehículos eléctricos y de combustión interna..... | 47 |
| Escenario Med – Op | 47 |
| ANEXO XIX. Vehículos eléctricos y de combustión interna..... | 48 |
| Escenario Med – Pe..... | 48 |
| ANEXO XX. Vehículos eléctricos y de combustión interna..... | 49 |
| Escenario Min – Op | 49 |
| ANEXO XXI. Vehículos eléctricos y de combustión interna..... | 50 |
| Escenario Min – Pe..... | 50 |
| ANEXO XXII. Proyección de demanda de energía eléctrica en el DMQ por crecimiento demográfico | 51 |
| ANEXO XXIII. Proyección de demanda de energía eléctrica en el DMQ por crecimiento demográfico | 51 |

RESUMEN

El presente proyecto se realizó con el objetivo de determinar la prospectiva energética y huella de carbono que se produciría al integrar vehículos eléctricos en el Distrito Metropolitano de Quito (DMQ). El estudio se realizó a través de tres escenarios de crecimiento vehicular en la ciudad, proyectados hasta el año 2050. En cada escenario: Business as usual (BAU), Medium (Med), Minimun (Min), se analizó un ingreso optimista y otro bajo, de vehículos eléctricos. A partir de un análisis de fuentes bibliográficas y datos de organismos oficiales, se calculó el consumo energético y la cantidad de emisiones de CO_{2-eq} producidas por cada vehículo, así como su impacto a través de los años.

En el análisis de los escenarios se consideraron diferentes factores como estadísticas de venta actuales de vehículos, proyecciones demográficas, planes gubernamentales y prospectivas de reducción de emisiones por movilidad, a nivel nacional e internacional. Los resultados indican que, en el escenario de crecimiento más bajo, con una alta penetración de vehículos eléctricos, el DMQ podría reducir sus emisiones de CO_{2-eq} aproximadamente un 50% en comparación con las emisiones al año base. Sin embargo, en este caso se considera que la matriz energética debería mantener la proporción de participación por tecnología actual.

La investigación también aborda un análisis sobre el impacto en la demanda energética que produciría la carga de los vehículos eléctricos, conforme a las proyecciones demográficas, representando al 2050, una demanda de 970 GWh en el escenario BAU con mayor penetración de movilidad eléctrica. Esto representa aproximadamente el 20% de la demanda eléctrica actual del DMQ.

Finalmente, se promueve la implementación de políticas, el desarrollo de infraestructura y el impulso a la conciencia social sobre los beneficios de la electromovilidad.

PALABRAS CLAVE: prospectiva energética, huella de carbono, vehículos eléctricos, emisiones de CO_{2-eq}, consumo energético.

ABSTRACT

The project analyzes different scenarios of vehicular growth and the entry of electric vehicles in the DMQ. At the same time, it seeks to determine the impact on energy consumption and the carbon footprint that would be generated by 2050. It starts with an analysis of three scenarios: Business as usual (BAU), Medium (Med), Minimum (Min), with an analysis of the penetration of electric vehicles in each of them.

Considering that the participation of technology in the country's energy sector remains stable despite the increase in demand, it is considered a constant factor of emissions from the electrical network. Therefore, in the minimum growth scenario, with 75% of electric vehicles on the market, CO₂-eq emissions are reduced by almost 50%. The energy demand generated from the charging of the projected electric vehicles was also analyzed. It is estimated that by 2050, in the event of greater growth and penetration of electric vehicles, the city's demand would be made up of 20% of the vehicular load.

Finally, the importance of implementing more effective policies, adequate infrastructure and constant socialization on the energy and environmental benefits of using electric vehicles was established.

KEYWORDS: energy consumption, carbon footprint, electric vehicles, emissions factor, CO₂-eq emissions.

1 DESCRIPCIÓN DEL COMPONENTE DESARROLLADO

La ONU define a la sostenibilidad ambiental como la necesidad de lograr el desarrollo económico, sin comprometer la conservación del medio ambiente, haciendo posible satisfacer las necesidades presentes sin poner en riesgo a las reservas de las futuras generaciones [1]. En la actualidad, el cambio climático, producido por el incremento de las concentraciones de gases de efecto invernadero (GEI), ha obligado a la sociedad a buscar soluciones para intentar mitigar o disminuir sus consecuencias. La energía es la causante de aproximadamente el 73% de los GEI a nivel mundial [2], la demanda de dicha energía crece cada año conforme lo hace la población, la urbanización, el desarrollo económico, la industria tecnológica y el crecimiento industrial.

En el Ecuador, se estima que el 50% de la energía que se produce al año, es destinada exclusivamente al sector transporte, misma que se genera principalmente a partir de combustibles fósiles [3]. La dependencia del sector transporte a los combustibles fósiles es uno de los puntos analizados dentro del Acuerdo de París, en el que establece como principal objetivo alcanzar la neutralidad de carbono a nivel mundial, para el año 2050 [4]. Todos los países signatarios se comprometieron a desarrollar sus propios planes para alcanzar los objetivos, adaptándolos a su realidad social, económica, política, ambiental y de infraestructura. Tal es el caso de Noruega, donde se ha logrado que más del 54% de los vehículos que ingresaron a su parque automotriz, sean eléctricos [5]. Otro ejemplo, es el caso de China, en la ciudad de Shenzhen, en la que tienen la primera y más grande flota de autobuses y taxis totalmente eléctricos, consiguiendo reducir las emisiones de CO_{2-eq} en un 48% [6].

La electromovilidad se presenta como una solución clave para reducir las emisiones al medio ambiente. No obstante, es crucial analizar el impacto del aumento de la demanda energética que se generaría para la carga de estos vehículos, así como las emisiones provenientes de los vehículos eléctricos que ingresen a la ciudad y los vehículos de combustión interna que se mantengan en circulación.

1.1 Objetivo general

Analizar, a partir de diferentes escenarios, la cantidad de energía requerida y las emisiones generadas por la movilidad eléctrica en la ciudad de Quito, con una prospectiva al año 2050.

1.2 Objetivos específicos

1. Proyectar el crecimiento del campo automotriz dentro del país al año 2050, considerando diferentes escenarios.
2. Analizar la demanda de generación eléctrica actual y calcular la demanda requerida al introducir vehículos eléctricos.
3. Evaluar el potencial de descarbonización, a partir del cálculo de las emisiones de CO_{2-eq} actuales y las emisiones generadas por los vehículos eléctricos y los de combustión que se mantengan en circulación, con base a los diferentes escenarios.

1.3 Alcance

Para la consecución de los objetivos planteados se inicia con un análisis bibliográfico, principalmente a nivel mundial, sobre la inclusión de electromovilidad en distintas partes del mundo. Para obtener los datos necesarios y realizar un posterior análisis dentro del país y de la ciudad, en pasos de 10 años. La principal limitación dentro del estudio es la disponibilidad de datos locales y la escasa investigación acerca del tema en el país y la región en general.

Por ello, el estudio se enfoca exclusivamente en el parque automotor privado, ya que no existe mayor análisis sobre el impacto que provocará la transición de este en la matriz energética del país. Además, considerando que en el DMQ los vehículos tipo SUV y automóviles son aquellos con mayor grado de participación, se restringe el análisis a dicho tipo de vehículos. Tomando como consideración, únicamente aquellos que utilizan gasolina como combustible para generar el movimiento.

Una vez procesada dicha información, se discute y se establece que tan beneficioso

resultaría la inclusión de movilidad eléctrica en la ciudad, si la nueva demanda eléctrica puede ser compensada por la matriz eléctrica nacional y cuál de las proyecciones en los diferentes escenarios de crecimiento vehicular, resultaría en mayor cantidad de beneficios.

1.4 Marco teórico

Definiciones:

Vehículos eléctricos

Un vehículo eléctrico (VE) es un tipo de automóvil en el que el movimiento se genera a partir de uno o más motores eléctricos. Su fuente de energía proviene de baterías recargables, que pueden almacenar electricidad y recargarse. Estos vehículos no generan emisiones directamente, pero la electricidad utilizada para recargarlos puede producir emisiones dependiendo de cómo se genere. Además, cuentan con una eficiencia de conversión de energía más alta que los vehículos tradicionales [7]. Existen diferentes tipos de vehículos eléctricos, entre los principales están:

- Vehículos eléctricos de batería (BEV): funcionan a partir de un motor eléctrico, mismo que permite impulsar el vehículo con la electricidad entregada desde las baterías integradas al vehículo. No requieren ningún combustible fósil de manera directa y por ende son cero emisiones [8].
- Vehículos híbridos eléctricos (HEV): funcionan con un motor eléctrico y uno a gasolina. Cuenta con un sistema de frenos regenerativos, mismo que permite recargar la batería que tienen incorporada. Sus emisiones son mínimas, sin embargo, se deben considerar [9].
- Vehículos híbridos enchufables (PHEV): funciona con el mismo sistema del HEV, sin embargo, este cuenta con un enchufe que permite recargar la batería cuando se requiera [10].

A pesar de las diferencias, todos los vehículos se componen de forma general por [11]:

- Batería: equipo en el que se almacena la energía eléctrica que acciona el motor eléctrico.
- Motor eléctrico: transforma la energía eléctrica en energía mecánica.
- Controlador del motor: gestiona la cantidad de energía eléctrica que es suministrada al motor.
- Convertidor DC – DC: transforma la corriente continua de alta tensión entregada por la batería a una corriente de baja tensión, distribuida a los diferentes sistemas

auxiliares del vehículo.

- Inversor: convierte la corriente continua de la batería a corriente alterna, esta es transmitida al motor.

En la figura 1.1., se pueden observar algunos de los componentes antes mencionados.

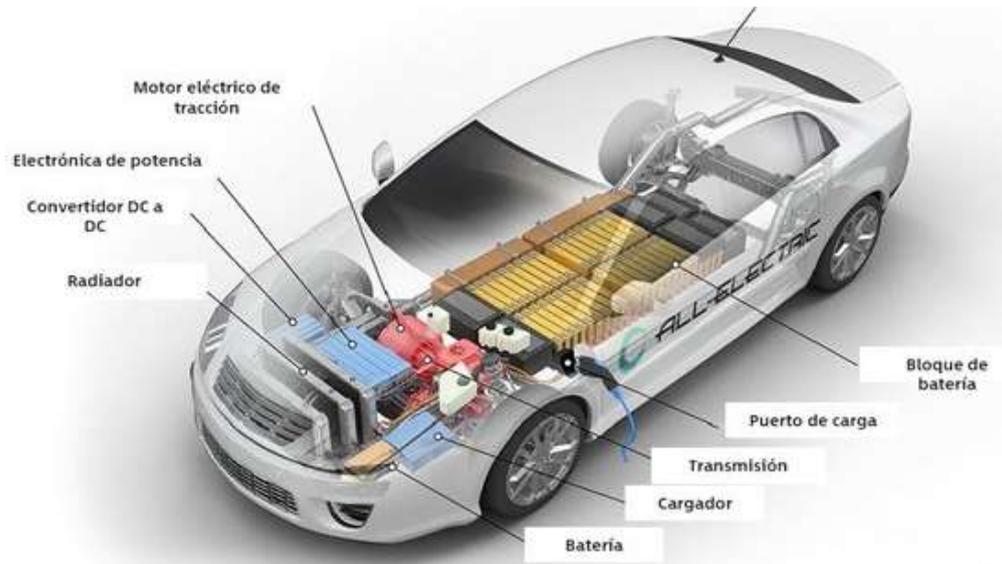


Figura 1.1. Componentes principales de un vehículo eléctrico

Fuente: [12]

Potencia motriz

La potencia motriz es la cantidad de trabajo que un motor es capaz de realizar en un tiempo determinado. Mide la proporción de energía que se transforma de forma efectiva en movimiento, en comparación con la energía total que se consume. Se define en porcentaje y se establece que los motores de combustión tienen en promedio de 20% a 25%, mientras que los motores eléctricos pueden alcanzar una eficiencia hasta del 95% [13]. Depende del consumo energético de cada vehículo, el consumo energético es la cantidad de energía que requiere un vehículo para recorrer una distancia determinada, bajo parámetros preestablecidos [14]. La potencia depende de varios factores, como: la eficiencia del motor, la energía que se utilice, condiciones de operación, entre otros. Esto se utiliza como indicador para determinar la eficiencia y el rendimiento de los sistemas motorizados, así como su impacto en costos operativos o de impacto al medio ambiente [15]. La eficiencia de un motor es la capacidad de este para transformar y transferir la energía que provee el combustible o la electricidad en energía motriz útil, que permite mover o impulsar un vehículo.

Estado del arte:

En el año 2020, el reporte de emisiones del Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente (PNUMA), registró un aumento en las emisiones de GEI a nivel mundial, alcanzando un valor aproximado de 52 Gt CO_{2-eq}/año a comparación de las 40 Gt CO_{2-eq}/año registradas en los 2000 [16]. Estas emisiones contribuyen significativamente al calentamiento global y provienen principalmente de la quema de combustibles fósiles para la generación de energía, lo cual es responsable del 73% de los gases de efecto invernadero liberados en la atmósfera [2]. Todos los sectores requieren el uso constante de dicha energía para satisfacer las necesidades de la población. Por ejemplo, la producción de electricidad y calor a nivel mundial representa un 42% de las emisiones globales de CO_{2-eq}. Seguido por el transporte con una participación del 24% en emisiones mundiales y la industria con el 21% [17][18]. Cada sector requiere un consumo de energía significativo y por ende aporta con un gran porcentaje de las emisiones, por lo que vuelve indispensable la necesidad de implementar prácticas más sostenibles, tomar acciones que tiendan hacia la eficiencia energética, y transicionar a tecnologías más limpias.

La necesidad de cambio en el sector transporte es indispensable a nivel internacional, principalmente por su dependencia a combustibles fósiles como la gasolina y el diésel. Además, toda la infraestructura detrás de aquello se encuentra ampliamente desarrollada. Es así, que en el año 2020 este sector fue el responsable de la producción de 7.3 Gt CO_{2-eq}/año de un total de 52 Gt CO_{2-eq}/año producidas a nivel mundial [17]. Los vehículos para el transporte terrestre son los principales emisores de este sector, sobre el transporte marítimo y aéreo. Además, su crecimiento es casi exponencial debido al aumento poblacional, globalización y otros factores. Por ello, mientras que en el año 2000 se registraban un aproximado de 700 millones de vehículos, según datos al 2020, esta cifra superó los 1.4 mil millones [19]. En el Ecuador, este cambio también es considerable ya que entre los años 2008 y 2018, se registró un incremento de vehículos de transporte terrestre del 161% [20].

Varios esfuerzos nacionales e internacionales buscan alcanzar la neutralidad de carbono. El Acuerdo de París establece tratados para limitar el aumento de la temperatura global a 2°C, y en el mejor de los casos, a 1.5°C sobre niveles preindustriales [4]. Los países deben presentar Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC) con planes específicos para reducir emisiones [21]. La Agencia Internacional de Energía (IEA) promueve la movilidad eléctrica mediante infraestructura de carga y políticas de apoyo, proyectando que el 30% de los vehículos vendidos sean eléctricos para 2030 [22]. En América Latina, el Programa de Incentivos a la Movilidad Eficiente y Sostenible (MOVE)

pretende aumentar las ventas de vehículos eléctricos al 10% para 2030, reduciendo 50 millones de toneladas de CO_{2-eq} anuales [23]. Colombia, con incentivos fiscales y mejora de infraestructura, espera tener 600,000 vehículos eléctricos en 2030, reduciendo 9 millones de toneladas de CO_{2-eq} al año [24]. Ecuador, a través del Plan Nacional de Energía, promueve energías renovables y eficiencia energética con incentivos fiscales, proyectando un 15% de parque automotor eléctrico y una reducción de 5 millones de toneladas de CO_{2-eq} para 2030 [25]. En el DMQ, el Plan de Movilidad Sostenible, busca mejorar la calidad del aire. Para ello, plantea incentivos para la compra de vehículos eléctricos, propone la generación de zonas de bajas emisiones y planes para la promoción del uso del transporte público, apuntando a una reducción del 20% en emisiones para 2030 [26].

La adopción de vehículos eléctricos es un componente fundamental en todas estas estrategias ya que este tipo de vehículos no producen emisiones directas de CO_{2-eq}, sin embargo, se debe considerar que la energía eléctrica que utiliza si puede generarlas en menor medida. Especialmente en Ecuador, que cuenta con una capacidad de instalación de energías renovables alta [19]. Si embargo, existen desafíos significativos en temas de infraestructura de carga, la región en general requiere un alto desarrollo e incentivo económico, tanto para el desarrollo de puntos de carga, como para la ampliación de la red [27].

Ayyadi, S. y Maaroufi M. [28] analizaron modelos de penetración de vehículos eléctricos en Marruecos, estimando que se alcanzaran 12600 VE para el año 2050. Para ello, utilizaron el modelo Bass de Difusión, esta herramienta permite analizar como los nuevos productos y tecnologías se adaptan al mercado con el paso del tiempo. En España se realizó un análisis sobre el impacto en la demanda eléctrica al introducir vehículos eléctricos, encontraron que el aporte la demanda total del país representaría apenas un 4%. Pero, esto se debe a que gran parte de la demanda eléctrica en ese país se genera a partir del sector industrial, más no al transporte. Además, a pesar de la leve afectación que produce a la matriz energética, la reducción de emisiones puede ser de 0,93 millones de t CO_{2-eq}, lo que es altamente considerable [29]. También, en la Universidad de Liubliana en Silesia, a partir de un análisis experimental, se obtuvo que un vehículo eléctrico consume alrededor de 36,83 kWh, mientras que uno de combustión requiere de 79,24 kWh. Obteniendo una eficiencia de transformación energética a motor mayor, para el caso de los vehículos eléctricos y por ende un menor consumo de energía. Mientras que, para el análisis ambiental, se calculó la energía requerida desde su fabricación, hasta el reciclaje. En el caso de los vehículos eléctricos, estos consumen 11050 kWh, incluido el proceso de fabricación de baterías. Mientras que un vehículo de combustión

requiere un total de 23904 kWh, en este caso se incluye el proceso de bombeo del crudo destinado a la gasolina o diésel [30]. Sin embargo, este análisis se restringe exclusivamente a un tipo de vehículo que funciona bajo condiciones controladas. De la misma manera, Olumide Towoju de la Universidad de Adeleke en Nigeria, estimó que para que los vehículos eléctricos sean más eficientes que los convencionales, es importante considerar el factor de emisión por la generación de electricidad. Ya que, en países con una alta tasa de fuentes de energía térmicas, dicho factor aumenta considerablemente. Como es el caso de Francia, Canadá y Nueva Zelanda. Para ello, estima un valor óptimo de 0,5495 kg CO_{2-eq} por cada kWh de electricidad que se genera y en caso del uso de combustibles sintéticos valores por debajo al calculado [31]. En la universidad Bayreuth en Alemania, a partir de un modelo físico de consumo y emisiones, se determinó que para el 2050 los vehículos eléctricos emitirán 15 veces menos que los vehículos de combustión interna [32]. Pero, en este caso solo se analizó vehículos eléctricos a batería y la comparación se realizó con vehículos de combustión que funcionen con gas natural comprimido. Mientras que en China se analizó el modo Vehículo a Red (V2G), que permite a los vehículos eléctricos recibir y devolver energía a la red en caso de ser necesario, estimando una reducción de emisiones del 45,7% para el año 2050 [33]. Sin embargo, el estudio es posible debido al estado de la red en dicho país y a las planificaciones de expansión de la red con las que ya cuentan.

En el caso de América, la introducción de movilidad eléctrica es mucho más complicada, Por ejemplo, en Colombia se realizó un análisis para ver si era posible cumplir con las metas de los Objetivos de Desarrollo Sostenible, con los incentivos impuestos por el gobierno a 10 años. A partir de un análisis PEST, Mic Mac de matrices de impacto cruzado, programación Mactor y finalmente un diseño con Morphol. Se concluyó que las metas propuestas en la estrategia de movilidad eléctrica no se lograrían cumplir ni con el escenario más optimista, en el que se tendrían 600 mil vehículos eléctricos [34]. Otro estudio realizado en Panamá en el año 2017 muestra que, a partir de un modelado de penetración de electromovilidad dentro del país, sería posible introducir un aproximado de 111 mil vehículos eléctricos. Estos permitirían reducir las emisiones en 3800 t CO_{2-eq} y solo representarían 130 MW al año, demanda que según capacidad energética de dicho país puede ser cubierta por energías renovables [35]. G. Gómez y R. Solís [36], realizaron una investigación en Costa Rica, centrada en el impacto al sistema eléctrico nacional que produciría la adopción de vehículos eléctricos a partir de un modelado para el año 2030. Obteniendo un escenario optimista, en el que mostró un aumento de demanda del 20%, con reducción de emisiones del 50%. En este estudio solo se consideró un análisis de participación por tecnología energético del año base y una prospectiva de integración de fuentes de energía renovables para suplir la demanda

eléctrica requerida. Así también, en la provincia de Mendoza, en Argentina, a partir del Programa de Análisis de Bajas Emisiones (LEAP) se modeló prospectivamente cómo sería el ingreso de vehículos eléctricos con una proposición de escenarios de posibles trayectorias de cambio. Se estima que la demanda eléctrica por la carga de vehículos eléctricos superará a la cantidad de electricidad que puede aportar la red [37]. Este caso es comparable con el caso de Ecuador, ya que el cambio a movilidad eléctrica si afectará de forma considerable a la matriz energética del país. Esto también se comprobó en un estudio del 2019 en República Dominicana, en el que con un 10% de penetración de vehículos eléctricos se estimó que ya empezarían a presentar pérdidas por una tensión en la red de distribución [38].

En la ciudad y el país en general, no existen los estudios necesarios para analizar el impacto de la penetración de movilidad eléctrica. Realizar estos análisis es crucial para tomar decisiones informadas que promuevan la adopción de tecnologías limpias y sostenibles. Sin una comprensión detallada de cómo la introducción de vehículos eléctricos afectará a nuestro entorno, las decisiones políticas podrían basarse en suposiciones y datos no adaptados a nuestra realidad. Por lo tanto, es imperativo realizar estudios locales que evalúen la infraestructura de carga, el comportamiento de los consumidores, el impacto económico y las reducciones en emisiones

A pesar de los diferentes incentivos como exoneración del IVA y otros, en el país desde el 2019 hasta el 2022 la venta de vehículos eléctricos aumenta, aunque no de manera significativa. Ya que, en el año de mayor venta, correspondiente al 2022 se registraron únicamente 400 unidades vendidas. Es decir, representa como un máximo el 0,2% del total de ventas de vehículos en el país al año [39]. Por ello, en el país se deben establecer medidas más drásticas y realizar un análisis más profundo, que incluya la consideración de consumo energético vehicular, el efecto de este dentro de la matriz energética del país, y la consideración con respecto al impacto ambiental que produciría la inclusión de nuevas tecnologías en el país. A medida que se implementen planes y políticas de apoyo que permitan desarrollar la infraestructura adecuada y promover la adopción de vehículos eléctricos, contribuyendo de manera significativa a la reducción de emisiones y al uso de energías más limpias. Es así, que el enfoque principal del presente proyecto es crear una prospectiva energética y de emisiones para la ciudad Quito, sobre el impacto que tendría la introducción de vehículos eléctricos en la demanda energética del país, así como su influencia en la reducción de la huella de carbono nacional.

2 METODOLOGÍA

Para plantear la prospectiva, esta investigación consideró la creación de escenarios de crecimiento del parque automotriz, así como la penetración de movilidad eléctrica en base a planes de acción climática mundiales, regionales y nacionales. A partir de los datos estadísticos del INEC [20], tanto de población como de vehículos matriculados por clase en el DMQ, se realizó una relación con la cantidad de gasolina que se distribuye para el sector transporte en la zona de interés. Con ello se logró obtener el valor de consumo energético por vehículo y su respectiva proyección con los diferentes escenarios. Además, a partir del factor de emisiones por uso de electricidad, se estimó la huella de carbono en base a vehículos eléctricos y vehículos de combustión interna. La figura 2.1., muestra el proceso de transformación de la información a resultados específicos.

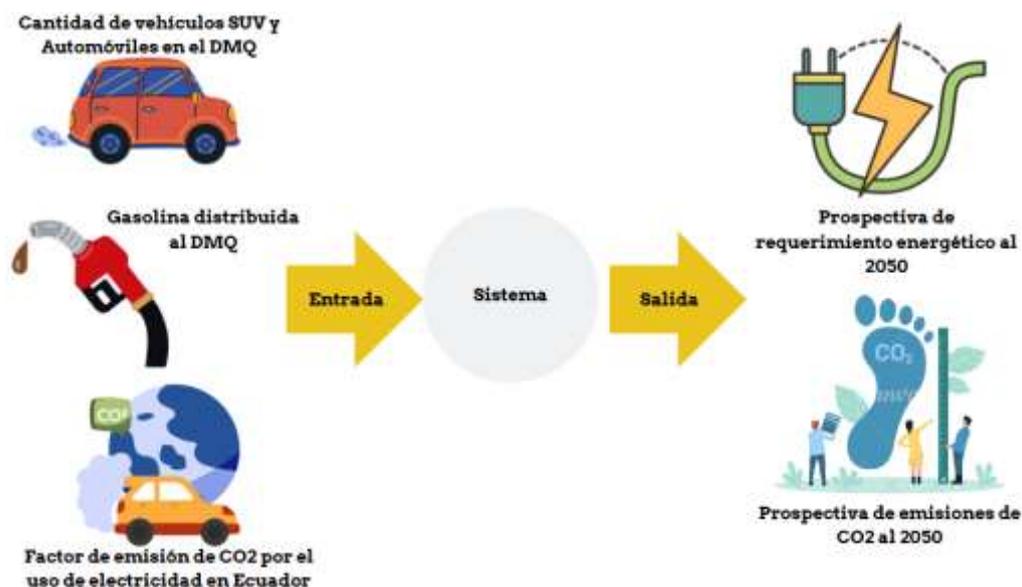


Figura 2.1. Esquema general del sistema

Fuente: [Propia]

2.1 Estimación del requerimiento energético en vehículos de combustión interna

El requerimiento energético, es la cantidad de energía hipotética que un vehículo necesita para poder desplazarse bajo condiciones establecidas [40]. En el caso de los vehículos de combustión interna a analizar, este requerimiento proviene de la gasolina, utilizada como fuente de energía. Por lo tanto, se inició calculando la cantidad de gasolina que se destina al sector transporte en la provincia de Pichincha, a partir de la ecuación 2.1.

$$GP_{T\ 2022} = \frac{G_P\ 2022}{G_E\ 2022} \times GE_{T\ 2022}$$

Ecuación 2.1. Gasolina distribuida al sector transporte en Pichincha para el año 2022

Donde:

$GP_{T\ 2022}$: Gasolina distribuida al sector transporte en Pichincha para el año 2022 (BEP)

$G_P\ 2022$: Total de gasolina distribuida en Pichincha en el año 2022 (BEP)

$G_E\ 2022$: Total de gasolina distribuida en Ecuador en el año 2022 (BEP)

$GE_{T\ 2022}$: Gasolina distribuida al sector transporte en Ecuador en el año 2022 (BEP)

Del Balance Energético Nacional 2022 se obtuvo un total de 23200000 BEP, como el total de gasolina distribuida en Ecuador, destinada exclusivamente al sector transporte. Mientras que en Pichincha se destinó un total de 5727000 BEP, de los cuales el transporte consumió 4860850 BEP [3].

Para corroborar los datos, se realizó una comparación entre los valores proporcionados por el Balance Energético Nacional y los que se detallan en el informe del Ministerio de Energías y Minas, en el año 2021. En estos se realizó una suma individual de cada mes, con respecto a la distribución de gasolina en Pichincha, de cada uno de los documentos mencionados. Posteriormente, se obtuvo el valor total de gasolina de cada caso y se calculó el error porcentual entre estos valores. Obteniéndose de esta manera un error muy por debajo del 1%. Los valores mencionados, se pueden revisar en el anexo I.

Para poder discretizar los datos, se calculó el total de vehículos matriculados en el DMQ de tipo SUV y automóviles. La ecuación 2.2. nos permitió calcular dicho valor.

$$VM_{DMQ\ 2022\ (S\ \&\ A)} = (VM_{DMQ\ 2022} \times SUV_{DMQ\ 2022}) + (VM_{DMQ\ 2022} \times Autos_{DMQ\ 2022})$$

Ecuación 2.2. Vehículos matriculados en el DMQ tipo SUV y automóviles para el año 2022

Donde:

$VM_{DMQ\ 2022\ (S\ \&\ A)}$: Vehículos matriculados en el DMQ tipo SUV y automóviles para el año 2022

$VM_{DMQ\ 2022}$: Total de vehículos matriculados en el DMQ para el año 2022

$SUV_{DMQ\ 2022}$: Distribución porcentual de vehículos SUV matriculados en el DMQ en el 2022

$Autos_{DMQ\ 2022}$: Distribución porcentual de automóviles matriculados en el DMQ en el 2022

Según el Informe de Calidad de Vida 2023 de Quito Cómo Vamos, los vehículos matriculados en el DMQ en el año 2022 fueron 508316 [41]. Además, en la figura 2.2. se puede observar la distribución porcentual por tipo de vehículo, con el que se calculó la cantidad de vehículos SUV y automóviles en el DMQ para el año 2022.



Figura 2.2. Distribución porcentual de los vehículos matriculados en el DMQ según clase 2019 - 2022

Fuente: [41]

Con el valor de la gasolina distribuida en la provincia, se calculó la cantidad destinada al DMQ, únicamente para SUV y automóviles (S & A), a partir de la ecuación 2.3. Tomando como referencia la cantidad de personas en la zona urbana del DMQ y en Pichincha, y la cantidad de vehículos por tipo.

$$G_{DMQ\ 2022\ (S\ \&\ A)} = \frac{GP_{T\ 2022} \times P_{DMQ\ 2022}}{P_{P\ 2022}} \times \frac{VM_{DMQ\ 2022\ (S\ \&\ A)}}{VM_{DMQ\ 2022}}$$

Ecuación 2.3. Gasolina distribuida al sector transporte en la zona urbana del DMQ (S & A) para el año 2022

Donde:

$G_{DMQ\ 2022\ (S\ \&\ A)}$: Gasolina distribuida al sector transporte en la zona urbana del DMQ (S & A) para el año 2022 (BEP)

$P_{DMQ\ 2022}$: Personas en el sector urbano del DMQ para el año 2022

$P_{P\ 2022}$: Personas en Pichincha para el año 2022

Los valores de población se obtuvieron del censo realizado por el INEC, en el año 2022 a nivel nacional. Obteniendo un total de 1763275 personas en la zona urbana del DMQ y 3089473 personas en la provincia de Pichincha [42].

Con el valor de gasolina distribuida en la zona urbana del DMQ y el número de vehículos matriculados en el DMQ (S & A), se calculó un valor promedio de la cantidad de combustible que consume cada vehículo al año, a través de la ecuación 2.4.

$$C_V = \frac{G_{DMQ\ 2022\ (S\ \&\ A)}}{VM_{DMQ\ 2022\ (S\ \&\ A)}}$$

Ecuación 2.4. Combustible por vehículo

Donde:

C_V : Combustible por vehículo (BEP)

A partir del valor obtenido de la cantidad de combustible que utiliza cada vehículo, se procedió a realizar la conversión a requerimiento energético por vehículo. Para este caso se utilizó la Metodología de Conversión de Unidades de la OLADE. En la que se establece que 1 BEP equivale a 1699,41 kWh [43].

La ecuación 2.5., permitió calcular el requerimiento energético por vehículo sin considerar la eficiencia del motor.

$$Re_c = \frac{E_V}{K_a}$$

Ecuación 2.5. Requerimiento energético de un vehículo de combustión interna sin considerar la eficiencia

Donde:

Re_c : Requerimiento energético de un vehículo de combustión interna sin considerar la eficiencia del motor (kWh/km)

E_V : Combustible por vehículo transformado en energía (kWh)

K_a : Kilometraje promedio de un vehículo al año (km)

Tomando en cuenta que un vehículo de combustión interna durante su operación pierde gran parte de la energía entregada a partir de la combustión de la gasolina, durante procesos como: los gases de salida, la fricción, la refrigeración, entre otros. Es por ello, que la eficiencia promedio de un motor de combustión interna oscila entre el 25% y el 20% [44]. Para el cálculo se utilizó la ecuación 2.6.

$$Re_{mc} = Re_c \times \eta$$

Ecuación 2.6. Requerimiento energético motriz de un vehículo de combustión interna

Donde:

Re_{mc} : Requerimiento energético motriz de un vehículo de combustión interna (kWh/km)

η : Eficiencia promedio de un motor a combustión

Al trabajar con valores anuales, fue necesario estimar un valor aproximado de la cantidad de kilómetros que recorre un vehículo al año dentro de la ciudad. Para lo cual se estableció que un vehículo liviano recorre entre 15000 km y 20000 km al año, según datos de la EPA [45] y un análisis del Departamento de Ciencias Políticas y Ambientales de la Universidad de California [46]. Además, dichos valores son los recomendados normalmente por las fichas técnicas de cada vehículo, cuando se exceden o no se pueden alcanzar, solo se considera como casos excepcionales.

Este cálculo es necesario para poder comparar los valores de requerimiento motriz de un vehículo eléctrico y uno de combustión interna, y de esta forma determinar si dichos datos son congruentes.

2.2 Estimación del requerimiento energético en vehículos eléctricos

El requerimiento o consumo energético en el caso de los vehículos eléctricos, es un dato que se obtiene a partir de fichas técnicas de los mismos. En este caso, el consumo se establece en valores de kWh por cada 100 km recorridos. La Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador (AEADE) establece que para el año 2022, en el Ecuador circularon aproximadamente 228 vehículos eléctricos. De los cuales, el 52% estaban en el DMQ, predominando los vehículos tipo SUV y automóviles [39]. Por lo tanto, para obtener un valor promedio del requerimiento energético por vehículos eléctricos, se realizó el análisis a partir de un promedio ponderado, utilizando la ecuación 2.7.

$$Re_E = \frac{(SUV_{DMQ\ 2022} \times Re_{SUV}) + (Autos_{DMQ\ 2022} \times Re_{Autos})}{SUV_{DMQ\ 2022} + Autos_{DMQ\ 2022}} \times K_a$$

Ecuación 2.7. Requerimiento energético de un vehículo eléctrico

Donde:

Re_E : Requerimiento energético de un vehículo eléctrico (kWh/km)

Re_{SUV} : Promedio del requerimiento energético de un vehículo eléctrico tipo SUV (kWh/km)

Re_{Autos} : Promedio del requerimiento energético de un vehículo eléctrico tipo automóvil (kWh/km)

Para ello, se consideró únicamente modelos y marcas que circulan dentro del país. Así como el porcentaje de participación de los vehículos SUV y de los automóviles para dicho año [41].

2.3 Estimación de las emisiones de CO_{2-eq} de vehículos de combustión interna

Para calcular las emisiones de CO_{2-eq} generadas por un vehículo de combustión interna al año, se utilizó el valor del combustible por vehículo transformado en energía que fue utilizado en la ecuación 2.5., considerando la corrección por cada 100 km. Esto se realiza, ya que independientemente de la eficiencia del motor, toda la energía entregada por el combustible genera emisiones. Además, se realizaron las conversiones necesarias, para trabajar en las unidades correctas. Por lo tanto, se utilizó la ecuación 2.8., para realizar el cálculo.

$$E_{VC} = F_e \times Re_c \times K_a$$

Ecuación 2.8. Emisiones de vehículos de combustión interna

Donde:

E_{VC} : Emisiones de vehículos de combustión interna (t CO_{2-eq})

F_e : Factor de emisión por el uso de electricidad (t CO_{2-eq}/MWh)

Re_c : Requerimiento energético de un vehículo de combustión interna sin considerar la eficiencia (MWh/km)

El factor de emisión por el uso de electricidad utilizado fue el establecido en el informe del Ministerio de Energías y Minas del año 2022. Aquí se especifica un factor por el uso de la electricidad producida en el Sistema Nacional Interconectado de 0,092 T CO_{2-eq}/MWh [47]. Se tomó dicho valor como base para la proyección de emisiones hasta el año 2050, es decir, se consideró que el porcentaje de participación de cada fuente de energía en la matriz de producción eléctrica se mantendría durante todos los años, aun cuando aumente la demanda de energía en el país.

2.4 Estimación de las emisiones de CO_{2-eq} de vehículos eléctricos

Para estimar las emisiones generadas por los vehículos eléctricos, se utilizó la ecuación 2.9. En este caso, se utiliza el valor del factor de emisión por el uso de electricidad detallado en el apartado 2.3 y el valor del requerimiento energético de un vehículo eléctrico de la

ecuación 2.7. en MWh.

$$E_{VE} = F_e \times Re_E \times K_a$$

Ecuación 2.9. Emisiones de vehículos eléctricos

Donde:

E_{VE} : Emisiones de vehículos eléctricos (t CO₂-eq)

Re_E : Requerimiento energético de un vehículo eléctrico (MWh/km)

2.5 Definición de escenarios

Para el análisis de la tendencia de crecimiento del parque automotriz en el DMQ, se planteó la creación de 3 escenarios. De cada escenario se crean dos sub-escenarios, en los que se expone una visión optimista y otra más cercana a la realidad. Para ello se consideró la evolución en la venta de vehículos dentro de la ciudad, en base a los diferentes cambios que se presentarían hasta el año 2050.

Business as usual (BAU)

En el escenario 1 se consideró la creación del mejor caso para el sector ventas, en el que la venta de vehículos avanza conforme al aumento de la población dentro del territorio. Para este cálculo fue necesario realizar una discretización en la cantidad de vehículos, tomando en cuenta únicamente aquellos matriculados en el DMQ, que sean privados y que utilizan gasolina como combustible. Además, se consideró que en el país el grado de venta de los vehículos SUV y automóviles es mayor en porcentaje a las demás clases de vehículos [4]. Para ello, se trabajó con la cantidad de vehículos privados en el DMQ en el año 2022, que fue calculado a partir de la ecuación 2.2.

Posteriormente con la ecuación 2.10. se calculó la cantidad de vehículos privados (SUV y Automóviles) que circularían en el DMQ para el año 2050, utilizando el dato de vehículos privados en el DMQ en el año 2022, previamente calculado.

$$V_{DMQ\ 2050\ (S\ \&\ A)} = \frac{VM_{DMQ\ 2022\ (S\ \&\ A)} \times P_E\ 2050}{P_E\ 2022}$$

Ecuación 2.10. Proyección de vehículos en la zona urbana del DMQ para el año 2050 (S & A)

Donde:

$V_{DMQ\ 2050\ (S\ \&\ A)}$: Proyección de vehículos en la zona urbana del DMQ para el año 2050 (S & A)

$P_{E\ 2050}$: Proyección de población en Ecuador para el año 2050

$P_{E\ 2022}$: Personas en Ecuador para el año 2022

Para el cálculo utilizamos la proyección poblacional realizada por el INEC en el año 2012, indica que para el año 2050 la población alcanzara un total de 23.4 millones de habitantes en el Ecuador [48]. Y el dato del último censo realizado a nivel nacional, que muestra que en el año 2022 existieron 16938986 personas en el Ecuador [42].

El valor de la proyección de vehículos en el DMQ para el año 2050, se toma como base para el primer escenario. Se asume el crecimiento del parque automotor conforme a la población, sin disminución alguna.

Medium (Med)

En el segundo escenario, se estableció una restricción en el crecimiento del parque automotriz de un 13% con respecto al valor base del primer escenario. Para ello se consideró la situación actual del campo automotriz dentro de la ciudad, ya que la capacidad del sistema vial en el DMQ se encuentra en un proceso de saturación [49]. Por lo cual, se plantea que las distintas entidades establezcan diversas trabas para la adquisición de nuevos vehículos para la ciudad. Para esto se utilizó la ecuación 2.11.

$$V_{DMQ\ E2\ 2050} = V_{DMQ\ 2050\ (S\ \&\ A)} \times 87\%$$

Ecuación 2.11. Cálculo de la proyección de vehículos en la zona urbana del DMQ para el año 2050 para el escenario 2 (S & A)

Donde:

$V_{DMQ\ E2\ 2050}$: Proyección de vehículos en la zona urbana del DMQ para el año 2050 para el escenario 2 (S & A)

Minimun (Min)

En el último escenario, se considera una restricción en el crecimiento del parque automotriz de un 25%. En este caso se toman medidas más estrictas y se aplican una serie de leyes drásticas que limitan el crecimiento vehicular en la ciudad, haciendo que la cantidad de vehículos proyectados para el año 2050 sea muy cercana a la cantidad de vehículos en el año 2022. Para obtener la cantidad de vehículos de este escenario, se utilizó la ecuación 2.12.

$$V_{DMQ E3 2050} = V_{DMQ 2050 (S \& A)} \times 75\%$$

Ecuación 2.12. Cálculo de la proyección de vehículos en la zona urbana del DMQ para el año 2050 para el escenario 3 (S & A)

Donde:

$V_{DMQ E3 2050}$: Proyección de vehículos en la zona urbana del DMQ para el año 2050 para el escenario 3 (S & A)

2.6 Definición de sub-escenarios

En cada uno de los escenarios descritos, se crearon dos sub-escenarios para cada caso bajo las mismas consideraciones. En el primer sub-escenario se establece una propuesta optimista, en la que el 75% de vehículos que circulen en la ciudad sean eléctricos y la diferencia con el total de vehículos de cada escenario sean los vehículos de combustión interna. Esta perspectiva nace del Plan de Acción de Cambio Climático de Quito, en la que se proyecta reducir gradualmente la cantidad de emisiones generadas, a partir de la electrificación de los vehículos privados [50]. Para ello, la ecuación 2.13. fue utilizada para calcular la cantidad de vehículos eléctricos con esta perspectiva, lo propio se realizó con los valores de cada escenario.

$$VE_{DMQ 2050} = V_{DMQ 2050 (S \& A)} - (V_{DMQ 2050 (S \& A)} \times 75\%)$$

Ecuación 2.13. Vehículos eléctricos en la zona urbana del DMQ para el año 2050 (S & A)

Donde:

$VE_{DMQ 2050}$: Vehículos eléctricos en la zona urbana del DMQ para el año 2050 (S & A)

El segundo sub-escenario propuesto, establece mantener el número de vehículos a combustión interna al año 2022 e iniciar un cambio desde ese punto, considerando que todos los vehículos que ingresan sean eléctricos, hasta completar el total de cada escenario. Para ello, se toma en cuenta las diferentes propuestas de incentivos establecidas a nivel nacional al comprar vehículos eléctricos y los apartados del Acuerdo de París para mitigar los efectos de la contaminación en el mundo al año 2050 [4].

Además, se utilizó la ecuación 2.14. para obtener valores medios en cantidad de vehículos para los años 2030 y 2040 a partir de los valores en reducción de emisiones.

$$VE_{DMQ\ 2030/2040} = \frac{RE_{2030/2040} \times VE_{DMQ\ 2050}}{RE_{2050}}$$

Ecuación 2.14. Vehículos eléctricos en la zona urbana del DMQ para el año 2030 y 2040 (S & A)

Donde:

$VE_{DMQ\ 2030/2040}$: Vehículos eléctricos en la zona urbana del DMQ para el año 2030 y 2040 (S & A)

$RE_{2030/2040}$: Impacto de la reducción de emisiones debido a la electrificación de vehículos privados para el año 2030 y 2040

RE_{2050} : Impacto de la reducción de emisiones debido a la electrificación de vehículos privados para el año 2050

El impacto en la reducción de emisiones es tomado del Plan de Acción de Cambio Climático de Quito (PAC) 2020-2050 [26]. La tabla 2.1. muestra los valores utilizados en el cálculo. En este caso se tomó los datos de electrificación de vehículos de pasajeros.

Tabla 2.1. Impacto de la reducción de emisiones según el PAC

| ESTRATEGIAS (puede incluir programas de alto nivel y objetivos) | | IMPACTO DE LA REDUCCIÓN DE EMISIONES (ALTO - BAJO) | | |
|--|---|---|-----------------------------------|-----------------------------------|
| | | 2030 | 2040 | 2050 |
| TRANSPORTE | Electrificación de vehículos de pasajeros | 146 421 TM CO ₂ -eq | 769 252 TM CO ₂ -eq | 902 399 TM CO ₂ -eq |

Fuente: [26]

2.7 Estimación de la demanda energética al introducir movilidad eléctrica

A partir de la ecuación 2.15. y los datos del inciso 2.6 de las proyecciones poblaciones INEC 2012 y el censo 2022. Se realizó una estimación de la cantidad de personas en el DMQ zona urbana al año 2050.

$$P_{DMQ\ 2050} = \frac{P_E\ 2050 \times P_{DMQ\ 2022}}{P_E\ 2022}$$

Ecuación 2.15. Personas en la zona urbana del DMQ para el año 2050

Donde:

$P_{DMQ\ 2050}$: Personas en la zona urbana del DMQ para el año 2050

$P_{DMQ\ 2022}$: Personas en la zona urbana del DMQ para el año 2022

A partir de los datos de población en el DMQ, se calculó la demanda correspondiente para cada año. Para este caso, se tomó el valor de demanda energética del Informe Anual de la CENACE, en el que se informó que para el año 2022 la demanda de energía fue de 27561,62 GWh [51]. La ecuación 2.16. permitió obtener los valores de proyección de demanda de cada año.

$$DE_{DMQ\ 2050} = \frac{DE_{DMQ\ 2022} \times P_{DMQ\ 2050}}{P_{DMQ\ 2022}}$$

Ecuación 2.16. Proyección de la demanda de energía en la zona urbana del DMQ para el año 2050

Donde:

$DE_{DMQ\ 2050}$: Proyección de la demanda de energía en la zona urbana del DMQ para el año 2050

$DE_{DMQ\ 2022}$: Demanda de energía en la zona urbana del DMQ para el año 2022

Con los datos de demanda de energía debidos al crecimiento poblacional, se estima el aumento en la demanda de cada año, a partir del consumo energético por vehículos eléctricos y la cantidad de vehículos eléctricos proyectados en cada año. En este caso, se toma en cuenta únicamente el sub-escenario 1, considerado como el de mayor crecimiento vehicular y mayor cambio a electromovilidad. Por lo tanto, el que requirió una mayor demanda de energía por carga. En la ecuación 2.17., se puede observar el proceso para el año 2050, se realiza el mismo proceso para los datos intermedios.

$$DE_{DMQ\ 2050/VE} = DE_{DMQ\ 2050} + (Re_E \times VE_{DMQ\ 2050})$$

Ecuación 2.17. Proyección de la demanda de energía con vehículos eléctricos en la zona urbana del DMQ para el año 2050

Donde:

$DE_{DMQ\ 2050/VE}$: Proyección de la demanda de energía con vehículos eléctricos en la zona urbana del DMQ para el año 2050.

3 RESULTADOS, CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

3.1 Resultados

Definición de escenarios

Los 3 escenarios permitieron definir los valores base con respecto a la cantidad de vehículos en el DMQ para el año 2022, para posteriormente calcular la prospectiva con respecto a la cantidad de vehículos eléctricos de cada sub-escenario.

En la tabla 3.1. se puede observar la cantidad de vehículos totales, considerando solo SUV y automóviles, de 326339 al año 2022. Este valor es la cantidad base de vehículos de combustión interna para los diferentes sub-escenarios y en este caso permite calcular la cantidad de vehículos al año 2050 de 450814, que se muestra en la figura 3.1, relacionando los datos con los valores de población en el país.

Tabla 3.1. Vehículos privados en el DMQ en el año 2022 (S & A)

| Año | Vehículos matriculados en el DMQ 2022 | Tipo de vehículo | Distribución porcentual | Total por tipo de vehículo | Total de vehículos |
|------|---------------------------------------|------------------|-------------------------|----------------------------|--------------------|
| 2022 | 508316 | SUV | 28.5% | 144870 | 326339 |
| | | Automóvil | 35.7% | 181469 | |

Fuente: [26]

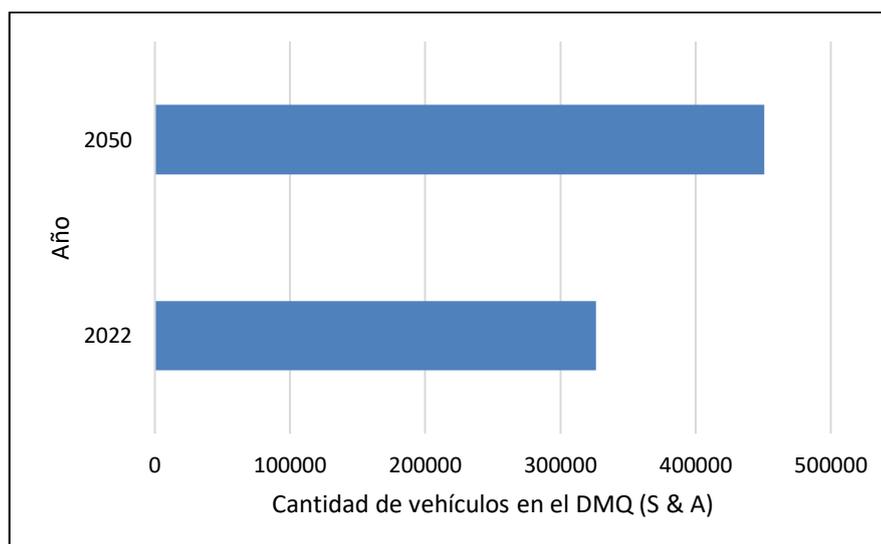


Figura 3.1. Proyección de crecimiento vehicular en el DMQ para el año 2050, como la comparación con la cantidad de vehículos actuales en el DMQ. Para ello se considera únicamente vehículos tipo SUV y Automóviles. Este es el escenario BAU.

Fuente: [Propia]

Tomando el valor del escenario BAU con respecto a la cantidad de vehículos en el DMQ para el año 2050 en el escenario 1, la figura 3.2. muestra la cantidad de vehículos para el año 2050 en cada escenario. Obteniendo un valor de 450814 vehículos en el escenario BAU, 392208 en el escenario Med y 338110 para el escenario Min.

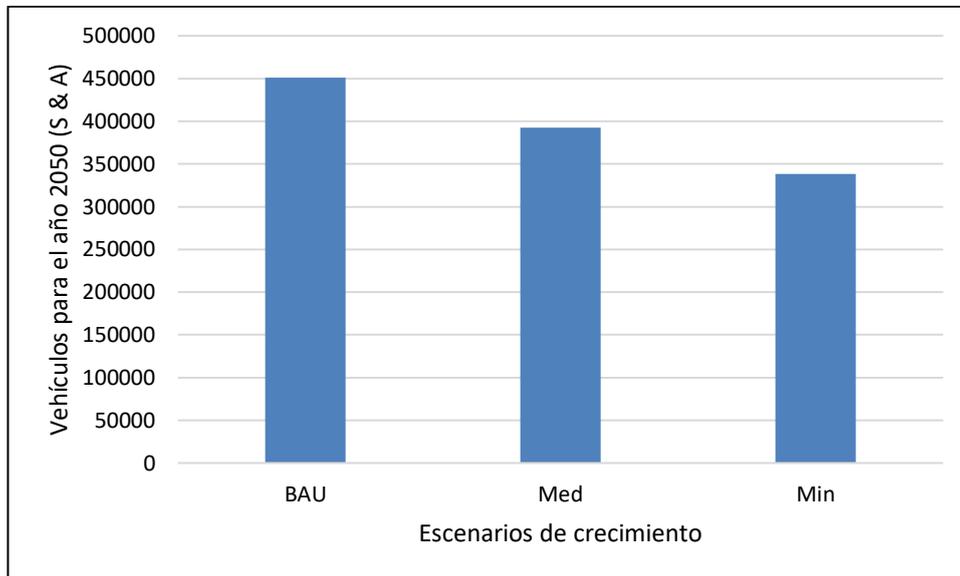


Figura 3.2. Escenarios de crecimiento vehicular en el DMQ para el año 2050, considerando un caso normal (BAU), un escenario con una restricción del 13% (Med) y un escenario de estancamiento con una restricción del 25% (Min). Para ello se toma como base el valor de la proyección al 2050 de 450814 vehículos.

Fuente: [Propia]

Definición de sub-escenarios

La figura 3.3. muestra la proyección de los diferentes sub-escenarios, 2 por cada escenario. La tabla 3.2 permite observar los sub-escenarios BAU - Op, Med - Op y Min - Op, son aquellos en los que se considera que el campo automotriz se constituirá por un 75% de vehículos eléctricos con respecto al total. Mientras que en los sub-escenarios Bau - Pe, Med - Pe y Min - Pe se presenta el caso en el que se mantiene la cantidad de vehículos de combustión interna actuales y son solo las nuevas unidades aquellas que serán eléctricas.

Tabla 3.2. Escenarios de crecimiento vehicular y penetración de movilidad eléctrica

| | Business as usual (BAU) | | Medium (Med) | | Minimun (Min) | |
|--|--------------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|-----------------------------|-------------------------------|
| Cantidad de vehículos en el DMQ | 450814 | | 392208 | | 338110 | |
| | Vehículos eléctricos | Vehículos a combustión | Vehículos eléctricos | Vehículos a combustión | Vehículos eléctricos | Vehículos a combustión |
| Escenario optimista (Op) | 338110 | 112703 | 294156 | 98052 | 253583 | 84528 |
| Escenario pesimista (Pe) | 124475 | 326339 | 65869 | 326339 | 11772 | 326339 |

Fuente: [Propia]

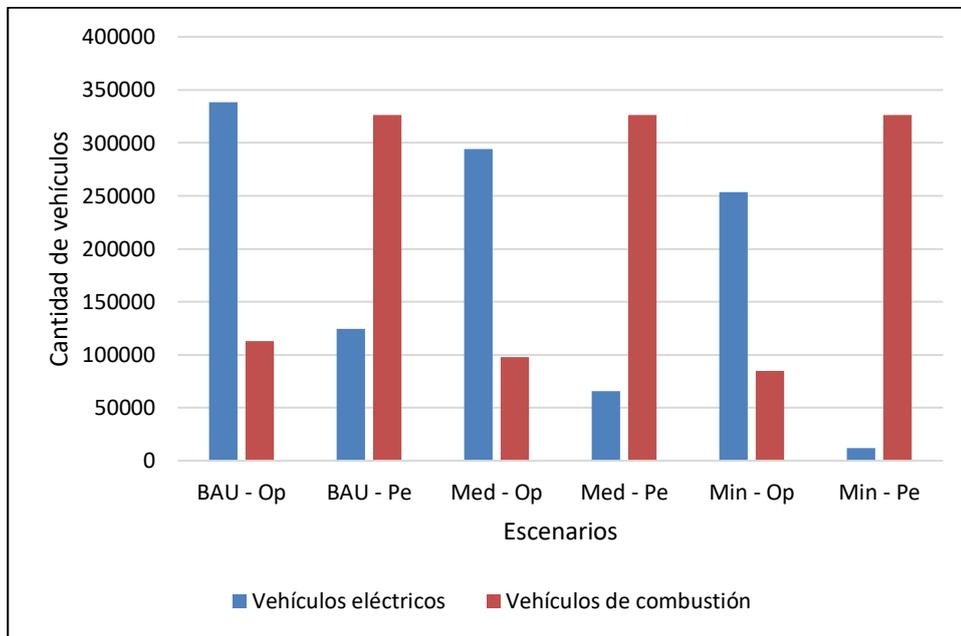


Figura 3.3. Escenarios de crecimiento vehicular y penetración de vehículos eléctricos en el DMQ para el año 2050, tomando como base el escenario optimista en el que el 75% de los vehículos serían eléctricos y otro caso que considera un cambio solo de las nuevas unidades a eléctricas.

Fuente: [Propia]

Además, la figura 3.4. muestra el comportamiento de ingreso de vehículos eléctricos en el DMQ, y la reducción de unidades con respecto a los vehículos de combustión.

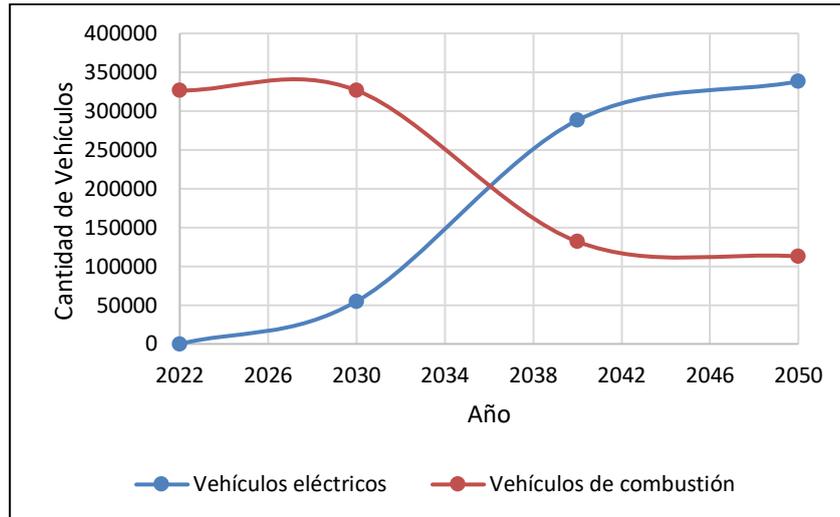


Figura 3.4. Escenarios BAU – Op de penetración de vehículos eléctricos, tomando en cuenta la reducción de vehículos de combustión interna hasta el año 2050

Fuente: [Propia]

Cada uno de los sub-escenarios propuestos, permitió realizar la proyección de requerimiento energético con respecto al consumo y la cantidad de emisiones de CO_{2-eq} producidas. En los anexos se muestran las tablas en las que se presentan los puntos intermedios para los años 2030 y 2040, proyectados a partir de la reducción de emisiones del Plan de Acción de Cambio Climático de Quito [13]. Además, de figuras en esta misma sección, que permiten observar cómo se dará el crecimiento vehicular a través de los años, con el crecimiento de eléctricos y la disminución o mantenimiento de vehículos de combustión.

Estimación del requerimiento energético en vehículos de combustión interna

En el anexo II muestra que se distribuyen a Pichincha un total de 4860 kBEP, destinados exclusivamente al sector transporte. Esto constituye el 21% del total de gasolina que se distribuye a nivel nacional. A partir de dicho valor, la tabla 3.3. muestra que son 2774262 BEP de gasolina los que se utilizan dentro del DMQ como combustible para vehículos de transporte terrestre.

Tabla 3.3. Gasolina distribuida al DMQ para el sector transporte en el año 2022

| | Gasolina (BEP) | Población |
|--------------------------|----------------|-----------|
| Pichincha | 4860847.30 | 3089473 |
| DMQ (Zona Urbana) | 2774262.96 | 1763275 |

Fuente: [26]

En la figura 3.5., se puede observar un esquema con los datos necesarios para obtener el valor de requerimiento energético por vehículo, que se calculó a partir de la cantidad de combustible que consume cada vehículo al año, siendo este 5,45 BEP. En este caso, se trabajó únicamente con los vehículos tipo SUV y automóviles matriculados en el DMQ y la gasolina destinada a estos. Además, también se muestra la transformación a requerimiento energético del valor de combustible por vehículo.

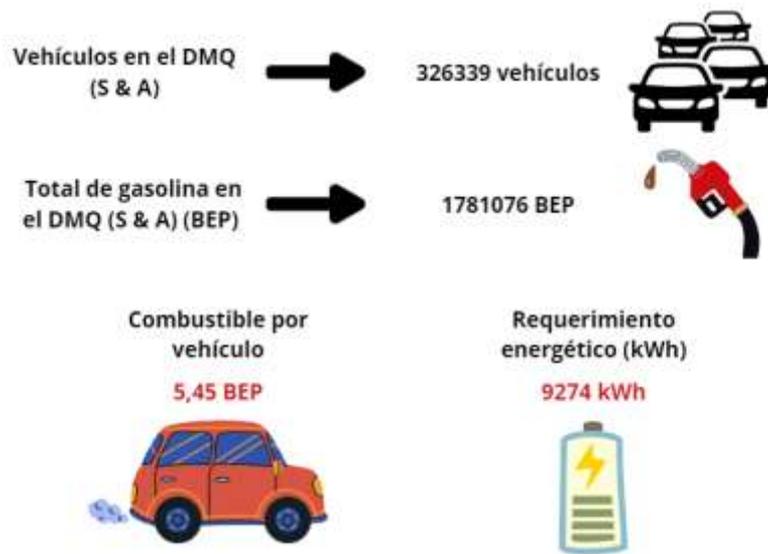


Figura 3.5. Consumo de combustible y requerimiento energético por vehículo

Fuente: [Propia]

En el anexo III, se indica el valor del requerimiento motriz, considerando el valor de eficiencia promedio de un motor de combustión interna. El requerimiento de energía motriz es 2086,86 kWh/km y considerando los valores promedio de kilómetros recorridos por cada vehículo al año, se obtuvo 0,12 kWh/km. Sin embargo, también se realizó el cálculo del requerimiento energético, sin considerar valores de eficiencia, ya que todo el proceso de combustión es el responsable de la generación de emisiones. Por lo tanto, el requerimiento energético de un vehículo de combustión interna sin eficiencia del motor es de 0,541 kWh/km.

Estimación del requerimiento energético en vehículos eléctricos

El anexo IV muestra que el requerimiento energético de un vehículo eléctrico es de 0,164 kWh/km, en este caso solo se consideró los datos de consumo de las fichas técnicas de vehículos tipo SUV y automóviles que circulan en el país. Además, también se obtuvo el valor correspondiente a requerimiento energético de 2869 kWh. En este caso, se vuelve a tomar como base los datos promedios de kilómetros recorridos al año por cada vehículo.

La carga de los vehículos eléctricos para cada año de proyección si representará un consumo directo de energía eléctrica, la cual deberá ser suministrada por la red. Por lo tanto, con la proyección de cada sub-escenario, se obtuvo un valor de demanda de energía eléctrica. La figura 3.6. representa el aumento en la demanda de consumo debida a la carga de los vehículos eléctricos. En este caso, se muestra el escenario BAU - Op, correspondiente al mayor valor de consumo, llegando a un valor máximo de 970,32 GWh al año. En los anexos se muestran la proyección de consumo energético por vehículos privados, en base a los diferentes sub-escenarios. Mostrando en la figura del anexo IX que el escenario Min - Pe, es el de menor aumento con un valor máximo de 189 GWh, ya que en este caso el crecimiento de vehículos eléctricos es únicamente de 65869 unidades.

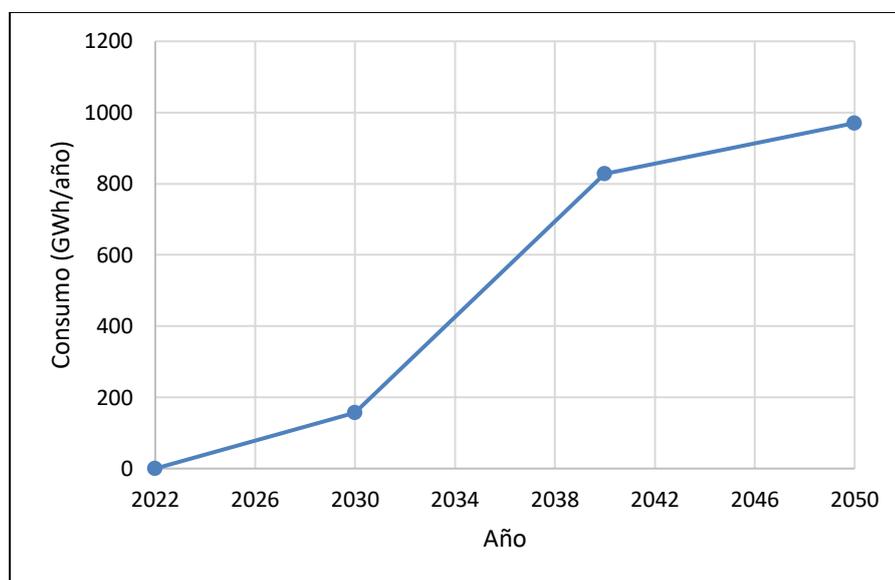


Figura 3.6. Demanda de consumo de vehículos eléctricos en el DMQ para el año 2050 (S & A) – Escenario BAU – Op, donde se obtiene un valor de consumo eléctrico de alrededor de 970 GWh. Este caso es el más crítico para la red, ya que demanda más de la misma.

Fuente: [Propia]

Estimación de las emisiones de CO_{2-eq} de vehículos de combustión interna y vehículos eléctricos

En los anexos X y XI, se puede observar que, considerando los valores de kilometraje promedio, se obtiene un valor de emisión de CO_{2-eq} para un vehículo de combustión interna de 0,87 t CO_{2-eq}, mientras que un vehículo eléctrico generará 0,26 t CO_{2-eq}.

En la figura 3.7., se puede observar el escenario Min – Op, con respecto a emisiones de CO_{2-eq} generadas por vehículos tipo SUV y automóviles, tanto eléctricos como de combustión interna hasta el año 2050. En este caso, el valor de emisiones de CO_{2-eq} al año 2050 sería de 140582 t CO_{2-eq} al año, considerando un escenario de crecimiento bajo con respecto al campo automotriz y en el que el 75% de los vehículos del análisis sean

eléctricos. En los anexos se puede observar los diferentes escenarios con respecto a generación de emisiones. En la figura 3.8. se puede observar que el caso más crítico es el escenario BAU - Pe, con un valor total de emisiones para el año 2050 de 317129 t CO_{2-eq} al año. Debido a la alta conservación de vehículos de combustión interna y al alto crecimiento del parque automotriz.

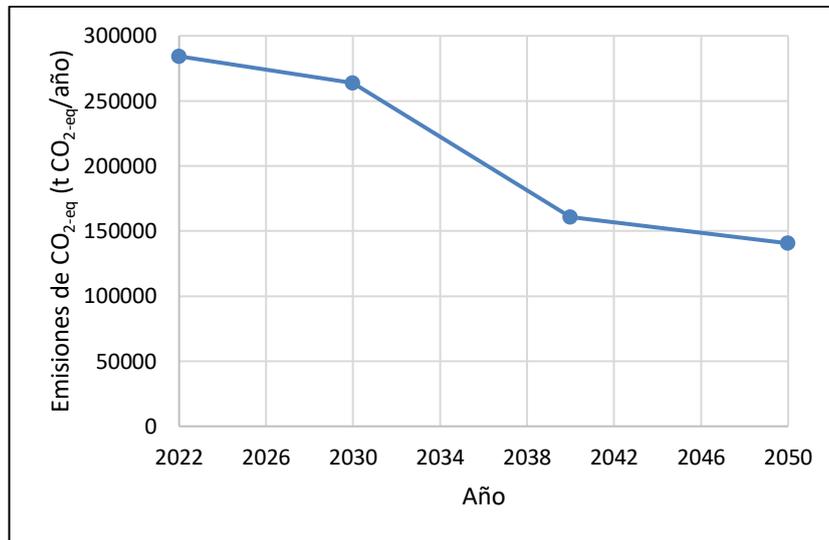


Figura 3.7. Emisiones de CO_{2-eq} generadas por vehículos tipo SUV y Automóviles en el DMQ para el año 2050 – Escenario Min – Op, con una reducción en el valor de emisiones de casi el 50%, con respecto al valor de emisiones de CO_{2-eq} inicial.

Fuente: [Propia]

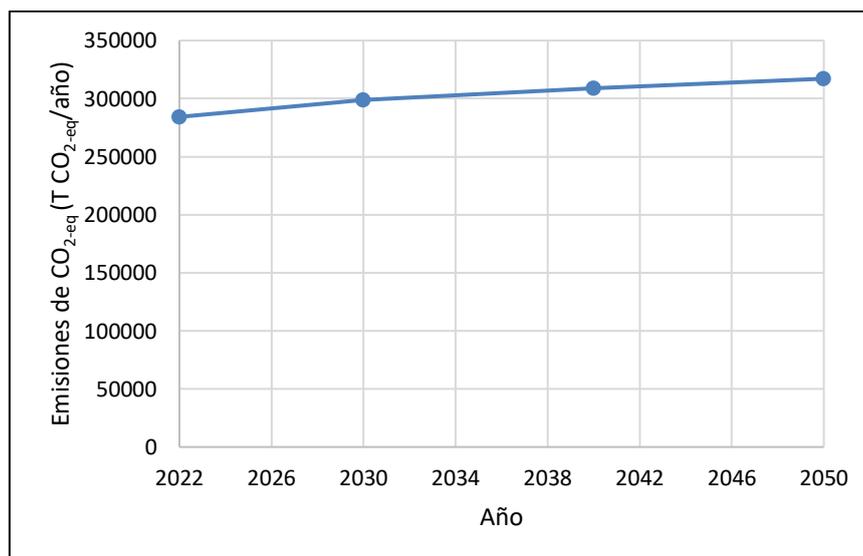


Figura 3.8. Emisiones de CO_{2-eq} generadas por vehículos tipo SUV y Automóviles en el DMQ para el año 2050 – Escenario BAU – Pe, con un aumento en el valor de las emisiones de CO_{2-eq} a pesar de la introducción de movilidad eléctrica.

Fuente: [Propia]

Estimación de la demanda energética al introducir movilidad eléctrica

El valor de la demanda energética en la zona urbana del DMQ seguirá creciendo de manera continua conforme al crecimiento poblacional que se experimente en la misma. En la figura 3.9. se puede observar cómo desde el año 2030 se podría empezar a experimentar un cambio considerable en el aumento de la demanda energética por la electromovilidad dentro de la ciudad. Considerando el escenario de mayor consumo, BAU – Op, se podría alcanzar un valor de 4933 GWh para el año 2050, teniendo una diferencia de más de 970 GWh con relación a la proyección de demanda energética por crecimiento demográfico al mismo año. Es decir, con el mayor escenario de crecimiento vehicular y con una alta tasa de penetración de vehículos eléctricos, la demanda energética de la ciudad crecería un 20% más, debido a la necesidad de carga de vehículos eléctricos.

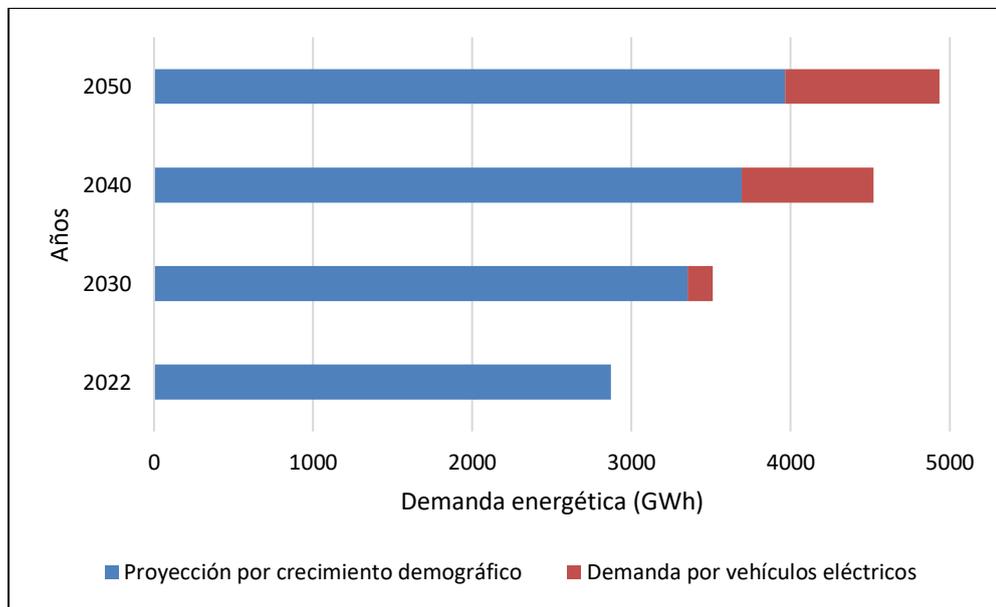


Figura 3.9. Proyección de demanda de energía eléctrica en el DMQ para el año 2050, en el que la demanda de energía eléctrica crece a partir del año 2030, llegando a ser el 20% de la demanda total para el año 2050.

Fuente: [Propia]

3.2 Discusión de Resultados

Dentro del cálculo de las emisiones de CO_{2-eq} generadas por el sector transporte, fue necesario utilizar el factor de emisiones por el uso de electricidad tomado del Informe del Ministerio de Energías y Minas del año 2022. Dentro del documento que especifica la metodología de cálculo de este, existen ambigüedades, ya que no se establece si se consideran cuestiones importantes al momento del cálculo. Las principales consideraciones para tener en cuenta para calcular este factor son:

- Composición de participación por tecnología en el sector energético: depende directamente de la composición de la matriz energética del país, es decir, de las fuentes a partir de las cuales se genere electricidad. Dicha proporción debe ser actualizada de manera continua, tomando en consideración aquellas plantas que dejan de trabajar, introducción de energías renovables y no renovables, etc.
- Actualización continua de los datos: para calcular el factor, se toman datos del año de interés y previos al mismo. Si dichos datos no cuentan con el tratamiento adecuado o son ambiguos, es posible que el cálculo sea incorrecto. Además, se debe considerar que debido al mantenimiento o a la falta de este, se puede obtener diferentes datos de generación, lo que afecta al factor de emisión.
- Emisiones directas e indirectas: se debe incluir las emisiones producidas durante todo el proceso de generación, es así, que se deberían incluir las emisiones producidas por las etapas de extracción, transporte o procesamiento de combustibles.
- Eficiencia de las plantas: las plantas generadoras pueden aumentar o reducir la cantidad de emisiones que producen, conforme a la eficiencia por unidad de electricidad producida. Este valor puede sobreestimar el factor de emisiones.
- Exportación e importación de energía: cuando se realiza una transacción de energía entre un país y otro, se debe considerar como se encuentra compuesta la matriz energética de dicho país, y considerar el mismo al realizar el cálculo.

En el caso del Ecuador, algunas de las inconsistencias más notables son: el uso de datos muy antiguos. Otro punto importante es que a pesar de que las hidroeléctricas generan electricidad con menores emisiones que las termoeléctricas, el factor de emisión de CO_{2-eq} del informe nacional, es el mismo para ambas tecnologías. Además, en los cálculos de descarbonización presentados en el informe de emisión nacional, se utiliza un factor de emisiones mayor.

Por ello, la figura 3.10. muestra el porcentaje de participación de cada fuente de generación de energía en el país al año 2022. En esta se puede observar que la energía hidroeléctrica

tiene el mayor grado de aporte para cubrir la demanda nacional. Sin embargo, como se mencionó previamente, el aumento de la demanda por crecimiento demográfico, necesidad de electrificación y otras causantes, va a generar la necesidad inminente de cambiar la matriz energética del país. Esto podría provocar un aumento en la generación de emisiones desde las fuentes de energía. Por ello, es necesario considerar diferentes porcentajes de participación de tecnologías en el sector energético, que permitan cubrir la demanda energética, sin aumentar la huella de carbono.

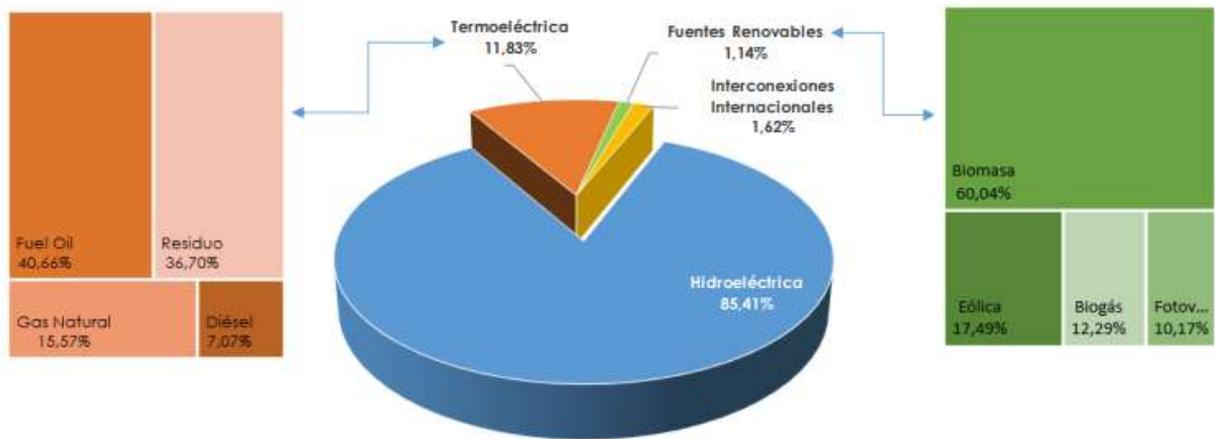


Figura 3.10. Fuentes de generación de energía en Ecuador para el año 2022

Fuente: [47]

Son diferentes los autores que analizan el potencial de generación de energía en el país, así en la figura 3.11. se presentan los escenarios propuestos en una investigación realizada en la Universidad San Francisco de Quito. En la misma se pueden observar diferentes propuestas de descarbonización de la matriz energética del país. Es decir, además de considerar el aumento de la demanda, también considera la posibilidad de utilizar nuevas fuentes de energía que puedan reemplazar a aquellas que afectan de manera directa al medio ambiente. Estos escenarios pueden ser analizados para considerar un nuevo factor de emisión por el uso de electricidad, en base a las nuevas fuentes de generación de energía.

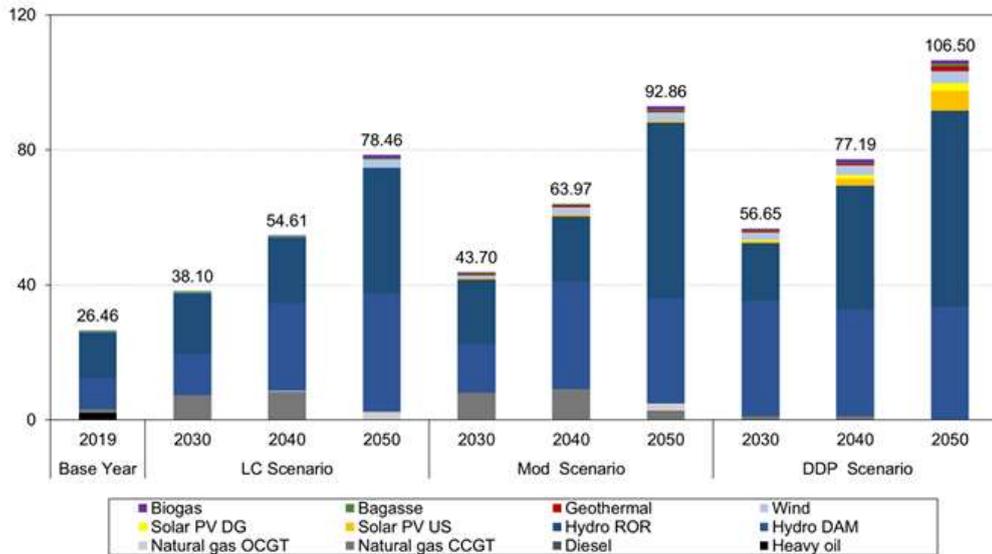


Figura 3.11. Proyecciones de generación de energía por escenarios

Fuente: [52]

Finalmente, en Ecuador, se han establecido incentivos para promover la inclusión de vehículos eléctricos, incluyendo incentivos fiscales como la exoneración del IVA y el arancel de importación, reducción de precios en la matrícula y exoneración del impuesto ambiental a la contaminación vehicular [53]. Aunque cada año crecen los incentivos, la adopción de vehículos eléctricos sigue siendo baja debido a la falta de información y a una infraestructura de carga insuficiente. Por ejemplo, a pesar de estos incentivos, Quito cuenta con menos de 50 estaciones de carga pública, lo cual es insuficiente para soportar una adopción masiva de vehículos eléctricos [54].

3.3 Conclusiones

Considerando únicamente el crecimiento demográfico en el país, se obtienen tres escenarios de crecimiento. En el escenario BAU con un total de 450814 vehículos, el escenario Medium de 392208 vehículos y finalmente el escenario Minimun con un total de 338111 vehículos. En cada escenario, se evaluó una penetración del 75% de vehículos eléctricos. Además, se analizó otro caso en el cual las ventas de vehículos eléctricos comienzan, pero se mantienen los vehículos de combustión interna que existían hasta el año 2022. Siendo el escenario más optimista, aquel en el que se integran 253583 unidades eléctricas y se mantienen 84528 vehículos de combustión, perteneciente al escenario Min - Op.

En el caso de la demanda energética proyectada a la integración de vehículos eléctricos en el DMQ al año 2050, el análisis del escenario BAU con una alta penetración de vehículos eléctricos aumento la demanda en 970 GWh. Haciendo que la demanda de electricidad en la ciudad llegué a un valor de 4933 GWh y que cerca del 20% de la misma corresponda a la demanda de carga por vehículos eléctricos. Considerando que solo se están tomando en cuenta el transporte terrestre privado (SUV y Automóviles), dicha demanda podría aumentar de forma considerable al tomar en cuenta todo el sector de transporte terrestre.

Analizando el escenario Minimun, con respecto al crecimiento del mercado vehicular y una penetración del 75% de vehículos eléctricos. Se observo que con este cambio es posible reducir las emisiones de CO_{2-eq} al año 2050, en aproximadamente un 50% del valor al año 2022. Teniendo una diferencia entre ambos valores de 143683 t CO_{2-eq}, permitiendo de esta manera reducir la huella de carbono del sector transporte analizado. Es importante tener en cuenta que para el cálculo realizado se utilizó un factor de emisión fijo para el uso de electricidad. Esto significa que no se consideraron posibles variaciones en ese valor, que podrían surgir dependiendo de las fuentes de energía utilizadas para satisfacer el aumento de la demanda.

3.4 Recomendaciones

Analizar cambios en la matriz energética del Ecuador, considerando distintos niveles de participación por tecnología en el sector energético, que se puedan implementar para cubrir la demanda eléctrica en el país debida a la implementación de movilidad eléctrica y el aumento de la demanda común por crecimiento poblacional.

Calcular el factor de emisión por el uso de electricidad, al considerar cambios en la proporción de aporte de energía por fuentes. Este factor se estima en base a la generación de energía eléctrica y la cantidad de emisiones de CO_{2-eq} según la fuente analizada.

Realizar un estudio de crecimiento vehicular a partir de un análisis multifacético, considerando proyecciones económicas, políticas de transporte, planes urbanísticos, adopción de nuevas tecnologías, cambios sociales y otros. Para de esta manera, obtener datos más precisos.

Extender el estudio a otros tipos de vehículos, considerando el aumento o disminución en temas de consumo, así como temas de kilometraje recorrido, el combustible con el que funciona, eficiencia del motor y otros.

Comparar los valores de consumo energético por vehículo, a través de un estudio experimental. Este permitiría contrastar los valores obtenidos mediante el cálculo y estimar el porcentaje de error que puede existir. Con estos datos, se puede calcular un valor de demanda energética más exacto.

4 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), *Climate Change 2021 – The Physical Science Basis*. Cambridge University Press, 2023. doi: 10.1017/9781009157896.
- [2] “Greenhouse Gas Emissions from Energy 2022 Database documentation.” [Online]. Available: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-product/greenhouse-gas-emissions->
- [3] Lasso Mendoza, Fernando Santos, and Alvite Guillermo, “Balance Energético Nacional 2022,” 2022. [Online]. Available: www.recursosyenergia.gob.ec
- [4] F. Vera, M. Camila, U. Sofía, and D. Castillo, *Acción climática y Acuerdo de París: el rol de las ciudades de América Latina y el Caribe*. 2023. [Online]. Available: www.diamela-studio.com
- [5] V. Klesty, “Electric cars rise to record 54% market share in Norway in 2020,” Reuters.
- [6] “ELECTRIFICATION OF PUBLIC TRANSPORT MOBILITY AND TRANSPORT CONNECTIVITY SERIES.” [Online]. Available: <http://creativecommons.org/licenses/by/3.0/igo>.
- [7] “Electric vehicle technology,” 2022.
- [8] A. Faraz, A. Ambikapathy, S. Thangavel, K. Logavani, and G. Arun Prasad, “Battery Electric Vehicles (BEVs),” 2021, pp. 137–160. doi: 10.1007/978-981-15-9251-5_8.
- [9] R. Lokapure, R. B. Lokapure, A. Suresh Raut, and S. B. Patil, “Hybrid Electric Vehicles (HEV).” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/374813752>
- [10] H. Singh, A. Ambikapathy, K. Logavani, G. Arun Prasad, and S. Thangavel, “Plug-In Hybrid Electric Vehicles (PHEVs),” in *Green Energy and Technology*, Springer Science and Business Media Deutschland GmbH, 2021, pp. 53–72. doi: 10.1007/978-981-15-9251-5_3.
- [11] D. González, P. Tutor, and P. Barreiro, “PRINCIPIOS BÁSICOS DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO Autor: Departamento de Tecnología Electrónica.”
- [12] “Alternative Fuels Data Center,” Energy Efficiency and Renewable Energy .
- [13] K. A. Small and K. Van Dender, “Fuel Efficiency and Motor Vehicle Travel: The Declining Rebound Effect,” 2007.
- [14] J. Deng, R. Long, and R. He, “Vehicle energy consumption analysis method and device and vehicle,” 2020.
- [15] K. Markus and B. Boris, “A method for predicting a consumption of a motor vehicle, motor vehicle and computer program,” 2014.
- [16] *Emissions Gap Report 2020*. United Nations.
- [17] I. Energy Agency, “Review 2021 Assessing the effects of economic recoveries on

- global energy demand and CO₂ emissions in 2021 Global Energy,” 2021. [Online]. Available: www.iea.org/t&c/
- [18] Intergovernmental Panel on Climate Change, *Climate change 2014 : synthesis report : longer report*.
- [19] I. Energy Agency, “Global EV Outlook 2020 Entering the decade of electric drive?”
- [20] INEC, “Anuario de Estadísticas de Transportes, 2022,” 2022. [Online]. Available: <http://www.ecuadorencifras.gob.ec/transporte/>
- [21] Unfccc, “ADOPTION OF THE PARIS AGREEMENT - Paris Agreement text English.”
- [22] E. Connelly, “Electric Vehicles,” International Energy Agency.
- [23] Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico de España, “MOVE - Movilidad Eléctrica en América Latina y el Caribe ,” Plataforma de Electromovilidad .
- [24] M. De Ambiente and Y. Desarrollo Sostenible, *Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica REPÚBLICA DE COLOMBIA*. [Online]. Available: www.minambiente.gov.co
- [25] “RESOLUCIÓN-COMEX-016-2019”.
- [26] “PLAN MAESTRO DE MOVILIDAD SOSTENIBLE DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO-PMMS DMQ.”
- [27] Banco Interamericano, “Estrategia Nacional de Electromovilidad Ecuador.”
- [28] S. Ayyadi and M. Maaroufi, “Diffusion Models for Predicting Electric Vehicles Market in Morocco,” in *EPE 2018 - Proceedings of the 2018 10th International Conference and Expositions on Electrical And Power Engineering*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Dec. 2018, pp. 46–51. doi: 10.1109/ICEPE.2018.8559858.
- [29] Z. Navas, D. García, and D. Iribarren, “Prospective Life Cycle Assessment of the Increased Electricity Demand Associated with the Penetration of Electric Vehicles in Spain,” *Energies (Basel)*, vol. 11, no. 5, May 2018.
- [30] R. Muha and A. Peroša, “Energy consumption and carbon footprint of an electric vehicle and a vehicle with an internal combustion engine,” *University of Ljubljana*, vol. 13, no. 2, Jul. 2018.
- [31] “Carbon Footprint Reduction with the Adoption of the Electricity-Powered Vehicles”.
- [32] M. Dollinger and G. Fischerauer, “Physics-Based Prediction for the Consumption and Emissions of Passenger Vehicles and Light Trucks up to 2050,” *Energies (Basel)*, vol. 16, no. 8, Apr. 2023, doi: 10.3390/en16083591.
- [33] Y. Wei *et al.*, “Economic and Environmental Benefits of Vehicle-to-Grid in the Power System: A National Study of China’s 2030 and 2060 Dual-Carbon Goal,” in *2022 IEEE 6th Conference on Energy Internet and Energy System Integration (EI2)*, IEEE, Nov. 2022, pp. 3176–3182. doi: 10.1109/EI256261.2022.10117160.
- [34] E. Marín Tabares, “ANÁLISIS PROSPECTIVO DEL MERCADO DE VEHÍCULOS ELÉCTRICOS EN COLOMBIA,” in *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI 2021*, Asociación Colombiana de Facultades de Ingeniería - ACOFI,

- Sep. 2021, pp. 1–10. doi: 10.26507/ponencia.1970.
- [35] J. Guevara-Cedeno, J. Aguilar, R. Torabi, and A. Berbey-Alvarez, “Electric mobility in Panama: A review,” in *Energy and Sustainability in Small Developing Economies, ES2DE 2018 - Proceedings*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., Oct. 2018, pp. 57–62. doi: 10.1109/ES2DE.2018.8494305.
- [36] G. A. Gomez-Ramirez and R. Solis-Ortega, “Electric Vehicle Penetration Modelling for Costa Rica Power System,” in *2021 IEEE CHILEAN Conference on Electrical, Electronics Engineering, Information and Communication Technologies, CHILECON 2021*, Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., 2021. doi: 10.1109/CHILECON54041.2021.9703070.
- [37] A. Osvaldo Benito, P. L. Castro Verdezoto, and P. D. Rodríguez, “Prospectiva sobre la integración energética de sistemas de generación distribuida y vehículos eléctricos en Mendoza, Argentina,” *RECIAMUC*, vol. 7, no. 2, pp. 375–389, Apr. 2023, doi: 10.26820/reciamuc/7.(2).abril.2023.375-389.
- [38] E. A. Álvarez Jerez *et al.*, “Potencial impacto energético de los vehículos eléctricos en la red de distribución del Distrito Nacional, República Dominicana,” *Ciencia, Ingenierías y Aplicaciones*, vol. 2, no. 1, pp. 45–66, Sep. 2019, doi: 10.22206/cyap.2019.v2i1.pp45-66.
- [39] “ANUARIO-AEADE_2022_comp”.
- [40] S. C. Davis and R. G. Boundy, “Energy Edition 38.”
- [41] D. C. Arias *et al.*, “COMITÉ DIRECTIVO Coordinadora de la iniciativa Quito Cómo Vamos y Directora Ejecutiva de la Fundación TANDEM.”
- [42] INEC, “Cifras Clave del Censo Ecuador 2022,” https://inec.censoecuador.gob.ec/public/Boletin_Segunda_Entrega_marzo_2024.html.
- [43] OLADE, “Guía M-5: Metodología de conversión de unidades.”
- [44] “System Simulation of Partially Premixed Combustion in Heavy-Duty Engines Gas Exchange, Fuels and In-cylinder Analysis.”
- [45] Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos, “EPA ,” <https://espanol.epa.gov/la-energia-y-el-medioambiente/calculadora-de-equivalencias-de-gases-de-efecto-invernadero-calculos>.
- [46] U. S. Permalink and S. Handy, “Accessibility vs. Mobility Enhancing Strategies for Addressing Automobile,” 2002. [Online]. Available: <https://escholarship.org/uc/item/5kn4s4pb>
- [47] G. Del Ecuador and E. Gobierno Del Ecuador, “Ministerio de Energía y Minas.”
- [48] INEC, “En el 2050 seremos 23,4 millones de ecuatorianos,” <https://www.ecuadorencifras.gob.ec/en-el-2050-seremos-234-millones-de-ecuatorianos/>.
- [49] “Secretaría de Movilidad.”

- [50] “Distrito Metropolitano de Quito Plan de Acción de Cambio Climático de Quito”, [Online]. Available: <https://www.www.quitoambiente.gob.ec>
- [51] “INFORME ANUAL 2022.”
- [52] J. C. Godoy, D. Villamar, R. Soria, C. Vaca, T. Hamacher, and F. Ordóñez, “Preparing the ecuador’s power sector to enable a large-scale electric land transport,” *Energies (Base)*, vol. 14, no. 18, Sep. 2021, doi: 10.3390/en14185728.
- [53] Bnamericas, “Ecuador Plans Achieving Mass Electromobility by 2040,” <https://www.bnamericas.com/en/interviews/ecuador-plans-mass-electromobility-by-2040>.
- [54] “Puntos de carga en Distrito Metropolitano de Quito,” ELECTROMAPAS.

5 ANEXOS

ANEXO I. Comparación de datos de gasolina distribuida

| Balance Energético Nacional (2021) [3] | | | |
|---|-----------------|------------|------------------|
| | Gasolina | BBL | Litros |
| Pichincha | Extra | 5320221 | 845845976.1 |
| | Super | 663052 | 105416648.3 |
| TOTAL (gal) | | | 251296950 |

| Ministerio de Energías y Minas (2021) [47] | | | |
|---|-----------------------|----------------------------------|-----------------------|
| | Gasolina extra | Gasolina extra con Etanol | Gasolina super |
| Enero | 16386755 | 539 | 2226360 |
| Febrero | 16340265 | 402 | 2343125 |
| Marzo | 18606285 | 356 | 2535234 |
| Abril | 16462020 | 410 | 2017710 |
| Mayo | 16727575 | 406 | 1954855 |
| Junio | 18547255 | 180 | 2276333 |
| Julio | 19920405 | 104 | 2466328 |
| Agosto | 19720295 | 366 | 2349485 |
| Septiembre | 19463325 | 505 | 2335351 |
| Octubre | 20029575 | 530 | 2458474 |
| Noviembre | 19350455 | 528 | 2287462 |
| Diciembre | 21890370 | 386 | 2597461 |
| TOTAL (gal) | 223444580 | 4712 | 27848178 |
| | 251297470 | | |

ANEXO II. Distribución de gasolina en Ecuador y Pichincha para el sector transporte

| PROVINCIAS | GAS NATURAL | GASOLINAS |
|------------------------|--------------|---------------|
| REGIÓN SIERRA | 246 | 12.824 |
| AZUAY | 187,69 | 1.474 |
| BOLÍVAR | - | 234 |
| CAÑAR | - | 381 |
| CARCHI | - | 217 |
| CHIMBORAZO | 31,84 | 748 |
| COTOPAXI | - | 776 |
| IMBABURA | - | 699 |
| LOJA | - | 657 |
| PICHINCHA | 26,51 | 5.727 |
| STO. DGO. TSÁCHILAS | - | 779 |
| TUNGURAHUA | - | 1.134 |
| REGIÓN COSTA | 1.083 | 13.274 |
| EL ORO | 1.062,05 | 1.271 |
| ESMERALDAS | - | 1.009 |
| GUAYAS | 20,73 | 6.783 |
| LOS RÍOS | - | 1.017 |
| MANABÍ | - | 2.558 |
| SANTA ELENA | - | 637 |
| REGIÓN ORIENTAL | - | 1.159 |
| MORONA SANTIAGO | - | 213 |
| NAPO | - | 149 |
| ORELLANA | - | 236 |
| PASTAZA | - | 161 |
| SUCUMBÍOS | - | 273 |
| ZAMORA CHINCHIPE | - | 128 |
| REGIÓN INSULAR | - | 76 |
| GALÁPAGOS | - | 76 |
| TOTAL | 1.329 | 27.334 |

 **Tabla 4.6:** Sector transporte (kBEP)

| | 2012 | 2013 | 2014 | 2015 | 2016 | 2017 | 2018 | 2019 | 2020 | 2021 | 2022 |
|--------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| ELECTRICIDAD | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 6 | 7 | 7 | 7 | 7 | 7 |
| GLP | 82 | 73 | 86 | 55 | 50 | 52 | 44 | 50 | 54 | 95 | 213 |
| GASOLINAS | 15.650 | 16.443 | 17.269 | 18.882 | 19.673 | 20.520 | 20.854 | 21.345 | 17.005 | 22.608 | 23.200 |
| JET FUEL | 1.080 | 1.161 | 1.182 | 1.182 | 701 | 629 | 659 | 663 | 300 | 407 | 747 |

| Provincia | Gasolinas (kBEP) | Gasolina de transporte (kBEP) | Porcentaje (%) |
|-----------|------------------|-------------------------------|----------------|
| Pichincha | 5727 | 4860.85 | 0.21 |
| TOTAL | 27334 | 23200 | |

ANEXO III. Requerimiento energético y motriz de un vehículo de combustión interna

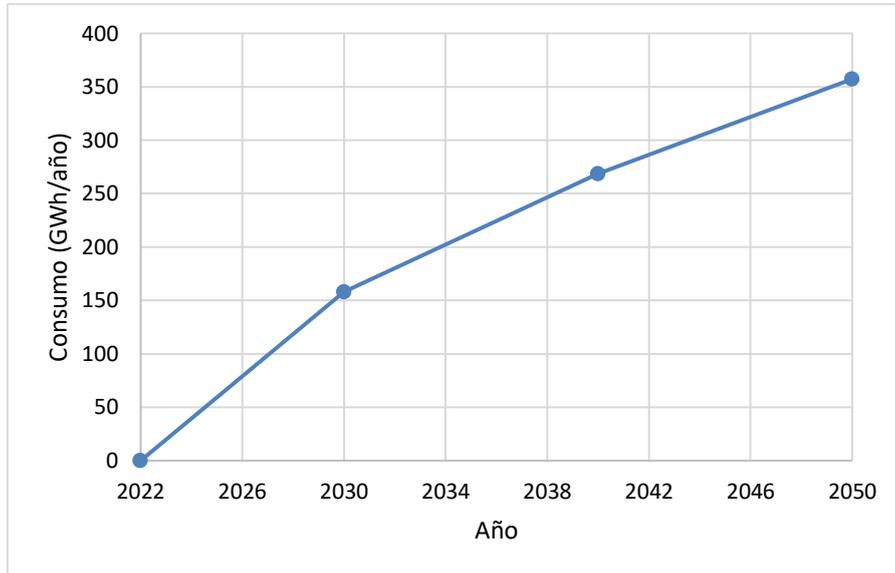
| Requerimiento energético (kWh) | Eficiencia del motor a combustión | Requerimiento motriz (kWh/km) | Kilómetros recorridos al año (km) | Requerimiento motriz (kWh/km) | Requerimiento motriz (kWh/km) |
|--------------------------------|-----------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|---|-------------------------------|
| 9274.959 | 0.225 | 2086.866 | 15000 | 0.14 | 0.12 |
| | | | 20000 | 0.10 | |
| | | | | Requerimiento eléctrico (kWh/km) | 0.5410 |

ANEXO IV. Requerimiento energético y motriz de un vehículo eléctrico

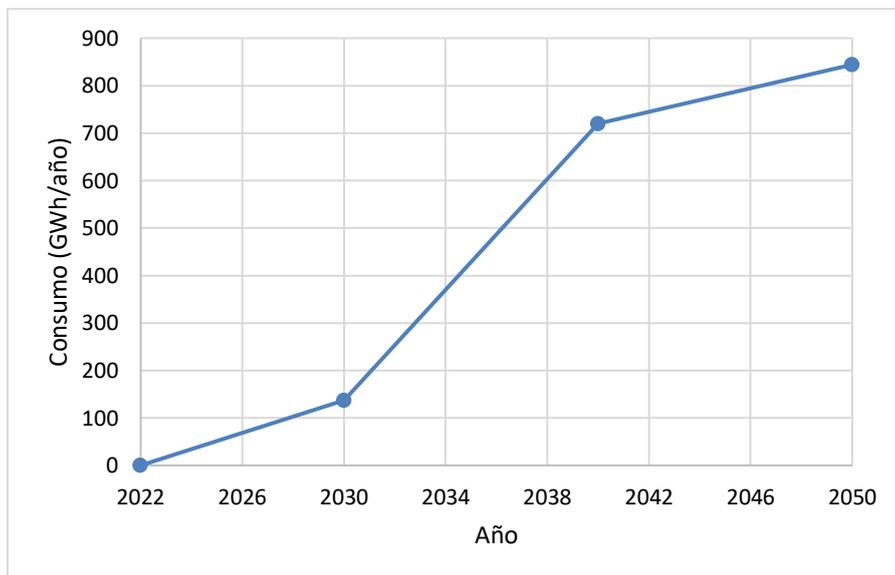
| | Venta de vehículos en Quito (%) | Requerimiento eléctrico (kWh/km) | Requerimiento eléctrico (kWh/km) |
|--------------------|---------------------------------|----------------------------------|----------------------------------|
| SUV | 0.285 | 0.174 | 0.164 |
| AUTOMÓVILES | 0.357 | 0.156 | |

| Requerimiento eléctrico (kWh/km) | Kilómetros recorridos al año (km) | Requerimiento energético (kWh) | Requerimiento energético (kWh) | Eficiencia de un motor eléctrico | Requerimiento motriz (kWh/km) |
|----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|----------------------------------|-------------------------------|
| 0.164 | 15000 | 2459.86 | 2869.84 | 0.85 | 0.14 |
| | 20000 | 3279.81 | | | |

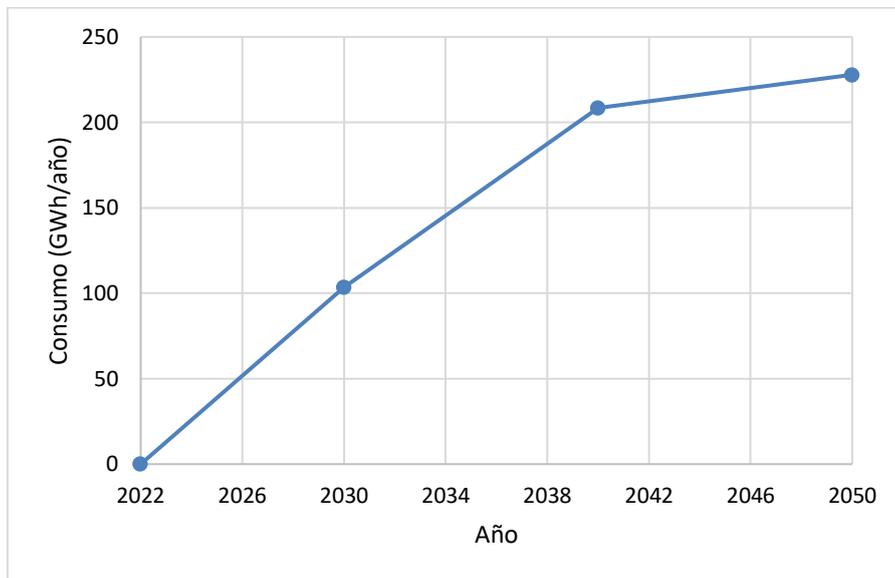
ANEXO V. Demanda de consumo de vehículos eléctricos en el DMQ para el año 2050 (S & A) – Escenario BAU - Pe



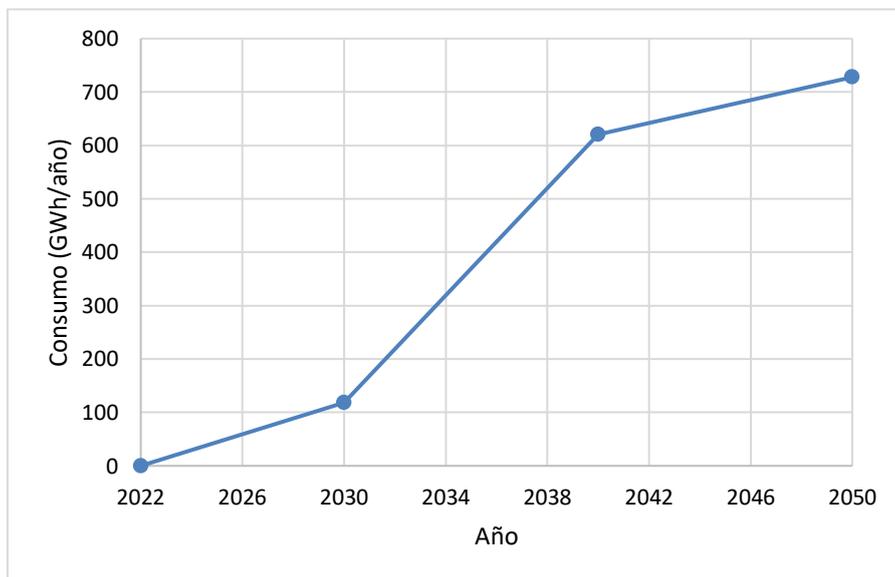
ANEXO VI. Demanda de consumo de vehículos eléctricos en el DMQ para el año 2050 (S & A) – Escenario Med - Op



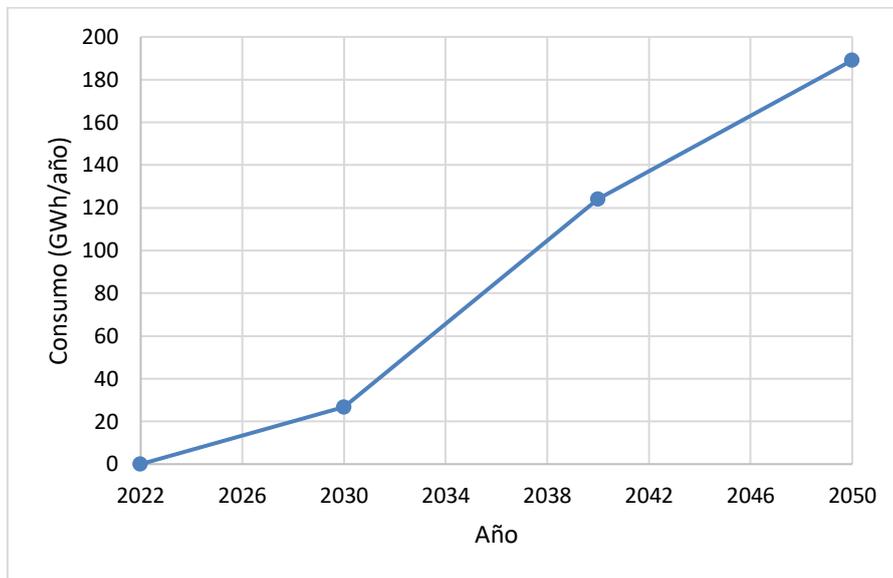
ANEXO VII. Demanda de consumo de vehículos eléctricos en el DMQ para el año 2050 (S & A) – Escenario Med - Pe



ANEXO VIII. Demanda de consumo de vehículos eléctricos en el DMQ para el año 2050 (S & A) – Escenario Min – Op



ANEXO IX. Demanda de consumo de vehículos eléctricos en el DMQ para el año 2050 (S & A) – Escenario Min - Pe



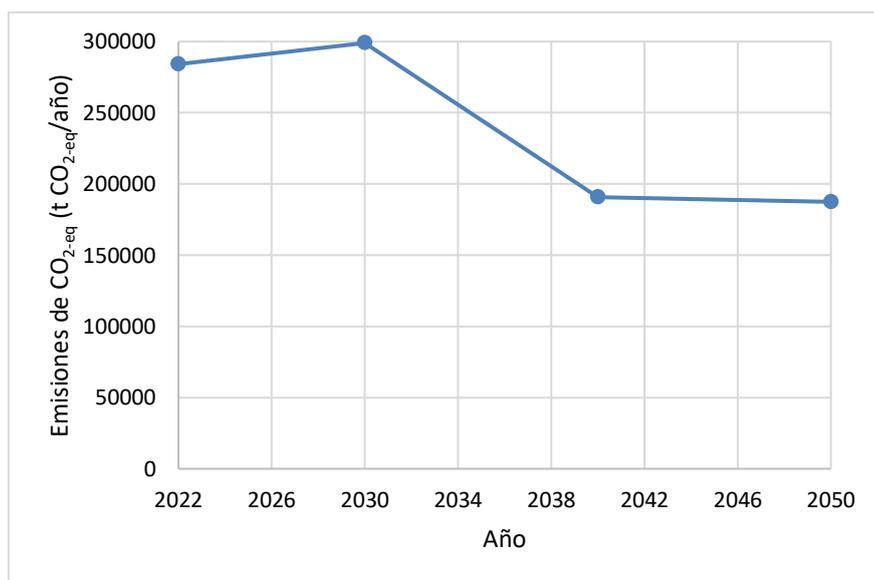
ANEXO X. Emisiones de CO_{2-eq} por vehículo de combustión interna

| Factor de emisión por el uso de electricidad (t CO _{2-eq} /MWh) | Requerimiento eléctrico (MWh/km) | Emisión por vehículo (t CO _{2-eq} /km) | Kilómetros recorridos al año (km) | Emisión por vehículo anual (t CO _{2-eq}) | Promedio (t CO _{2-eq}) |
|--|----------------------------------|---|-----------------------------------|--|----------------------------------|
| 0.092 | 0.000541 | 4.978E-05 | 15000 | 0.75 | 0.87 |
| | | | 20000 | 1.00 | |

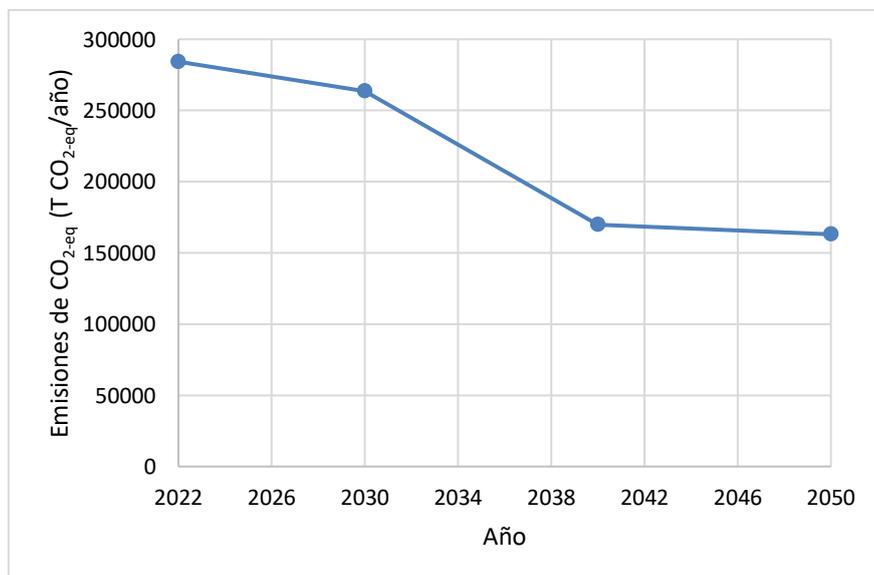
ANEXO XI. Emisiones de CO_{2-eq} de un vehículo eléctrico

| Factor de emisión por el uso de electricidad (t CO _{2-eq} /MWh) | Requerimiento eléctrico (MWh/km) | Emisión por vehículo (t CO _{2-eq} /km) | Kilómetros recorridos al año (km) | Emisión por vehículo anual (t CO _{2-eq}) | Promedio (t CO _{2-eq}) |
|--|----------------------------------|---|-----------------------------------|--|----------------------------------|
| 0.092 | 0.000164 | 1.509E-05 | 15000 | 0.23 | 0.26 |
| | | | 20000 | 3E-01 | |

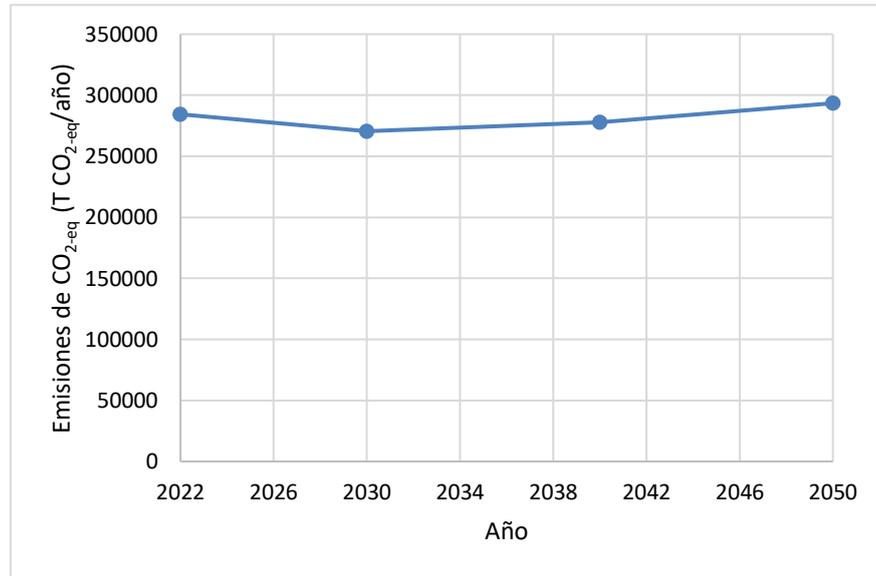
ANEXO XII. Emisiones de CO_{2-eq} generadas por vehículos tipo SUV y Automóviles en el DMQ para el año 2050 – Escenario BAU
– Op



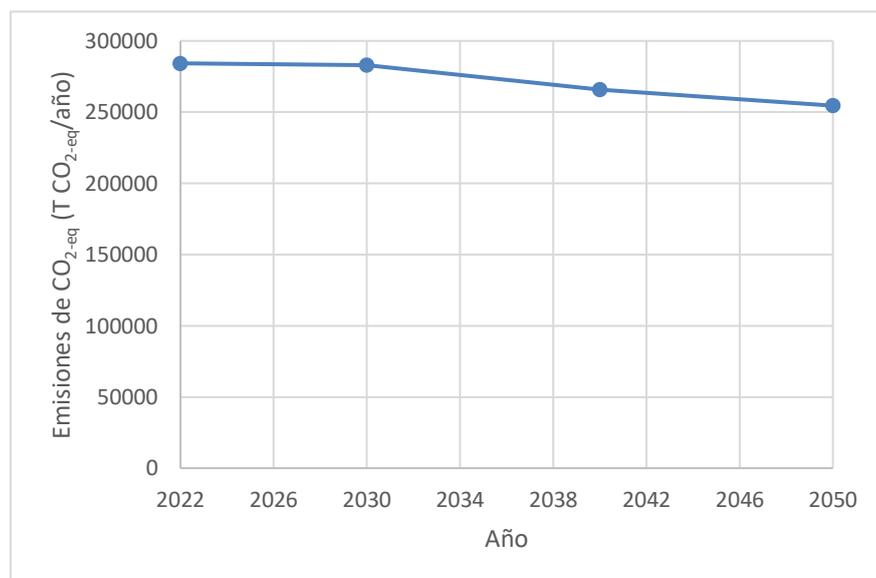
ANEXO XIII. Emisiones de CO_{2-eq} generadas por vehículos tipo SUV y Automóviles en el DMQ para el año 2050 – Escenario Med
– Op



ANEXO XIV. Emisiones de CO₂-eq generadas por vehículos tipo SUV y Automóviles en el DMQ para el año 2050 – Escenario Med – Pe



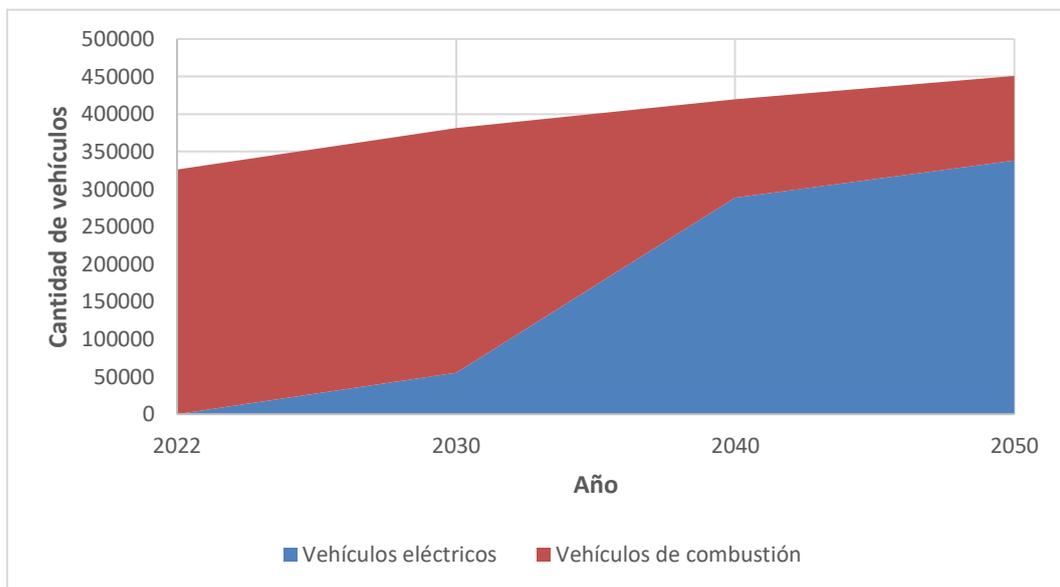
ANEXO XV. Emisiones de CO₂-eq generadas por vehículos tipo SUV y Automóviles en el DMQ para el año 2050 – Escenario Min – Pe



ANEXO XVI. Vehículos eléctricos y de combustión interna

Escenario BAU – Op

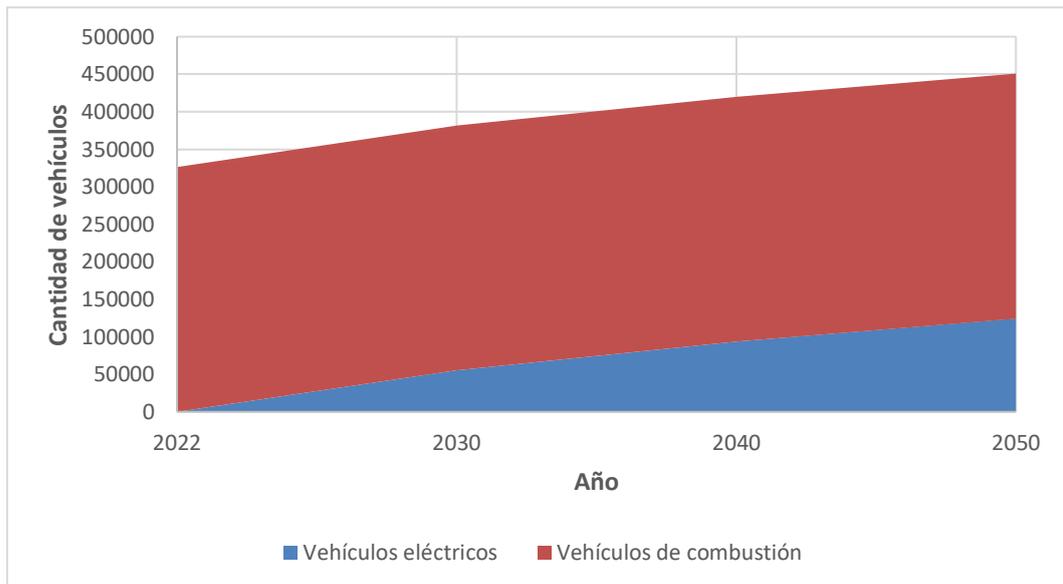
| Año | Reducción de emisiones | Vehículos eléctricos 100% | Vehículos eléctricos 75% | Vehículos combustión | Vehículos totales |
|------|------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------|-------------------|
| 2022 | 0 | 0 | 0 | 326339 | 326339 |
| 2030 | 146421 | 73148 | 54861 | 326597 | 381458 |
| 2040 | 769252 | 384297 | 288223 | 131766 | 419989 |
| 2050 | 902399 | 450814 | 338110 | 112703 | 450814 |



ANEXO XVII. Vehículos eléctricos y de combustión interna

Escenario BAU – Pe

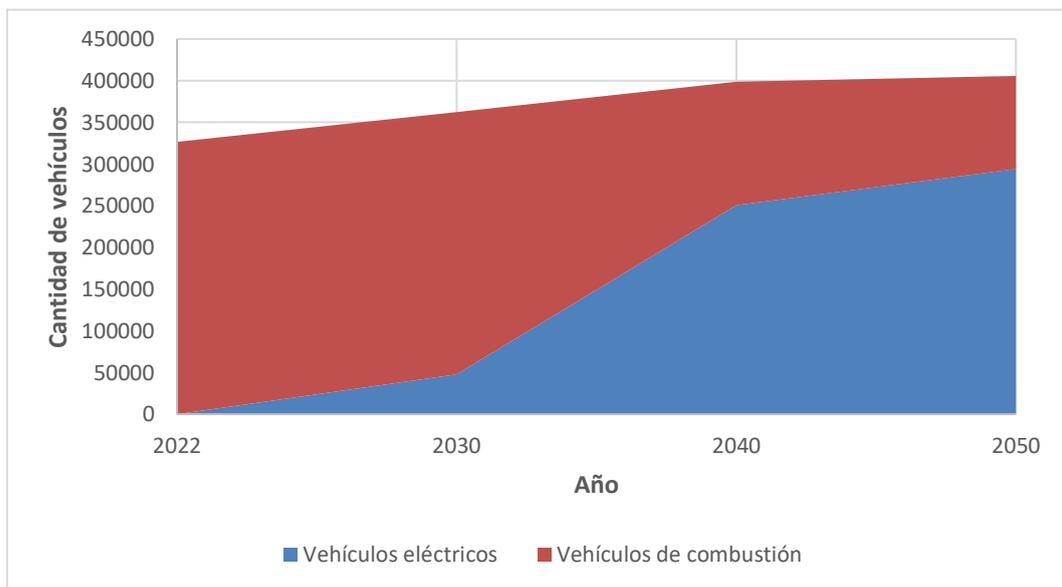
| Año | Reducción de emisiones | Vehículos eléctricos 100% | Vehículos eléctricos | Vehículos combustión | Vehículos totales |
|------|------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|-------------------|
| 2022 | 0 | 0 | 0 | 326339 | 326339 |
| 2030 | 146421 | 73148 | 55119 | 326339 | 381458 |
| 2040 | 769252 | 384297 | 93650 | 326339 | 419989 |
| 2050 | 902399 | 450814 | 124475 | 326339 | 450814 |



ANEXO XVIII. Vehículos eléctricos y de combustión interna

Escenario Med – Op

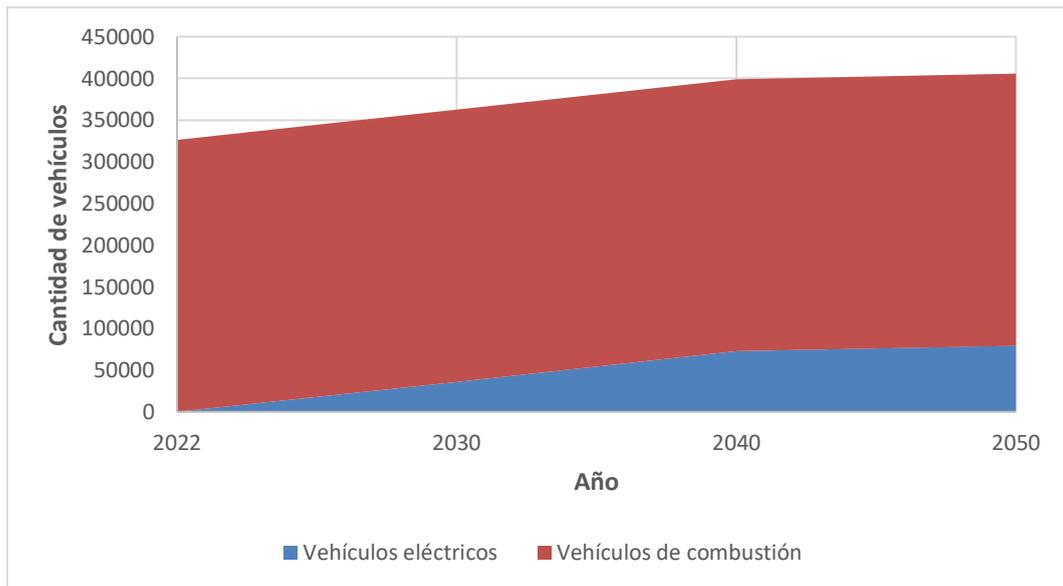
| Año | Reducción de emisiones | Vehículos eléctricos 100% | Vehículos eléctricos 75% | Vehículos combustión | Vehículos totales |
|------|------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------|-------------------|
| 2022 | 0 | 0 | 0 | 326339 | 326339 |
| 2030 | 146421 | 63639 | 47729 | 287954 | 335683 |
| 2040 | 769252 | 334339 | 250754 | 118836 | 369590 |
| 2050 | 902399 | 392208 | 294156 | 98052 | 392208 |



ANEXO XIX. Vehículos eléctricos y de combustión interna

Escenario Med – Pe

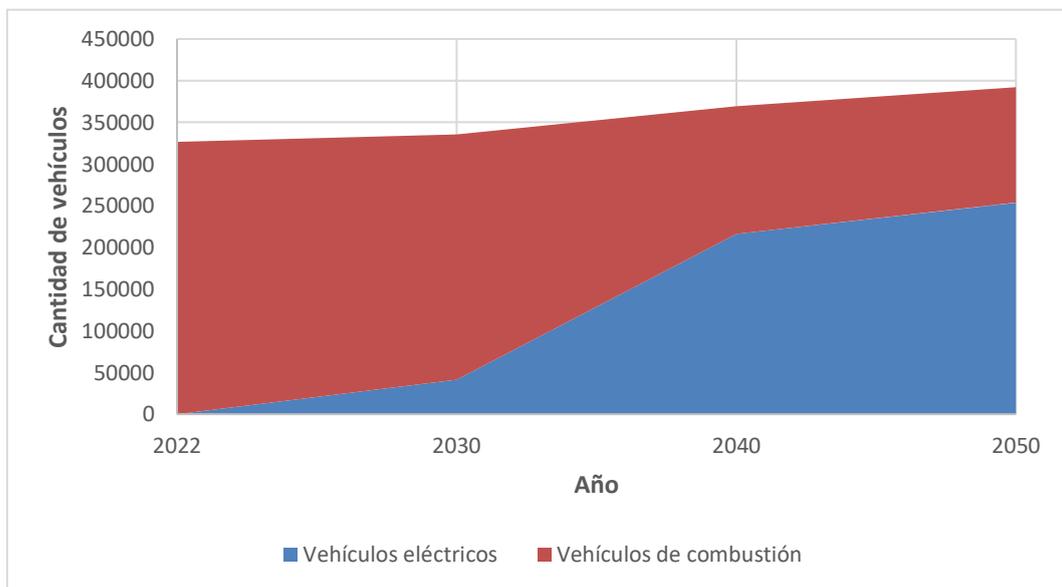
| Año | Reducción de emisiones | Vehículos eléctricos 100% | Vehículos eléctricos | Vehículos combustión | Vehículos totales |
|------|------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|-------------------|
| 2022 | 0 | 0 | 0 | 326339 | 326339 |
| 2030 | 146421 | 63639 | 9344 | 326339 | 335683 |
| 2040 | 769252 | 334339 | 43251 | 326339 | 369590 |
| 2050 | 902399 | 392208 | 65869 | 326339 | 392208 |



ANEXO XX. Vehículos eléctricos y de combustión interna

Escenario Min – Op

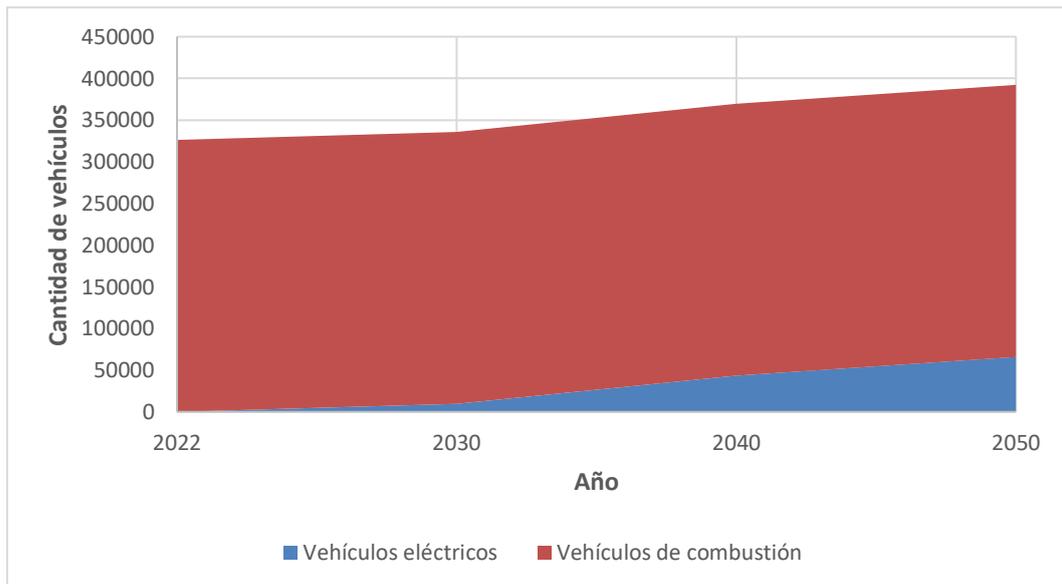
| Año | Reducción de emisiones | Vehículos eléctricos 100% | Vehículos eléctricos 75% | Vehículos combustión | Vehículos totales |
|------|------------------------|---------------------------|--------------------------|----------------------|-------------------|
| 2022 | 0 | 0 | 0 | 326339 | 326339 |
| 2030 | 146421 | 54861 | 41146 | 290406 | 331552 |
| 2040 | 769252 | 288223 | 216167 | 119028 | 335195 |
| 2050 | 902399 | 338110 | 253583 | 84528 | 338111 |



ANEXO XXI. Vehículos eléctricos y de combustión interna

Escenario Min – Pe

| Año | Reducción de emisiones | Vehículos eléctricos 100% | Vehículos eléctricos | Vehículos combustión | Vehículos totales |
|------|------------------------|---------------------------|----------------------|----------------------|-------------------|
| 2022 | 0 | 0 | 0 | 326339 | 326339 |
| 2030 | 146421 | 54861 | 5213 | 326339 | 331552 |
| 2040 | 769252 | 288223 | 8856 | 326339 | 335195 |
| 2050 | 902399 | 338110 | 11772 | 326339 | 338111 |



ANEXO XXII. Proyección de demanda de energía eléctrica en el DMQ por crecimiento demográfico

| Año | Demanda normal (GWh) | Población en Quito |
|------------|-----------------------------|---------------------------|
| 2022 | 2869.05 | 1763275 |
| 2030 | 3353.63 | 2061094 |
| 2040 | 3692.38 | 2269285 |
| 2050 | 3963.38 | 2435839 |

ANEXO XXIII. Proyección de demanda de energía eléctrica en el DMQ por crecimiento demográfico

| Año | Demanda con electromovilidad (GWh) |
|------------|---|
| 2022 | 2869.05 |
| 2030 | 3511.07 |
| 2040 | 4519.53 |
| 2050 | 4933.70 |