



Propuesta de alternativa de matriz energética del sector transporte a partir de la cuantificación de emisiones de “GEI” en el departamento de Boyacá

**Lizneira Galván Severiche
Diego Mauricio Gómez Muñoz
Paula Gisela González Parra
Brayan Arley Ramírez Hurtado**

Universidad EAN
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Industrial
Bogotá, Colombia
2021

Propuesta de alternativa de matriz energética del sector transporte a partir de la cuantificación de emisiones de “GEI” en el departamento de Boyacá

**Lizneira Galván Severiche
Diego Mauricio Gómez Muñoz
Paula Gisela González Parra
Brayan Arley Ramírez Hurtado**

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:
Ingeniero (a) Industrial

Director (a):

Prof. Dr. Jeffrey León-Pulido

Modalidad:

Proyecto de integración

Universidad EAN
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Industrial
Bogotá, Colombia

2021

Nota de aceptación

PhD. LEIDY NATALIA ZAPATA
RESTREPO
Firma del jurado

Prof. Dr. JEFFREY LEON-PULIDO
Firma del director del trabajo de grado

Bogotá D.C. 03 - Dic. 2021

Resumen

El transporte ha sido parte central de la historia económica de la humanidad al igual que lo ha sido la energía. Un sistema de transporte eficiente y sostenible es también sinónimo de desarrollo económico y bienestar, así como un termómetro cualificado sobre el grado de avance de una sociedad. El uso de combustibles fósiles como el carbón, petróleo y gas natural ha sido de gran ayuda para ese crecimiento económico y avance tecnológico durante siglos; sin embargo, ha causado graves daños al medio ambiente.

Es por esta razón que se ha vuelto necesaria la implementación de fuentes de energía renovables y alternativas, que sean más limpias y amigables con el planeta. Boyacá, es uno de los treinta y dos departamentos que hacen parte de Colombia, con grandes recursos naturales y condiciones geográficas, lo que hace que la implementación de otras estrategias de energías para el transporte sea viable. Teniendo en cuenta las nuevas tecnologías desarrolladas los últimos años para el sector transporte con el fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). El presente estudio evalúa posibilidades de incluir biocombustibles, transición hacia vehículos 100% eléctricos o el reemplazo de las flotas de transporte de funcionamiento diésel por híbridos, en relación con el factor de emisión asociado.

Estas alternativas están enfocadas al uso de biocombustible, energía eléctrica y una posible mezcla de los dos (híbridos). Para el caso estudiado se empleó la metodología de estimación de emisiones GEI propuesta por la norma ISO/TR 14069:2013 parte 1, también se estima que el consumo eléctrico es de 84,04 kWh/ruta para un bus híbrido. El valor de emisiones de CO₂ obtenido por el consumo de combustible para el bus híbrido se adhiere al valor obtenido de emisiones por consumo de energía para obtener el total de emisiones de CO₂ del bus híbrido. Con ello se obtiene un total emisiones de 178.21 kg de CO₂/trayecto para el caso de estudio empleando un bus de tecnología híbrida comparado contra las emisiones de un autobús convencional que genera alrededor de 220 kg de CO₂/trayecto.

Palabras clave: biocombustible, gases de efecto invernadero, matriz energética, vehículo híbrido.

Abstract

Transportation has been as central to the economic history of mankind as energy has been. An efficient and sustainable transportation system is also synonymous with economic development and well-being, as well as a qualified thermometer of a society's degree of advancement. The use of fossil fuels such as coal, oil and natural gas has been a boon to economic growth and technological progress for centuries; however, it has caused serious damage to the environment.

It is for this reason that it has become necessary to implement renewable and alternative energy sources, which are cleaner and friendlier to the planet. Boyacá is one of the thirty-two departments that are part of Colombia, with great natural resources and geographical conditions, which makes the implementation of other energy strategies for transportation viable. Taking into account the new technologies developed in recent years for the transportation sector in order to reduce greenhouse gas (GHG) emissions. The present study evaluates possibilities of including biofuels, transition to 100% electric vehicles or the replacement of diesel-operated transport fleets with hybrids, in relation to the associated emission factor.

These alternatives are focused on the use of biofuel, electric energy and a possible mixture of the two (hybrids). For the case studied, the GHG emissions estimation methodology proposed by ISO/TR 14069:2013 part 1 was used, also the electric consumption is estimated to be 84.04 kWh/route for a hybrid bus. The CO₂ emissions value obtained for fuel consumption for the hybrid bus is added to the obtained value of emissions from energy consumption to obtain the total CO₂ emissions of the hybrid bus. This gives a total emissions of 178.21 kg CO₂/trip for the case study using a hybrid technology bus compared to the emissions of a conventional bus that generates about 220 kg CO₂/trip.

Keywords: biofuel, greenhouse gases, energy matrix, hybrid vehicle.

Tabla de Contenido

| | |
|--|-----------|
| Lista de Figuras | 7 |
| Lista de tablas | 8 |
| CAPITULO 1. INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO | 9 |
| 1.1 INTRODUCCIÓN | 9 |
| 1.2 OBJETIVOS | 11 |
| 1.3 JUSTIFICACIÓN Y ALCANCE | 11 |
| 1.4 ESTRUCTURA DEL PROYECTO | 12 |
| CAPÍTULO 2. ESTADO DEL ARTE | 13 |
| 2.1 SECTOR DE TRANSPORTE EN COLOMBIA | 13 |
| 2.2 TRANSPORTE DE PASAJEROS | 14 |
| 2.3 TAMAÑO DE MERCADO | 15 |
| 2.4 PARQUE AUTOMOTOR | 19 |
| 2.5 DESCRIPCIÓN DEL VEHÍCULO | 19 |
| 2.6 METODOLOGÍA PARA EL CÁLCULO DE GEI | 22 |
| 2.7 MATRIZ ENERGÉTICA | 23 |
| 2.8 NORMATIVIDAD | 29 |
| 2.9 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO | 32 |
| CAPÍTULO 3. METODOLOGÍA | 33 |
| 3.1 METODOLOGÍA DEL PROYECTO | 33 |
| 3.2 DIAGNÓSTICO CASO DE ESTUDIO | 33 |
| 3.3 IDENTIFICACIÓN FUENTES DE ENERGÍA | 34 |
| 3.4 HERRAMIENTAS DE CÁLCULO PARA LAS EMISIONES DE GEI | 41 |
| 3.5 CONCLUSIONES DEL CAPÍTULO | 44 |
| CAPÍTULO 4. ANÁLISIS Y RESULTADOS | 46 |
| 4.1 CASO DE ESTUDIO | 46 |
| 4.2 DETERMINACIÓN DE LAS EMISIONES DE GEI | 47 |
| 4.3 COSTOS DE COMBUSTIBLES Y OTROS COSTOS ASOCIADOS | 51 |
| 4.4 COMPARACIÓN DE ALTERNATIVAS DE BUSES | 54 |
| CAPÍTULO 5. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 56 |
| 5.1 CONCLUSIONES | 56 |
| 5.2 RECOMENDACIONES Y ESTUDIOS FUTUROS | 57 |
| CAPÍTULO 6. REFERENCIAS | 58 |
| CAPÍTULO 7. ANEXOS | 63 |

Lista de figuras

| | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| Figura 1. Pasajeros transportados en el municipio de Tunja, Boyacá entre los periodos 2018-I y 2021-I | 18 |
| Figura 2. Spirit 2 para la empresa Bolivariano | 21 |
| Figura 3. Consumo final de energía Colombia 2018 | 24 |
| Figura 4. Canasta energética del sector transporte | 25 |
| Figura 5. Caracterización energética y modal del sector transporte..... | 25 |
| Figura 6. Diagrama de Sankey para el transporte por carretera (PetaJulios)..... | 26 |
| Figura 7. Capacidad de generación eléctrica..... | 27 |
| Figura 8. Transformación en términos de vehículos. | 28 |
| Figura 9. Proyección de la flota para transporte urbano de pasajeros | 28 |
| Figura 10. Potencial de reemplazo y beneficios máximos esperados | 35 |
| Figura 11. Resultados pruebas de consumo de combustible y energía C40-CCI | 36 |
| Figura 12. Costos del ciclo de vida de vehículos en Bogotá | 36 |
| Figura 13. Función del sistema de un bus híbrido en paralelo | 38 |
| Figura 14. Resumen de alcances y emisiones..... | 42 |
| Figura 15. Estimación de emisiones de GEI por consumo de combustible en cada trayecto del Dpto. de Boyacá | 48 |
| Figura 16. Emisiones de CO ₂ por tipo de vehículo para el trayecto del caso de estudio. 50 | |
| Figura 17. Emisiones totales de CO ₂ por tipo de vehículo para el trayecto del caso de estudio | 51 |
| Figura 18. Línea de base energética | 52 |
| Figura 19. Comparación de contaminantes atmosféricos y costo de combustible entre un bus diésel y un bus híbrido. | 55 |
| Figura 20. Ficha técnica O500RS 1836/30 extraída de (Mercedes-Benz, 2020)..... | 63 |

Lista de tablas

| | <u>Pág.</u> |
|--|-------------|
| Tabla 1. Especificaciones ruta Sogamoso - Bogotá | 16 |
| Tabla 2. Características del vehículo SPIRIT 2..... | 21 |
| Tabla 3. Principales aspectos ambientales, financieros y operacionales de los buses híbridos..... | 39 |
| Tabla 4. Factores de emisión y consumo por tipo de combustible o costo de este | 43 |
| Tabla 5. Información técnica trayectos flota Alfa transportes | 46 |
| Tabla 6. Rendimiento buses Londres 2013 (Todos de dos pisos Euro V) | 49 |
| Tabla 7. Rendimiento Bus Híbrido y Bus Convencional de 12m Euro V en Boyacá | 49 |
| Tabla 8. Datos línea base | 52 |
| Tabla 9. Plan de acción | 53 |
| Tabla 10. Ahorro plan de acción | 53 |
| Tabla 11. Características de los buses híbridos eléctricos..... | 54 |

Capítulo 1. Introducción y objetivos del proyecto

1.1 Introducción

El uso de combustibles fósiles y la producción de cemento son en el mundo, de lejos, la más importante fuente generadora de GEI, con un aporte cercano al 68%. Estas dos actividades han liberado 380.625 g de carbono a la atmósfera en el año 2011, en comparación con lo emitido por deforestación y otros cambios de uso del suelo (Castañeda, 2017).

Si la proporción actual de uso de los combustibles fósiles se mantiene y la demanda energética se duplica para el 2050, las emisiones superarán enormemente la cantidad de carbono que se puede emitir si se ha de limitar el aumento medio de temperatura a nivel mundial a 2°C. El nivel de emisiones tendría consecuencias climáticas desastrosas para el planeta. Los retos clave para la gestión es aplicar los mejores arreglos con el fin de minimizar las fugas y las emisiones de GEI. Esto proporcionará beneficios económicos a la vez que disminuye los efectos sobre la salud, aumenta la seguridad y reduce el calentamiento de la Tierra. Los múltiples beneficios de gestionar las emisiones de metano son convincentes, pero todavía queda mucho por hacer para demostrar un progreso adecuado en esta área. (Andrade-Castañeda, Arteaga-Céspedes, & Segura-Madrugal, 2017).

Por tanto, en este trabajo se busca cuantificar las emisiones de GEI generadas por el uso de combustibles fósiles en los buses que hacen el recorrido de Sogamoso a Bogotá, con el fin de proponer una alternativa de transformación en la tecnología y en la cultura del transporte para reducir el uso de estos combustibles por otro como el biodiesel o implementar tecnologías de buses eléctricos o híbridos y así contribuir con la disminución de estas emisiones.

A continuación, serán estudiados los elementos que arrojen evidencias cuantitativas y/o cualitativas del grado de afectación de las emisiones de CO₂ provenientes de los buses que transitan en el territorio colombiano, específicamente en la ruta Sogamoso-Bogotá, y

así implementar acciones de mitigación, como el cambio de tecnología automotriz en los buses tradicionales a motores con funcionamiento por medio del biocombustible biodiesel, sistema eléctrico o híbridos.

1.1.1 Definición del problema

La contaminación atmosférica en los principales corredores industriales del departamento de Boyacá ha sido uno de los principales factores predominantes de la contaminación del aire, municipios como Sogamoso donde se desarrollan actividades económicas como la explotación de minas de caliza, arcillas, carbón, mármol, y manufactura de las mismas, además de actividades comerciales, han generado efectos negativos sobre la salud y el bienestar de las comunidades, por ello es de gran importancia realizar estudios que permitan observar y conocer el estado y comportamiento de la calidad del aire (Gobernación de Boyacá, 2020).

Boyacá es uno de los departamentos más contaminados del país, según análisis adelantados por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. En febrero de 2019 se produjeron alertas naranjas y amarilla por la contaminación del aire. Según monitoreos del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Estos datos muestran que el mayor problema son las fuentes móviles con el 80% y el 20% de las industrias. Esta afirmación se ratifica con datos entregados por la CAR de Cundinamarca, que tiene jurisdicción en el occidente boyacense, y que ha lanzado una alerta para Ráquira, donde en el 2016 se alcanzaron los niveles más altos de contaminación del país. (Dias, 2019)

Es por ello, que estudiar las posibilidades de integración de una matriz energética en el sector de transporte de pasajeros en Boyacá, puntualmente para este estudio en la ruta Sogamoso-Bogotá a partir de la cuantificación de las emisiones de gases de efecto invernadero generado por un vehículo automotor convencional y la mejora que representaría para este departamento, el cambio de este tipo de tecnología es un objetivo primordial.

1.1.2 Formulación de la pregunta de investigación.

¿Es posible mejorar la matriz energética del sector transporte de pasajeros por medio del estudio y cálculo de emisiones de GEI de la ruta Sogamoso - Bogotá?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo general

Estudiar las posibilidades de integración de la matriz energética en el sector de transporte de pasajeros, a partir del entendimiento de las emisiones de gases de efecto invernadero – GEI como análisis del impacto generado por vehículo automotor de carga en el Departamento de Boyacá.

1.2.2 Objetivos específicos

- Identificar el tamaño del parque automotor, especificando el tipo, clase, características y atributos de vehículo más usado en Colombia.
- Desarrollar un escenario de análisis del consumo de GEI para un vehículo de transporte de carga en corredores viales de Boyacá.
- Calcular las emisiones y condiciones del entorno para un vehículo de transporte de pasajeros.
- Valorar las posibilidades de integración de la matriz energética como alternativa del sector de transporte de pasajeros.

1.3 Justificación y alcance

Mediante la implementación de mejora energética en la organización se pretende dar eficiencia al consumo y reducir las emisiones de GEI, específicamente en la ruta Sogamoso - Bogotá que cubre el departamento de Boyacá con el vehículo convencional a diésel operado en la actualidad. La fuente principal de energía es el combustible diésel el cual por su volatilidad en los precios actuales del mercado genera un alto costo para la organización y un impacto negativo para el medio ambiente, debido a sus altas emisiones.

En la actualidad, Colombia es uno de los países con los precios más altos en combustibles de combustión interna, por ello se realiza una investigación con el fin de saber cuál es el sistema más efectivo en la eficiencia energética, entre los sistemas seleccionados se encuentra; buses 100% eléctricos, biodiesel, y buses híbridos. Las largas distancias son unos de los principales retos en el abastecimiento de energía limpia, para ello, debe evaluarse cuál es el más eficiente en cuanto a consumo, costos y cuidado del medio ambiente.

1.4 Estructura del proyecto

El primer capítulo se ha enfocado en dar una introducción grosso modo de la propuesta que se realiza en la matriz energética para el sector transporte en el departamento de Boyacá, Colombia, con sus respectivos objetivos y la justificación que nace de la demanda de nuevas alternativas de transporte limpias en el mundo. El segundo capítulo está enfocado en conocer el sector transporte en Colombia y las diferentes variables que están implícitas en él, también se hace un análisis de la temática relacionada a los automóviles, sus características, la matriz energética del caso estudio y la normatividad aplicable al sector.

Para el tercer capítulo se determina la metodología de desarrollo del proyecto, el diagnóstico e identificación de los elementos que interfieren en la matriz energética del caso de estudio y las respectivas herramientas de cálculo. Por último, el capítulo cuatro está centrados en realizar un análisis de los resultados obtenidos en el análisis del caso de estudio y con el capítulo 5 se presentan las conclusiones que se obtuvieron en este estudio junto con recomendaciones futuras para el sector transporte en Colombia.

Capítulo 2. Estado del Arte

2.1 Sector de transporte en Colombia

En Colombia, la regulación del sistema de transporte, en general, comienza en 1996 a través de la Ley 336, la cual ha sido reformada paulatinamente en virtud de las modificaciones a la estructura del Estado colombiano derivadas de la Constitución Política de 1991 (como la Ley 489 de 1998 y la Ley 790 de 2002). Específicamente, ha habido una reforma con la creación del Ministerio de Transporte, cuyo enfoque misional es garantizar el desarrollo y mejoramiento del transporte, tránsito y su infraestructura, de manera integral, competitiva y segura (Rodríguez-Alvarez & Pérez-Martínez, 2016).

El sector del transporte intermunicipal de pasajeros en Colombia ha contribuido al desarrollo económico y social de las regiones en función de las necesidades de la población y del sector empresarial. Igualmente, el sector se organiza a partir de las terminales de transporte en las ciudades, las cuales facilitan la operación del servicio (Rodríguez-Alvarez & Pérez-Martínez, 2016). El sector atraviesa, no obstante, una serie de dificultades derivadas de situaciones como la intensificación de la competencia del transporte aéreo, la creciente compra de vehículos por parte de las familias y el rezago en la infraestructura vial, cuyo indicador en obras civiles relacionadas con carreteras en 2013-I solo se incrementó el 1,4%. Sin embargo, el sector logra salir adelante por la diversificación en sus servicios, por ejemplo, como corresponsales no bancarios, transporte de mercancía y servicios de comunicación en sus puntos de venta. Otros logros de las empresas del sector están relacionados con el cubrimiento de proyectos en los que el transporte aéreo es muy costoso o inexistente (Rodríguez-Alvarez & Pérez-Martínez, 2016).

Con el crecimiento económico previsto, Colombia va a experimentar, aunque en una escala mucho más modesta, lo que ha venido pasando en forma dramática en China y en la India en los últimos años: al aumentar sus ingresos, una porción creciente de su población ya no tendrá que dedicarlos enteramente a subsistir, por lo que generará una cierta capacidad de ahorro que la liberará gradualmente de las garras de la pobreza (Acevedo, 2014).

Por otro lado, desde el 25 de marzo de 2020, día de inicio del Aislamiento Preventivo Obligatorio decretado por Gobierno nacional, hasta el 8 de junio, se movilizaron 321.026 pasajeros que llevaron a cabo su desplazamiento bajo las excepciones establecidas por el Gobierno nacional, en 90.411 vehículos despachados. Para este mismo periodo, 36 terminales de transporte terrestre han reportado movimiento de pasajeros: Cali, Medellín norte, Armenia, Pereira, Bogotá norte, Bogotá salitre, Medellín sur, Neiva, Florencia, Valledupar, Tuluá, Ibagué, Buga, Manizales, Barranquilla, Villavicencio, Pitalito, Bucaramanga, Cauca, Pasto, Garzón, Cúcuta, Melgar, Santa Marta, Bogotá sur, Cartagena, Ipiales, Duitama, La Plata, Montería, Ocaña, Honda, Aguazul, Maicao, San Gil y Villagarzón. Cali fue la terminal que más ha movilizado usuarios, con 91.977 en 30.334 despachos. (Ministerio de Transporte, 2020)

El año 2020 sin duda, fue significativo para el servicio público de transporte terrestre automotor de pasajeros por carretera (transporte intermunicipal) y las empresas administradoras y operadoras de terminales de transporte terrestre automotor (terminales de transporte), ya que se encontraban en un escenario de disminución de la demanda de servicios como consecuencia de la pandemia por Covid-19. Los pasajeros dejaron de utilizar los servicios de las empresas de transporte por las medidas de restricción a la movilidad que había ordenado el gobierno nacional, la falta de confianza y la crisis económica; por esta misma razón las terminales de transporte despachaban menos vehículos. Todo lo anterior afectando los ingresos y amenazando la sostenibilidad de las compañías. (Consejo Superior del Transporte, 2021)

2.2 Transporte de pasajeros

El transporte público de pasajeros ocupa un papel importante en las grandes ciudades; teniendo en cuenta que la población se encuentra en constante aumento. Hoy en día, desde la perspectiva de los viajeros, existen muchas alternativas (modos de transporte) para movilizarse al interior de una ciudad. La elección de qué modo elegir puede estar basada en muchos criterios, tales como: los costos, comodidad, distancia, tiempos de viaje, etc. Alrededor de este tema, muchas ciudades optan por planes de desarrollo que incluyan estrategias de transporte público eficientes, con bajos impactos ambientales y que sea atractivo para los usuarios (Serna-Uran, García-Castrillón, & Flórez-Londoño, 2016).

En la actualidad en Colombia existen un total de 538 empresas habilitadas para prestar el servicio público de Transporte Terrestre Automotor de Pasajeros por carretera. Estas empresas acceden al mercado a través de la habilitación que concede el Ministerio de Transporte para prestar el servicio en una ruta determinada, y bajo un régimen de libertad tarifaria con precios mínimos establecidos periódicamente por el Ministerio de Transporte. Cundinamarca es el departamento con mayor número de empresas (16.3%), incluido Bogotá. Antioquia representa el 15.2% de las empresas del país (ANDI, 2020).

Las empresas de transporte habilitadas bajo la modalidad de servicio intermunicipal son vigiladas subjetiva y objetivamente por la Superintendencia de Puertos y Transporte, su actividad se encuentra regulada por los postulados generales de la Ley 105 de 1993 y Ley 336 de 1996. Los requisitos de acceso al servicio y operación han sido definidos en el Decreto 1079 de 2015 (ANDI, 2020).

La flota vehicular de transporte intermunicipal es de aproximadamente 38 mil vehículos, de los cuales el 48% corresponde a autobuses con capacidad para 32 o más pasajeros. En 2016, el transporte terrestre intermunicipal de pasajeros por carretera movilizó un total de 189.953 millones de pasajeros. (ANDI, 2020)

2.3 Tamaño de mercado

2.3.1 Sector transporte en Colombia

Transporte interurbano e intermunicipal de pasajeros

Actualmente en Colombia existen un total de 538 empresas habilitadas para prestar el servicio público de Transporte Terrestre Automotor de Pasajeros por carretera. Estas empresas acceden al mercado a través de la habilitación que concede el Ministerio de Transporte para prestar el servicio en una ruta determinada, y bajo un régimen de libertad tarifaria con precios mínimos establecidos periódicamente por el Ministerio de Transporte. Cundinamarca es el departamento con mayor número de empresas (16.3%), incluido Bogotá. Antioquia representa el (15.2%) de las empresas del país.

Las empresas de transporte habilitadas bajo la modalidad de servicio intermunicipal son vigiladas subjetiva y objetivamente por la Superintendencia de Puertos y Transporte, su actividad se encuentra regulada por los postulados generales de la Ley 105 de 1993 y Ley 336 de 1996. La flota vehicular de transporte intermunicipal es de aproximadamente 38 mil vehículos, de los cuales el 48% corresponde a autobuses con capacidad para 32 o más pasajeros. (ANDI, 2020)

Movimiento de Pasajeros - Modo Terrestre

Durante el 2019 se movilizaron 136.183.088 pasajeros por las carreteras del país, que en comparación con el año 2018 presentó una disminución del 0,7% de los pasajeros movilizados lo que representa 1.001.175 de pasajeros menos en el 2019. En la tabla 1 y 2 se resumen las características de la ruta Sogamoso – Bogotá sin distinción de la empresa prestado del servicio de transporte.

Tabla 1. Especificaciones ruta Sogamoso - Bogotá

| RUTA | Sogamoso- Bogotá |
|---|-------------------------|
| Vehículo | Bus |
| Consumo de combustible | 0,0986 |
| Duración aproximada del viaje | 3h 20min |
| Ruta en kilómetros | 456 |
| Consumo de combustible por viaje en galones | 44,962 |
| Número de viajes por día | 1 |
| Número de viajes por mes | 30 |

Fuente: Elaboración propia a partir de datos del (Ministerio de Transporte, 2020)

2.3.2 Sector transporte en el departamento de Boyacá

Es importante destacar que, Boyacá se ha caracterizado por ser un departamento predominantemente agrícola, cuya economía depende de la variedad de recursos naturales y minerales existentes, debido a la presencia de diferentes pisos bioclimáticos que han permitido su aprovechamiento y explotación de recursos naturales y mineros. (Arias Gómez & Antosová, 2015)

Históricamente el escenario económico boyacense era favorable para el establecimiento del transporte automotor, tanto de pasajeros como de carga, en la medida que la demanda propiciada por la producción agrícola local, la creciente expansión de la industria y, por ende, de mano de obra vinculada a esta, y el acceso carretero hacia zonas apartadas de la realidad regional incrementaron los niveles de migración del campo a los principales centros urbanos, lo cual permitió el aumento paulatino de empresas y rutas adscritas a la operatividad de dicha actividad (Camargo Bonilla, 2018).

Además de ser Boyacá el segundo departamento con mayor densidad de red vial para 1960, en razón a la insuficiencia que presentaba en materia de medios de comunicación, pues al interior de su territorio solo funcionaban dos líneas férreas, una que conectaba de forma directa a Bogotá con sus tres ciudades principales (Duitama, Tunja y Sogamoso), y otra que se dirigía hacia el departamento de Santander y cuyo trayecto cubría únicamente a su capital (Tunja). Tales circunstancias favorecieron y fomentaron el uso de buses, chivas y camionetas como sistema de movilidad dominante desde los años cincuenta del siglo XX en casi todas sus provincias. La iniciativa del transporte de pasajeros en Boyacá surgió del interés de un grupo considerable de empresarios, quienes a través de pequeñas y medianas fortunas compraron algunos vehículos o aportaron cierto capital al haber social de cada una de sus compañías. (Pachón & Ramírez, 2016)

Cabe señalar que, tanto las condiciones socioeconómicas de Boyacá como el estado de su red de carreteras justificaron este trabajo a nivel espacial; sin embargo, la selección del transporte de pasajeros como objeto de estudio responde a la escasez de trabajos que lo aborden en cuanto al orden empresarial y a su organización interna. A pesar de ser un sector significativo para la historia económica nacional, hace falta reflejar el vínculo directo del transporte con la infraestructura vial, las obras públicas del país y la incidencia de la política gubernamental para su desenvolvimiento. (Camargo Bonilla, 2018)

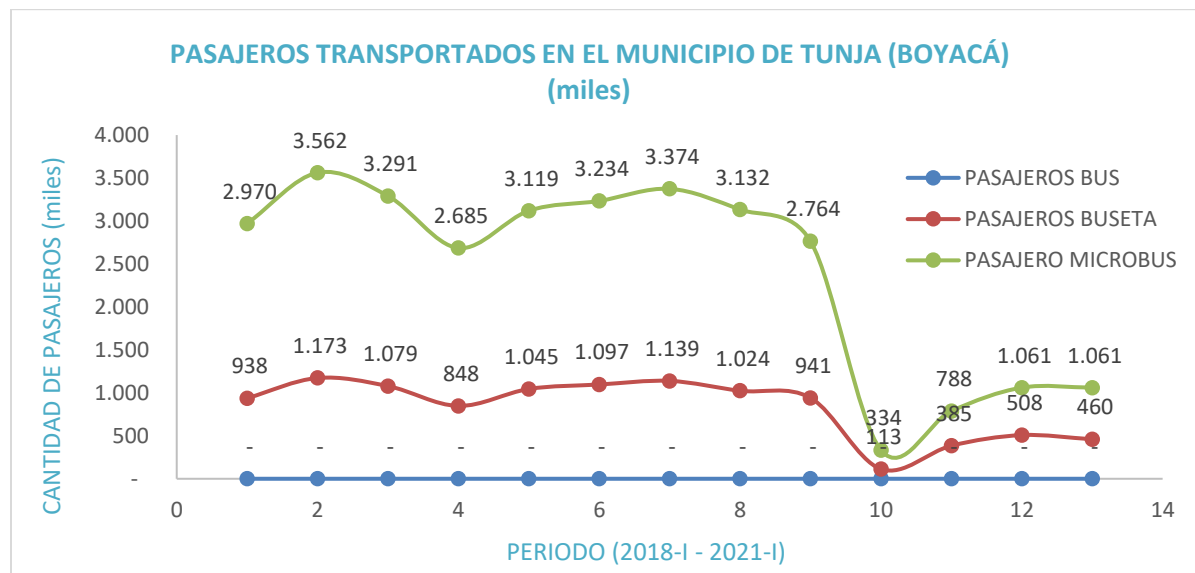
Para esta investigación se analiza la ruta Sogamoso-Bogotá por el simple hecho de que históricamente la actividad transportadora de carga y pasajeros, a través de camiones, buses y automóviles dada la insuficiencia de medios de comunicación y el precario sistema férreo centrado en la línea directa Bogotá-Sogamoso, se convirtió en un sector atractivo para comerciantes, agricultores y algunas personas de negocios que aprovechaban el

crecimiento de la precaria infraestructura vial y suplían la demanda existente para un gremio de tardío desarrollo (Camargo Bonilla, 2018).

Hoy en día el sector transporte en Boyacá es uno de los más deseados teniendo en cuenta también que la red vial del departamento de Boyacá es una de las de mayor longitud en el país, administrada por diferentes entes territoriales, y caracterizada según sus especificaciones y servicio como son: primarias, secundarias y terciarias (Gobernación de Boyacá, 2017).

Según datos del Departamento Administrativo Nacional de Estadística, (DANE, 2021), para los periodos comprendidos entre 2018-I y 2021-I (periodicidad trimestral) se registró la siguiente cantidad de pasajeros movilizados en el municipio de Tunja (Figura 1), capital del departamento de Boyacá.

Figura 1. Pasajeros transportados en el municipio de Tunja, Boyacá entre los periodos 2018-I y 2021-I



Fuente: Adaptado de (DANE, 2021)

Cabe resaltar la demanda continua del sistema de transporte en el municipio hacia otros lugares aledaños al departamento, exceptuando los periodos de cuarentenas decretadas por el gobierno a causa de la pandemia COVID-19, donde es evidente la disminución en la demanda de este servicio, por lo cual tomar datos posteriores a este periodo ocasionaría un sesgo en la información que se obtenga.

2.4 Parque automotor

- **Construcción y funcionamiento de la terminal de Duitama**

La nueva terminal de transportes de Duitama tuvo una inversión cercana a los 20.000 millones de pesos y es una de las construcciones más modernas del oriente colombiano. Cuenta con salas de espera; 65 locales comerciales, entre ellos entidades financieras, cajeros automáticos, una plazoleta de comidas; zona de encomiendas; vías exclusivas para la circulación de busetas y taxis de servicio urbano oratorio; un área administrativa; llegada y zona vip; así como consultorios para medicina preventiva y alcoholimetría para conductores. (El Tiempo, 2015)

- **Construcción Nueva Terminal de Tunja**

Actualmente, se encuentra terminada la construcción la Nueva Terminal de Transportes de la ciudad de Tunja, después de una larga espera en la cual la infraestructura actual fue considerada una de las más atrasadas de Colombia. El predio donde se levantó la terminal tiene una extensión aproximada de 59.000 metros cuadrados. El área construida cubierta tiene dos niveles: un nivel inferior de 4.759 metros cuadrados y uno superior de 5.718. Las áreas operacionales exteriores tienen 37.871 metros cuadrados. Este inmueble dispondrá además de accesos peatonales, una sala de abordaje para 2.000 pasajeros cada hora, área de taquillas y de administración, locales comerciales, baterías de baños, plazoleta de comidas, amplias zonas áreas verdes y bahías operacionales. (Gobernación de Boyacá, 2013)

- **Modernización de Parque automotor:**

A partir del 2013, dos reconocidas empresas del sector del transporte intermunicipal de pasajeros han adquirido buses de segundo piso, con capacidad para 60 pasajeros, especialmente para cubrir la ruta Sogamoso - Tunja - Bogotá. Estos vehículos tienen unas especificaciones muy altas, como servicio de Wi-Fi para conectarse a Internet y 18 tomas de 110 voltios para cargar celulares u otros equipos (Rodríguez-Alvarez & Pérez-Martínez, 2016).

2.5 Descripción del vehículo

Para proyectar la posibilidad de transición de bus convencional a bus híbrido para mediana distancia se propone a la compañía Alfa la técnica de desarrollo retrofit

(conversión de vehículos diesel a eléctricos) reduciendo así, la inversión inicial a diferencia de la compra de uno nuevo. Para ello, se toma como referencia uno de los buses más nuevos, modernos, robustos y de alta durabilidad de la compañía, el bus AGA SPIRIT 2 Mercedes-Benz O500RS 1836 modelo 2019 o Mercedes-Benz 1836. Se toma como primera base de estudio porque es considerado como un chasis para aplicaciones de mediana distancia y se desempeña bien en las rutas de nuestra geografía a nivel nacional. Adicional, cuenta con tecnología de bajas emisiones Euro VI, es decir que, cuenta con tratamiento de gases mediante filtros al sistema de escape y urea como aditivo para encapsular el material articulado contaminante; las emisiones están presentes, pero son casi imperceptibles. (Colombuses, 2020)

A continuación, es importante conocer la nomenclatura del chasis:

O: Chasis diseñado para autobús

500: Nivel de desarrollo tecnológico en el cual fue desarrollada la plataforma (Serie)

R: Servicio de carretera o interurbanos

S: Vehículo cuenta con suspensión automática

18: Número de toneladas de peso bruto vehicular

36: Indica que tiene 360 caballos de fuerza

Es necesario recordar que este vehículo no es una unidad integral. En Colombia, la mayoría de los vehículos son fabricados como carrocería sobre un chasis ensamblado previamente. En este caso, la empresa Alfa cuenta en su mayoría con carrocería de la compañía boyacense Autobuses AGA de Colombia SAS, elegida por ser una marca icónica a nivel nacional en la fabricación y ensamble de autobuses.

El modelo descrito para nuestro bus se trata de un desarrollo reciente de la compañía AGA que ha evolucionado del modelo tradicional denominado Spirit al Spirit 2, siendo una variante técnica de desarrollo de ingeniería en el vehículo Spirit que ha sido dotado de otras posibilidades de servicio en el transporte intermunicipal de pasajeros, con una longitud de 14 metros y una capacidad máxima de 56 pasajeros permite a los conductores ampliar la capacidad en la prestación de su servicio (Autobuses AGA de Colombia SAS, 2021).

Algunas de sus características y son las siguientes:

Tabla 2. Características del vehículo SPIRIT 2

| CARACTERÍSTICAS | |
|--|---|
| Longitud | 12 o 14 metros |
| Cantidad de Sillas | Entre 50 y 56 Sillas + conductor + Auxiliar |
| Monitor | Frontal de 32" |
| Monitores | Auxiliares de 22" |
| Aire acondicionado | Si |
| Espejos calefactados | Si |
| Cámara de reversa | Si |
| Iluminación | Interior Tipo LED |
| Baño | WC doble servicio o doble WC en la parte trasera. |
| USB / Enchufe de 120V en silletería | Si |
| Pantallas de entretenimiento individual | Si |
| Cinturones | Cinturones de seguridad de 2 o 3 puntos |
| Camarote | Si |

Fuente: Tomado de (Autobuses AGA de Colombia SAS, 2021)

Figura 2. Spirit 2 para la empresa Bolivariano



Fuente: Imagen tomado de (Autobuses AGA de Colombia SAS, 2021)

2.5.1 Motor

Motor Mercedes-Benz OM 457 LA, 354 cv de potencia y 1.600 Nm de par motor, que cumple con las normas de emisión de contaminantes Euro V. El OM 457 LA es un motor con sistema de inyección electrónica, que asegura el máximo desempeño con reducido consumo de combustible y un notable rendimiento en arranques y retomadas de velocidad, debido a su gran elasticidad (Mercedes-Benz, 2020).

El sistema de freno motor con TOP BRAKE genera mayor potencia y vida útil para el sistema de frenos, reduciendo costos y brindando seguridad en la operación. La caja de cambios servo-shift proporciona un cambio de marchas más suave y preciso, ofreciendo confort y seguridad tanto para el conductor como para los pasajeros. Las ventajas ofrecidas por el chasis representan para el transportista la mejor opción para su negocio (Mercedes-Benz, 2020).

2.5.2 Otras características

En el **anexo 1** del documento, se presenta la ficha técnica del vehículo O500RS 1836/30, el cual contiene información relevante a las especificaciones del motor, la transmisión, el chasis, los ejes, desempeño y otros datos de los cuales es de interés para el presente proyecto el sistema eléctrico, la velocidad máxima y la capacidad en pendientes. Todos estos datos fueron obtenidos directamente de la página de la compañía productora del vehículo (Mercedes-Benz, 2020).

2.6 Metodología para el cálculo de GEI

Según la norma ISO 14069, existen 3 metodologías para el cálculo de emisiones de GEI, la primera está basada en un cálculo directo, en la cual se tiene los datos de la actividad y estos se multiplican por un factor de emisión; la segunda está basada en la medición, aquí se toman los datos de emisión directamente en la fuente con ayuda de instrumentos metrológicos, en algunos casos no es práctica esta metodología por posibles dificultades, la tercera metodología es una mezcla de las dos metodologías primeras (ICONTEC, 2013).

Las emisiones GEI por pasajero pueden ser determinadas por dos vías: La primera es usando datos de consumo específico de combustible del vehículo sujeto a estudio, multiplicado por el factor de emisión del combustible o la longitud promedio del viaje (Ver tabla 3).

La otra vía para calcular las emisiones por pasajero es usando estudios sectoriales donde se estiman el consumo de combustible para el tipo de vehículo y el número de pasajeros transportados en la categoría del vehículo.

Puede haber una combinación de las dos alternativas de cálculo, utilizando indistintamente, una u otra para diferentes categorías de vehículos. El objetivo es tener la información más confiable y de mejor calidad.

La metodología por aplicar para el cálculo de emisiones está basada en un factor de emisión o emisiones de GEI por pasajero. Las emisiones por pasajero transportado y por categoría de vehículo, también pueden ser afectadas por un factor de mejora tecnológica, cambios en los parámetros de la línea base durante la operación del proyecto, y políticas y/o regulaciones sectoriales.

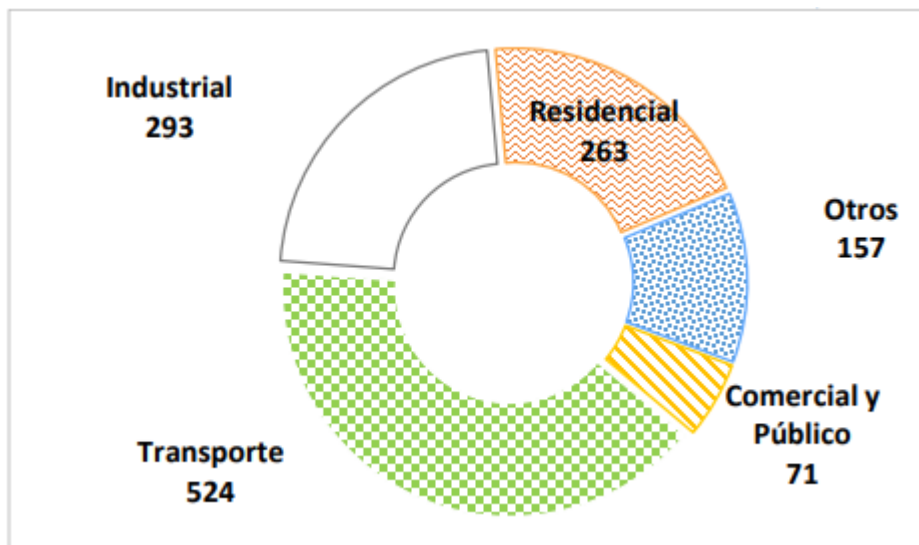
Dado que las emisiones por pasajero y la cantidad de pasajeros varían según el tipo de vehículo y de combustible usado. Las categorías se pueden basar en criterios, tales como aquellas que tengan las más altas emisiones por pasajero transportado, aquellas donde haya información confiable de factores de carga y de consumo de combustible y aquellas que sean relevantes para el proyecto.

2.7 Matriz energética

La matriz energética es una representación cuantitativa de la totalidad de energía que utiliza un país, e indica la incidencia relativa de las fuentes de las que procede cada tipo de energía: nuclear, hidráulica, solar, eólica, biomasa, geotérmica o combustibles fósiles como el petróleo, el gas y el carbón (Educar, 2015) . Es decir, sirve de guía para que el sector energético planifique actividades relacionadas con la innovación, la producción, el transporte y las ventas (Polyexcel, 2020).

Tomando como referencia las cifras del el Balance Energético Colombiano – BECO10, el consumo final de energía del país en el año 2018 fue de 1.308 PJ, con la mayor participación por parte del sector transporte con un 40% (524 PJ); un 22% del sector industrial (293PJ); un 20 % del sector residencial (263 PJ); un 6% del sector comercial y público (71 PJ) y otros sectores con un 12% (UPME, 2019).

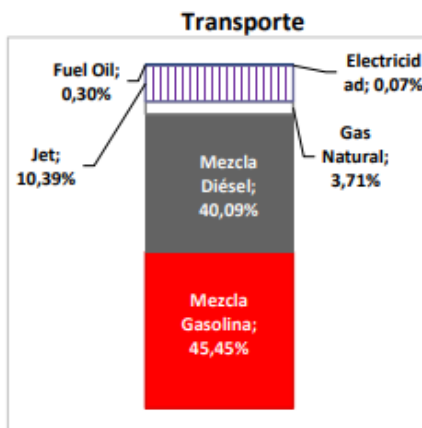
Figura 3. Consumo final de energía Colombia 2018



Fuente: Elaboración propia de UPME (UPME, 2019)

Los energéticos utilizados en el sector de transporte de consumo pueden observarse en la **Figura 4**. En dicha ilustración se observa el predominio de los combustibles fósiles en el sector transporte.

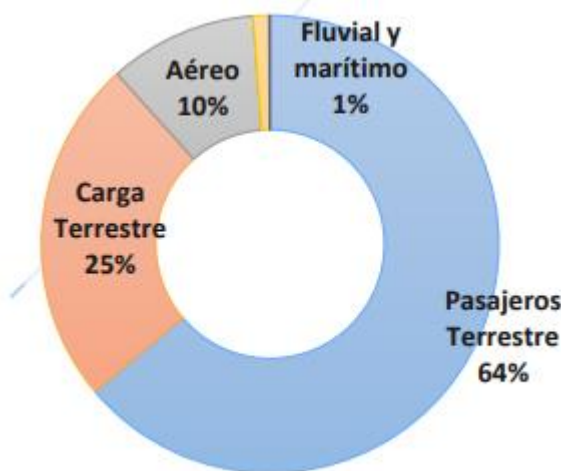
Figura 4. Canasta energética del sector transporte



Fuente: Elaboración propia de BECO-UPME (UPME, 2019)

El sector transporte representa el 40% del consumo final de energía en el país, siendo el primero en uso de energía con 524 PJ. El modo de transporte con mayor contribución en este consumo es el modo Carretero (88%), seguido del modo Aéreo (10%) como puede observarse en la Figura 5.

Figura 5. Caracterización energética y modal del sector transporte

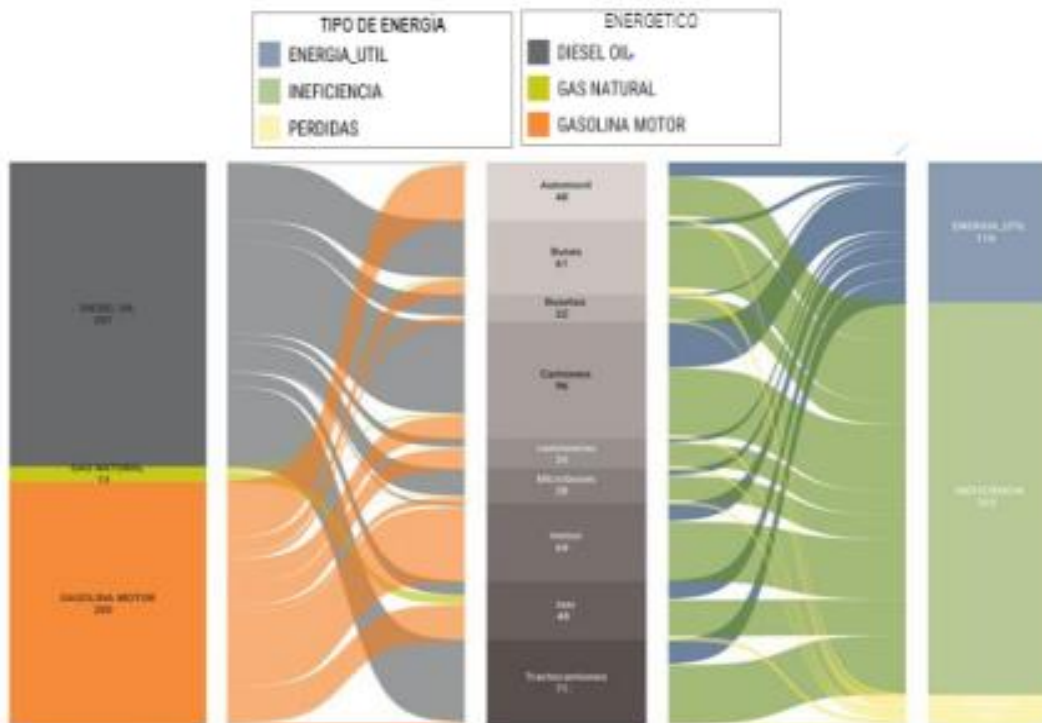


Fuente: Elaboración propia de BECO-UPME (UPME, 2019)

En el Diagrama de Sankey de la **Figura 6**, se observan las fuentes y usos de la energía del sector de transporte por carretera, así como los energéticos más usados, expresados en PetaJulios- PJ, son la mezcla gasolina y la mezcla diésel con una participación del 97% de las fuentes de energía y que los tipos de vehículos de mayor consumo es el transporte

de carga (camiones y tractocamiones) con un 36% y el transporte público de pasajeros (buses, busetas, microbuses y taxis) con un 34%. Importante señalar el nivel de la ineficiencia energética en este sector, que alcanza un 70% de pérdidas de energía útil, que corresponde a valores típicos de las pérdidas de energía por el uso vehículos convencionales utilizados en el país. (UPME, 2019)

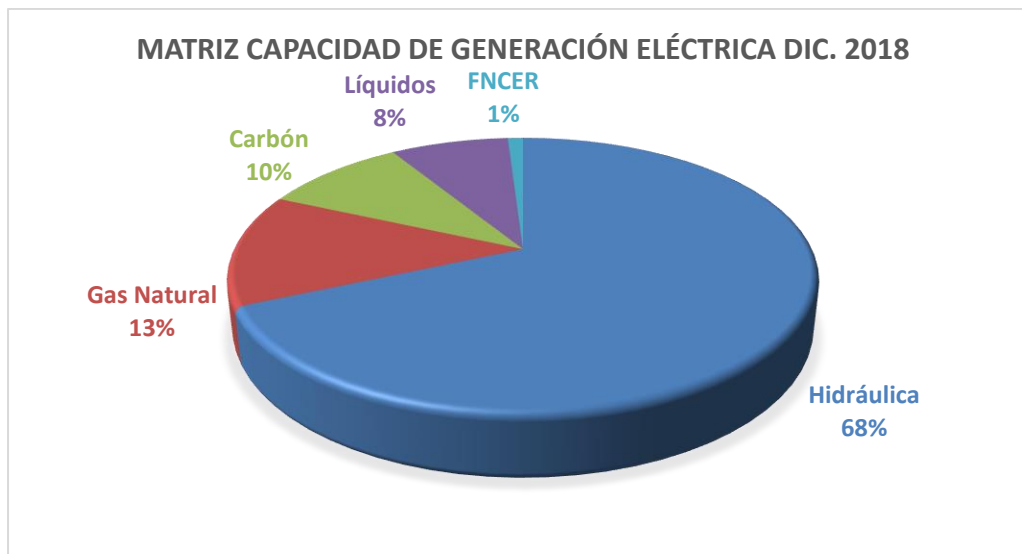
Figura 6. Diagrama de Sankey para el transporte por carretera (PetaJulios)



Fuente: Elaboración propia de BECO-UPME (UPME, 2019)

Por otro lado, debemos rescatar que Colombia tiene una de las matrices de generación eléctrica más limpias del mundo. A diciembre de 2018, la capacidad instalada de generación en el Sistema Interconectado Nacional fue de 17.312 Mega-watts (MW). De esta capacidad instalada, el 68,4% correspondió a generación hidráulica, casi el 30% a generación térmica (13,3% con Gas Natural, 7,8% con combustibles líquidos y 9,5% con carbón) y aproximadamente el 1% con Fuentes No Convencionales de Energía Renovable (FNCR) (eólica, solar, y biomasa) (Martí, 2019).

Figura 7. Capacidad de generación eléctrica



Fuente: (Martí, 2019)

Es por ello que, con el Plan Energético Nacional - PEN se quieren lograr unos objetivos para hacer de Colombia un país de oportunidades, generando el valor del sector energético y minero; llevar a Colombia a ser un país competitivo, teniendo conexiones internacionales gracias a la infraestructura energética; ser un país productivo y eficiente donde exista la diversificación de la canasta de energéticos y minerales con criterios de seguridad y de bajo impacto, además de satisfacer los requerimientos con procesos eficientes y de buenas prácticas. Para así lograr finalmente, un país formal que promueva la universalización y asequibilidad del servicio y la formalidad en minería.

Para el caso específico del sector transporte que representa el 40% del consumo final de energía en el país, el PEN propone diversas acciones que se reflejan en unos escenarios proyectados hacia el año 2050, teniendo especial relevancia la transición energética hacia combustibles más limpios.

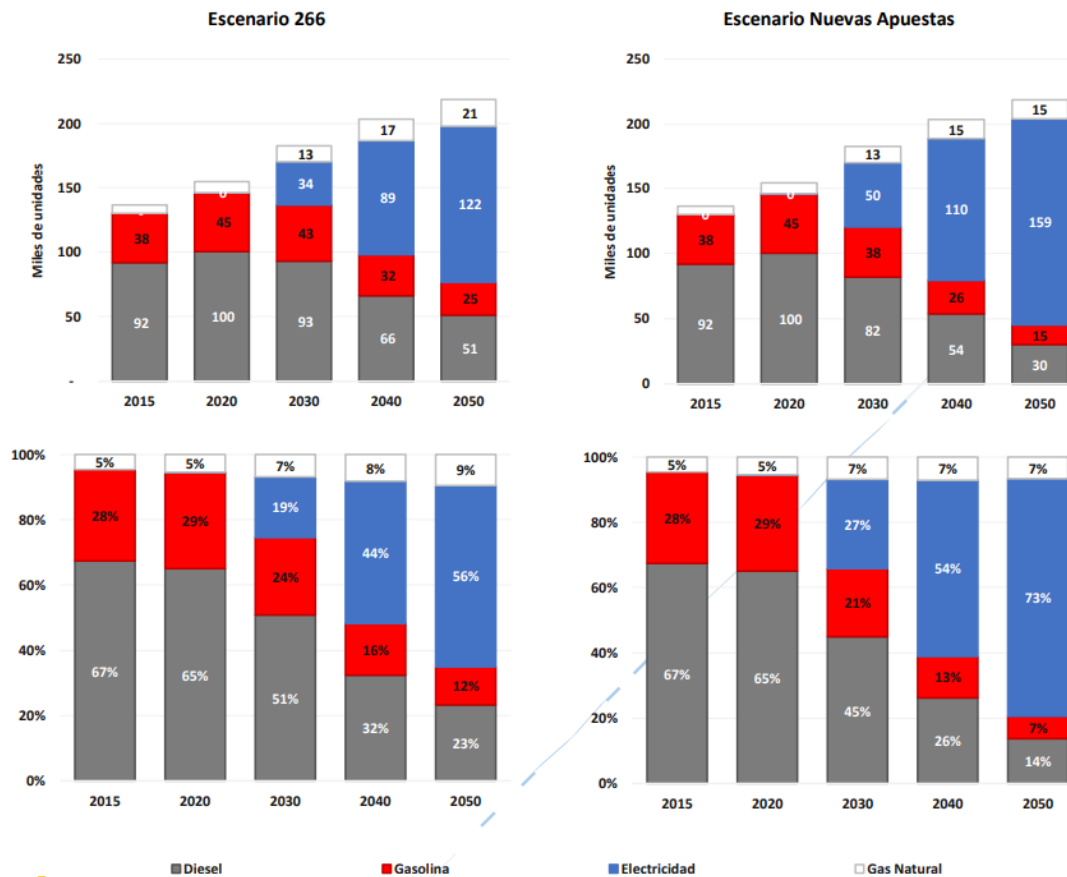
Las proyecciones de flota de este segmento, incluyendo buses, busetas y microbuses se presentan en la **Figura 8** y la **Figura 9**. Vale la pena señalar que la composición del parque proyectada supone que en ambos escenarios a 2050, el combustible predominante será la energía eléctrica como se puede evidenciar:

Figura 8. Transformación en términos de vehículos.

| | Escenario 266 | Nuevas apuestas |
|---|--|--|
| Transición en transporte de carga urbana | 2030: 20.000 eléctricos 2050: 25% flota eléctrica, 23% flota a GN | 2030: 35.000 eléctricos 2050: 55% Flota eléctrica, 15% flota a GN |
| Transición en Taxis | 2030: 40.000 Eléctricos (15%) y 40.000 GN (40%) 2050: 30% Flota eléctrica, 30% flota GN | 2030: 80.000 eléctricos (27%) y 80.000 GN (66%) 2050: 70% Flota eléctrica, 18% Flota a GN |
| Electrificación en Vehículos livianos (incluye autos, camperos y camionetas) | 2030: 370.000 eléctricos e híbridos (6%) 2050: 12% flota eléctricos | 2030: 660.000 eléctricos e híbridos (10%) 2050: 25% flota eléctricos |
| Electrificación en Motos | 2030: 630.000 eléctricas (5%) 2050: 56% eléctricas | 2030: 630.000 eléctricas (5%) 2050: 64% eléctricas |

Fuente: Imagen tomada de (UPME, 2020)

Figura 9. Proyección de la flota para transporte urbano de pasajeros



Fuente: Imagen tomada de: (UPME, 2019)

2.8 Normatividad¹

2.8.1 Nacional

- **Ley 1931 de 27 julio de 2018**, por la cual se establecen directrices para la gestión del cambio climático: Esta ley consagra principios orientadores para su adecuada interpretación, reglamentación e implementación. Dentro de tales principios, se destacan los principios de corresponsabilidad y de autogestión, en virtud de los cuales, todas las personas naturales o jurídicas, públicas o privadas tienen la responsabilidad de participar en la gestión del cambio climático y desarrollar acciones propias para contribuir en su gestión.
- **Ley 1972 de 18 Julio 2019**, por la cual se establece la protección de los derechos a la salud y al medio ambiente sano estableciendo medidas tendientes a la reducción de emisiones contaminantes de fuentes móviles: Tiene por objeto establecer medidas tendientes a la reducción de emisiones contaminantes al aire provenientes de fuentes móviles que circulen por el territorio nacional, haciendo énfasis en el material particulado, con el fin de resguardar la vida, la salud y goce de ambiente sano.
- **Ley 1964 de 11 julio de 2019**, por medio de la cual se promueve el uso de vehículos eléctricos en Colombia y se dictan otras disposiciones: Tiene por objeto general esquemas de promoción al uso de vehículos eléctricos y de cero emisiones, con el fin de contribuir a la movilidad sostenible y a la reducción de emisiones contaminantes y de gases de efecto invernadero.
- **Resolución 40103 de 07 abril 2021**, por la cual se establecen los parámetros y requisitos de calidad del combustible diésel, los biocombustibles para uso en motores de encendido por compresión como componentes de mezcla en procesos de combustión.
- **Resolución 40178 de 03 julio de 2020**, Por la cual se establecen disposiciones en materia de realización de programas piloto de mezclas superiores de biocombustibles para su uso exclusivo en vehículos automotores o fuentes móviles terrestres.

¹ Instituto de transporte, NORMATIVA INTERNACIONAL SOBRE LÍMITES DE EMISIONES CONTAMINANTES DE VEHÍCULOS DE CARRETERA (Publicación Técnica No. 562 Sanfandila, Qro., 2019).

- **Documento Consejo Nacional de Política Económica y Social (Conpes 3510) marzo 31 de 2008**, Lineamientos de política para promover la producción sostenible de biocombustibles en Colombia.

2.8.2 Internacional²

- **Ley 164 de 1994, (octubre 27) Diario Oficial No. 41.575, del 28 de octubre de 1994**, Por medio de la cual se aprueba la "Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático": Hecha en Nueva York el 9 de mayo de 1992, las partes reafirman que deben proteger el sistema climático en beneficio de las generaciones presentes y futuras, sobre la base de la equidad y de conformidad con sus responsabilidades comunes pero diferenciadas y sus respectivas capacidades.
- **Norma internacional ISO 14064**, detalla los principios y requisitos para el diseño, desarrollo y gestión de inventarios de GEI para compañías y organizaciones, y para la presentación de informes sobre estos inventarios. Incluye los requisitos para determinar los límites de la emisión de GEI, cuantificar las emisiones y remociones de GEI de la organización e identificar las actividades o acciones específicas de la compañía con el objeto de mejorar la gestión de los GEI. También, incluye requisitos y orientaciones para la gestión de la calidad del inventario, el informe, la auditoría interna y las responsabilidades de la organización en las actividades de verificación.
- **Norma internacional ISO 14064-2**, se centra en los proyectos de GEI o en actividades basadas en proyectos diseñados específicamente para reducir las emisiones de GEI o incrementar las remociones de GEI. Incluye los principios y los requisitos para determinar escenarios de las líneas base de los proyectos y para hacer seguimiento, cuantificar e informar del desempeño del proyecto con relación al escenario de la línea base, y proporciona una base para los proyectos de GEI a validar o verificar.
- **Norma internacional ISO 14064-3**, detalla los principios y requisitos para la verificación de los inventarios de GEI y para la validación o verificación de los

² Naciones Unidas, Acción por el cambio climático (Blog de las Naciones Unidas, ONU y cambio climático, 1998).

proyectos de GEI. También describe el proceso para la validación o verificación relacionada con los GEI, y especifica componentes tales como la planificación de la validación o verificación, los procedimientos de evaluación y la evaluación de las declaraciones de GEI de la organización o del proyecto. Las organizaciones o las partes independientes pueden usar esta norma para validar o verificar las declaraciones de GEI.

- **Protocolo de Kyoto, 11 diciembre 1997**, el Protocolo de Kyoto pone en funcionamiento la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático comprometiendo a los países industrializados a limitar y reducir las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de conformidad con las metas individuales acordadas. La propia Convención sólo pide a esos países que adopten políticas y medidas de mitigación y que informen periódicamente.

Se basa en los principios y disposiciones de la Convención y sigue su estructura basada en los anexos. Sólo vincula a los países desarrollados y les impone una carga más pesada en virtud del principio de "responsabilidad común pero diferenciada y capacidades respectivas", porque reconoce que son los principales responsables de los actuales altos niveles de emisiones de GEI en la atmósfera.

- **La enmienda de Doha (Qatar) 8 diciembre 2012**, La enmienda incluye; Nuevas responsabilidades para las Partes del Anexo I del Protocolo de Kyoto que acordaron asumir compromisos en un segundo período, del 1 de enero de 2013 al 31 de diciembre de 2020; Una lista revisada de los GEI sobre los que deberán informar las Partes en el segundo período de compromiso; y Enmiendas a varios artículos del Protocolo de Kyoto que se referían específicamente a cuestiones relativas al primer período de compromiso y que debían actualizarse para el segundo período.
- **El acuerdo de París 12 diciembre 2015**, conformado por 197 países adoptaron el Acuerdo de París en la COP21, en París, el 12 de diciembre de 2015. Tiene por objeto reducir de forma sustancial las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero y limitar el aumento global de la temperatura en este siglo a 2 grados Celsius, al tiempo que busca medios de limitar la subida todavía más, a 1,5 grados. El Acuerdo incluye los compromisos de todos los países de reducir sus emisiones y colaborar para adaptarse a los efectos del cambio climático, así como llamamientos a los Estados para que fortalezcan sus compromisos a lo largo del

tiempo, ofrece una vía para que las naciones desarrolladas ayuden a las naciones en desarrollo en su labor de mitigación del cambio climático y adaptación a este, al tiempo que crean un marco para el seguimiento y la presentación de informes transparentes de los objetivos climáticos de los países.

2.9 Conclusiones del capítulo

Una de las actividades que más aportan GEI son la industria del transporte y del cemento con un aporte del 68% de emisiones totales a la atmósfera, la industria del transporte específicamente aporta emisiones de CO₂ y N₂O, por lo cual la transición de la tecnología de motores de combustible interna (diésel) a una tecnología híbrida representa una reducción en el 25% del consumo de combustible, contribuyendo a la disminución de costos y reducción del impacto ambiental generado por la contaminación.

El departamento de Boyacá es uno de los departamentos con mayor afluencia de pasajeros, su cercanía a la capital genera un gran movimiento de personas, transporte de materias primas y productos en general. Su principal red vial de comunicación es la ruta Bogotá-Sogamoso la cual se encuentra en óptimas condiciones y doble calzada, pero el relieve con el que cuenta el departamento es montañoso, lo cual las empresas prestadoras de servicio como lo es el transporte necesitan incorporar vehículos que cuenten con resistencia, potencia y buen funcionamiento por ende la combinación de motores a combustión interna y motores eléctricos proporcionan eficiencia.

Capítulo 3. Metodología

3.1 Metodología del proyecto

La mejora de una matriz energética debe ser analizada de forma cualitativa y cuantitativa para poder evaluar todos los factores que le conciernen, cuestiones sociales, económicas, ambientales, etc., el análisis cualitativo permite comprender la fenomenología de un suceso a partir de la observación, la exploración y la subjetividad, en tanto, el análisis cuantitativo está basado en la medición, orientada a los resultados por medio de datos sólidos y repetibles siendo más objetivo (Pita Fernández & Pértegas Díaz, 2002). Para este caso se analizan los factores relacionados con el funcionamiento del sector de transporte de pasajeros: el consumo de combustible, las características de los vehículos, la fenomenología del espacio en que funciona el sistema y la generación de residuos, entre otros; para la cuantificación de emisiones de gases de efecto invernadero se emplea la herramienta denominada **guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)**, la cual se basa en la norma ISO 14064 parte 1 y el protocolo *Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol)*, en ella se define un factor de emisión para cada variable y se calcula el total de GEI generados en el desarrollo de sus actividades.

Para el caso de estudio se analizan los datos empíricos referentes al periodo 2020 de la compañía de transportes y con estos, se diseñan las alternativas para el cambio de la matriz energética, enfocada a la disminución de los GEI y el uso de recursos renovables.

3.2 Diagnóstico caso de estudio

Alfa de transportes (Por motivos de manejo de información se cambia la razón social de la compañía) es una organización que tiene como objeto principal la explotación del transporte terrestre automotor, cuyo fin principal es el transporte de Pasajeros y actividades conexas. Actualmente se posiciona como una de las empresas de mayor cobertura en Boyacá y Casanare, el entorno económico en el que se desenvuelve la compañía exige constante innovación y compite mediante servicio de transporte de pasajeros con vehículos de alta calidad.

La empresa tiene una estructura organizacional la cual cuenta con misión, visión, objetivos a corto, medio y largo plazo. Cuentan con una muy amplia organización dividida en áreas como lo son la de mantenimiento, recursos humanos, comercial, administrativa, operacional. En las cuales distribuyen sus casi 600 trabajadores.

Objetivos de calidad

- Asegurar el cumplimiento de incremento del presupuesto de ventas y rentabilidad financiera de los accionistas y afiliados a la empresa.
- Mantener el nivel de satisfacción de nuestros clientes, por medio de la prestación de un servicio eficiente y el cumplimiento de los requisitos del cliente, legales y los establecidos por la empresa.
 - Mantener la infraestructura y equipamiento de la empresa.
 - Asegurar la toma de conciencia y formación del personal.
 - Mejorar continuamente la eficacia y eficiencia de los procesos.

Política energética

Alfa de transportes se compromete a mejorar continuamente la eficacia y eficiencia de los procesos a través de la implementación de nuevas tecnologías para el transporte como el uso de biodiesel, para cumplir con los propósitos establecidos para el sector transporte en el Plan Energético Nacional 2020-2050.

3.3 Identificación fuentes de energía

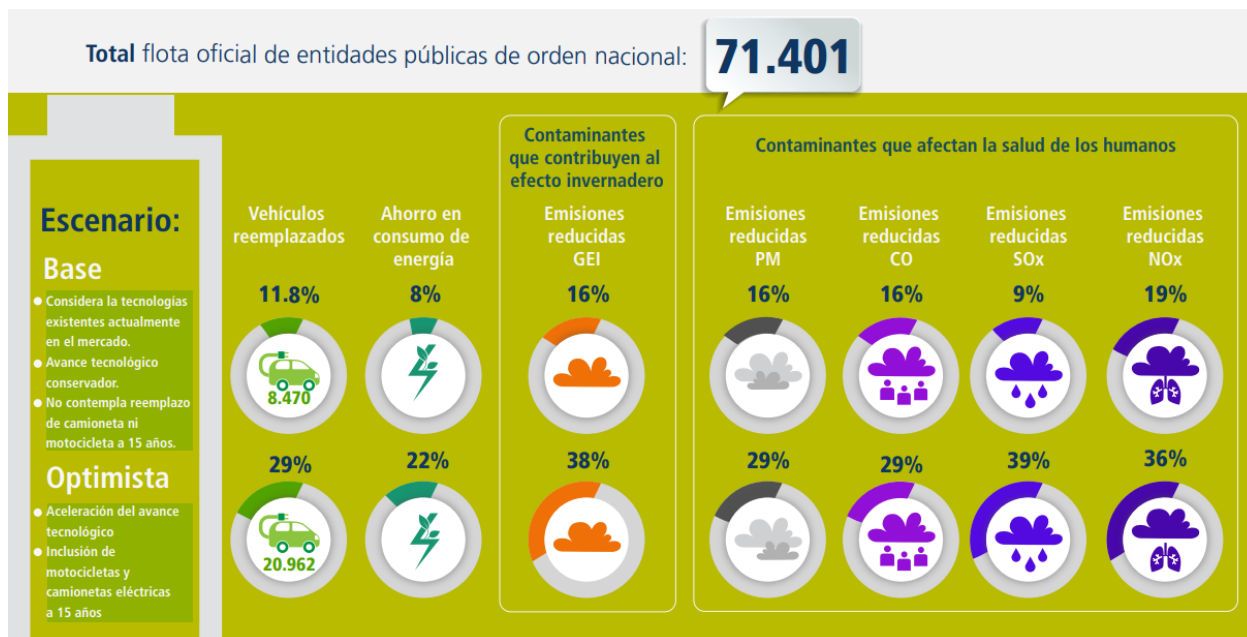
Actualmente, la fuente energética primaria de este tipo de buses es el combustible diésel, por lo que la eficiencia energética de la propuesta está enfocada en el mejoramiento tecnológico para aumentar el rendimiento de los vehículos y reducir el consumo energético, sin afectar los índices de calidad en la prestación del servicio.

Teniendo en cuenta las proyecciones que realizó la UPME en el Plan Energético Nacional y las tecnologías que se han desarrollado durante los últimos años para el sector transporte en procura de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a la atmósfera, las alternativas que se presentan son: el cambio por un biocombustible, la transición hacia vehículos 100% eléctricos o el reemplazo de las flotas de transporte con autobuses a diésel por autobuses híbridos.

Como parte de los esfuerzos nacionales por la transición energética del transporte, se realizó el programa de reemplazo de vehículos de la flota oficial orientado por la UPME en 2019. Los resultados indican que en las 279 entidades públicas existía una flota de 170.700 vehículos con un potencial de reemplazo de 71.401 vehículos con las siguientes opciones:

- Opción biodiesel.
- Opción vehículos 100% eléctricos.
- Opción autobuses híbridos.

Figura 10. Potencial de reemplazo y beneficios máximos esperados

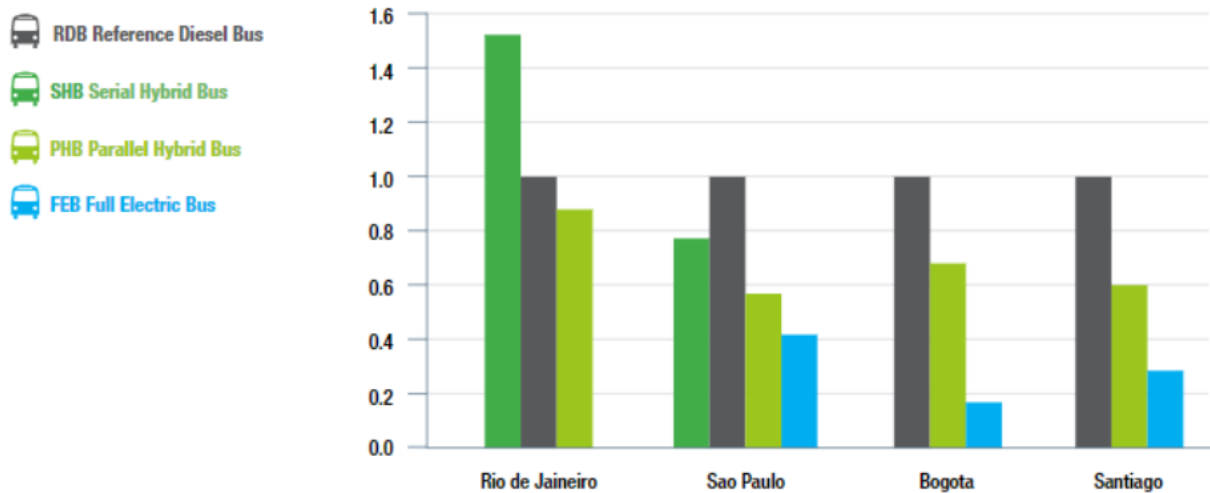


Fuente: Imagen tomada de: (UPME, 2019)

En el año 2013 se realizó el Programa de Pruebas de Buses Híbridos y Eléctricos que fue concebido por C40-CCI y auspiciado activamente por el BID, con el propósito de proveer los fundamentos para que las ciudades y los operadores pudieran tomar decisiones, considerando las barreras para la implementación y las condiciones requeridas para que las nuevas tecnologías operaran en todo su potencial.

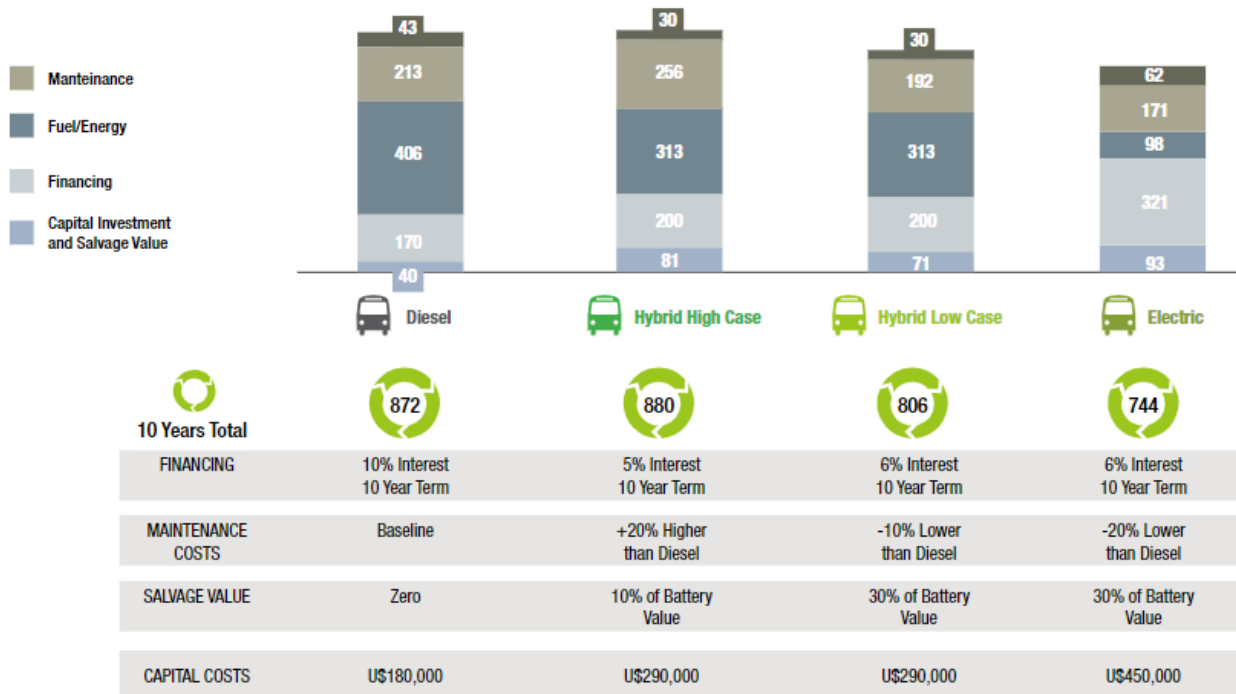
La publicación que contiene los principales resultados del programa permite evidenciar, en el contexto de distintas ciudades de Latinoamérica, cuál es el impacto de la implementación de estos buses híbridos a nivel económico, social y ambiental.

Figura 11. Resultados pruebas de consumo de combustible y energía C40-CCI



Fuente: Imagen tomada de (C40 Cities, 2013)

Figura 12. Costos del ciclo de vida de vehículos en Bogotá



Fuente: Imagen tomada de (C40 Cities, 2013)

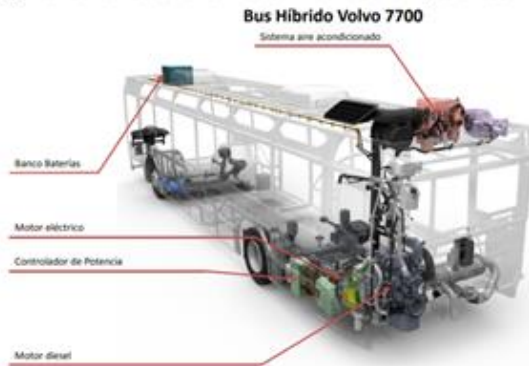
3.3.1 Elementos más comunes para el funcionamiento de un bus híbrido

Existe una mayor viabilidad para este tipo de trayectos en la implementación de buses híbridos, ya que estos combinan el motor convencional de combustión interna con un sistema de propulsión eléctrico. Este tipo de buses usa normalmente una fuente de poder diésel-eléctrica y también se describen como buses híbridos diésel-eléctricos. Con la fuente de poder eléctrica se buscan economías de combustible superiores a las de los vehículos convencionales. Los buses híbridos diésel-eléctricos modernos usan tecnologías para mejorar la eficiencia, tales como frenado regenerativo, que convierte la energía cinética del vehículo en energía eléctrica para cargar la batería en lugar de disipar la energía en forma de calor cada vez que el vehículo frena.

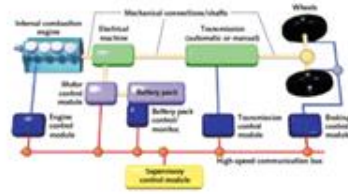
En general, los vehículos híbridos y eléctricos se pueden clasificar de acuerdo con la fuente de poder que llega al tren de conducción: en paralelo o en serie. Los híbridos en paralelo, ambos motores, el de combustión interna y el motor eléctrico, están conectados a la transmisión mecánica y pueden transmitir simultáneamente potencia para manejar las ruedas, normalmente mediante transmisión convencional. En los híbridos en serie, solo el motor eléctrico maneja al tren de dirección y el motor de combustión interna trabaja como un generador para alimentar al motor eléctrico o para recargar las baterías. Los híbridos en serie tienen normalmente motores de combustión más pequeños y un conjunto de baterías más grande que el de los híbridos en paralelo. A su turno estos tienen motores más pequeños que los de los buses diésel equivalentes. Los buses híbridos no requieren inversiones adicionales en infraestructura. Los sistemas híbridos consumen menos energía y consecuentemente reducen CO₂, óxido de nitrógeno y emisiones de partículas. (C40-CCI, 2013).

Figura 13. Función del sistema de un bus híbrido en paralelo

¿Cómo funciona un bus híbrido en paralelo?



Sistema híbrido en paralelo



En esta configuración, la tracción se puede realizar a través de la máquina eléctrica y/o el motor a combustión. La energía se obtiene a partir de las baterías y la regeneración tanto por freno regenerativo o por la operación motor combustión – máquina eléctrica.

Fuente: Imágenes tomadas de (Osses, 2013)

Con las definiciones anteriores se puede observar la estructura de un sistema en paralelo híbrido y las ventajas que éstos traen, no solo para el medio ambiente, sino también para el ahorro en el consumo de combustible y el aumento de la eficiencia del vehículo.

Gracias al desarrollo de técnicas como el retrofit (conversión de vehículos diésel a eléctricos) los vehículos híbridos representan un menor costo de la inversión inicial en comparación con la compra de uno nuevo.

La introducción de una nueva tecnología como la híbrida-eléctrica para buses requiere la identificación de los aspectos que lo diferencian de la tecnología convencional y así mismo, determinar cuáles de estos factores podrían convertirse en aspectos positivos o negativos para usuarios y operadores de los buses. Para tal fin, a continuación, se presentan los principales aspectos de manera resumida:

Tabla 3. Principales aspectos ambientales, financieros y operacionales de los buses híbridos

| Aspectos ambientales | Aspectos financieros | Aspectos operacionales |
|--|--|--|
| <ul style="list-style-type: none"> • Reducción de gases efecto invernadero. • Reducción en la emisión de gases contaminantes locales a la atmosfera. • Reducción del ruido. • Menor impacto ambiental desde el punto de vista de análisis de ciclo de vida del producto. • Las baterías contienen elementos tóxicos y requieren una disposición final adecuada. | <ul style="list-style-type: none"> • Se obtienen ahorros por disminución en el consumo de combustible. • Incertidumbre respecto al costo general de mantenimiento de un BHE. • El reemplazo de las baterías implica un costo adicional. • El costo inicial de bus suele ser un 50% mayor frente a un bus diésel. • El costo durante el ciclo de vida es mayor que en un bus convencional. | <ul style="list-style-type: none"> • La vida útil del bus se extiende en un 20% en promedio. • Los ahorros de combustible varían de acuerdo con la velocidad promedio. • Son preferidos por los usuarios gracias a su menor ruido y vibración. • En modo eléctrico pueden operar en túneles o estaciones subterráneas. • SE reduce la dependencia de combustibles fósiles. • La tecnología híbrida eléctrica es compatible con biocombustibles. • Se requiere entrenamiento especial para su operación y mantenimiento. • La reventa de BHE's usados se ve limitada por su limitado mercado. |

Fuente: Adaptada de (Lema, 2012)

3.3.2 Consumo eléctrico

Un autobús híbrido eléctrico utiliza dos tipos de energías distintas para lograr su desplazamiento: por un lado, un motor de combustión interna (generalmente diésel); por otro, uno (o más) motores eléctricos. Con estas dos tecnologías puede hacer funcionar el motor térmico, el eléctrico o ambos conjuntamente. De este modo, el sistema híbrido puede, fácilmente, reducir el consumo de combustible –se estima una disminución de un 25% por término medio– y, con ello, minimizar las emisiones contaminantes del escape –principalmente el diésel– como los óxidos de nitrógeno NOx – grupo de gases compuestos por óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO₂) y nanopartículas (PM) – (CESVIMAP, 2019).

Según los datos de la Asociación de Empresas Gestoras de Transportes Colectivos Urbanos (ATUC) convertir a híbrido un autobús diésel convencional, puede ahorrar al año alrededor de un 22% en gasto de combustible. En el caso del gas natural comprimido (GNC) el ahorro alcanza un 30% (Sánchez Criado, 2016).

El combustible más utilizado para el motor de combustión interna es diésel de bajo contenido de azufre, aunque también se pueden utilizar otras fuentes de energía como gasolina, gas natural, biocombustibles o biogás. Para el sistema de almacenamiento de energía se utilizan baterías de plomo-ácido, níquel-hidruro metálico o ion-litio, aunque en algunos casos también se utiliza un ultracapacitor que a diferencia de una batería convencional tiene una mayor vida útil y provee una gran cantidad de energía, pero por un corto periodo de tiempo (Lema, 2012).

Actualmente existen dos configuraciones para VHE (vehículos híbridos eléctricos), en serie donde la tracción es únicamente generada por el motor eléctrico y en paralelo donde tanto el motor eléctrico como el de combustión van conectados al sistema de tracción. Si bien ambos sistemas ofrecen sus ventajas y desventajas, en términos generales es posible afirmar que el sistema paralelo se desempeña mejor en altas velocidades mientras que el sistema en serie ofrece ventajas en condiciones de operación con baja velocidad promedio y frecuentes paradas y arranques (Lema, 2012).

Uno de los mayores beneficios de la tecnología híbrida, que también aplica a los vehículos puramente eléctricos, es la recuperación de la energía cinética del vehículo. Esto se logra mediante el sistema de frenado regenerativo que transforma y almacena en forma de electricidad la energía que usualmente se disipa en forma de calor al detener el vehículo. Si bien existen otras tecnologías para aprovechar y almacenar esta energía, como sistemas hidráulicos o volante giratorio; el almacenamiento de energía en forma mecánica sigue siendo un tema bastante complejo para ser llevado a la práctica (TCRP, 2000).

3.3.3 Residuos

- En el caso del sistema híbrido en serie la energía que no se utiliza inmediatamente debe ser almacenada en las baterías y esto implica una pérdida aproximada del 20%, puesto que siempre se genera una pérdida entre la energía que es cargada y la que posteriormente puede ser aprovechada y este sería un residuo principal (Lynch, 2012).
- Al tener que transformar toda la energía mecánica del MCI en electricidad para el motor eléctrico y posteriormente en energía mecánica para el sistema de tracción, se genera una pérdida de energía del 15% o incluso del 35% cuando la energía también pasa por el sistema de almacenamiento (Lynch, 2012).
- Al no contar con un sistema de transmisión directa desde el MCI, el sistema en serie requiere una batería y motor eléctrico más grandes para movilizar el vehículo (Lorencon, 2012).
- En el sistema paralelo al igual que en buses convencionales, siempre se requiere un sistema de transmisión que conecte el MCI y las ruedas, lo que significa pérdida de la energía y aumento en el peso del vehículo.
- El sistema paralelo no es compatible con sistema de motorización no mecánicos como una célula de combustible a hidrogeno, ya que se requiere una fuente de energía mecánica como el motor de combustión interna (Ranganathan, 2012).

3.4 Herramientas de cálculo para las emisiones de GEI

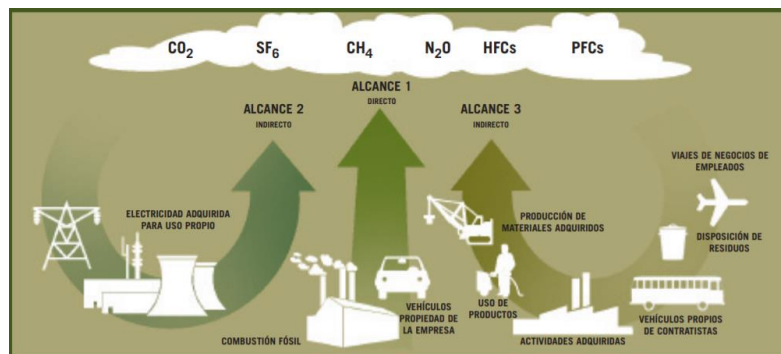
Para el cálculo de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) de las diferentes alternativas planteadas, se empleará la **guía práctica para el cálculo de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI)**, esta se basa en la norma ISO 14064 parte 1 y el protocolo Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol), es uno de los protocolos más empleado a escala internacional para entender, cuantificar y gestionar las emisiones. Está pensada para facilitar la estimación de emisiones de GEI, detallando el marco de huellas

de carbono y las categorías de emisiones que pueden identificarse con base en los protocolos reconocidos alrededor del mundo, enfocado al consumo de combustible, eléctrico y de transporte (Generalitat de Catalunya, 2011).

3.4.1 Descripción de los alcances

Con la herramienta que se presenta para el cálculo de GEI es posible estimar las emisiones que están asociadas a las actividades de transporte de pasajeros terrestre; la herramienta asocia los seis gases de efecto invernadero recogidos en el protocolo de Kioto: dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄), óxido de nitrógeno (N₂O), hidrofluorocarburos (HFC), perfluorocarburos (PFC) y hexafluoruro de azufre (SF₆) y no es posible calcular el total de emisiones posibles de una organización, tampoco incluye un método de cálculo para gases distintos del CO₂ equivalente. Cabe resaltar que el cálculo de GEI es diferente según el tipo de datos disponibles y el tipo de transporte.

Figura 14. Resumen de alcances y emisiones



Fuente: Imagen tomada de (GREENHOUSE GAS PROTOCOL, 2021)

3.4.2 Ecuaciones e indicadores

- **Consumo eléctrico**

Para calcular las emisiones asociadas, debe aplicarse un factor de emisión de CO₂ atribuible al suministro eléctrico, también conocido como mix eléctrico (g de CO₂/kWh), que representa las emisiones asociadas a la generación eléctrica necesaria para cubrir el consumo (Fraguas, García, Pineda, & Portillo, 2013). En 2020 para Colombia el factor de emisión de CO₂ por generación eléctrica es de 164,38 gramos por kWh³.

³ Obtenido de <https://www.minenergia.gov.co/>

Para el caso del consumo eléctrico se aplica la siguiente ecuación:

$$Emisiones\ de\ CO_2\ \left(\frac{g\ CO_2}{año}\right) = Consumo\ energético\ (kWh/año) \cdot Factor\ de\ emisión\ \left(\frac{g\ CO_2}{kWh}\right) \quad (1)$$

- **Transporte de pasajeros**

Según los datos disponibles, el cálculo de las emisiones de CO₂ (GEI) de los automóviles puede realizarse de forma diferente. En esta propuesta, en concreto, se incluye la metodología de cálculo para tres tipos de datos:

- A. Litros de combustible (diésel o gasolina) consumidos; o, si no se dispone de este dato, opción B.
- B. Cuantía económica (pesos colombianos) asociada al consumo de combustible (diésel o gasolina); o, si tampoco se dispone de este dato, opción C.
- C. Kilómetros recorridos y marca y modelo del automóvil (diésel o gasolina).

Tabla 4. Factores de emisión y consumo por tipo de combustible o costo de este

| DATOS DISPONIBLES | | | |
|---|---|---------------------------|--|
| REFERENCIA | METODOLOGÍA | FACTOR DE EMISIÓN/CONSUMO | |
| A. Consumo de combustible (litros de diésel o gasolina) | | | |
| GASOLINA 95 O 98 | Consumo X Factor de emisión | 2,38 | kg de CO ₂ /Litro |
| DIESEL | Consumo X Factor de emisión | 2,61 | kg de CO ₂ /Litro |
| BIOETANOL | Consumo X (Factor de emisión X (1 - % bioetanol)) | 2,38 | kg de CO ₂ /Litro |
| BIODIESEL | Consumo X (Factor de emisión X (1 - % biodiesel)) | 2,61 | kg de CO ₂ /Litro |
| GAS NATURAL | Consumo X Factor de emisión | 2,71 | kg de CO ₂ /kg de gas natural |
| B. Cuantía económica (pesos) asociadas al consumo de combustible | | | |
| GASOLINA 95 | Costo total / Factor de consumo | 5.176,55 | COP/Litro |
| GASOLINA 98 | Costo total / Factor de consumo | 5.693,76 | COP/Litro |
| DIESEL | Costo total / Factor de consumo | 5.796,37 | COP/Litro |

Fuente: Adaptada de (Generalitat de Catalunya, 2011)

En la **Tabla 4** se presenta el resumen de la metodología para el cálculo de emisiones de CO₂ dependiendo de la información que se tenga disponible (consumo de combustible o cuantía económica de combustible). Para el caso de kilómetros recorridos, marca y modelo del automóvil, en el siguiente enlace (<http://coches.idae.es/base-datos/marca-y-modelo>) se encuentra la calculadora online donde se tiene en cuenta las referencias del vehículo y otros datos necesarios.

También se incluyen factores de emisión útiles cuando el dato disponible es la distancia recorrida y no se conoce la marca y modelo del automóvil. Las emisiones en función de la distancia recorrida varían en función de múltiples factores, como por ejemplo las características del vehículo y la velocidad de la vía.

3.4.3 Periodo de medición

La guía no especifica un periodo específico de medición, es recomendable realizar las respectivas mediciones del consumo, recorrido y cuantía económica diariamente para cada vehículo, y promediar estos datos de forma mensual para realizar el cálculo de GEI emitidos por cada vehículo. En el caso de estudio se toman los datos concernientes al periodo comprendido entre enero y marzo de 2020 para construir la línea base expuesta en la **Tabla 8**.

3.5 Conclusiones del capítulo

Algunas de las conclusiones que se obtuvieron del capítulo fueron:

Mientras el análisis económico muestra que el costo de adquisición de buses híbridos y eléctricos es mayor que el de los buses tradicionales, la evaluación del ciclo de vida muestra que los buses híbridos y eléctricos pueden reducir los costos totales a las ciudades y/o a los operadores en el largo plazo. En particular, el costo inicial de compra es superior al de los buses tradicionales en aproximadamente 50%-60% para buses híbridos.

En el largo plazo los buses híbridos y eléctricos podrían superar a los vehículos tradicionales, debido a ahorros en energía, reducción de emisiones, menores costos de mantenimiento y mayor durabilidad.

Los buses híbridos y eléctricos tendrían que superar ampliamente el promedio de desempeño de los buses diésel para que los operadores consideraran un cambio importante a las nuevas tecnologías. En Bogotá, por ejemplo, los híbridos podrían ser competitivos en costo con los buses diésel en el mediano plazo; el financiamiento podría acelerar la transición y el Fondo de Tecnología Limpia (Clean Technology Fund), dispuesto por BID para Colombia, puede jugar un rol importante al proveer financiamiento con tasas concesionales para las tecnologías de bajo carbono (C40 Cities, 2013).

Capítulo 4. Análisis y resultados

4.1 Caso de estudio

Como caso de estudio, en este ejercicio se analizaron los consumos de combustible respecto a los viajes realizados por el vehículo en la ruta Sogamoso-Bogotá durante los meses de enero, febrero y marzo del año 2020. Esta información se encuentra consignada en la **Tabla 5**.

Tabla 5. Información técnica trayectos flota Alfa transportes

| INFORMACIÓN TÉCNICA TRAYECTOS FLOTA ALFA TRANSPORTES | | | | |
|--|------------------|----------------|----------------|------------------|
| Ruta | Tipo de vehículo | Duración (min) | Distancia (km) | Consumo (Litros) |
| Arauca - Cravo Norte | Aerovan | 469,00 | 134,00 | 17,59 |
| Arauca - Bucaramanga | Bus | 364,00 | 464,00 | 171,11 |
| Arauca - Tame | Bus | 171,00 | 182,00 | 67,12 |
| Bogotá - Yopal | Bus | 327,00 | 338,00 | 124,64 |
| Bogotá - Sogamoso | Bus | 200,00 | 228,00 | 84,08 |
| Bogotá - Duitama | Bus | 183,00 | 212,00 | 78,18 |
| Bogotá - Paipa | Bus | 173,00 | 200,00 | 73,75 |
| Bogotá - Tunja | Bus | 148,00 | 160,00 | 59,00 |
| Bucaramanga - Saravena | Bus | 291,00 | 284,00 | 104,73 |
| Bucaramanga - Yopal | Bus | 399,00 | 487,00 | 179,59 |
| Cúcuta - Saravena | Aerovan | 270,00 | 234,00 | 30,72 |
| Cravo Norte - Arauca | Aerovan | 201,00 | 149,00 | 19,56 |
| Nunchia – Yopal | Aerovan | 63,00 | 54,00 | 7,09 |
| Orocue – Yopal | Bus | 240,00 | 160,00 | 59,00 |
| Orocue - Yopal (El cacho) | Bus | 260,00 | 164,00 | 60,48 |
| Paz de Ariporo - Yopal | Aerovan | 87,00 | 93,00 | 12,21 |
| Sabanalarga - Yopal | Aerovan | 167,00 | 126,00 | 16,54 |
| Saravena - Arauca | Aerovan | 199,00 | 186,00 | 24,42 |
| Saravena - Tame | Aerovan | 80,00 | 73,00 | 9,58 |
| Sogamoso -Yopal | Bus | 211,00 | 147,00 | 54,21 |
| Tamara – Yopal | Aerovan | 156,00 | 92,00 | 12,08 |
| Tame – Yopal | Aerovan | 171,00 | 187,00 | 24,55 |
| Trinidad – Yopal | Aerovan | 136,00 | 112,00 | 14,70 |
| Trinidad - Yopal (Pore) | Aerovan | 129,00 | 128,00 | 16,80 |
| Villavicencio - Yopal | Bus | 344,00 | 262,00 | 96,62 |
| Yopal – Cúcuta | Bus | 800,00 | 483,00 | 178,11 |
| Bogotá - Cartagena | Bus | 1320,00 | 1074,00 | 396,05 |
| Bogotá - Villavicencio | Bus | 240,00 | 115,00 | 42,41 |

Fuente: (Alfa transportes)

La fuente energética primaria de la organización es el combustible diésel, por lo que la eficiencia energética de la presente propuesta estará enfocada en el mejoramiento tecnológico para aumentar el rendimiento de los vehículos y reducir el consumo energético sin afectar los índices de calidad en la prestación del servicio. Para ello, se tomó como base de estudio el vehículo Spirit, sus características están descritas en la **Tabla 2** y el **Anexo 1** del presente documento, también cabe resaltar que, la ruta cubierta por el vehículo tiene una distancia estimada de 228 km y un consumo promedio de 40 – 50 galones de diésel por trayecto.

Por manejo de información sensible solo se empleará el dato de distancia recorrida o consumo de combustible para los respectivos cálculos de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero.

4.2 Determinación de las emisiones de GEI

Inicialmente se realiza el cálculo de la cantidad de emisiones de GEI emitidas por cada trayecto con la ecuación (2), expuestas en la **Tabla 5** calculadas con los factores de emisión de la **Tabla 4**, los cuales pueden ser observados en la **Figura 15**.

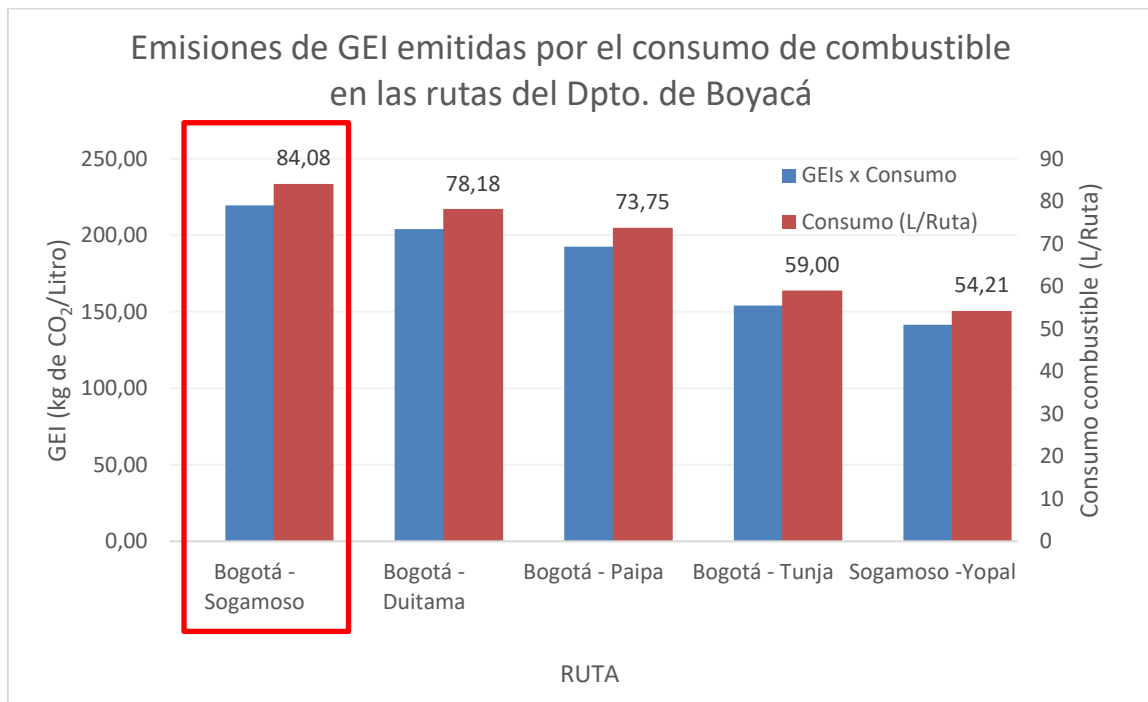
Determinación de emisiones por consumo de combustible para el trayecto Bogotá – Sogamoso en un bus diésel convencional:

$$Emisiones\ de\ CO_2 = Consumo\ de\ combustible\ (L/trayecto) \cdot Factor\ de\ emisión\ \left(\frac{kg\ CO_2}{L}\right) \quad (2)$$

$$Emisiones\ de\ CO_2\ \left(\frac{kg\ CO_2}{L}\right) = 84.08 \frac{L}{Trayecto} \cdot \left(2.61 \frac{kg\ CO_2}{L}\right)$$

$$Emisiones\ de\ CO_2\ bus\ convencional = 219.44 \frac{kg\ de\ CO_2}{Trayecto}$$

Figura 15. Estimación de emisiones de GEI por consumo de combustible en cada trayecto del Dpto. de Boyacá



Fuente: Elaborado por los autores

En la **Figura 15** se evidencia que para los trayectos de Bogotá – Sogamoso, Bogotá – Duitama y Bogotá – Paipa, la emisión de GEI es alta comparada con las demás rutas, esto puede verse afectado por las variables del entorno y la distancia recorrida. Para el caso de estudio (ruta Sogamoso-Bogotá), se estima que las emisiones de GEI emitidas por consumo de combustible diésel en un vehículo convencional es de 219,44 kg de CO₂/trayecto.

Para determinar las emisiones de GEI se tomaron tres indicadores de desempeño:

- Consumo de combustible diésel en galones/kilómetro.
- Consumo de combustible / viajes realizados en el mes.
- Rendimiento bus híbrido / rendimiento bus diésel.

Para realizar un análisis cuantitativo se tomaron valores comparativos entre autobuses convencionales e híbridos, utilizados en la ciudad de Londres, con lo cual se demuestra

que el uso de un bus híbrido representa una reducción en el consumo de diésel entre el 33% al 46% dependiendo del tipo de vehículo.

Tabla 6. Rendimiento buses Londres 2013 (Todos de dos pisos Euro V)

| Rendimiento Buses Londres 2013 (todos de dos pisos Euro V) | | |
|--|------------------------------|---------------------------------|
| Tipo de bus | Consumo de diésel (L/100 km) | % ahorros relativo a bus diésel |
| Diésel convencional | 49 | |
| Híbrido “normal” | 33 | 33% |
| New Bus for London hybrid | 26 | 46% |

Fuente: Adaptado de (Grütter Consulting AG, 2020)

De igual forma, en la **Tabla 7** se representa el consumo de un bus diésel frente a uno convencional y el porcentaje de ahorro que se espera con el uso de un bus híbrido en Boyacá comparado con un bus convencional de 12m Euro V.

Tabla 7. Rendimiento Bus Híbrido y Bus Convencional de 12m Euro V en Boyacá

| Rendimiento Bus Híbrido y Bus Convencional de 12m Euro V en Boyacá | | | |
|--|-----------------------------|-------------------------------|------------------|
| Operador | Consumo de diésel (L/100km) | Consumo Bus Híbrido (L/100km) | % Ahorro híbrido |
| A | 39 | 30 | 25% |
| B | 44 | 33 | 25% |

Fuente: Adaptado de (Grütter Consulting AG, 2020)

A partir del porcentaje de ahorro que se obtuvo en la **Tabla 7**, se relaciona con el consumo de combustible de la **Tabla 5** para el caso de estudio, y se obtiene que con el uso de un bus híbrido el consumo de diésel estaría en aproximadamente 63 Litros por trayecto. Con este dato se procede a determinar las emisiones para este tipo de vehículo.

Determinación de emisiones por consumo de combustible para el trayecto Bogotá – Sogamoso del bus híbrido:

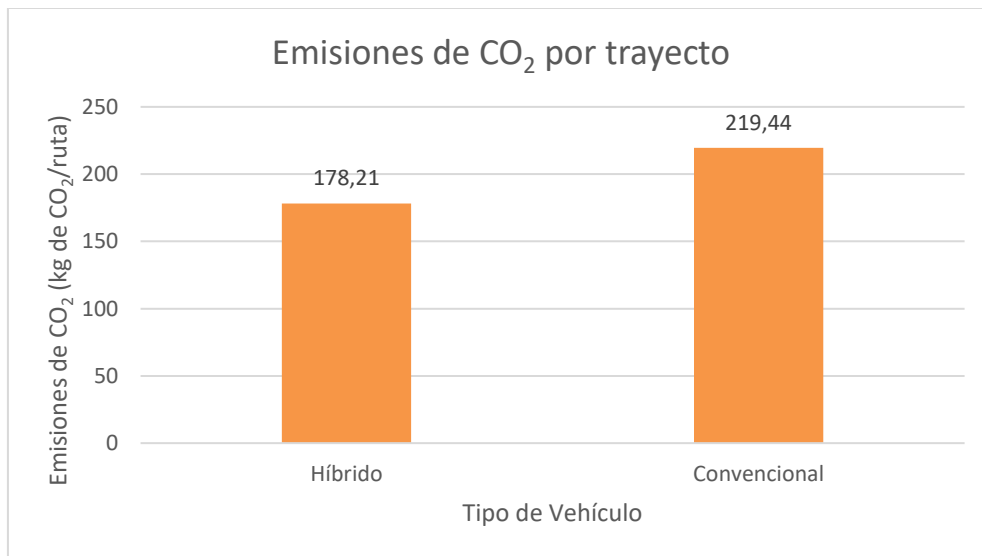
$$Emisiones\ de\ CO_2 = Consumo\ de\ combustible\ (L/trayecto) \cdot Factor\ de\ emisión\ \left(\frac{kg\ CO_2}{L}\right) \quad (3)$$

$$Emisiones\ de\ CO_2\ \left(\frac{kg\ CO_2}{L}\right) = 63.00 \frac{L}{trayecto} \cdot \left(2.61 \frac{kg\ CO_2}{L}\right)$$

$$Emisiones\ de\ CO_2 = 164.43 \frac{kg\ de\ CO_2}{trayecto}$$

En la **Figura 16** se resalta la reducción en las emisiones de CO₂ con respecto al uso de un vehículo convencional diésel y uno híbrido, permitiendo obtener una reducción de aproximadamente el 33% de estas emisiones.

Figura 16. Emisiones de CO₂ por tipo de vehículo para el trayecto del caso de estudio



Fuente: Elaborado por los autores

Determinación de emisiones totales por consumo de combustible para el trayecto Bogotá – Sogamoso del bus híbrido:

Se tomó como referencia de cálculo para el consumo de energía, el dato suministrado por (Grütter Consulting AG, 2020) donde especifica que para un bus eléctrico el consumo de energía es de 100kWh/100km, es decir, 1 kWh/km, para nuestro caso de estudio se estima que el consumo eléctrico sea de 84,04 kWh/ruta.

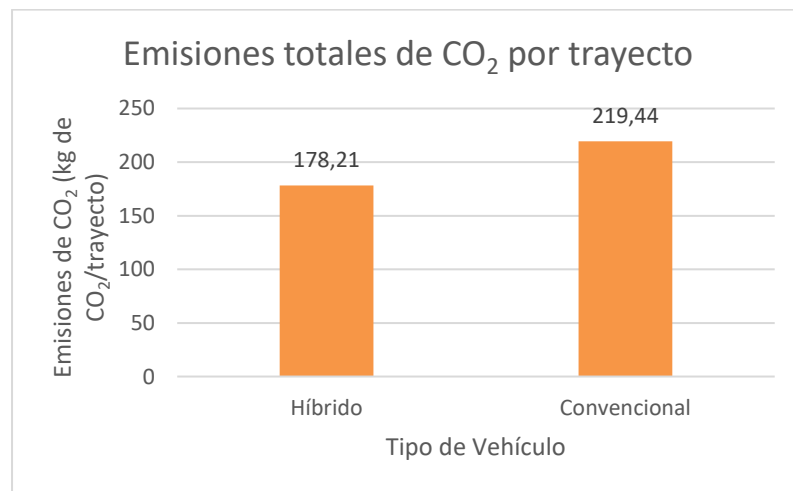
$$Emisiones\ de\ CO_2 = Consumo\ energético\ (kWh/trayecto) \cdot Factor\ de\ emisión\ \left(\frac{kg\ CO_2}{kWh}\right) \quad (4)$$

$$\text{Emisiones de } CO_2 = 84.04 \frac{kWh}{\text{trayecto}} \cdot 0.164 \left(\frac{kg \text{ } CO_2}{kWh} \right)$$

$$\text{Emisiones de } CO_2 = 13.78 \frac{kg \text{ } CO_2}{\text{trayecto}}$$

El valor de emisiones de CO₂ obtenido por el consumo de combustible para el bus híbrido se adhiere al valor obtenido de emisiones por consumo de energía para obtener el total de emisiones de CO₂ del bus híbrido. Con ello se obtiene un total de 178.21 kg de CO₂/trayecto para nuestro caso de estudio empleando un bus de tecnología híbrida.

Figura 17. Emisiones totales de CO₂ por tipo de vehículo para el trayecto del caso de estudio



Fuente: Elaborado por los autores

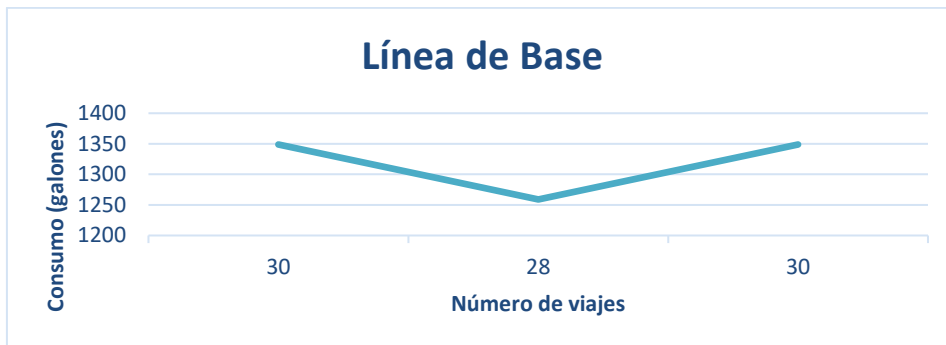
Con la comparación de las emisiones totales de CO₂ de la **Figura 17** se tiene una reducción de aproximadamente el 23% al emplear tecnologías menos contaminantes como la de los buses convencionales diésel.

4.3 Costos de combustibles y otros costos asociados

Para el conocimiento de los costos de combustibles y otros costos asociados se identificó inicialmente la ruta de destino Sogamoso – Bogotá con un valor de trayecto por pasajero de 32.000 COP. Seguidamente, se realizó un ejercicio donde se analizaron los consumos de combustible respecto a los viajes realizados por el vehículo de dicha ruta

durante los meses de enero, febrero y marzo del año 2020. Sin embargo, como se mencionaba anteriormente en el caso de estudio, no fue posible trazar una línea de base energética completa porque sería necesario contar con información de al menos un año anterior a la implementación del proyecto. Por tanto, con los datos recogidos se tendría que:

Figura 18. Línea de base energética



Fuente: Elaborado por los autores

Los siguientes datos fueron directamente obtenidos por los integrantes del grupo de trabajo a diferentes conductores de empresas de transporte urbano e intermunicipal de pasajeros, basándonos así:

Tabla 8. Datos línea base

| RUTA | | Sogamoso – Bogotá | | | |
|--|----------|-------------------|---|-------------------|-------------------------------------|
| Vehículo | Bus | Mes | Combustible consumido por viaje (galones) | Viajes realizados | Pago por combustible diésel mensual |
| Consumo de combustible | 0,0986 | Enero | 44,9616 | 30 | \$ 11.314.137 |
| Duración aproximada del viaje | 3h 20min | Febrero | 44,9616 | 28 | \$ 10.559.861 |
| Ruta kilómetros | 456 | Marzo | 44,9616 | 30 | \$ 11.314.137 |
| Consumo de combustible X viaje (galones) | 44,9616 | Egresos mensuales | | | |
| Número de viajes en un día | 1 | | | | |
| Número de viajes X Mes | 30 | | | | |
| Costos Nacionales | | Tipo | Factor | | |
| Galón diésel | \$ 8.388 | Costo | 17.938,43 (COP/Galón) | Cambio de aceite | \$ 150.000 |
| Galón diésel B10 | \$ 8.802 | Consumo | 9,7614 (kg de CO ₂ /Galón) | Rodamiento | \$ 370.000 |
| | | | | Conduce diario | \$ 420.000 |
| | | | | TOTAL | \$ 940.000 |

Fuente: Elaborado por los autores

Con la nueva alternativa de bus híbrido se realizó un plan de acción para comprobar la viabilidad mediante la comparación pago por combustible diésel vs pago por combustible híbrido teniendo en cuenta los tres meses mencionados, los viajes realizados en el mes y la generación de GEI durante este periodo de tiempo como se evidencia en la **Tabla 9**.

Tabla 9. Plan de acción

| Mes | Combustible consumido (Galones) | Viajes realizados | Pago por combustible diésel (COP/galón) | GEI por combustible diésel (kg de CO ₂ /mes) | Pago por combustible en híbrido (-25%) | GEI por combustible biodiésel (kg de CO ₂ /mes) |
|---------|---------------------------------|-------------------|---|---|--|--|
| Enero | 1.348,85 | 30 | \$ 11.314.137 | 6.156,71 | \$ 8.485.603 | 4.617,54 |
| Febrero | 1.258,92 | 28 | \$ 10.559.861 | 5.746,27 | \$ 7.919.896 | 4.309,70 |
| Marzo | 1.348,85 | 30 | \$ 11.314.137 | 6.156,71 | \$ 8.485.603 | 4.617,54 |

Fuente: Elaborado por los autores

En la **Tabla 10** se figura como el uso de un bus híbrido representa un ahorro de **\$2.859.678** frente al uso de uno convencional a diésel, demostrando una disminución en las emisiones de GEI en **1.504,97 kg de CO₂/mes** al implementar buses de tecnología híbrida para el caso de estudio.

Tabla 10. Ahorro plan de acción

| Autobús | Costo mantenimiento mensual | Consumo combustible mensual promedio | TOTAL | GEI por uso de combustible (kg de CO ₂ /mes) |
|-------------------------|-----------------------------|--------------------------------------|---------------|---|
| Scania Marcopolo new G7 | \$ 940.000 | \$ 11.062.712 | \$ 12.002.712 | 6.019,90 |
| Autobús híbrido | \$ 846.000 | \$ 8.297.034 | \$ 9.143.034 | 4.514,92 |
| AHORRO | \$ 94.000 | \$ 2.765.678 | \$ 2.859.678 | 1.504,97 |

Fuente: Elaborado por los autores

El uso de un bus híbrido representa una disminución de aproximadamente del 25% en emisiones de GEI en la ruta Sogamoso – Bogotá, sin tener en cuenta otros factores que puedan afectar estos datos.

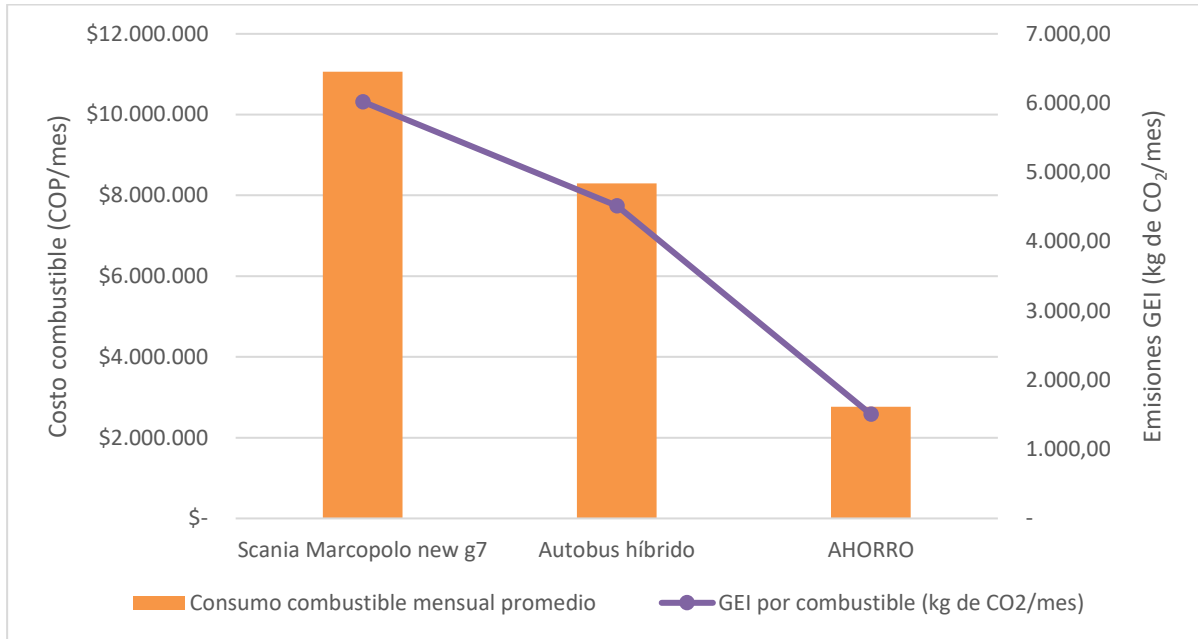
4.4 Comparación de alternativas de buses

Tabla 11. Características de los buses híbridos eléctricos

| Aspectos Ambientales | Aspectos Financieros | Aspectos Operacionales |
|--|---|---|
| <ul style="list-style-type: none"> • Reducción de gases efecto invernadero. • Reducción en la emisión de gases contaminantes locales a la atmosfera. • Reducción del ruido. • Menor impacto ambiental desde el punto de vista de análisis de ciclo de vida del producto. • Las baterías contienen elementos tóxicos y requieren una disposición final adecuada. | <ul style="list-style-type: none"> • Se obtienen ahorros por disminución en el consumo de combustible. • Incertidumbre respecto al costo general de mantenimiento de un BHE. • El reemplazo de las baterías implica un costo adicional. • El costo inicial del bus suele ser un 50% mayor frente a un bus diésel. • El costo durante el ciclo de vida es mayor que en un bus convencional. | <ul style="list-style-type: none"> • La vida útil del bus se extiende en un 20% en promedio. • Lo ahorros de combustible varían de acuerdo a la velocidad promedio. • Son preferidos por los usuarios gracias a su menor ruido y vibración. • En modo eléctrico pueden operar en túneles o estaciones subterráneas. • Se reduce la dependencia de combustibles fósiles. • La tecnología híbrida eléctrica es compatible con biocombustible. |

La **Tabla 11** muestra una comparativa entre los diversos aspectos relacionados de un sistema híbrido, ya que un autobús híbrido eléctrico utiliza dos tipos de energías distintas para lograr su desplazamiento: por un lado, un motor de combustión interna (generalmente diésel); por otro, uno (o más) motores eléctricos. Con estas dos tecnologías puede hacer funcionar el motor térmico, el eléctrico o ambos conjuntamente. De este modo, el sistema híbrido puede, fácilmente, reducir el consumo de combustible –se estima una disminución de un 25% por término medio– y, con ello, minimizar las emisiones contaminantes del escape –principalmente los diésel– como los óxidos de nitrógeno NOx – grupo de gases compuestos por óxido nítrico (NO), dióxido de nitrógeno (NO2) y nanopartículas (PM) (CESVIMAP, 2019).

Figura 19. Comparación de contaminantes atmosféricos y costo de combustible entre un bus diésel y un bus híbrido.



Fuente: Elaborado por los autores

Como vemos en la **Figura 19**, la tecnología híbrida eléctrica sustituye gran cantidad de combustible y emisiones contaminantes por una pequeña cantidad de energía eléctrica, dando, de esta forma, paso al transporte ecológico, silencioso y eficiente hasta que el autobús 100% eléctrico (cero emisiones) se imponga como transporte urbano (CESVIMAP, 2019).

Capítulo 5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

La implementación de buses híbridos en la ruta Sogamoso – Bogotá en el tema energético, ambiental y económico, es una de las opciones más apropiadas ya que al combinar un motor de combustión interna con uno eléctrico proporciona rendimiento y disminución de costos. Es importante recalcar que el país actualmente se encuentra en la incursión de tecnologías limpias en el tema de automotor, por lo cual implementar un bus 100% eléctrico no es viable ya que en el trayecto y las largas distancias no hay las estaciones para recargar estos vehículos.

Para el desarrollo de una línea de base energética que muestre las tendencias de consumo respecto a los viajes realizados sería necesario contar con información de al menos un año anterior a la implementación del proyecto, más esto no fue posible debido a la privacidad que la organización, maneja con las cifras de sus operaciones y las restricciones de desplazamiento hasta el sitio que están vigentes debido a la pandemia.

El parque automotor que se encuentra en el departamento de Boyacá actualmente es uno de los más modernos del país, su renovación comenzó con la terminal de Duitama la cual conto con una inversión de 20.000 mil millones de pesos, en cuanto a la terminal de Tunja la cual había sido catalogada como una de las más retrasadas del país, fue entregada recientemente siendo una de las terminales más modernas y amplias del país, esto contribuyendo al desarrollo y logística del sector.

Implementar un bus híbrido representa una disminución de aproximadamente del 25% en emisiones de GEI en la ruta Sogamoso – Bogotá, además de esto es la mejor opción en rendimiento energético, y el bus más apropiado para la ruta establecida. Un bus hibrido representa un ahorro de **\$2.859.678** frente al uso de uno convencional a diésel, demostrando una disminución en las emisiones de GEI en **1.504,97 kg de CO₂/mes** al implementar buses de tecnología híbrida para el caso de estudio. Uno de los mayores beneficios de la tecnología hibrida, es que también aplica a los vehículos puramente eléctricos. La cual es la recuperación de la energía cinética del vehículo

Las empresas prestadoras de transporte en el departamento de Boyacá cuentan con una amplia flota de vehículos para la prestación del servicio, algunas de estas reconocidas empresas están incorporando buses de doble piso, los cuales cuentan con una capacidad de 60 pasajeros y sus prestaciones son premium. Su principal ruta es Bogotá Sogamoso. Es un bus AGA SPIRIT 2 Mercedes-Benz O500RS 1836 modelo 2019 o Mercedes-Benz 1836. cuenta con tecnología Euro 6.360 caballos de fuerza, y suspensión automática. La renovación de flota del sector contribuye a que las personas piensen en utilizar el servicio público, ya que con el fuerte crecimiento en la adquisición de vehículo particular hace que la afluencia de pasajeros disminuya.

De acuerdo con los cálculos y la norma ISO 14064 parte 1 protocolo *Greenhouse Gas Protocol (GHG Protocol)*, para las emisiones de CO₂ es importante aumentar la eficiencia energética en los buses, ya que las emisiones generadas por los motores a combustión interna en las rutas establecidas Liberan cantidades enormes de CO₂.

5.2 Recomendaciones y estudios futuros

Es recomendable que las empresas de transporte de pasajeros implementen de manera transitoria buses eléctricos a sus flotas, con el fin de aumentar su eficiencia energética y reducir las emisiones de CO₂, comprometiéndose con el medio ambiente y a su vez prestar un servicio de mayor calidad.

De acuerdo con el cronograma y fechas establecidas del Plan Energético Nacional – PEN se plantea que para el 2050 en su totalidad las empresas prestadoras de servicio de transporte cuenten en su totalidad con buses 100% eléctricos. Por ende, es de gran importancia velar por la ejecución de proyectos a nivel de infraestructura vial que garanticen el adecuado funcionamiento de vehículos, ya sean eléctricos y/o híbridos.

Capítulo 6. Referencias

- Acevedo, J. (2014). Resumen del libro: El transporte como soporte al desarrollo de Colombia. Una visión al 2040. *Revista de Ingeniería*, 0(29), 156-162. doi:10.16924/riua.v0i29.257
- ANDI. (2020). *Transporte de pasajeros*. Obtenido de Cámaras sectoriales: <http://www.andi.com.co/Home/Camara/27-transporte-de-pasajeros>
- Andrade-Castañeda, H. J., Arteaga-Céspedes, C. C., & Segura-Madrigal, M. A. (2017). Emisión de gases de efecto invernadero por uso de combustibles fósiles en Ibagué, Tolima (Colombia). *Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(1), 103-112. doi:10.21930/rcta.vol18_num1_art:561
- Arias Gómez, H. Y., & Antosová, G. (2015). *Perfil espacial de la economía boyacense*. Obtenido de http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0120-30532015000100005
- Autobuses AGA de Colombia SAS. (2021). *SPIRIT 2*. Obtenido de Autobuses y Autocares: https://autobusesaga.com/?page_id=709
- C40 Cities. (2013). *Low Carbon Technologies Can Transform Latin America's Bus Fleets*. Obtenido de Inter-American Development Bank: <https://publications.iadb.org/en/publication/16337/low-carbon-technologies-can-transform-latin-americas-bus-fleets>
- Camargo Bonilla, Y. (2018). El transporte de pasajeros por carretera en Boyacá (Colombia): sociedades, devenir e instituciones, 1930-1965. *Historia y Espacio*. doi:10.25100/hye.v14i50.6487
- Cardenas, A. (26 de febrero de 2018). Aún con tecnología vieja, buses híbridos contaminan 30 % menos. *El Tiempo*.
- Castañeda, H. J. (Enero de 2017). *Artículo de investigación científica y tecnológica*. Obtenido de Emisión de gases de efecto invernadero por uso de combustibles fósiles en Ibagué, Tolima (Colombia): <http://www.scielo.org.co/pdf/ccta/v18n1/v18n1a06.pdf>
- CESVIMAP. (2019). *Autobuses híbrido-eléctricos*. Obtenido de Revista CESVIMAP: <https://www.revistacesvimap.com/autobuses-hibrido-electricos/>
- Cesvimap, R. (01 de Marzo de 2019). *Autobuses híbrido-eléctricos*. Obtenido de <https://www.revistacesvimap.com/autobuses-hibrido-electricos/>

- Colombuses. (2020). *Así es un BUS AGA SPIRIT 2 MERCEDES BENZ O500RS 1836 de Coflonorte LIBERTADORES*. Obtenido de <https://www.youtube.com/watch?v=XQLTsmwS09I&t=17s>
- Consejo Superior del Transporte. (24 de Abril de 2021). *IMPACTO DE LA PANDEMIA POR COVID-19 EN EL TRANSPORTE INTERMUNICIPAL DE COLOMBIA*. Obtenido de <http://consejosuperiordeltransporte.org/wp-content/uploads/2021/04/IMPACTO-DE-LA-PANDEMIA-POR-COVID-19-EN-EL-TRANSPORTE-INTERMUNICIPAL-EN-COLOMBIA-SR.pdf>
- DANE. (15 de 10 de 2021). *Estadísticas por tema - Transporte*. Obtenido de DANE información para todos: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/transporte>
- Dias, D. S. (19 de Marzo de 2019). *Boyacá es uno de los departamentos con peor calidad de aire*. Obtenido de Siete dias -Boyaca: <https://boyaca7dias.com.co/2019/03/19/boyaca-es-uno-de-los-departamentos-con-peor-calidad-de-aire-raquira-a-la-cabeza/>
- Educar. (2015). *Los hidrocarburos son nuestra principal fuente de energía*. Obtenido de <http://energiasdemipais.educ.ar/la-matriz-energetica-argentina-y-su-evolucion-en-las-ultimas-decadas/>
- El Tiempo. (17 de 11 de 2015). *Duitama inaugura moderna terminal de transporte de pasajeros*. Obtenido de <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-16433889>
- Fraguas, R., García, D., Pineda, L., & Portillo, V. (2013). *Cálculo y Gestión de Huella de carbono de la compañía: URBAN INVESTMENT, S.A. Escuela de Organización Industrial*. Obtenido de https://static.eoi.es/savia/documents/EOI_UrbanInvestment_2013.pdf
- Galarza, R., Espín Lagos, S., Zaldumbide, F., Tene, O., & López Villacís, I. (2018). *Incidencia de las rutas del transporte público en la contaminación ambiental microbiana de buses urbanos. Ciencia digital, 2(2)*. doi:10.33262/cienciadigital.v2i2.76
- Generalitat de Catalunya. (2011). *Guía práctica para el cálculo de emisiones de Gases de Efecto*. Cataluña: Comisión Interdepartamental de Cambio Climático. Obtenido de Academia.

- Gobernación de Boyacá. (23 de 10 de 2013). *Construir Terminal de Transportes de Tunja fue una decisión concertada*. Obtenido de <https://www.boyaca.gov.co/via-libre-al-terminal-de-transporte-dio-el-gobernador-de-boyaca-en-la-asamblea-2-2/>
- Gobernación de Boyacá. (2017). *Infraestructura para transporte y logística*. Obtenido de <https://www.boyaca.gov.co/images/planes/plan-de-desarrollo/pdd2016-06-T-Infraestructura.pdf>
- Gobernación de Boyacá. (2020). *Calidad del Aire en Boyacá*. Obtenido de Observatorio Ambiental de Boyacá: <http://www.boyaca.gov.co/ambiental/aire/>
- GREENHOUSE GAS PROTOCOL. (12 de 10 de 2021). *What is GHG Protocol?* Obtenido de About Us | Greenhouse Gas Protocol: <https://ghgprotocol.org/about-us>
- Grütter Consulting AG. (2020). *Rendimiento ambiental y económico de buses híbridos y eléctricos basados en grandes flotas operacionales*. Internacional: REPIC.
- Hernán Jair Andrade Castañeda, C. C.-C. (Enero de 2017). *Emisión de gases de efecto invernadero por uso de combustibles fósiles, ibague Tolima (Colombia)*. Obtenido de Scielo - Artículo de investigación científica y tecnológica: <http://www.scielo.org.co/pdf/ccta/v18n1/v18n1a06.pdf>
- ICONTEC. (2013). ISO/TR 14069:2013: Greenhouse gases -- Quantification and reporting of greenhouse gas emissions for organizations -- Guidance for the application of ISO 14064-1. *e-collection*. Obtenido de Instituto Colombiano de Normas Técnicas: <https://ecollection.icontec.org/normavw.aspx?ID=38991>
- Lema, S. (2012). *Factibilidad para la introducción de buses híbridos en sistemas BRT en América Latina: el caso de Transmilenio de Bogotá*. Obtenido de Banco de la República: <https://babel.banrepcultural.org/digital/collection/p17054coll23/id/155>
- Lorencon. (2012). *Presentation Ônibus Híbrido*.
- Lynch, C. &. (2012). *Analysis of Electric Drive Technologies For Transit Applications: Battery HybridElectric, and Fuel Cells*. Obtenido de https://www.transit.dot.gov/documents/Electric_Drive_Bus_Analysis.pdf
- Martí, M. A. (2019). *La matriz energética de Colombia se renueva*. Obtenido de <https://blogs.iadb.org/energia/es/la-matriz-energetica-de-colombia-se-renueva/>
- Mercedes-Benz. (2020). *El chasis para ómnibus O 500 RS cubre las aplicaciones interurbanas de mediana y larga distancia*. Obtenido de Nuestros buses: https://www.mercedes-benz-bus.com/es_AR/models/o500-rs.html

- Ministerio de Transporte. (2020). *Informe al Congreso de la República Sector transporte 2019-2020*. Obtenido de https://www.mintransporte.gov.co/publicaciones/477/informes_al_congreso/
- Organización Mundial de la Salud. (2006). *Guías de calidad del aire de la OMS relativas al material particulado, el ozono, el dióxido de nitrógeno y el dióxido de azufre : actualización mundial 2005*. Obtenido de <https://apps.who.int/iris/handle/10665/69478>
- Osses, M. (20 de 06 de 2013). *Buses híbridos y eléctricos: experiencia en América del Sur*. Obtenido de <http://www.ingenieros.cl/wp-content/uploads/2013/06/Buses-Hibridos-y-Elctricos-UTFSM.pdf>
- Pachón, Á., & Ramírez, M. T. (2016). *La infraestructura de transporte en Colombia durante el siglo XX*. Obtenido de Banco de la República: <https://www.banrep.gov.co/es/infraestructura-transporte-colombia-durante-el-siglo-xx>
- Pita Fernández, S., & Pértegas Díaz, S. (2002). Investigación cuantitativa y cualitativa. *Fisterra*, 76-78.
- Polyexcel. (21 de 12 de 2020). *Matriz energética: entienda qué es y para qué sirve*. Obtenido de <https://polyexcel.com.br/es/productos/matriz-energetica-entienda-que-es-y-para-que-sirve/>
- Ranganathan, S. (2012). *Hybrid buses costs and benefits*. Obtenido de https://www.eesi.org/files/eesi_hybrid_bus_032007.pdf
- Rodríguez-Alvarez, D. A., & Pérez-Martínez, R. N. (2016). Competitividad del sector de transporte terrestre intermunicipal de pasajeros en Boyacá: una aproximación al estado del arte. *Cooperativismo & Desarrollo*, 24(109). doi:10.16925/co.v24i109.1511
- Sánchez Criado, C. (2016). *Los autobuses híbridos ahorran un 30% de combustible al año*. Obtenido de movilidadelectrica.com: <https://movilidadelectrica.com/los-autobuses-hibridos-ahorran-30-combustible-al-ano/>
- Sanchez, C. (2019). *La mala calidad del aire provoca daños graves a la salud y a los ecosistemas*. Obtenido de Instituto de Estudios Urbanos - IEU: <http://ieu.unal.edu.co/medios/noticias-del-ieu/item/la-mala-calidad-del-aire-provoca-danos-graves-a-la-salud-y-a-los-ecosistemas>

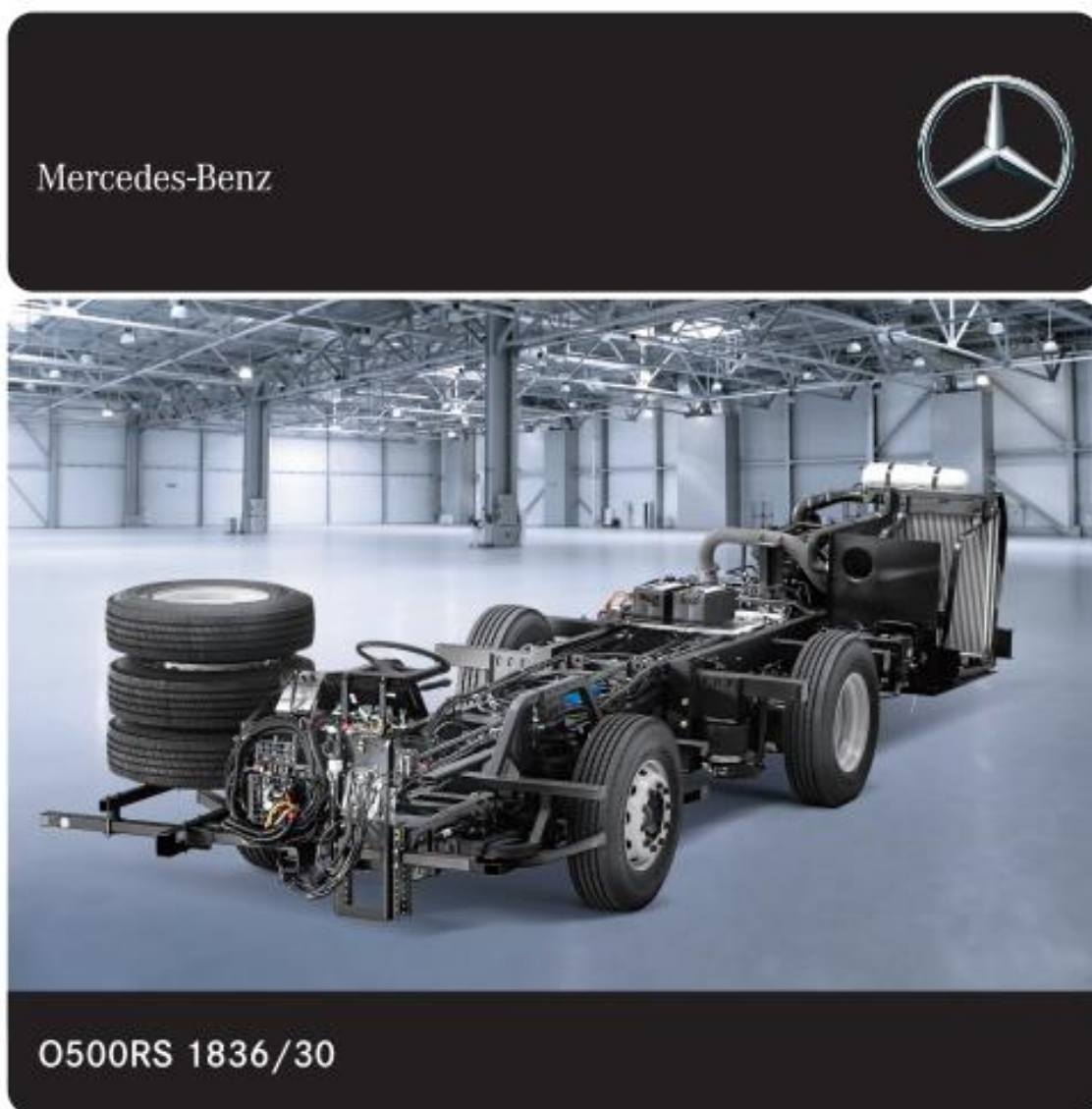
- Serna-Uran, C. A., García-Castrillón, J. A., & Flórez-Londoño, O. (2016). Análisis de Rutas de Transporte de Pasajeros Mediante la Herramienta Network Analyst de Arcgis. Caso Aplicado en la Ciudad de Medellín. *Ingenierías USBMed*, 7(2), 89–95. doi:10.21500/20275846.2631
- TCRP. (2000). *Hybrid-Electric Transit Buses: Status, Issues, and Benefits*. Obtenido de http://onlinepubs.trb.org/onlinepubs/tcrp/tcrp_rpt_59.pdf
- Unidas, N. (s.f.). *Crónicas Naciones Unidas*. Obtenido de El papel de los combustibles fósiles en un sistema energético sostenible: <https://www.un.org/es/chronicle/article/el-papel-de-los-combustibles-fosiles-en-un-sistema-energetico-sostenible>
- UPME. (2019). *PLAN ENERGÉTICO NACIONAL 2020 - 2050*. Obtenido de La Unidad de Planeación Minero Energética: https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/PEN_documento_para_consulta.pdf
- UPME. (2020). *Plan energético nacional - PEN*. Obtenido de Unidad de Planeación Minero: https://www1.upme.gov.co/DemandaEnergetica/UPME_Presentacion_PEN_V48.pdf

Capítulo 7. Anexos

Anexo 1: Ficha técnica vehículo O500RS 1836/30 63

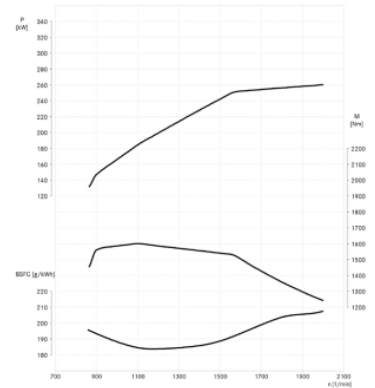
Anexo 1: Ficha técnica vehículo O500RS 1836/30

Figura 20. Ficha técnica O500RS 1836/30 extraída de (Mercedes-Benz, 2020)



Motor

| | |
|---------------------------------------|---|
| Modelo | MB OM 457 LA. V/23-03 |
| Tipo | 6 cilindros, verticales en línea, con turbo-intercooler |
| Cilindrada (cm ³) | 11.967 |
| Potencia máxima, conforme (ISO 1585) | 260 kW (354 cv) @ 2.000/min |
| Par motor máximo, conforme (ISO 1585) | 1.600 Nm (163 mkgf) @ 1100 min |
| Consumo específico | 184 g / kWh @ 1.170/min |



Transmisión

| | |
|--|---------------------------|
| Caja de cambios | MB GO 210-6 + servo shift |
| Marchas | 6 (Man.) |
| Relación 1 ^{era} / Última / Reversa | 6,528 / 0,799 / 6,136 |

Ejes

| | |
|-----------------------------|------------------------|
| Eje delantero | MB VO 4/13 DL - 7,0 |
| 1 ^{er} Eje trasero | MB HO 4 / 09 DL - 11,5 |
| Relación del eje trasero | i=3,667 |

Desempeño del vehículo

| | |
|--|-------------------------------|
| Velocidad máxima - Km / h | 100 limitado electrónicamente |
| Capacidad máxima en pendientes con 18.500 kg (%) | 28 |

Chasis

| | |
|------------------------------------|--|
| Bastidor - Tipo | Bastidor constituido de cinco módulos: |
| Módulo 1: Voladizo Delantero | Construido con perfil de acero estampado "U" 116x73x6 mm (material: EN 10149-2 1.0984 opcional LNE 50 +Ti) con tubos de acero transversales perfil 80x60x4,25 mm (material: acero M 22) unidos por soldadura y tornillos. |
| Módulo 2: Eje Delantero | Construido con perfil de acero estampado "U" 216x75x6 mm (material: EN 10149-2 1.0984 opcional LNE 50 +Ti) con tubos de acero transversales perfil 100x60x4,75 mm (material: acero M 22) unidos por soldadura. |
| Módulo 3: Entre los ejes | Construido con perfil de acero estampado "U" 216x75x6 mm (material: EN 10149-2 1.0984 opcional LNE 50 +Ti) con refuerzo de placa de acero de 6 mm (material: EN 10149-2 1.0984 opcional LNE 50 +Ti) unidos por soldadura. |
| Módulo 4: Eje Trasero | Construido con perfil de acero estampado "U" 216 x 75 x 6 mm (material: EN 10149-2 1.0984 opcional LNE 50 +Ti) con tubos de acero transversales perfil 120x80x4,75 mm (material: acero M 22) unidos por soldadura. |
| Módulo 5: Situado debajo del motor | Construido con perfil de acero estampado "U" 216x75x6 mm (material: EN 10149-2 1.0984 opcional LNE 50 +Ti) con travesaño perfil "U" 200x63x6 mm (material: EN 10149-2 1.0984 opcional LNE 50 +Ti) unidos por tornillos. |
| Suspensión delantera | Neumática, con 2 fuelles de aire, 3 barras longitudinales, 1 barra cruzada y 1 válvula de nivelación. |
| Suspensión trasera | Neumática, con 4 fuelles de aire con batientes auxiliares internos, 2 brazos longitudinales, 2 brazos oblicuos y 2 válvulas reguladoras de nivel. Con 4 amortiguadores telescópicos de doble acción y barra estabilizadora |
| Llantas | 8.25 x 22.5 |
| Neumáticos | 295/80R 22,5 |
| Caja de Dirección | ZF 8098 |
| Tanque de Combustible (l) | 20 (traslado) |
| Tanque de urea (l) | 25 |

Sistema eléctrico

| | |
|---------------------|------------|
| Alternador (V / Ah) | 28/140 |
| Batería (V / Ah) | 2 x 12/170 |
| Tensión nominal (V) | 24 |

Frenos

| | |
|--------------------------|--|
| Freno de servicio | Tambor en ruedas delanteras y traseras |
| Freno de estacionamiento | Cámara de resorte acumulador con accionamiento neumático |
| Sistemas adicionales | Freno motor con top brake, ABS, ASR |

Peso y capacidad (kg)

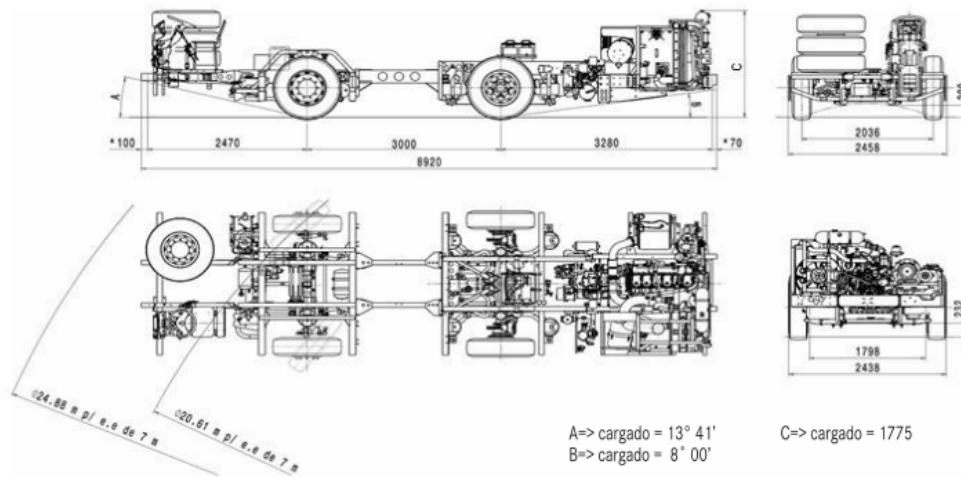
Vacío sin carrocería, en orden de marcha (1)

| | |
|---|--------|
| Eje delantero (Kg) | 914 |
| 1 ^{er} Eje trasero (Kg) | 5.164 |
| Total (Kg) | 6.078 |
| Carga útil: Carrocería + pasajeros (Kg) | 12.422 |

Pesos Admisibles Técnicamente

| | |
|----------------------------------|--------|
| Eje delantero (Kg) | 7.000 |
| 1 ^{er} Eje trasero (Kg) | 11.500 |
| Peso bruto vehicular (PBV) (Kg) | 18.500 |

(1) Chasis optimizado, sin carrocería, sin conductor y con caja de herramientas. Los pesos pueden cambiar según los opcionales.



Algunos componentes que se muestran en este folleto son opcionales y sólo pueden obtenerse mediante solicitud especial. Dirijase a su representante Mercedes-Benz. Él tiene la solución específica a sus necesidades de transporte. Con miras al desarrollo tecnológico, Mercedes-Benz Camiones y Buses Argentina S.A.U. se reserva el derecho de alterar las especificaciones y los diseños sin previo aviso. La tecnología de los productos Mercedes-Benz respeta la calidad del medio ambiente. Fotos no contractuales. Fecha de impresión: Octubre 2020.

Fuente: (Mercedes-Benz, 2020)