

Universidad Nacional de Ingeniería

Facultad de Ingeniería Mecánica



TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

**Evaluación económica del costo total de propiedad (CTP)
para la sustitución de motores diésel por motores dedicados
a GNV en una flota urbana de buses en Lima Metropolitana**

Para obtener el título profesional de Ingeniero Mecánico.

Elaborado por

Sebastian Agustin Zerga Morales

 [0009-0006-8300-4163](https://orcid.org/0009-0006-8300-4163)

Asesor

Dr. Ing. Juan Guillermo Lira Cacho

 [0000-0001-9118-4367](https://orcid.org/0000-0001-9118-4367)

LIMA – PERÚ

2024

Citar/How to cite	Zerga Morales [1]
Referencia/Reference	[1] S. Zerga Morales, “ <i>Evaluación económica del costo total de propiedad (CTP) para la sustitución de motores diésel por motores dedicados a GNV en una flota urbana de buses en Lima Metropolitana</i> ” [Trabajo de Suficiencia Profesional]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2024.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Zerga, 2024)
Referencia/Reference	Zerga, S. (2024). <i>Evaluación económica del costo total de propiedad (CTP) para la sustitución de motores diésel por motores dedicados a GNV en una flota urbana de buses en Lima Metropolitana</i> . [Trabajo de Suficiencia Profesional, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

Dedicatoria

A mis abuelos, Agustín, Dora, Paulino y Eulogia, por decirme, a veces sin palabras, de dónde vengo y a dónde voy.

A mis padres, Carlos y Ana, por su apoyo incondicional.

A mis hermanos y a mi enamorada, por acompañarme en este camino.

Agradecimientos

A mi asesor de tesis, el profesor Juan Guillermo Lira Cacho, por el permanente apoyo y seguimiento durante todo este proceso, también por su guía para culminar satisfactoriamente este trabajo.

A mis compañeros de MODASA, Juan Egoavil, Corly Agrada y José Tocas, por compartir sus experiencias y sus puntos de vistas acerca de los buses con motores diésel y a GNV.

A mis compañeros del grupo Polo, Jimmy Peñafiel, Jhanna Flores y a Rommy, por compartir la información histórica requerida para poder desarrollar este trabajo. A Bryan Alcarraz, por su constante apoyo emocional.

A mi amigo de la universidad, Walter Calle, por todos los consejos y críticas constructivas para alcanzar la meta.

RESUMEN

La presente investigación trata de la problemática del alto costo actual del petróleo diésel y cómo este afecta negativamente a la operación de una flota urbana de buses en Lima Metropolitana, por lo que se propone la sustitución de los motores diésel originales de estos buses por motores dedicados a gas natural vehicular (GNV).

Esta investigación se basa en la evaluación y comparación del costo total de propiedad (CTP) de un bus con motor diésel con el CTP del mismo bus al que se le cambia el motor por uno dedicado a GNV. Entre los costos a analizar están: los costos del combustible, los costos del mantenimiento, el costo de la instalación del motor a GNV, costo del overhaul del motor, el costo social del carbono y el precio de reventa. Se plantea una metodología aplicativa basada en el CTP. Para la evaluación, se utilizan los datos recolectados por el área de mantenimiento de la empresa propietaria de la flota de buses, como la distancia recorrida y el consumo de combustible.

Se realizó el cálculo de las variables del CTP en el supuesto caso de mantener la flota con los motores diésel y en el caso de sustituir el motor de los buses por uno dedicado a GNV durante los 8 últimos años de la vida útil de la flota (del año 13 al 20).

El resultado que se obtiene es una reducción del CTP anual desde el primer año de iniciada la sustitución, alcanzando un ahorro considerable para la empresa.

Palabras clave: Motores diésel, motores dedicados a gas natural vehicular, costo total de propiedad, flota de buses.

ABSTRACT

This research deals with the problem of the current high cost of gasoil and how it negatively affects the operation of an urban bus fleet in Lima Metropolitana, so it proposes the substitution of the original diesel engines by dedicated compress natural gas (CNG) engines.

This research is based on the evaluation and comparison of the total cost of ownership (TCO) of a bus with a diesel engine with the TCO of the same bus that changes the engine for a dedicated CNG one. Among the costs to be analyzed are fuel costs, maintenance cost, installation of the CNG engine, engine overhaul cost, social cost of carbon and resale price. Is proposed an applicative methodology based on the TCO. For the evaluation, the data collected by the maintenance area, such as the distance traveled and fuel consumption, are used.

The calculation of the TCO variables was carried out in the hypothetical case of keeping the fleet with the diesel engines and in case of replacing the engine of the buses with a CNG one during the last 8 years of the useful life of the fleet (from year 13 to 20).

The result obtained is a reduction of the annual TCO from the first year of the substitution, reaching a considerable saving for the company.

Keywords: diesel engines, CNG engines, total cost of ownership, bus fleet.

PRÓLOGO

El presente trabajo tiene como finalidad disminuir el costo total de propiedad (CTP) de una flota urbana de buses en Lima Metropolitana que originalmente tienen motores diésel, sustituyéndolos por motores dedicados a GNV. El trabajo está dividido en seis capítulos:

El **primer capítulo** corresponde a la **introducción**, donde se explica la problemática del costo del combustible diésel y su influencia en la operatividad de la flota de buses. Además, se presenta el objetivo de la investigación y los antecedentes nacionales e internacionales que sirvieron como base para el planteamiento y desarrollo de la investigación.

El **segundo capítulo** trata de los **marcos teórico y conceptual**, en él se definen las características y propiedades de los combustibles gaseosos que se utilizan en los motores de combustión interna. Asimismo, se detalla el sistema de alimentación de GNV presente en los buses, el significado del CTP, el costo social del carbono y el programa de apoyo económico para la sustitución de los motores originales por motores dedicados a GNV de buses urbanos en Lima Metropolitana.

El **tercer capítulo** contiene la hipótesis y operacionalización **de variables**, dependientes e independientes, con sus respectivos indicadores que se desarrollan en el trabajo.

En el **cuarto capítulo**, titulado **metodología de la investigación**, se describe la metodología, el tipo y diseño de la investigación, la unidad de análisis y la matriz de consistencia.

El **quinto capítulo** aborda el **desarrollo de la investigación**, basada en la evaluación del CTP. Se presentan y calculan los costos considerados y se agregan nuevos costos como aporte importante a la investigación.

En el **sexto capítulo**, se presenta el **análisis y la discusión de los resultados** del trabajo. Asimismo, se realiza la contrastación de la hipótesis de la investigación.

INDICE

RESUMEN	v
ABSTRACT	vi
PRÓLOGO	vii
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 Generalidades	1
1.2 Descripción del problema de investigación	2
1.3 Objetivo del estudio	5
1.4 Antecedentes investigativos	5
1.4.1 Investigaciones internacionales	5
1.4.2 Investigaciones nacionales	8
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	12
2.1 Marco teórico	12
2.1.1 Motores de combustión interna a combustibles gaseosos	12
2.1.2 Sistema de alimentación de combustible de motores dedicados a GNV	21
2.1.3 Costo total de propiedad de un (CTP)	28
2.1.4 Gases de efecto invernadero (GEI)	30
2.1.5 Costo social del carbono	31
2.1.6 Fondo de Inclusión Social Energética (FISE)	32
2.2 Marco conceptual	33
CAPÍTULO III. HIPÓTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES	35
3.1 Hipótesis general	35
3.2 Operacionalización de variables	35
CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN	36
4.1 Tipo y diseño de investigación	36
4.2 Unidad de análisis	37

4.3	Matriz de consistencia	38
CAPÍTULO V. DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN		39
5.1	Motores analizados	42
5.1.1	Motor diésel Mercedes Benz OM366 LA	42
5.1.2	Motor dedicado a GNV Fiat Power Train N60	43
5.2	Identificación de variables	43
5.2.1	Costos no considerados en el proyecto	44
5.2.2	Costos adicionados al costo total de propiedad	45
5.3	Cálculo de los costos	45
5.3.1	En el caso de mantener el motor diésel en un bus Mercedes Benz ..	45
5.3.2	En el caso de la sustitución del motor diésel por un motor dedicado a GNV en un bus Mercedes Benz	51
CAPÍTULO VI. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS		57
6.1	Análisis del CTP	57
6.1.1	Costos del overhaul del motor diésel y su sustitución de un motor diésel por un motor a GNV	57
6.1.2	Costo de los combustibles	57
6.1.3	Costo del mantenimiento	58
6.1.4	Costo del seguro obligatorio contra accidentes de tránsito (SOAT) y la revisión técnica (RT)	59
6.1.5	Costo social del carbono	59
6.1.6	Precio de reventa de un bus	60
6.2	Discusión de resultados	60
6.2.1	Costo total de propiedad de un bus Mercedes Benz con motor diésel	60
6.2.2	Costo total de propiedad (CTP) de un bus Mercedes Benz con motor dedicado a GNV	61
6.2.3	Costo total de propiedad acumulado	62

CONCLUSIONES	64
RECOMENDACIONES	66
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67
ANEXOS	73

Lista de Figuras

Figura 1.1	<i>Demanda y oferta del petróleo diésel, en miles de barriles por día (MBPD).</i>	2
Figura 1.2	<i>Consumo energético del sector transporte, por medio de transporte y por fuente energética.</i>	3
Figura 1.3	<i>Matriz del consumo de energía en el Perú</i>	4
Figura 1.4	<i>Vehículos pesados a GNV vs precio promedio del petróleo diésel.</i>	5
Figura 2.1	<i>Principales combustibles gaseosos utilizados en motores de encendido por chispa y diésel.</i>	12
Figura 2.2	<i>Comparación de la potencia de un motor dedicado a GNV (GNC) y con una mezcla de GNV + 20% de H₂.</i>	19
Figura 2.3	<i>Sistema de alimentación de un motor dual a gas y a petróleo diésel.</i>	20
Figura 2.4	<i>Sistema de alimentación de combustible para motores a GNV.</i>	22
Figura 2.5	<i>Regulador de presión de dos etapas.</i>	24
Figura 2.6	<i>Sistema de alimentación de aire.</i>	25
Figura 2.7	<i>Válvula de cilindro.</i>	26
Figura 2.8	<i>Electro inyector de GNV de la marca Fiat Power Train.</i>	27
Figura 2.9	<i>Sistema de recarga de GNV en un bus urbano.</i>	28
Figura 5.1	<i>Diagrama lógico del cálculo del CTP.</i>	41
Figura 6.1	<i>Costo total de propiedad anual e incidencia de variables (en soles).</i>	58
Figura 6.2	<i>Incidencia de las variables en el valor del CTP de un bus Mercedes Benz con motor diésel.</i>	61
Figura 6.3	<i>Incidencia de las variables en el valor del CTP de un bus Mercedes Benz con motor dedicado a GNV.</i>	62
Figura 6.4	<i>Costo total de propiedad de un bus de la flota (por año, en soles).</i>	63

Lista de Tablas

Tabla 2.1	Comparación de las características de los combustibles alternativos y convencionales	15
Tabla 2.2	<i>Tipos de tanques de GNV.</i>	23
Tabla 2.3	Precio de venta de tanques de GNV tipo 1, 2 y 3 en Perú.	23
Tabla 2.4	Emisión de CO _{2e} por tipo de combustible quemado.	31
Tabla 3.1	Variables e indicadores.	35
Tabla 4.1	Matriz de consistencia.	38
Tabla 5.1	Características técnicas de los buses Mercedes Benz con motor diésel, Agrale con motor dedicado a GNV y la propuesta de un bus Mercedes Benz con motor FPT.	40
Tabla 5.2	Características técnicas del motor Mercedes Benz OM366 LA	42
Tabla 5.3	Características técnicas del motor Fiat Power Train N60.	43
Tabla 5.4	Condiciones de las variables del costo total de propiedad.	44
Tabla 5.5	Variables adicionadas a la metodología del cálculo del CTP.	45
Tabla 5.6	Costo de los servicios y repuestos del overhaul del motor diésel de un bus Mercedes Benzl.	46
Tabla 5.7	Recorrido promedio mensual de los buses Mercedes Benz con motor diésel.	47
Tabla 5.8	Consumo promedio mensual de combustible de los buses Mercedes Benz con motor diésel.	48
Tabla 5.9	Costo del seguro y la revisión técnica de un bus Mercedes Benz con motor diésel.	49
Tabla 5.10	Costo de mantenimiento anual de un bus Mercedes Benz en función del año en que se efectúa.	50
Tabla 5.11	Costo social del carbono de un bus Mercedes Benz con motor diésel.	50
Tabla 5.12	Costo de los servicios y repuestos para la sustitución del motor diésel por un motor dedicado a GNV.	52
Tabla 5.13	Recorrido promedio mensual de los buses Agrale con motor dedicado a GNV.	53
Tabla 5.14	Consumo de GNV promedio mensual de un bus Agrale (en m ³).	54
Tabla 5.15	Costo del seguro y la revisión técnica de un bus Mercedes Benz con motor dedicado a GNV.	55
Tabla 5.16	Costo de mantenimiento anual de un bus Mercedes Benz con motor a GNV en función del año en que se efectúa.	56

Tabla 5.17 Costo social del carbono de un bus Mercedes Benz con motor dedicado a GNV.	56
Tabla 6.1 Costo total de propiedad (CTP) acumulado del año 13 al año 20 de vida útil de un bus Mercedes Benz con motor diésel y del mismo bus con el motor sustituido por uno a GNV	63

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1 Generalidades

El alto costo actual del petróleo diésel en el Perú es un problema que genera la necesidad de migrar a otras fuentes de energía. Varios autores, tanto a nivel nacional como nivel internacional, han analizado esta problemática y proponen diferentes soluciones.

En ese contexto, las empresas con flotas urbanas de buses, existen 4 escenarios posibles para afrontar esta problemática:

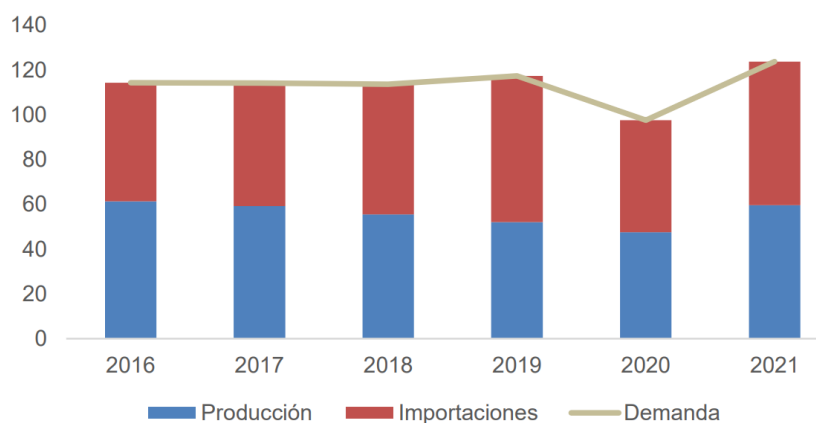
- Conservar la flota de buses a petróleo diésel y elevar el precio del pasaje.
- Renovar la flota por buses nuevos con motores a GNV, las cuales tienen una mejor economía de combustible, pero un alto costo inicial de adquisición.
- Convertir el motor diésel a GNV, con sistema dual o bicomcombustible, alternativas que se consideran de baja confiabilidad.
- Cambio del motor diésel de los buses por un motor dedicado a GNV.

Para evitar el alto costo de adquisición de una flota nueva y conservar la confiabilidad del motor, se plantea sustituir los motores diésel de la flota actual de buses con motores dedicados a GNV debido a las ventajas del bajo costo del combustible, el bajo nivel de gases contaminantes, la amplia red de abastecimiento del GNV en Lima Metropolitana, el financiamiento estatal y las amplias reservas de gas natural en el país.

1.2 Descripción del problema de investigación

En el año 2017, en la ciudad de Lima, un ciudadano promedio gastaba 50 soles a la semana en pasajes (Marketwin, 2017), pero para el 2023 los gastos se incrementaron en un 42%, llegando a 12 soles diarios (Espinoza, 2023). El alza de los pasajes se debe a que por lo menos el 40 % de los costos operativos de las unidades de transporte público que funcionan con petróleo diésel es por el costo del combustible (Bernardo & Pariona, 2023). Como se sabe, el precio del petróleo en el Perú se rige por el libre mercado, pero la oferta interna del combustible no abastece la demanda nacional, por lo cual se importa gran parte de este combustible, provocando que su precio dependa de la variabilidad del mercado internacional (OSINERGMIN, 2015). La importación del petróleo diésel en el 2021 representó el 51% de la demanda nacional, tal como se aprecia en la Figura 1.1, esto sin considerar el combustible diésel producido a partir del petróleo crudo importado (INDECOPI, 2022).

Figura 1.1 *Demanda y oferta del petróleo diésel, en miles de barriles por día (MBPD).*

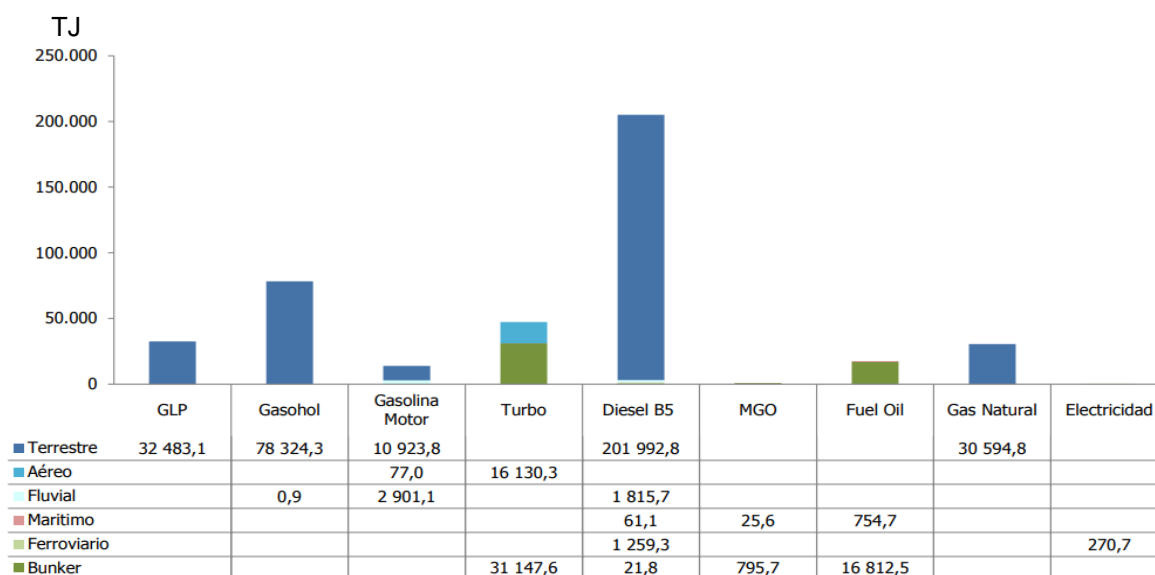


Fuente: INDECOPI (2022), "Informe de Lanzamiento del Estudio de Mercado sobre Combustibles Líquidos y Gas Licuado de Petróleo en el Perú".

Los combustibles fósiles utilizados para la propulsión de los buses urbanos intervienen en la contaminación del aire, este es un problema de alto interés por mitigar para el Ministerio del Ambiente (MINAM). Por lo que, mediante decretos supremos, el MINAM disminuye progresivamente los límites máximos permisibles, basándose en

normativas internacionales como la Euro y la Tier. También se regula la calidad del combustible disminuyendo la concentración del azufre en el petróleo a 50 ppm (MINAM, 2016). Estas normativas limitan el ingreso al mercado peruano de vehículos que no cumplan con ellas e impiden la conservación de las flotas que incumplan con las mismas. La fuente energética con mayor participación en el sector del transporte terrestre es el petróleo diésel B5. En la Figura 1.2 el gas natural vehicular se ubica en el puesto 4 (MEM, 2019).

Figura 1.2 Consumo energético del sector transporte, por medio de transporte y por fuente energética.

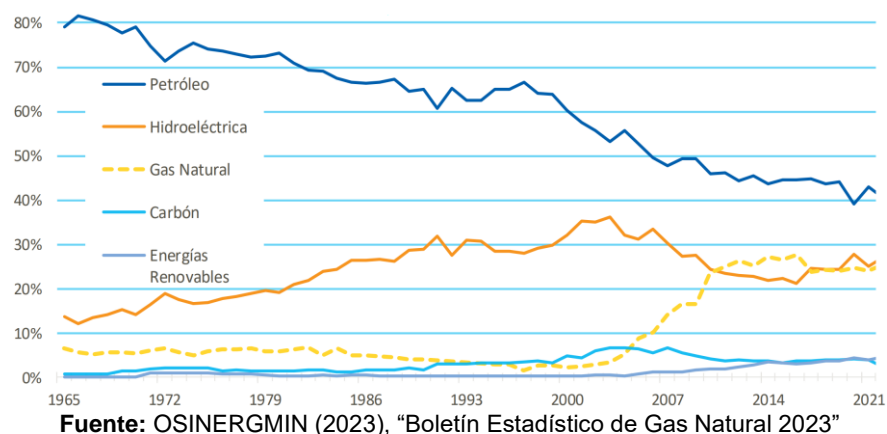


Fuente: Ministerio de Energía y Minas (2019), “Balance nacional de energía 2019”.

En el Perú, circulan más de 22.000 unidades de transporte público de pasajeros (interprovincial, urbano y turismo), de las cuales, 5.780 operan en Lima Metropolitana (MTC, 2023). Se estima en 12,2% el efecto invernadero contribuido por la emisión de gases (MINAM, 2019).

En Figura 1.3 hace dos decenios, la matriz energética del país existe la tendencia a disminuir el consumo del petróleo y carbón para reemplazarlos por fuentes energéticas más eco amigables y sostenibles (OSINERGMIN, 2023).

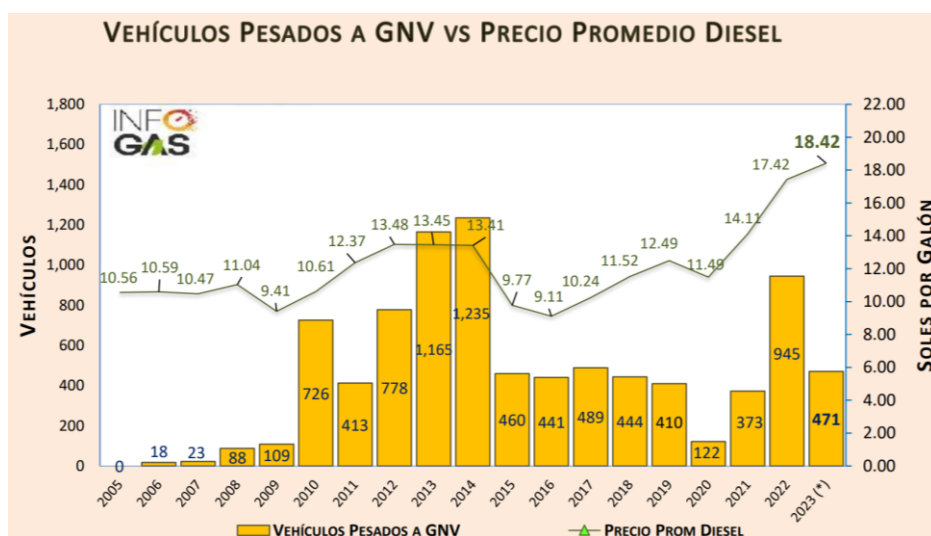
Figura 1.3 Matriz del consumo de energía en el Perú



Frente al problema de la inestabilidad del precio del petróleo, los empresarios del transporte público optan por otras alternativas energéticas como son los buses eléctricos o buses a GNV, pero los buses eléctricos tienen un alto costo de adquisición; por ello, a partir del 2021, la empresa MODASA se convirtió en el primer taller en obtener el certificado para conversiones a GNV de equipos pesados que beneficie a aquellos empresarios que cambien su motor diésel por un motor dedicado a GNV, a una fracción de lo que costaría la adquisición de una unidad nueva, contando para ello con el apoyo del Estado, a través de Fondo de Inclusión Social Energético (FISE), pagando esta sustitución en cuotas sin intereses.

En la Figura 1.44, se observa una asociación entre el precio del petróleo diésel, la compra de vehículos pesados a GNV y el aumento de la cantidad de los vehículos pesados a GNV en los años en los que se elevó el precio promedio del petróleo diésel, notándose que se presenta un incremento en las compras de estos vehículos a partir del 2010, con el inicio de las actividades del "Metropolitano", flota de buses urbanos que en su totalidad trabaja a GNV.

Figura 1.4 Vehículos pesados a GNV vs precio promedio del petróleo diésel.



Fuente: Infogas (2023), "Reporte de indicadores generales"(Infogas, 2023b)

Frente a este problema, cabe preguntarse en qué medida el incremento de los costos del petróleo diésel impacta negativamente en la operación de las flotas urbanas de buses con motores diésel.

1.3 Objetivo del estudio

Determinar cómo la sustitución de los motores diésel por motores dedicados a GNV disminuye notablemente el costo total de propiedad (CTP) de una flota urbana de buses.

1.4 Antecedentes investigativos

1.4.1 Investigaciones internacionales

Bautista, R. et al. (2022), "Giro Zero: Impulsando el transporte automotor de carga por carretera en Colombia hacia cero emisiones".

En este estudio se evalúa las alternativas vehiculares que existen en el transporte terrestre de carga para disminuir las emisiones de los gases de efecto invernadero. La toma de decisión se basa en 3 factores: impacto ambiental, costos operativos y conducción eficiente.

Se realizó un análisis para diferentes tipos de vehículos pesados, desde camiones rígidos de 2 ejes hasta semirremolques de 6 ejes, concluyendo que, para los camiones a GNV, se logra reducir la emisión del CO₂ en 11,76%, y los NO_x en un 25%, con respecto a un motor diésel Euro V.

En el caso de Colombia, el precio de un camión con motor a GNV es menor o igual al de un camión con motor diésel debido a los altos incentivos que existen allí, como el descuento del impuesto a la renta, la exclusión del impuesto al valor agregado (IVA), entre otros beneficios fiscales. Otra ventaja del GNV, es el menor costo del combustible, lográndose así disminuir los costos operativos en 30% con respecto a vehículos con motores diésel convencionales.

Szumska, E. et al. (2022), "Total Cost of Ownership analysis and energy efficiency of electric, hybrid and conventional urban buses".

En esta investigación se evalúa el CTP de buses urbanos con 3 diferentes formas de propulsión: diésel, híbrida diésel eléctrica y eléctrica. Se considera el costo de: compra de una unidad nueva, del combustible, del mantenimiento, del cambio de batería y de la infraestructura para la recarga.

Los autores concluyen que existen dos factores que inciden significativamente en el CTP de los buses: la ruta y el número de viajes. Para el caso de Polonia, se determinó que los buses eléctricos presentan un alto CTP (1 euro / km) en comparación a las demás unidades, llegando a casi duplicar su CTP con respecto a una unidad con propulsión híbrida (0,60 euro / km). La única forma de que los buses eléctricos disminuyan su CTP es por medio de una subvención económica al momento de adquirir el vehículo.

Gil, S. et al. (2021), "Transporte Sostenible en Argentina, Costos e impactos ambientales de los distintos combustibles".

El propósito fue evaluar alternativas de transporte y tecnologías existentes para el transporte público, analizando todos los costos involucrados, basándose en el costo nivelado de transporte (CNdT). El CNdT es el costo medio por pasajero para recorrer una cierta distancia, tomando en cuenta todos los costos, como el de adquisición del vehículo, mantenimiento, financiamiento y tasas.

Los autores concluyen que la mejor opción para el transporte urbano masivo era el bus eléctrico, con un costo de 0,14 USD/km.pasajero y 24,3 g (CO₂) /km.pasajero, sin embargo, mencionan que Argentina no cuenta con una red de suministro eléctrico que logre abastecer toda la demanda que se generaría y que el precio de las baterías es aún muy alto.

Asimismo, concluyen que, en un periodo de 10 a 15 años, con un costo de 0,13 USD/km.pasajero y 118,3 g (CO₂) /km.pasajero, el GNV sería una de las mejores alternativas, hasta que los vehículos eléctricos bajen de precio.

Scheimberg, S. (2020), "Consideraciones acerca de la diversificación del transporte pesado en Argentina. Una mirada desde la planificación energética".

El objetivo de este estudio es la sustitución de los combustibles líquidos en los buses urbanos debido a una conveniencia económica. Este interés económico se debe a la necesidad de disminuir los subsidios estatales, en especial, los asignados a las tarifas del transporte público.

Se evalúan 4 alternativas energéticas: biodiesel, diésel, GNV y eléctrica; determinando el costo de la adquisición, costo del mantenimiento y costo del combustible. Obteniendo un

costo operativo de 0,602 dólares / km para el bus con motor diésel, 0,303 dólares / km para el bus a GNV y 0,232 dólares / km para el bus eléctrico.

El autor concluye que la mejor alternativa es el GNV para los vehículos pesados debido al ahorro económico y baja contaminación; otro factor es que existe una gran red de suministro de GNV en Argentina y un gran interés por el desarrollo de la industria del GNV.

Peña, I (2018), "Evaluación del impacto ambiental asociado a una flota de autobuses públicos urbanos: la ciudad de Madrid como caso de estudio".

En esta investigación se evalúa el impacto ambiental de 5 escenarios en el transporte urbano en Madrid: el escenario actual, la renovación de flota con buses con motor diésel Euro VI, buses con motor a GNV, buses eléctricos con fuente de energía de generación mixta y, exclusivamente, con energías renovables.

Para realizar el análisis ambiental de los escenarios, la autora utiliza la metodología del análisis de ciclo de vida de los buses, desde su fabricación hasta su mantenimiento; también analiza el ciclo de vida del combustible, desde la extracción de la fuente de energía hasta la distribución y utilización. Esta metodología se basa en las normas ISO 14040 y 14044.

La investigadora concluye que, el escenario de menor impacto ambiental es el bus eléctrico con fuentes energéticas renovables, sin embargo, la investigación no considera el impacto ambiental de las baterías eléctricas (en su fabricación y posterior reciclaje).

1.4.2 Investigaciones nacionales

Aldana, J. et al. (2022), "Propuesta para la sustitución del combustible diésel en los vehículos de transporte de pasajeros".

El objetivo de esta tesis es proponer dos alternativas para sustituir al petróleo diésel como combustible en el transporte público, comparando los factores económicos, ambientales y sociales, tomando el caso de los buses con motores diésel y comparándolo con las alternativas de vehículos con motores a gas natural vehicular (GNV) y vehículos eléctricos.

Se evalúan las tres opciones propuestas de buses, realizando una evaluación “**privada**”, analizando los costos operativos (OPEX) y los costos de capital (CAPEX), y una evaluación “**social**”, adicionando a estos costos, los costos asociados a los beneficios sociales como son el tiempo de viaje, las emisiones contaminantes y los gastos por accidentes.

Los autores concluyeron que, en el estudio de 209 buses, los buses eléctricos son más rentables que los buses a GNV, con una relación beneficio / costo de 1,99, un VAN de 127 millones de dólares (mdd) considerando los costos asociados a los beneficios sociales, y precisando que un bus eléctrico no genera directamente CO₂. Sin embargo, considerando una evaluación “**privada**”, los buses a GNV son más rentables que los buses eléctricos, con una relación de beneficio / costo de 3,49, y alcanza un VAN de 39,7 mdd.

Bernardo, P. et al. (2022), “Evaluación de la factibilidad económica para cambiar la actual flota de autobuses convencionales por autobuses eléctricos en el Corredor Rojo en la Ciudad Metropolitana de Lima mediante la técnica del Total Cost of Ownership en el periodo del 2020-2030”.

En esta tesis se compara un bus con motor diésel con un bus eléctrico, basándose en la metodología del CTP, y analizando la flota de buses de la ruta del corredor 201 que recorre la ruta desde la avenida La Marina hasta la urbanización Ceres, en el distrito de Ate.

Mediante esta metodología, se analizan todos los costos que involucra la posesión del bus, incluyendo los costos de compra y reventa, el costo del combustible, los intereses, los seguros, el mantenimiento y las tasas fiscales; finalizando el trabajo, con el análisis de los indicadores económicos para determinar la factibilidad del cambio de flota.

Los autores concluyeron que los CAPEX de un bus con motor diésel son 3,94 veces menores que los de un bus eléctrico. Para los empresarios, esto sería un factor importante para la decisión de compra. También concluyen que los OPEX, como los consumos energéticos, se reducen 14 veces, y los costos de mantenimiento disminuyen 6 veces en comparación al bus diésel. Se afirma que el mayor costo inicial de adquisición de un bus eléctrico se compensa en 7 años y 10 meses.

Gonzales, C. (2018), "Implementación del sistema de gas natural en la flota de camiones de las plantas de Lima de la empresa UNICON".

Esta investigación tiene como objetivo disminuir el costo del consumo de combustible migrando de fuente energética a GNV. Se evalúa cuatro diferentes casos: el *overhaul* del motor diésel, la conversión del motor diésel a GNV, el *overhaul* del motor diésel y su conversión a GNV, y la sustitución del motor diésel por un motor dedicado a GNV. Para comparar los diferentes casos, se evalúan factores como el costo del servicio, tiempo de trabajo, confiabilidad, ahorro de combustible y durabilidad del motor.

Al realizar el análisis económico del cambio de motor diésel por un motor dedicado a GNV para las 22 unidades que conforman la flota, la autora obtiene un VAN positivo de 321.259 dólares americanos y un TIR de del 48%, lo cual indica que este cambio es rentable y cumple con los requisitos mínimos para que la empresa apruebe el proyecto.

La autora del trabajo concluye que la sustitución del motor diésel por un motor dedicado a GNV es la opción óptima debido a que permite un ahorro en el costo del combustible de 44%, conservando la confiabilidad y durabilidad del motor diésel inicial.

Mendoza, H (2017), "El uso del gas natural vehicular (GNV) y su incidencia en el costo de transporte de una empresa avícola".

El estudio analiza la situación actual de GNV desde la perspectiva de una empresa de transporte de carga, realizando encuestas a 49 personas de diferentes áreas de la empresa acerca de los conocimientos que tienen del GNV, así como los beneficios económicos y ambientales que conlleva.

En la segunda parte, analiza los dos principales costos de una flota vehicular: el costo del mantenimiento y el costo del combustible, comparando los costos de una flota de 14 tractocamiones con motores diésel con el supuesto caso de adquirir unidades de similares prestaciones con motores dedicados a GNV.

Los resultados obtenidos señalan que, en la flota de 14 buses a GNV en un periodo de 5 años, se ahorraría un 33,77% (S/ 2.310.376,23) con respecto a los costos del mantenimiento y combustible de la flota utilizando petróleo diésel.

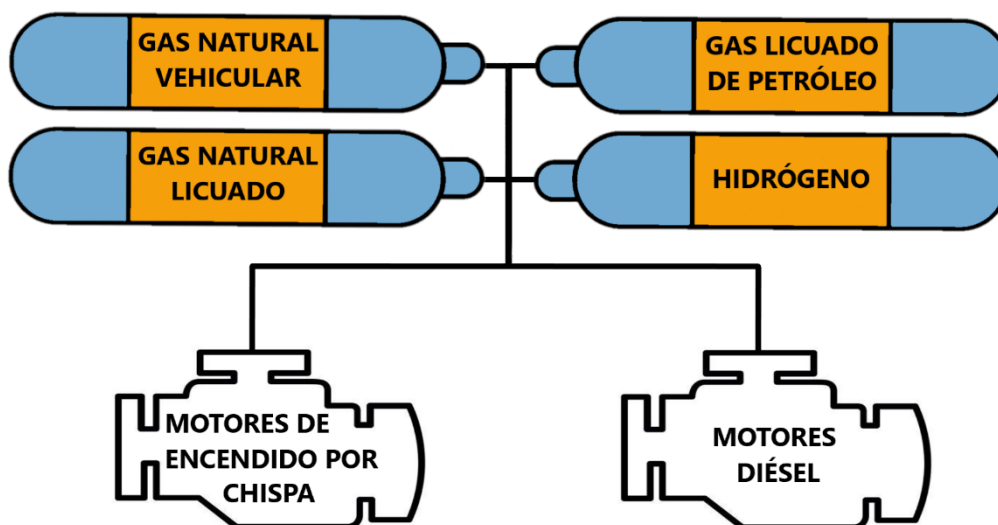
CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

2.1 Marco teórico

2.1.1 Motores de combustión interna a combustibles gaseosos

Actualmente, los motores de combustión interna de los buses utilizados en prestación del servicio urbano de pasajeros, se utilizan principalmente cuatro tipos de combustibles gaseosos: GNV, gas natural licuado (GNL), gas licuado de petróleo (GLP) y el hidrógeno (comprimido o licuado). Estos combustibles se emplean tanto en los motores de encendido por chispa como diésel, ver Figura .

Figura 2.1 Principales combustibles gaseosos utilizados en motores de encendido por chispa y diésel.



Fuente: Adaptado de Lira, J. (2017), "Uso de combustibles gaseosos en motores de combustión interna". (Lira, 2015)

Los motores que funcionan exclusivamente con combustibles gaseosos se llaman motores "dedicados", y son empleados generalmente en motores encendido por chispa.

Los motores que funcionan con más de un tipo de combustible pueden ser de dos tipos: 1) con sistema bicombustible; 2) con sistema dual.

En el caso de los motores con sistema de bicombustible, estos son de encendido por chispa que utilizan alternativamente uno de los dos combustibles considerados, lo cual ocurre cuando el operador lo requiera o cuando la computadora lo decida. Las aplicaciones más frecuentes de este sistema son en los motores a gasolina que son convertidos a GNV o GLP como segundo combustible, y que son utilizados a menudo en Lima, especialmente en automóviles para el servicio de taxi.

Los motores con sistema de alimentación dual son motores diésel, a los que se les suministra en simultáneo dos combustibles, uno de ellos es el petróleo diésel (inyección piloto) y el otro es un combustible gaseoso, como el GNV o GLP, que se suministra en el ducto de admisión del motor (MTC, 2006).

2.1.1.1 Motores a gas natural vehicular (GNV) y licuado (GNL)

El GNV está compuesto hasta un 94,4% de metano (el resto son otros gases como el etano, propano, etc.), el cual tiene un alto poder calorífico inferior (en MJ/kg) mayor que cualquier combustible líquido, tal como se detalla en la Tabla 2.1. La ausencia de cadenas largas de carbono-carbono en el GNV, además de una estructura molecular simple y estable, genera que este combustible tenga un número de octano más alto que cualquier gasolina comercial, permitiendo tener una mayor relación de compresión en los motores dedicados a GNV debido a su alta resistencia al autoencendido y la detonación. La baja relación carbono / hidrógeno en las moléculas del metano también permite que en la combustión se emita menos dióxido de carbono (20% menos CO₂, por cada kg de combustible) que utilizando otros combustibles compuestos por hidrocarburos más complejos. El estado gaseoso del GNV también permite una mezcla aire - combustible más homogénea que los combustibles líquidos, permitiendo esto una combustión más completa y limpia, sin material particulado, que es un producto típico de la combustión en los motores diésel. A pesar de que el gas natural tiene un alto poder calorífico gravimétrico (en MJ/kg), su densidad energética volumétrica (en MJ/m³) es muy inferior a la de los combustibles líquidos, por lo

que para su utilización en el transporte terrestre este debe almacenarse en depósitos a altas presiones (de 20 a 25 MPa). Esta desventaja ocasiona que la autonomía de recorrido de los vehículos a GNV sea reducida y que su utilización esté mayormente limitada a las ciudades, zonas urbanas o con estaciones de carga cercanas entre sí (Bae & Kim, 2017). En Lima, para los automóviles, el consumo típico de GNV es de 9 a 11,8 kilómetros / m³, con un rendimiento de hasta 7,5 km / sol (SITEC,2024); para el caso de buses de transporte urbano, el intervalo de consumo es de 2 a 5 km /m³ (Unidad de Planeación Minero-Energética, 2019).

Una alternativa para afrontar el factor limitante de las cortas distancias de autonomía de los vehículos con motores a GNV es el uso del gas natural licuado (GNL), que se obtiene enfriando el gas natural hasta -162°C, reduciéndose con ello 600 veces su volumen a una presión cercana a la atmosférica, lo que permite su traslado y almacenamiento en tanques más livianos. Aunque el gas está en estado líquido, la inflamabilidad del GNL es similar a la del GNV, por lo que los operadores no están expuestos a un mayor peligro de inflamación, sin embargo, al estar a temperaturas bajo cero, el GNL presenta el riesgo de producir quemaduras en frío si entra en contacto con la piel. Para la correcta manipulación en la recarga del GNL se requiere utilizar guantes criogénicos, pantalla facial, ropa antiestática, calzado de protección y cable de toma tierra. La principal desventaja de este combustible es el elevado costo de la implementación de las estaciones de servicio, los sistemas de criogenización y los tanques especiales en los vehículos (Megino, 2023).

Tabla 2.1 Comparación de las características de los combustibles alternativos y convencionales

Características	Gasolina	Diésel	Metano	Hidrógeno	Gas Licuado de Petróleo (GLP)		Alcohol	
					Propano	Butano	Metanol	Etanol
Fórmula (estado)	$C_nH_{1.87n}(l)$	$C_nH_{1.8n}(l)$	$CH_4(g)$	$H_2(g)$	C_3H_8	C_4H_{10}	CH_4O	C_2H_6O
Densidad (kg/m^3) a $0^\circ C$ y 1 atm.	0,72-0,78	0,84-0,88	0,72	0,09	0,51	0,58	0,792	0,785
Poder calorífico inferior (MJ/kg)	44	42,5	50	120	46,1	45,5	19,9	26,9
Número de octano (RON)	92-98	-	120	≥ 120	111	103	109	107
Número de cetano	-	52	-	-	-	-	-	-
Relación estequiométrica aire-combustible (A/C)	14,6	14,5	17,23	34,3	15,6	15,4	6,5	9
Calor latente de vaporización (kJ/kg)	305	270	509	-	426	385	1168	840
Punto de ebullición ($^\circ C$)	27-225	-	-161,5	-	-42	-0,5	64,7	78
Velocidad de la llama laminar (m/s)	0,37-0,43	-	0,38	1,85	0,38	0,37	-	0,39

Fuente : Choongsik, B., et al. (2016), "Alternative fuels for internal combustion engines".

En el Perú, existen pocas estaciones de GNL, y los camiones con motores dedicados a GNL aún no se encuentran a la venta, las pocas unidades que circulan son utilizadas con fines de prueba. Preliminarmente, utilizando GNL, se estima un 33% de ahorro en el costo del combustible con respecto al petróleo diésel (Infogás, 2023).

2.1.1.1.1 Motores a gas licuado de petróleo (GLP)

El GLP es obtenido principalmente del proceso de refinado del petróleo. Se compone de propano, butano, propileno y otros hidrocarburos ligeros. La cantidad de propano en el GLP es variable, pudiendo ser, incluso, propano puro. El GLP es el combustible más común en el Perú después del petróleo diésel y la gasolina, con más de 650.000 unidades circulando en el país según la Sociedad Peruana de Gas Licuado (SPGL). La tecnología utilizada en los motores automotrices a GLP es muy similar a la de los motores a GNV, la principal diferencia es la presión de trabajo y la presión de almacenamiento del GLP (6 – 8 bares) (Raslavičius et al., 2014).

En cuanto a las emisiones contaminantes, el GLP emite entre 15 a 20% menos CO₂ que un motor a gasolina y hasta un 98% menos de NO_x que un motor diésel. EL GLP, al igual que cualquier combustible gaseoso, presenta una combustión más limpia, sin emisión de SO_x y partículas sólidas suspendidas en los gases de escape con respecto a los combustibles líquidos derivados del petróleo.

En el país, generalmente, los vehículos que utilizan este combustible trabajan con motores de encendido por chispa que tienen sistema bicombustible, es decir, el motor funciona alternativamente a gasolina o GLP. La conversión de un vehículo particular (automóviles o camionetas) es, aproximadamente, 2.000 soles más barata que la conversión a GNV (Montero, 2023). El consumo de combustible en estos vehículos oscila entre 24 a 30 kilómetros por galón; considerando el precio del galón en 6,4 soles, lo que da un rendimiento de 3,75 a 4,7 km / sol (SITEC, 2024).

2.1.1.2 Motores a hidrógeno

La energía primaria para la obtención del hidrógeno proviene tanto de recursos renovables como no renovables. A diferencia de los combustibles fósiles, la combustión del hidrógeno solo produce agua y NO_x, y no emite moléculas con contenido de carbono como el CO₂, CO y HC. Existen dos tipos de motores a hidrógeno: los motores eléctricos con pila de combustible y los motores de combustión interna. Los primeros, es decir, con pila de combustible, funcionan mediante una reacción electroquímica entre el hidrógeno y el oxígeno del aire, dando como resultado, calor, vapor de agua y electricidad, la cual es utilizada por un motor eléctrico para la propulsión del vehículo. El funcionamiento del motor de combustión interna a hidrógeno es similar al de los motores de encendido por chispa que utilizan combustibles convencionales.

Se sabe que el hidrógeno tiene el más alto octanaje en comparación a los demás combustibles (≥ 120 , ver tabla 2.1), lo que permite utilizarlo en motores con una mayor

relación de compresión, los que, en conjunto con una velocidad de propagación de llama más alta, pueden lograr una mayor eficiencia térmica.

El hidrógeno en el planeta existe en abundancia, sin embargo, no es posible extraerlo directamente del medio ambiente para su aprovechamiento, por lo que se recurre a diferentes métodos para su generación. El método más limpio para su obtención es la electrolisis del agua, pero actualmente este solo representa el 3% de todo el hidrógeno producido en el mundo; el hidrógeno restante es obtenido mediante el proceso de reformado con vapor de agua del gas natural.

Aparte de la dificultad de la obtención del hidrógeno, otro gran desafío es su almacenaje. Debido a su baja densidad energética se requiere almacenarlo a altas presiones (350-700 bar), y si se desea almacenarlo en estado líquido para ocupar menor espacio, se requiere enfriarlo a una temperatura de -253°C .

El hidrógeno está catalogado como el combustible del mañana por ser eficiente, sostenible y eco amigable, pero para lograrlo, se requiere afrontar los problemas de producción, almacenamiento y que su utilización sea segura y rentable económicamente (Montero, 2023).

Algunos países tienen prototipos de motores a hidrógeno. Solo después de haber afrontado el alto costo de la adquisición de un bus a hidrógeno, cuyo valor fluctúa entre 400 mil y un millón de dólares, recién se comienza a aprovechar de todos los beneficios del combustible. En Santiago de Chile, por ejemplo, para el caso de un bus de 12 metros, el costo de producción del hidrógeno es de 9 USD / kg de H_2 , con un tiempo de carga entre 3 y 22 minutos y una autonomía de 6 a 9 kg de H_2 / 100 km (Taborelli, 2023).

2.1.1.3 Motores duales a GNV e hidrógeno (mezcla de GNV +H₂)

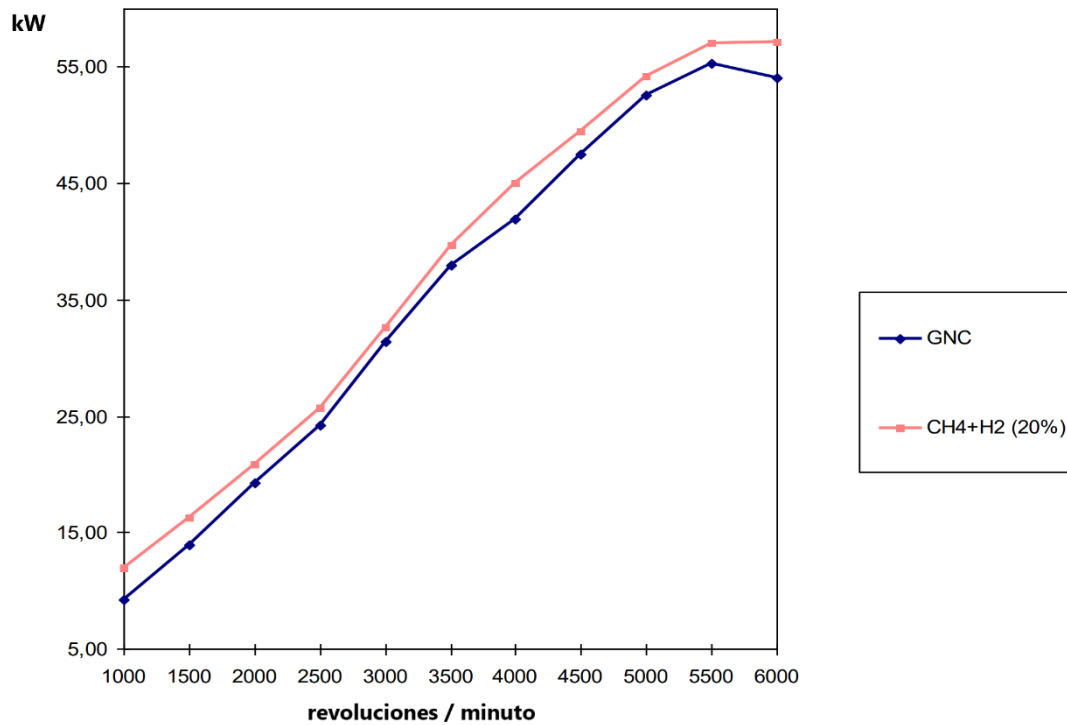
Los motores duales que usan mezclas de gas natural con hidrógeno tienen varios beneficios ambientales y económicos. Por un lado, como ya se mencionó, el hidrógeno es un combustible renovable y limpio, que se puede producir a partir del agua y electricidad, y cero emisiones de efecto invernadero ni sustancias contaminantes. Por otro lado, el gas natural es un combustible fósil, pero más barato y menos contaminante que el petróleo diésel o la gasolina. Ambos combustibles (H₂ y GNV) permiten reducir el costo de operación, las emisiones de CO₂, material particulado y el SO_x, aumentar la eficiencia, la flexibilidad y la confiabilidad del motor.

Sin embargo, el GNV presenta una gran desventaja: la velocidad de la propagación de la llama es baja, lo que provoca una disminución de la potencia (ver tabla 2.1), por lo que se debe adelantar la chispa en comparación a un motor a gasolina, para así compensar parcialmente esta disminución. Esta pérdida de potencia es menor cuando se mezcla el GNV con 20% - 30% (en volumen) de hidrógeno.

Al mezclar GNV con hidrógeno al 20%, y trabajando con una mezcla pobre ($\lambda^1=1,2$), se logra obtener un ligero incremento en la potencia en comparación a cuando se usa únicamente GNV, tal como se muestra en la Figura . Adicionalmente, se logra disminuir el consumo específico y se disminuyen las emisiones de NO_x (Franzi et al., 2016). Este tipo de motor aún está en etapa experimental por lo que su aplicación está limitada a autos, más no se ha encontrado información en buses urbanos de pasajeros.

¹ λ : factor lambda, relación entre la relación aire combustible de la mezcla real y la relación aire combustible de la mezcla estequiométrica.

Figura 2.2 Comparación de la potencia de un motor dedicado a GNV (GNC) y con una mezcla de GNV + 20% de H₂.

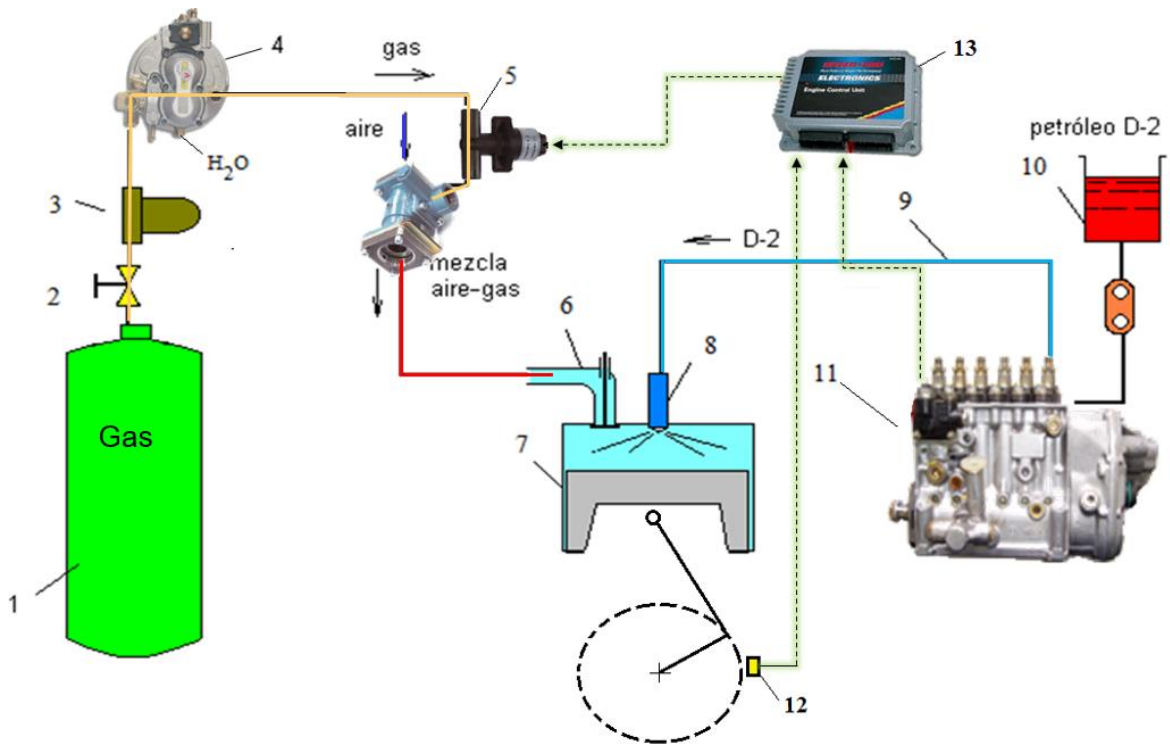


Fuente: Franzi, R., et al. (2016), "Utilización del combustible híbrido (GNC+H₂) en motores de uso vehicular".

2.1.1.4 Motores con sistema dual a petróleo diésel y gas natural

En la Figura se aprecian motores diésel que trabajan con GNV y petróleo diésel simultáneamente. Para su funcionamiento, el gas natural es suministrado por el dosificador (5) hacia el múltiple de admisión, donde se realiza una premezcla con el aire. Posteriormente, el combustible líquido (petróleo diésel) "piloto" se inyecta cerca del punto muerto superior, al final de la carrera de compresión, para iniciar el autoencendido del gasóleo seguido de la combustión de la mezcla del gas natural con el aire (Bae & Kim, 2017). Algunos de estos motores duales, aparte del GNV y el petróleo diésel, pueden trabajar con mezclas de biodiésel, biogás y otros combustibles gaseosos.

Figura 2.3 Sistema de alimentación de un motor dual a gas y a petróleo diésel.



Fuente: Lira, J. (2017), "Uso de combustibles gaseosos en motores de combustión interna".

1. Cilindros de almacenamiento de GNV – 2. Válvula de paso de paquete de cilindro – 3. Filtro – 4. Reductor de presión – 5. Dosificador – 6. Múltiple de admisión – 7. Cámara de combustión – 8. Inyector de petróleo diésel – 9. Cañería del inyector – 10. Tanque de petróleo diésel – 11. Bomba de inyección de petróleo diésel – 12. Sensor de posición del cigüeñal – 13. Unidad electrónica de control.

Las ventajas de estos motores son: reducción del impacto ambiental, ahorro económico (debido a la disminución del consumo del petróleo diésel), costo de la conversión del motor a una fracción de lo que costaría un motor dedicado a GNV. Todas estas ventajas se logran sin perder las bondades de un motor diésel como la potencia y el alto torque, también permite trabajar a diferentes regímenes de carga y velocidad en cualquier condición climática (Yuksel, 2021).

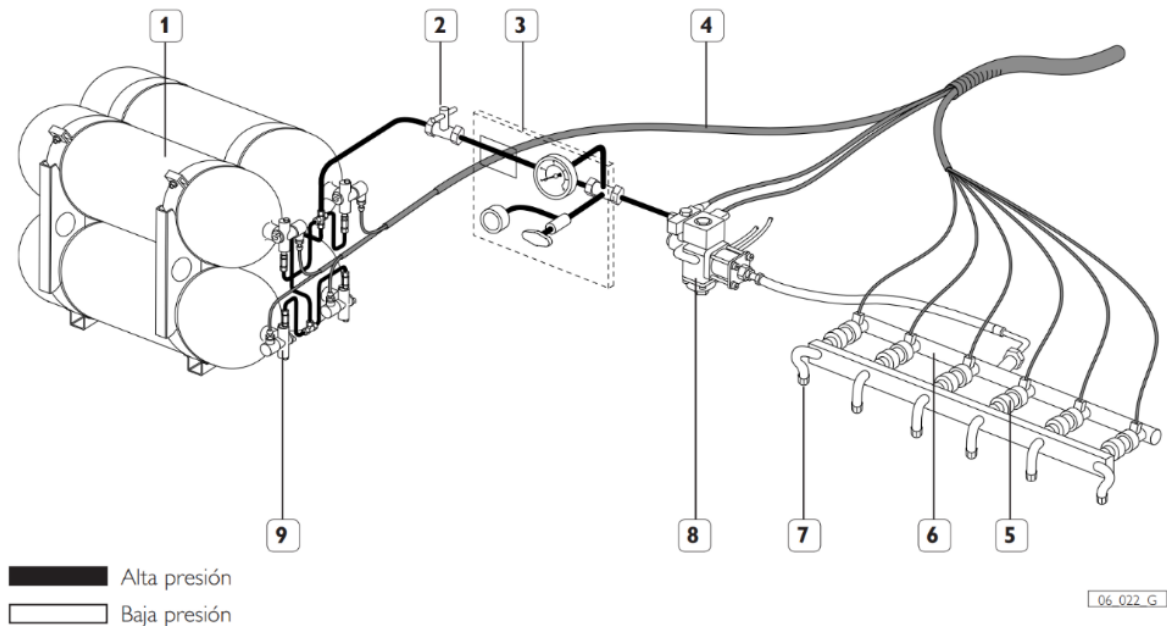
Con ayuda del Estado, mediante prestamos sin intereses, los propietarios de buses urbanos pueden acceder al sistema dual fuel, alcanzando un ahorro en combustible del

25%, con un menor costo de inversión que con la sustitución del motor diésel por uno dedicado a GNV y con menos cantidad de tanques (para un bus de 12 metros de largo y 17 toneladas de peso bruto de aplicación de transporte urbano solo requeriría 2 tanques de 100 litros, en comparación de los 9 tanques para un bus con motor dedicado a GNV) lo que permitiría el incremento de la carga útil (Varigas, 2023).

2.1.2 Sistema de alimentación de combustible de motores dedicados a GNV

Un bus de pasajeros, con un motor dedicado a GNV, requiere contar con un sistema de alimentación de combustible tal como el que se muestra en la Figura . El GNV ingresa al sistema a través de la válvula racor de llenado (3) y se almacena en los cilindros (1) a una presión de 200 bar. Cada cilindro está equipado con una válvula de paso (9), y, adicionalmente, existe una válvula de paso (2) por paquete de cilindros (1). Antes de ingresar al motor, el GNV pasa por un proceso de reducción de la presión hasta 9 bar, mediante el regulador de presión (8). Una vez reducida la presión, el GNV se dirige al riel de inyectores (6) para ser distribuido a cada cilindro, a través de un inyector (5), hacia los tubos de admisión por medio de las cañerías (7). Todo este proceso es controlado y gestionado por una computadora que recibe la información de todos los componentes involucrados a través del ramal eléctrico (4) (Iveco Motors, 2005).

Figura 2.4 Sistema de alimentación de combustible para motores a GNV.



Fuente: Iveco Motors (2007), "N60 ENT G: Directiva de instalación".

1. Cilindros de almacenamiento – 2. Válvula de paso de paquete de cilindro – 3. Panel de carga – 4. Ramal eléctrico – 5. Inyectores – 6. Riel de inyectores – 7. Cañería de entrada de combustible a los tubos de admisión – 8. Regulador de presión de doble etapa – 9. Válvula de cilindro

2.1.2.1 Cilindros (tanques) de alta presión para el almacenamiento del gas natural comprimido.

Son cilindros de materiales compuestos, tal como se muestra en la Tabla 2.2. La máxima presión de trabajo es de 200 bar, a 15 °C, pudiendo soportar hasta 260 bar. Normalmente, un bus de 12 metros cuenta con 8 o 9 cilindros de 100 litros de capacidad volumétrica c/u (hidráulica) dispuestos de forma transversal o longitudinal al bus, aprovechando el espacio disponible en el chasis (INDECOPI, 2004).

Tabla 2.2 Tipos de tanques de GNV.

Tipo de tanque	Material
Tipo 1	Cilindro metálico.
Tipo 2	Cilindro interno metálico con recubrimiento circunferencial de resina.
Tipo 3	Cilindro interno metálico con recubrimiento total de resina.
Tipo 4	Cilindro interno no metálico con recubrimiento total de resina.

Fuente: INDECOPI (2004), “Norma técnica peruana 111.013”

En las flotas de buses urbanos en Lima, por lo general, se utilizan tanques de GNV tipo 1 y 2 por ser económicos y de mayor vida útil, estos tanques tienen una capacidad de 100 a 135 litros a 200 bar y una vida útil entre una a dos décadas según la norma ISO 11439. Estos tanques pueden variar de diámetro y longitud para adecuarse al espacio disponible en el bus en el cual van a estar montados, disponible en la Tabla 2.3.

Tabla 2.3 Precio de venta de tanques de GNV tipo 1, 2 y 3 en Perú.

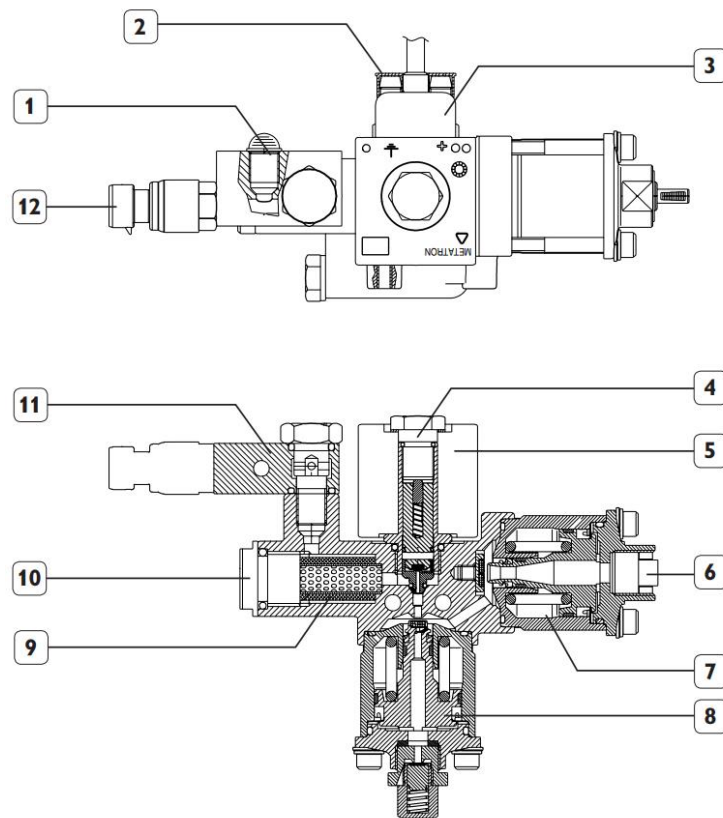
Diámetro x volumen x presión máx.	Largo / peso	Precio de venta	Vida útil ISO 11439
325 mm x 100 l x 200 bar – Tipo 1	1495 mm / 95 kg	\$331.86	20 años
325 mm x 120 l x 200 bar – Tipo 1	1770 mm / 114 kg	\$382.63	20 años
356 mm x 100 l x 200 bar – Tipo 1	1280 mm / 96 kg	\$362.82	20 años
356 mm x 120 l x 200 bar – Tipo 1	1500 mm / 111 kg	\$392.54	20 años
338 mm x 100 l x 200 bar – Tipo 2	1440 mm / 73 kg	\$393.78	15 años
338 mm x 120 l x 200 bar – Tipo 2	1695 mm / 85 kg	\$430.93	15 años
338 mm x 135 l x 200 bar – Tipo 2	1900 mm / 97 kg	\$458.80	15 años
365 mm x 120 l x 200 bar – Tipo 3	1564 mm / 43 kg	\$1,441.46	15 años

Fuente: Solution Supply (2022), “Estimación de costos de tanques de GNV”.

2.1.2.2 Regulador de presión de dos etapas.

Este regulador de presión se encarga de reducir (en dos etapas) la presión de los tanques de GNV hacia los inyectores. La primera etapa (de alta presión) reduce los 200 bar de presión en los tanques de gas, que ingresan por (1) (en Figura) hasta 14 bar, mientras que en la segunda etapa (de estabilización) se alcanza la presión de 9 bar, con la que es suministrado a los inyectores por el racor de salida (6) (Iveco Powertrain, 2007).

Figura 2.5 Regulador de presión de dos etapas.



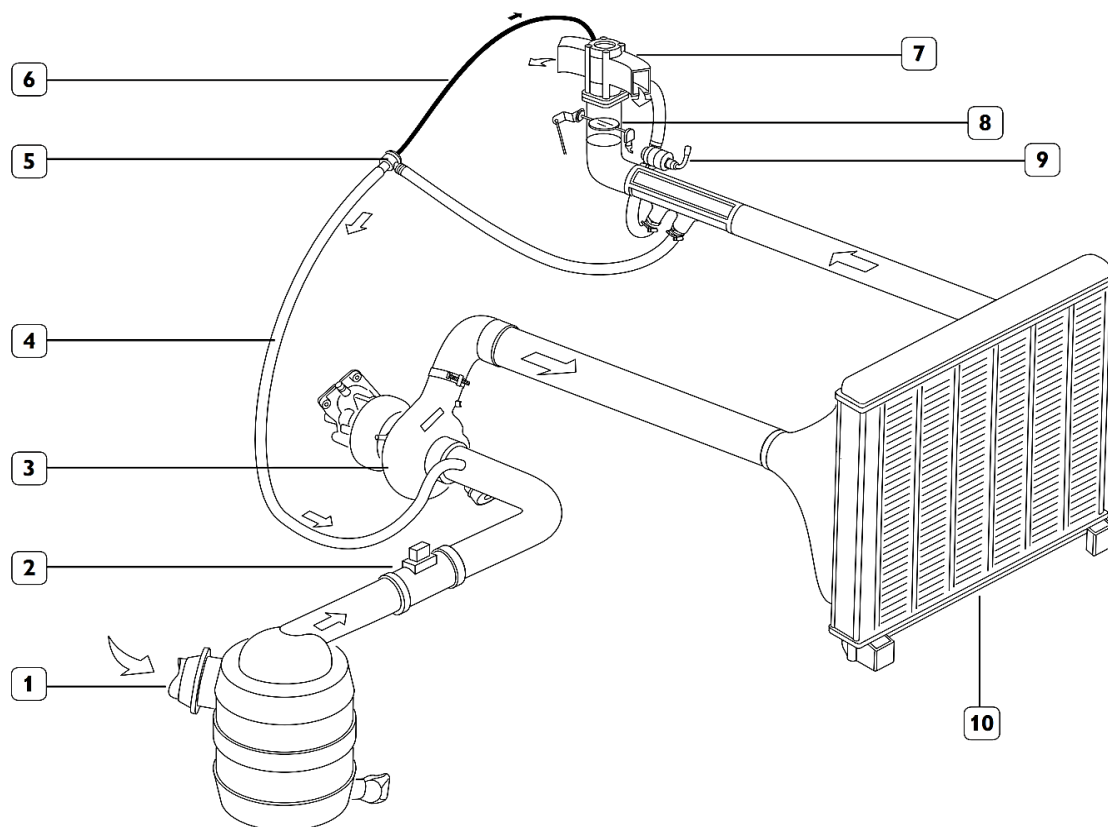
Fuente: Iveco Motors (2007), "N60 ENT G: Directiva de instalación".

1. Racor de entrada de combustible – 2. Racores del circuito del líquido refrigerante del motor – 3. Conector eléctrico de la electroválvula – 4. Grupo de soporte de válvula – 5. Bobina de la electroválvula – 6. Racor de salida de combustible 7. Segunda etapa de regulación de combustible- 8. Primera etapa de regulación – 9. Filtro – 10. Tapón – 11. Racor para sensor de presión – 12. Sensor de presión del combustible en la entrada.

2.1.2.3 Sistema de alimentación de aire del motor

El sistema de alimentación de aire (ver Figura) debe mantener y suministrar la cantidad de aire necesaria para el óptimo funcionamiento del motor. Para el caso de motores dedicados a GNV en vehículos pesados, se utiliza un sistema sobrealimentación del aire con un turbocompresor (3), y su enfriamiento con un intercooler (10). Al ser motores que trabajan con mezclas cercanas a la estequiométrica, se requiere un control preciso del ingreso de aire, por lo que existen sensores y actuadores electrónicos como el sensor de caudal o sensor MAF (2) y la válvula mariposa con el sensor de posición (8), que regula el caudal de aire que ingresa al motor (Iveco Powertrain, 2007).

Figura 2.6 Sistema de alimentación de aire.



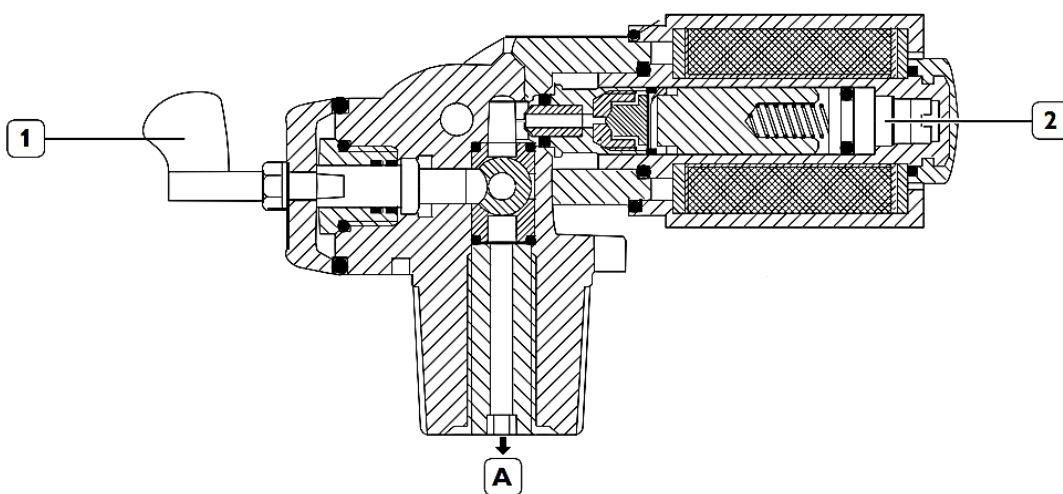
Fuente: Iveco Motors (2007), "N60 ENT G: Directiva de instalación".

1. Entrada de aire al filtro – 2. Sensor de caudal – 3. Turbocompresor – 4. Tubo de recirculación de aire sobrealimentado – 5. Válvula neumática para recirculación de aire sobrealimentado – 6. Manguera de vacío para accionar la recirculación – 7. Múltiple de admisión – 8. Válvula mariposa con sensor de posición – 9. Electroválvula de caudal mínimo – 10. Intercambiador de calor (intercooler)

2.1.2.4 Válvula de cilindro.

La válvula de cilindro (ver Figura) se enrosca a la entrada del cilindro (tanque) de GNV por A, cuenta con una válvula de corte de caudal de accionamiento manual (1) y una electroválvula de corte (2) accionada por la computadora. Cuenta, también, con un limitador de caudal, en caso de fugas o roturas de cañerías, y un tapón fusible que, a la temperatura de 103 °C, descarga el gas a la atmósfera para evitar explosiones (Iveco Powertrain, 2007).

Figura 2.7 *Válvula de cilindro.*



Fuente: Iveco Motors (2007), "N60 ENT G: Directiva de instalación".

1. Válvula de corte de caudal de accionamiento manual – 2. Electroválvula de corte de caudal – A. Conexión al cilindro de GNV

2.1.2.5 Electro inyectores de GNV

Los electro inyectores mostrados en la Figura inyectan el GNV a una presión de 9 bar inmediata a la válvula mariposa, en el múltiple de admisión. El funcionamiento de los electro inyectores es del tipo secuencial faseado (controlados de acuerdo con el orden de encendido de los cilindros), mientras que la inyección del GNV se inicia en la parte final de la fase de escape de gases del cilindro hasta la fase de admisión. La activación del electro inyector es controlada por la computadora, enviando un pulso que energiza una bobina que libera el GNV hacia el múltiple de admisión, mezclándose con el aire previamente filtrado (Iveco Motors, 2005).

Figura 2.8 Electro inyector de GNV de la marca Fiat Power Train.

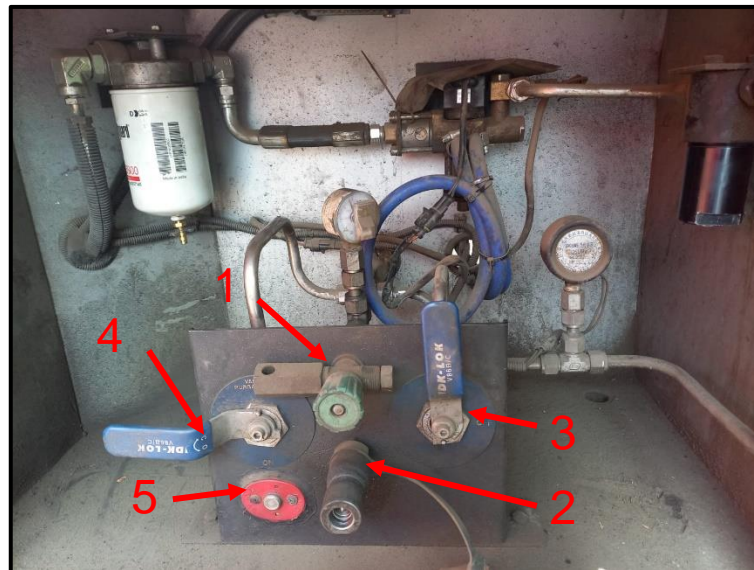


Fuente: Autodoc, <https://www.autodoc.es/bosch/1150452>.

2.1.2.6 Sistema de recarga de GNV en un bus urbano

Para realizar la recarga del GNV en los buses urbanos existen dos formas: la carga lenta (1), utilizado también en los automóviles a GNV y la carga rápida (2), esto se evidencia en la Figura . Por otro lado, a las tomas de recarga, los buses con motores dedicados a GNV utilizan una válvula de corte de suministro de GNV (3) en caso de fugas de GNV en el motor y una válvula de purgado de GNV (4) para realizar trabajos de mantenimiento en las cañerías de los tanques de GNV. Otra similitud del sistema de recarga de GNV de un bus y un automóvil es que ambos cuentan con un chip de GNV (5), pieza indispensable para realizar la recarga de GNV.

Figura 2.9 Sistema de recarga de GNV en un bus urbano.



1. Válvula de carga lenta – 2. Válvula de carga rápida – 3. Válvula de corte de combustible – 4. Válvula de mantenimiento – 5. Chip para recarga de GNV.

2.1.3 Costo total de propiedad de un (CTP)

El CTP es una herramienta de análisis financiero utilizada en la gestión empresarial y de activos desde finales del siglo pasado. Su propósito es evaluar el costo real de adquisición y posesión de bienes, como los buses en este estudio, considerando tanto los costos directos como indirectos durante un periodo específico. Una evaluación adecuada del CTP es crucial para evitar decisiones antieconómicas basadas únicamente en el costo inicial. En algunos casos, un bien con un costo inicial más alto puede resultar con un CTP menor a largo plazo comparado con opciones, aparentemente, más económicas (Hagman et al., 2016).

La vida útil del bien es un factor determinante en el CTP, especialmente al comparar bienes similares. Para periodos cortos, bienes con costos iniciales altos pueden no ser rentables; sin embargo, al extender el periodo de análisis, estos pueden ofrecer un CTP más bajo que los bienes inicialmente más económicos (Hagman et al., 2016).

Un bajo CTP para los buses es más atractivo para un potencial cliente. Los factores más significativos del CTP son el consumo de combustible y los costos de mantenimiento. Por ello, los fabricantes se enfocan en mejorar el rendimiento y la durabilidad de sus productos para reducir su impacto en el CTP (Cummins Newsroom, 2021).

La fórmula 1 permite el cálculo del CTP de un vehículo.

$$CTP = (CC - PR) + CK(KTR) + \left[\frac{rP}{1-(1+r)^{-N}} N - P \right] + CS + CM + I - S \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

- CC es el costo de compra o inversión inicial para la adquisición del bien o servicio (en este caso, un bus).
- PR es el precio de reventa del bus al finalizar el periodo de aprovechamiento de la propiedad.
- CK es el costo por kilómetro recorrido; el cual se multiplica por el kilometraje total recorrido para obtener el costo total por kilometraje recorrido.
- KTR es el kilometraje total recorrido en los viajes realizados.
- r es la tasa de interés mensual por el crédito solicitado a una entidad financiera.
- P es el monto prestado por la entidad financiera.
- N es el número de meses del préstamo.
- $\left[\frac{rP}{1-(1+r)^{-N}} N - P \right]$ son los intereses generados por el préstamo para la adquisición del bus.
- CS son los costos de los seguros para cubrir los riesgos automovilísticos.
- CM son los costos de mantenimiento y reparaciones.

- I son los costos de los impuestos gubernamentales asignados por la compra del bus.
- S son las subvenciones estatales por la compra del bus.

2.1.4 Gases de efecto invernadero (GEI)

Los GEI son los encargados de mantener y regular la temperatura de la atmósfera del planeta, sin embargo, la intervención del hombre, la utilización de combustibles fósiles, generó un desequilibrio de estos gases en la atmósfera terrestre y el cambio climático, lo que amenaza a todo el planeta.

Entre los principales GEI se encuentra el dióxido de carbono (CO_2), con el 75% de estos gases, y puede permanecer en la atmósfera por más de mil años. Muchos países, en el periodo del 2019 al 2023, principalmente en Europa, comenzaron a reducir sus emisiones debido, principalmente, a la pandemia COVID 19, la crisis económica y la guerra de Rusia con Ucrania.

El metano (CH_4) es el segundo GEI más importante, representando el 16% de los GEI. Si bien su duración en la atmósfera es de 12 años, el impacto del metano en el cambio climático es 84 veces más potente que el CO_2 . Como es conocido, el metano es el principal componente del GNV, es así que, se debe diseñar y dar mantenimiento a los motores dedicados a GNV para evitar fugas importantes. Otra fuente de emisión del metano es la descomposición de la materia orgánica en vertederos y en la industria ganadera.

El óxido nitroso (N_2O) ocupa el tercer puesto, con 6% de los GEI, tiene una duración de más de un siglo en la atmósfera y su impacto es 264 veces mayor que el dióxido de carbono. De otro lado, es la agricultura y ganadería responsables de la emisión de este gas (Nuñez, 2023).

2.1.5 Costo social del carbono

La emisión de GEI genera una disminución en el avance de la sociedad perjudicando el bienestar de las personas en las ciudades. A este costo social de la combustión del carbono contenido en los combustibles fósiles se le asigna un valor monetario para evaluar el impacto ambiental que produce un proyecto que genere de manera directa o indirectamente gases de efecto invernadero (GEI). Como ya se mencionó, el CO₂ representa el 75 % de los GEI, por lo que es el gas más representativo; por consiguiente, el impacto de los demás gases generalmente es transformado a CO₂ equivalente (CO_{2e}), que representa la cantidad de CO₂ que tendría el mismo efecto invernadero que una determinada cantidad de otro gas como el CH₄ y N₂O. Varios países han adoptado diferentes tasas, considerando el nivel del impacto social y la necesidad de disminuir los GEI. Para el Perú, este costo es de 7,17 ^{2, 3} dólares por tonelada de CO₂. La emisión de CO₂, por la combustión de diferentes tipos de combustible, está representada en la Tabla (Bernardo & Pariona, 2023).

Sin embargo, el CSC en el Perú es bajo en comparación con otras regiones. En Europa, por ejemplo, es de 48 USD / tonelada, y 40 USD / ton en México (Gil et al., 2021), esto se debe al interés de los Estados en disminuir las emisiones de dióxido de carbono en sus respectivos territorios.

Tabla 2.4 Emisión de CO_{2e} por tipo de combustible quemado.

Combustible	Emisión de CO _{2e}
Gasolina	2,33 kg de CO _{2e} /litro
Diesel	2,83 kg de CO _{2e} /litro
Gas natural vehicular	2,09 kg de CO _{2e} /m ³

Fuente: Andrade, H. et al (2017), "Emisión de gases de efecto invernadero por uso de combustibles fósiles en Ibagué, Tolima (Colombia)".

² MEF (2019), "Directiva General del Sistema Nacional de Programación Multianual y Gestión de Inversiones"(MEF, 2019).

³ CIUP (2016) "Estimación del precio social del carbono para la evaluación social de proyectos en el Perú(CIUP, 2016).

En la Unión Europea, se utiliza el esquema del comercio de emisiones para reducir la cantidad de gases de efecto invernadero (GEI), el objetivo es limitar el nivel total de GEI y permite a las empresas mercadear con los derechos de emisiones, tal como las acciones en las bolsas de valores. Al final de un periodo determinado, las empresas deben contar con el mismo número de derechos de emisión como emisiones producidas tengan en el mismo periodo, en caso contrario, deberán comprar más derechos.

Otro método utilizado es el impuesto sobre las emisiones de GEI producidos por la quema de combustibles fósiles. En el caso de Colombia, el cobro de este impuesto se realiza en la primera compra del combustible que se realiza en la línea de distribución del combustible, y el precio varía de acuerdo con el combustible (diésel, gasolinas, GNV o GLP). Estos impuestos presentan muchos beneficios sociales y ambientales, sin embargo, no garantizan un límite máximo de emisiones, por lo que, un trabajo en conjunto con el esquema del comercio de emisiones lograría el objetivo de reducir los GEI (Bendezú, 2020).

2.1.6 Fondo de Inclusión Social Energética (FISE)

El FISE es un fondo administrado por el MINEM, y se constituyó con la ley N° 29852 en el año 2012, su fin es el de facilitar el acceso a energías menos contaminantes a poblaciones con menos recursos. En la actualidad, con el FISE se viene realizando los siguientes proyectos:

- La expansión de la utilización del gas natural para casas, vehículos o medios de transporte.
- La propagación para el acceso a balones de GLP para el sector doméstico en zonas urbanas y rurales vulnerables.
- El mecanismo de subvención de la tarifa eléctrica residencial.

- Pago de los intereses de la deuda de los servicios públicos de electricidad y gas natural en la época de la pandemia COVID 19.

Para que un bus se encuentre apto para la sustitución por un motor dedicado a GNV tiene que cumplir con los siguientes requisitos:

- El bus con motor diésel tiene que ser de propiedad de una persona natural o jurídica.
- La máxima antigüedad del bus debe ser de 20 años.
- Contar con una cotización por la sustitución vigente emitida por un taller autorizado.
- El bus debe contar con la habilitación del servicio de transporte urbano y no debe contar con ningún proceso judicial u orden de captura (FISE, 2024).

2.2 Marco conceptual

Bus: Vehículo automotor de transporte público de pasajeros y trayecto fijo que se emplea habitualmente en el servicio urbano.

Carrocería: Es la parte del vehículo en donde se traslada a los pasajeros o a la carga, está constituida por puertas, ventanas, asientos, paredes, techos, etc.; esta parte va instalada sobre el chasis.

Chasis: Es la parte del vehículo que se encarga de toda la mecánica, en el van ensamblados todos los sistemas importantes para la operación del vehículo (motor, caja, corona, dirección, suspensión, etc.).

Combustible: Material que, en una reacción química de oxidación muy rápida, genera energía calorífica.

Costos: Gastos que se realizan para generar ingresos.

Flota: Conjunto de vehículos.

Gas: Combustible en estado gaseoso.

Gas licuado: Gas que ha pasado al estado líquido al pasar por un proceso de compresión o por la baja de la temperatura.

Huella de carbono: Indicador ambiental de los GEI generados por una actividad humana.

Motor de combustión interna: Máquina que transforma la energía térmica en energía mecánica.

Motor dedicado a GNV: Motor fabricado para usar exclusivamente GNV.

Petróleo diésel o gasóleo: Combustible derivado del petróleo crudo utilizado en los motores de encendido por compresión (motores diésel).

Overhaul: Reparación de componente o equipo (motor, caja, corona, bus, camión, etc.) que recupera las condiciones iniciales, como salido de fábrica.

Padrón: Número asignado por la empresa a un vehículo para identificarlo.

Revisión técnica: Inspección periódica que se le realiza a un vehículo para garantizar el estado óptimo para circular por las vías públicas.

Seguro obligatorio contra accidentes de tránsito (SOAT): Seguro que se adquiere periódicamente para un vehículo para la protección de todos los ocupantes y terceros que se encuentren involucrados en un accidente dentro de las vías públicas.

CAPÍTULO III. HIPÓTESIS Y OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

3.1 Hipótesis general

El cambio de motor diésel a motor dedicado a GNV disminuirá notablemente el CTP en una flota de buses en Lima Metropolitana.

3.2 Operacionalización de variables

- Variables independientes: Vehículo con motor diésel y vehículo con motor dedicado a GNV.

-Variable dependiente: Costo total de propiedad (CTP).

Tabla 3.1 Variables e indicadores.

VARIABLES	INDICADORES
Variables independientes: Vehículo con motor diésel y vehículo con motor dedicado a GNV.	<ul style="list-style-type: none"> - Marca y modelo de bus y motor - Rendimiento energético (km/galón o km/m³) - Emisiones (g de CO₂/km) - Costos del combustible (soles/galón o soles/m³)
Variable dependiente: Costo total de propiedad (CTP).	<ul style="list-style-type: none"> - Costo del overhaul del motor y costo de la sustitución de un motor diésel por uno a GNV (soles). - Costo del combustible (soles/km). -Costo del SOAT y la revisión técnica (RT), en soles. - CSC (soles/ton. de CO₂). - Costo del mantenimiento (soles) - Precio de reventa del bus (soles).

CAPÍTULO IV. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

4.1 Tipo y diseño de investigación

Con respecto al enfoque, la presente investigación es aplicada debido a que se utilizó como referencia la metodología del CTP, sin embargo, se debe mencionar que esta metodología se adaptó a la presente investigación, debido a que, normalmente, es utilizada para evaluar la adquisición de vehículos o equipos nuevos, pero en este trabajo se emplean unidades usadas, por lo que existen términos que se tuvieron que omitir en la evaluación del costo total de propiedad.

Según las características epistemológicas esta investigación es:

- Desde la percepción de la realidad, la investigación es objetiva porque cuantifica y mide datos e indicadores numéricos como distancia recorrida, consumo de combustible, rendimiento de combustible y costos.
- Desde el punto del razonamiento, la investigación es deductiva, ya que contrasta la hipótesis planteada basándose en teorías e investigaciones sobre el costo total de propiedad y el cambio de combustible, de petróleo diésel a GNV.
- Desde el punto de vista de la finalidad, la investigación comprobará la viabilidad de la utilización de motores dedicados a GNV, con la finalidad de disminuir el costo total de propiedad.
- Según su orientación, la investigación está orientada a resultados debido a que el objetivo se centra en el beneficio económico del uso del GNV.
- Por el principio de verdad, la investigación es particular, ya que analiza los datos de un único modelo de bus.
- Desde el punto de la causalidad, el trabajo se basará en los antecedentes de operación de los equipos.

La investigación, según el alcance, es descriptiva debido a que se centra en detallar todos los costos involucrados en un bus con motor diésel y en un bus con motor dedicado a GNV.

El diseño es no experimental transversal, debido a que los datos se recolectaron en el intervalo de enero a octubre del 2023 se recabaron datos de una empresa de transporte urbano.

4.2 Unidad de análisis

En esta investigación, se considera como unidad de análisis a la flota urbana de buses con motor diésel, de chasis Mercedes Benz OF1721, de la empresa de transporte urbano Inversiones y Representaciones Polo S.A.C.

La empresa de transporte, regulada por la Municipalidad Metropolitana de Lima, tiene una flota de 164 unidades que recorren las rutas 4515 y 9401. En esta investigación, se utiliza la ruta 9401 debido a que cuenta con 43 unidades Mercedes Benz OF 1721, la otra ruta mencionada solo cuenta con 3 unidades. La ruta 9401 parte del distrito de Ate hasta el distrito de Ventanilla, cuenta con 120 paraderos, y tiene 60 km de longitud.

4.3 Matriz de consistencia

Título: “Evaluación económica del costo total de propiedad (CTP) para la sustitución de motores diésel por motores dedicados a GNV en una flota urbana de buses en Lima Metropolitana”

Tabla 4.1 Matriz de consistencia.

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES		INDICADORES	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS DE RECOLECCION DE DATOS
			INDEPENDIENTE	DEPENDIENTE		
Frente a este problema, cabe preguntarse en qué medida el incremento de los costos del petróleo diésel impacta negativamente en la operación de las flotas urbanas de buses con motores diésel.	Determinar como la sustitución de los motores diésel por motores dedicados a GNV disminuye notablemente el costo total de propiedad (CTP) de una flota urbana de buses.	El cambio de motor diésel a motor dedicado a GNV disminuirá notablemente el CTP en una flota de buses en Lima Metropolitana.	Vehículo con motor diésel y vehículo con motor dedicado a GNV.	Costo total de propiedad (CTP).	<ul style="list-style-type: none"> - Marca y modelo de bus - Rendimiento energético (km/galón o km/m³) - Emisiones (g de CO_{2e}/km) - Costos del combustible (soles/galón o soles/m³) - Costo del overhaul del motor y costo de la sustitución de un motor diésel por uno a GNV (soles). - Costo del combustible (soles/km). - Costo del seguro obligatorio contra accidentes de tránsito (SOAT) y la revisión técnica (RT), en soles. - Costo social del carbono (soles/ton. de CO₂). - Costo del mantenimiento (soles) - Costo de reventa del bus (soles). 	<ul style="list-style-type: none"> - Evaluación de los costos basada en el costo total de propiedad. - Recolección de archivos de registro de funcionamiento de la flota de buses.

CAPÍTULO V. DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

Para conservar la flota de buses Mercedes Benz de la unidad de análisis y disminuir el costo total de propiedad, se propone la sustitución del motor diésel de un bus Mercedes Benz por un motor dedicado a GNV de la marca Fiat Power Train (FPT), para lo cual se utilizaron los datos recolectados de la flota de buses de la empresa de transporte urbano Inversiones y Representaciones Polo SAC, específicamente en la Tabla 5.1, muestra las características de los buses Mercedes Benz con motor diésel y de los buses Agrale con motor FPT dedicado a GNV; para luego proyectar el costo total de propiedad del bus para los años que le quedan de vida útil. Un componente que se compara es el consumo de combustible de un bus Mercedes Benz con motor diésel y la propuesta del mismo bus, pero con motor FPT dedicado a GNV. Al no existir información histórica del rendimiento de un bus Mercedes Benz con motor FPT a GNV, en la ruta 9401, de la unidad de análisis (con una extensión de 60 km) para este proyecto, se considera que el rendimiento (en km/m³) de un bus Mercedes Benz con motor FPT a GNV, es igual al del bus Agrale con motor FPT a GNV debido a que ambos buses recorrerían una ruta similar y tienen características técnicas semejantes.

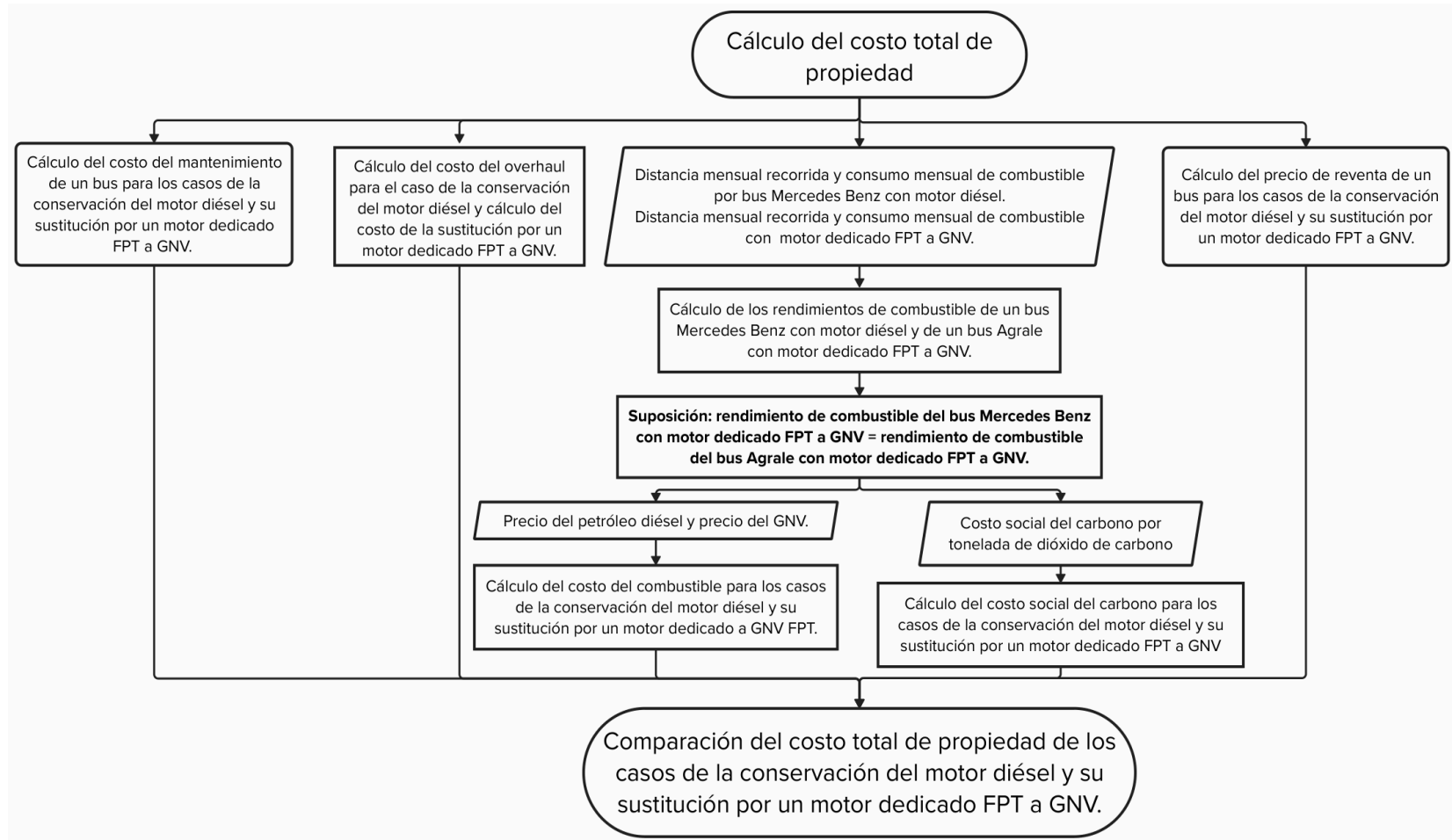
Tabla 5.1 Características técnicas de los buses Mercedes Benz con motor diésel, Agrale con motor dedicado a GNV y la propuesta de un bus Mercedes Benz con motor FPT.

Chasis	Mercedes Benz OF 1721	Mercedes Benz OF 1721	Agrale MA 17
Carrocería	Metalpar Apache	Metalpar Apache	Modasa Titan
Motor	Mercedes Benz OM 366 LA	Fiat Power Train N60	Fiat Power Train N60
Combustible	Petróleo diésel	GNV	GNV
Peso bruto vehicular	17 toneladas	17 toneladas	17 toneladas
Potencia nominal	153 kW (a 2600 rpm)	149 kW (a 2800 rpm)	149 kW (a 2800 rpm)
Asientos	52	52	48
Potencia máxima / peso bruto	9,00 kW/ton.	8,76 kW/ton.	8,64 kW/ton.
Relación final de transmisión	44,85	44,85	46,88
Torque máximo a la rueda / peso bruto	1,75 N.m/kg	1,72 N.m/kg	1,81 N.m/kg
Velocidad máxima (en directa)	101,63 km/h	109,45 km/h	109,34 km/h

En el desarrollo del proyecto solo se considera el costo total de propiedad y no los ingresos, debido a que solo se cuenta con la información brindada por el área de mantenimiento más no del área de operaciones. La cantidad de pasajeros, y los ingresos por la recaudación de pasajes son considerados información confidencial para la empresa propietaria. En La

Figura se esquematiza el proceso de cálculo del CTP en la unidad de análisis.

Figura 5.1 Diagrama lógico del cálculo del CTP.



5.1 Motores analizados

5.1.1 Motor diésel Mercedes Benz OM366 LA

Se recopiló información del motor utilizado en la flota de buses Mercedes Benz de la unidad de análisis. Las características técnicas de este motor se muestran en la Tabla . El motor diésel Mercedes Benz OM366 LA está vigente al final de la década de los ochenta. En por ello que, este motor recibió algunas mejoras técnicas, pero sin la aplicación de sistemas electrónicos.

Tabla 5.2 Características técnicas del motor Mercedes Benz OM366 LA.

Tipo de motor	Diésel
Marca de motor	Mercedes Benz
Modelo de motor	OM366 LA
Potencia máxima (kW)	153
Régimen de potencia máxima (rpm)	2600
Torque máximo (N.m)	660
Régimen de torque máximo (rpm)	1400
Cilindrada (litros)	5,9
Relación de compresión	18,0:1
Número y disposición de cilindros	6 en línea
Tipo de inyección	directa
Sobrealimentación	Turbocompresor con intercooler
Norma de emisiones contaminantes	Euro II
Consumo específico (g/kWh, a 2000 rpm)	195
Peso del motor (kg)	600

Fuente: Autolider (2021), "Ficha técnica OF 1721 /59".(Autolider, 2021)

5.1.2 Motor dedicado a GNV Fiat Power Train N60

Se recopiló información del bus Agrale MA 17 y motor dedicado a FPT N60, de los cuales se procesaron los datos de consumo y recorrido, que se muestran en los anexos 3 y 4 para tomarlos como referencia del rendimiento de combustible (en km/m³) en la ruta 9401. Este motor cuenta con una mejor tecnología que el motor diésel Mercedes Benz OM366 LA, ya que es gestionado electrónicamente por una computadora. En la Tabla se detalla sus características técnicas.

Tabla 5.3 Características técnicas del motor Fiat Power Train N60.

Tipo de motor	Encendido por chispa, dedicado a GNV
Marca de motor	Fiat Power Train (FPT)
Modelo de motor	N60
Potencia máxima (kW)	147
Régimen de potencia máxima (rpm)	2500 - 2800
Torque máximo (N.m)	650
Régimen de torque máximo (rpm)	1250 - 2000
Cilindrada (litros)	5,9
Relación de compresión	11,0:1
Número y disposición de cilindros	6 en línea
Tipo de inyección	Indirecta, multipunto
Sobrealimentación	Turbocompresor con intercooler
Norma de emisiones contaminantes	Euro V
Peso del motor (kg)	520

Fuente: Iveco Motors (2005), "Manual técnico y de reparación N60 ENTG". (Iveco Motors, 2005)

5.2 Identificación de variables

La evaluación económica en la presente investigación se realizó con base en el método del costo total de propiedad (CTP). Las variables de este método están indicadas en la Tabla . Algunas de estas variables no se evaluaron en el proyecto, tales como el costo de compra,

intereses, impuestos y subvenciones gubernamentales aplicados a la adquisición de un bus urbano nuevo (esto se explica en el subcapítulo 5.2.1). Los costos que se agregaron en la evaluación del CTP son el costo social del carbono, el costo del *overhaul* del motor en el caso de conservar el motor diésel, y el costo de la instalación del motor dedicado a GNV.

Tabla 5.4 Condiciones de las variables del costo total de propiedad.

Variable	Observación
Costo de compra del bus urbano	No considerado en el proyecto
Precio de reventa del bus urbano	Evaluado en el proyecto
Costo de combustible	Evaluado en el proyecto
Intereses del financiamiento de la compra del bus urbano	No considerado en el proyecto
Costo de seguro	Evaluado en el proyecto
Costo del mantenimiento	Evaluado en el proyecto
Impuestos gubernamentales	No considerado en el proyecto
Subvenciones gubernamentales	No considerado en el proyecto

Fuente: Hagman, J. (2016), "Total cost of ownership and its potential implications for battery electric vehicle diffusion".

5.2.1 Costos no considerados en el proyecto

En la fórmula 1 (p. 34) del CTP, no se consideró los costos de compra, impuestos gubernamentales, ni los intereses, debido a que estos son factores que inciden en el costo solo cuando los buses son nuevos, pero en este proyecto se están analizando buses usados, que ya no cuentan con deudas por la adquisición del bien.

Tampoco se consideraron las subvenciones gubernamentales, debido a que, a la fecha, no existe un bono económico para la sustitución del motor diésel por un motor a GNV; el único beneficio que existe es el pago de la sustitución del motor en cuotas sin intereses.

5.2.2 Costos adicionados al costo total de propiedad

Tal como se muestra en la Tabla , se incluyó al CTP el CSC, debido a que es una manera de cuantificar la huella de carbono que genera el funcionamiento de cada bus. Adicionalmente, se consideró el costo del *overhaul* del motor y el costo de la instalación del motor dedicado a GNV debido a que son los dos casos o escenarios que se evaluaron en la investigación.

Tabla 5.5 Variables adicionadas a la metodología del cálculo del CTP.

Variable	Observación
Costo social del carbono	Evaluado en el proyecto
Costo del <i>overhaul</i> del motor	Evaluado en el proyecto
Costo de la sustitución por un motor a GNV	Evaluado en el proyecto

5.3 Cálculo de los costos

5.3.1 En el caso de mantener el motor diésel en un bus Mercedes Benz

5.3.1.1 Costo del *overhaul* del motor diésel de un bus Mercedes Benz

En el caso de conservar la flota de buses con motor diésel, para mantener al equipo operativo se requiere un *overhaul* del motor, el cual, por ser un motor muy comercial, tiene un amplio stock de repuestos y variedad de precios en el mercado local. Se indica en Tabla 5.6 que para determinar el costo de *overhaul* del motor se tomará como referencia el *overhaul* realizado a la unidad identificada con el padrón 303 (debido a que es de la última unidad a la que se le realizó un *overhaul* de motor).

Tabla 5.6 Costo de los servicios y repuestos del overhaul del motor diésel de un bus Mercedes Benzl.

Servicios	
Rectificado del motor	S/ 3.500,00
Mantenimiento del radiador e intercooler	S/ 850,00
Mantenimiento del alternador y arrancador	S/ 700,00
Mantenimiento de la bomba de inyección, inyectores y turbocompresor	S/ 6.180,00
Mano de obra de armado del motor (54 horas hombre)	S/ 2.700,00
Repuestos	
Kit de reparación del motor (kit linner, metales del cigüeñal, guías, válvulas, asientos, kit de empaques bomba de agua, aceite y otros)	S/ 12.650,00
Mangueras, cañerías, tubos, abrazaderas, pernos y otros elementos de sujeción	S/ 2.750,00
Fluidos y filtros del motor	S/ 850,00
Consumibles de (trapo industrial, desengrasantes, amarras plásticas, etc.)	S/ 250,00
Total	S/ 30.430,00

Fuente: Inversiones y representaciones Polo SAC (2022), "Reporte de costos de la orden de trabajo número 89, padrón 303" (Reporte de Costos de La Orden de Trabajo Número 89, Padrón 303, 2022)

5.3.1.2 Costo del combustible consumido por un bus Mercedes Benz con motor diésel

Para el caso de las unidades con motores diésel, se recopiló el recorrido mensual y el consumo de combustible acumulado desde enero del 2023 hasta octubre del 2023 para calcular el recorrido anual (en km) y su rendimiento anual (en km/galón), lo cual está detallado en los Anexos 1 y 2. En Tabla 5.7 se aprecia el recorrido promedio mensual de las unidades, que fue de 6.981 km o 83.773 km anuales.

Tabla 5.7 Recorrido promedio mensual de los buses Mercedes Benz con motor diésel.

Padrón	Promedio mensual (km)
301	7,711,72
302	7,616,65
303	4,961,22
305	6,245,43
306	6,576,63
307	7.481,01
308	7.078,90
309	7.251,32
310	7.262,68
313	5.548,00
314	7.748,44
315	7.181,79
316	7.693,57
317	7.788,46
318	6.236,09
319	7.855,59
321	7.461,99
323	7.661,24
324	6.910,69

Padrón	Promedio mensual (km)
325	6.669,77
326	8.038,53
328	6.883,29
330	7.623,50
336	7.640,27
338	6.428,09
339	6.968,02
345	4.801,97
348	7.148,19
376	7.280,71
377	6.845,34
378	6.319,29
379	7.296,70
380	8.367,85
381	7.712,02
382	6.036,95
383	6.777,91
457	5.190,36
Promedio	6.981,09

En ese sentido, la Tabla , se evidencia que el promedio del consumo de combustible petróleo diésel mensual fue de 701,12 galones o 8.413,44 galones anuales por unidad.

Tabla 5.8 Consumo promedio mensual de combustible de los buses Mercedes Benz con motor diésel.

Padrón	Promedio mensual (galones)	Padrón	Promedio mensual (galones)
301	772,50	325	596,02
302	718,90	326	810,41
303	505,74	328	686,54
305	625,07	330	777,57
306	641,60	336	783,26
307	779,28	338	628,20
308	701,42	339	700,42
309	653,58	345	504,29
310	793,73	348	690,46
313	526,26	376	694,69
314	689,47	377	735,46
315	717,94	378	638,94
316	745,03	379	737,57
317	733,22	380	809,67
318	610,53	381	815,34
319	858,68	382	851,95
321	750,75	383	671,67
323	769,27	457	500,78
324	715,28	Promedio	701,12

Para calcular el costo anual del combustible se utilizó la siguiente fórmula.

$$\text{Costo anual del combustible} = \frac{\text{Precio del combustible} \left(\frac{\text{soles}}{\text{galón}} \text{ o } \frac{\text{soles}}{\text{m}^3} \right) * \text{Recorrido anual (km)}}{\text{Rendimiento promedio} \left(\frac{\text{km}}{\text{galón}} \text{ o } \frac{\text{km}}{\text{m}^3} \right)} \dots\dots (2)$$

Utilizando esta fórmula, reemplazando los datos promedio, y considerando el precio del petróleo diésel D2 - B5 de 15,99 soles / galón (OSINERGMIN, 2023), resulta un valor de S/ 134.531,64 como costo anual del combustible consumido por bus.

$$\text{Costo anual del combustible} = \frac{15,99 \frac{\text{soles}}{\text{galón}} * 83.773,08 \text{ km}}{\frac{6.981 \text{ km}}{701,12 \text{ galones}} = 9,957 \text{ km/galón}} = 134.531,69 \frac{\text{soles}}{\text{año. bus}}$$

5.3.1.3 Costo del seguro obligatorio contra accidentes de tránsito (SOAT) y la revisión técnica de un bus Mercedes Benz con motor diésel

En el Perú, para circular en la vía pública se requiere el SOAT y la revisión técnica vehicular. Es por ello que, la empresa propietaria de la flota de buses urbanos, por lo general, trabaja con seguros Rímac para obtener el SOAT. En la **Tabla** se detallan los costos.

Tabla 5.9 Costo del seguro y la revisión técnica de un bus Mercedes Benz con motor diésel.

	Costo por bus con motor diésel
Seguro SOAT	S/ 485,00
Revisión técnica vehicular	S/ 180,00
Costo total	S/ 665,00

5.3.1.4 Costo de mantenimiento de un bus Mercedes Benz con motor diésel

Para determinar dichos costos de mantenimiento, pudiendo conservar los motores diésel, se utilizaron los porcentajes (en relación con el valor inicial de la unidad) que se muestran en la **Tabla** . Para los cálculos se tomó, como referencia, el valor inicial de la unidad de S/ 407.900,00. Por la antigüedad del equipo, se requiere que se cambien algunos componentes mayores, que son de alto costo, como las piezas estructurales del chasis (soportes de muelles, largueros, travesaños, eje de transmisión, eje de dirección, etc.) que fallan con frecuencia

como consecuencia del desgaste y la fatiga; estos costos elevan gradualmente los costos de mantenimiento.

Tabla 5.10 Costo de mantenimiento anual de un bus Mercedes Benz en función del año en que se efectúa.

Año	13	14	15	16	17	18	19	20
- Costo de mantenimiento (en porcentaje con respecto al valor inicial del bus)	12%	13%	14%	15%	16%	17%	18%	19%
-Costo de mantenimiento (soles)	48.948	53.027	57.106	61.185	65.264	69.343	73.422	77.501

Fuente: Municipalidad Metropolitana de Lima (2017) "Informe Multianual de Inversiones en Asociaciones Público-Privadas correspondiente al ejercicio fiscal"

5.3.1.5 Costo social del carbono de un bus Mercedes Benz con motor diésel

Utilizando el consumo anual de combustible, obtenido de la Tabla, en el subcapítulo 5.3.1.2, se obtiene el valor del costo social de carbono anual que se indica Tabla 5.11.

Tabla 5.11 Costo social del carbono de un bus Mercedes Benz con motor diésel.

Emisión de carbono en un motor diésel (kg de CO _{2e} /galón)	10,71
Consumo anual de combustible (galones)	8.413,44
Emisión anual de carbono (ton.)	90,13
Costo social del carbono anual (soles)	2.462,13

5.3.1.6 Precio de la reventa de un bus Mercedes Benz con motor diésel

Para la empresa en la que se está realizando el estudio, el tiempo estimado de vida de un bus urbano, es de 20 años. El vehículo, al finalizar su tiempo de vida, pierde la mayor parte de su valor económico, y mantenerlo se vuelve, económicamente, no rentable. Por lo que pasaría a venderse como chatarra o accedería a un bono para la cuota inicial de un vehículo nuevo.

En el Perú, existe el bono de chatarreo para buses urbanos, el cual tiene un valor de 7.000 dólares para la cuota inicial de una nueva unidad.

5.3.2 En el caso de la sustitución del motor diésel por un motor dedicado a GNV en un bus Mercedes Benz

5.3.2.1 Costo de la sustitución del motor diésel por un motor a GNV

Para realizar la instalación del motor dedicado a GNV en los buses, se requiere el servicio de un taller especializado y autorizado por el Ministerio de Energía y Minas (MINEM), también se puede aprovechar el apoyo económico del Fondo de Inversión Social Energético (FISE) para realizar el pago en cuotas sin intereses por 5 años. En la Tabla 5.12 se aprecia el costo de conversión, y se pagarían anualidades de 36.000 soles. En este caso, se está considerando los costos para la instalación del motor FPT a GNV en el bus Metalpar con carrocería Mercedes Benz.

Tabla 5.12 Costo de los servicios y repuestos para la sustitución del motor diésel por un motor dedicado a GNV.

Servicios	
Instalación del motor, tanques, sistema de combustible, eléctrico, electrónico, refrigeración y otros	S/ 17.640,00
Adaptación del tubo de escape, modificación de base del filtro de aire y otros	S/ 19.155,00
Otros	S/ 1.260,00
Repuestos	
Sistema de alimentación (motor, cilindro, válvulas, uniones y cañerías)	S/ 132.920,00
Mangueras, cañerías, abrazaderas, soportes y otros	S/ 6.800,00
Cableado eléctrico y componentes electrónicos	S/ 2.050,00
Fluidos y filtros	S/ 105,00
Consumibles de (trapo industrial, desengrasantes, amarras plásticas, etc.)	S/ 70,00
Total	S/ 180.000,00

Fuente: (Ministerio de Energía y Minas (2023), "Resolución Directoral No. 142-2023-MINEM-DGH")

5.3.2.2 Costo anual del combustible consumido por un bus Mercedes Benz con motor dedicado a GNV

Para el caso de la sustitución del motor diésel por un motor dedicado a GNV, se recopiló el recorrido mensual y el consumo acumulado desde mayo del 2023 hasta diciembre del 2023 (detallados en los Anexos 3 y 4) para calcular el rendimiento anual del motor dedicado FPT a GNV (km/m³) en la ruta 9401.

Es así que, en la Tabla 5., el promedio global de recorrido por bus es de 4.445,56 km mensuales.

Tabla 5.13 Recorrido promedio mensual de los buses Agrale con motor dedicado a GNV.

Padrón	Promedio mensual (km)
2002	4.297,57
2004	4.315,38
2012	3.048,38
2022	5.333,43
2023	4.544,50
2028	5.574,71
2032	4.364,83
2036	4.534,50
2038	4.743,00
2041	4.784,50
2042	3.000,00
2043	5.713,43
2044	4.562,43
2045	4.181,43
2046	4.857,57
2047	5.008,86
2048	5.267,71
2049	1.362,00
2050	4.971,50
Promedio	4.445,56

De otro lado, la Tabla 5. indica el consumo promedio mensual de GNV de cada bus es de 2.361,42 m³.

Tabla 5.14 Consumo de GNV promedio mensual de un bus Agrale (en m³).

Padrón	Promedio mensual (m ³)
2002	2.220,37
2004	2.282,51
2012	1.582,62
2022	2.819,33
2023	2.268,37
2028	2.991,84
2032	2.337,79
2036	2.501,20
2038	2.507,33
2041	2.686,07
2042	1.611,29
2043	2.944,11
2044	2.498,58
2045	2.163,76
2046	2.634,63
2047	2.656,25
2048	2.586,95
2049	680,84
2050	2.893,11
Promedio	2.361,42

Con los valores calculados en las Tabla 5. y Tabla 5., se procedió a determinar el rendimiento promedio de los buses con motores a GNV, dando como resultado un rendimiento de 1,883 km/m³ ($\frac{4.445,56 \text{ km}}{2.361,42 \text{ m}^3}$) Para calcular el costo de combustible se consideró el costo por metro cúbico de 1,49 soles/m³ (OSINERGMIN, 2023) y el recorrido anual de 83.773,08 kilómetros (recorrido realizado por un bus Mercedes Benz con motor diésel). Reemplazando en la fórmula 2 el costo del combustible para recorrer la misma distancia que un bus Mercedes Benz OF 1721, resulta en 66.303,66 soles anuales.

$$\text{Costo anual del combustible} = \frac{1,49 \frac{\text{soles}}{\text{m}^3} * 83.773,08 \text{ km}}{\frac{4.445,56 \text{ km}}{2.361,42 \text{ m}^3} = 1,883 \text{ km/m}^3} = 66.303,66 \frac{\text{soles}}{\text{año. bus}}$$

5.3.2.3 Costo del seguro obligatorio contra accidentes de tránsito (SOAT) y la revisión técnica (RT) de un bus Mercedes Benz con motor dedicado a GNV

El seguro SOAT y la revisión técnica vehicular no dependen del tipo de combustible utilizado por el motor del vehículo, por lo que este costo se mantiene igual, tal como se detalla en la Tabla 5.15.

Tabla 5.15 Costo del seguro y la revisión técnica de un bus Mercedes Benz con motor dedicado a GNV.

	Costo por bus con motor a GNV
Seguro SOAT	S/ 485,00
RT	S/ 180,00
Costo total	S/ 665,00

5.3.2.4 Costo de mantenimiento de un bus Mercedes Benz con motor dedicado GNV

En el caso de un bus Mercedes Benz al que se le ha cambiado el motor diésel original por un motor dedicado a GNV, se consideró porcentajes menores a los mostrados en la Tabla debido a que el motor a GNV a instalar es nuevo y esto disminuye los costos de mantenimiento. Para determinar los porcentajes del costo de mantenimiento de estos motores, se consultó al área de mantenimiento de la empresa para determinar en qué medida disminuiría el costo. En la Tabla 5.16 la jefatura de mantenimiento de la empresa estima que el costo de mantenimiento disminuiría en 2% con respecto a los costos del caso cuando se mantiene al bus con motor diésel.

Tabla 5.16 Costo de mantenimiento anual de un bus Mercedes Benz con motor a GNV en función del año en que se efectúa.

Año	13	14	15	16	17	18	19	20
Costo de mantenimiento (en porcentaje con respecto al valor inicial del bus)	10%	11%	12%	13%	14%	15%	16%	17%
Costo de mantenimiento (soles)	40.790	44.869	48.948	53.027	57.106	61.185	65.264	69.343

5.3.2.5 Costo social de carbono de un bus Mercedes Benz con motor dedicado a GNV

Utilizando el consumo de combustible gas para recorrer la misma distancia que los buses Mercedes Benz (83.773 kilómetros anuales), se obtiene el costo social del carbono anual, tal como se detalla en la Tabla 5.17

Tabla 5.17 Costo social del carbono de un bus Mercedes Benz con motor dedicado a GNV.

Emisión de carbono en un motor GNV (kg de CO ₂ /m ³)	2,09
Consumo anual de GNV (m ³)	44.489,11
Emisión anual de carbono (ton.)	92,98
Costo social del carbono anual (soles)	2.540,06

5.3.2.6 Precio de la reventa de un bus Mercedes Benz con motor dedicado a GNV

Considerando los mismos 20 años de utilización de la flota de buses Mercedes Benz, el valor del bono para la adquisición de una nueva unidad es el mismo, es decir, 7.000 dólares.

CAPÍTULO VI. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

6.1 Análisis del CTP

6.1.1 Costos del overhaul del motor diésel y su sustitución de un motor diésel por un motor a GNV

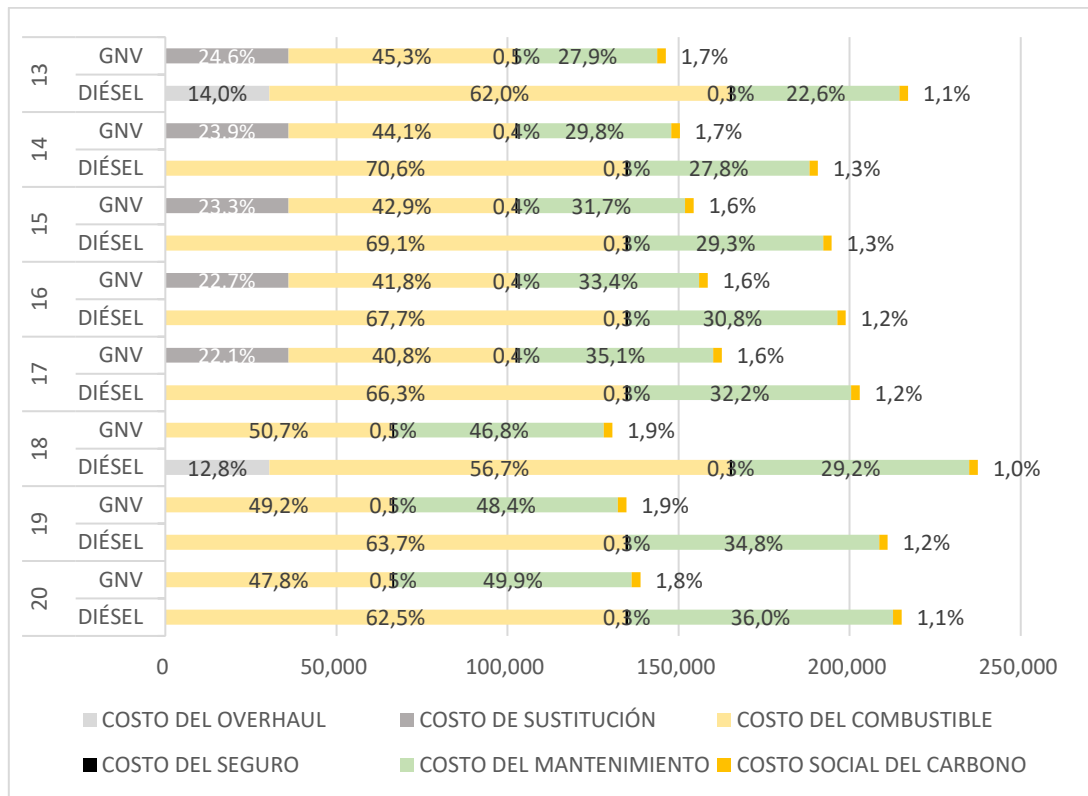
El costo de sustitución del motor diésel por un motor dedicado a GNV representa una inversión inicial de más de 5,9 veces el costo del *overhaul* del motor diésel original; sin embargo, considerando el costo del *overhaul* de 30.340,00 soles, este costo contempla la reparación del motor usando repuestos alternativos. Esta diferencia se reduce si se usaran repuestos originales en la reparación.

El incentivo del FISE para pagar la sustitución del motor, en cuotas, sin intereses hasta por 5 años, favorece la decisión de los empresarios para realizar la conversión. Se debe mencionar que esta conversión se realiza en un taller autorizado por el FISE, como es MODASA, con 100 % de piezas originales.

6.1.2 Costo de los combustibles

El costo del combustible es el factor más importante en el CTP. Para los buses Mercedes Benz con motor a diésel, llega hasta el 70,6% del CTP anual. En cambio, para el mismo bus con un motor a GNV, el costo del combustible no representaría más del 50,8 % del CTP anual, indicado en Figura 6,1.

Figura 6.1 Costo total de propiedad anual e incidencia de variables (en soles).



6.1.3 Costo del mantenimiento

El costo de mantenimiento es el segundo factor con mayor CTP anual para un bus Mercedes Benz con motor diésel, representando hasta el 36,0 %.

Para los buses con motor dedicados a GNV, el costo de mantenimiento supera al costo del combustible en el último año de utilización (ver figura 6.1), debido a que, al ser unidades antiguas, requieren de repuestos difíciles de conseguir y de un alto precio; también se debe a que el costo de combustible disminuye su incidencia en el CTP por su bajo costo.

6.1.4 Costo del seguro obligatorio contra accidentes de tránsito (SOAT) y la revisión técnica (RT)

El costo del seguro es de 575 soles anuales, una cantidad casi despreciable frente a los demás costos del CTP anual (0,4% del CTP); sin embargo, se lo considera para el cálculo debido a que nos brinda un CTP más cercano al real. Para ambos casos, es el mismo valor debido a que no existe variación de precios según el combustible que se utilice.

6.1.5 Costo social del carbono

El CSC es muy similar en ambos casos, siendo de 2.462,13 soles anuales para un motor a petróleo diésel y, sorprendentemente, 2.540,01 soles anuales para uno a GNV. El mayor costo social del carbono al utilizar GNV se debe a que el rendimiento promedio de los buses con motor a GNV es bajo (1,883 km/m³), incluso comparándolo con los 5 km/m³ (UPME, 2019) que se alcanza en la ciudad de Bogotá, Colombia. El bajo rendimiento energético en la ruta establecida provoca el alto consumo de combustible, lo que conlleva a un alto nivel de emisiones. Una de las causas del alto consumo puede ser que los conductores no están lo suficientemente capacitados en técnicas de manejo, donde se priorice el ahorro de combustible; otra posible causa es la topografía de la ruta, la cual presenta múltiples desperfectos y desniveles, llegando a 650 m.s.n.m en la comunidad de Huaycán. Otro problema importante es el tráfico lento en la ciudad de Lima, lo que obliga a que los buses circulen a bajas velocidades y con tiempos prolongados de funcionamiento del motor en ralentí.

El factor de 7,17 USD / ton. para el cálculo del CSC en el Perú es muy bajo en comparación a otras regiones (de 6 a 7 veces menor). Aumentando este costo a un valor más realista y justo aumentaría el CSC en por lo menos 6 veces su valor.

6.1.6 Precio de reventa de un bus

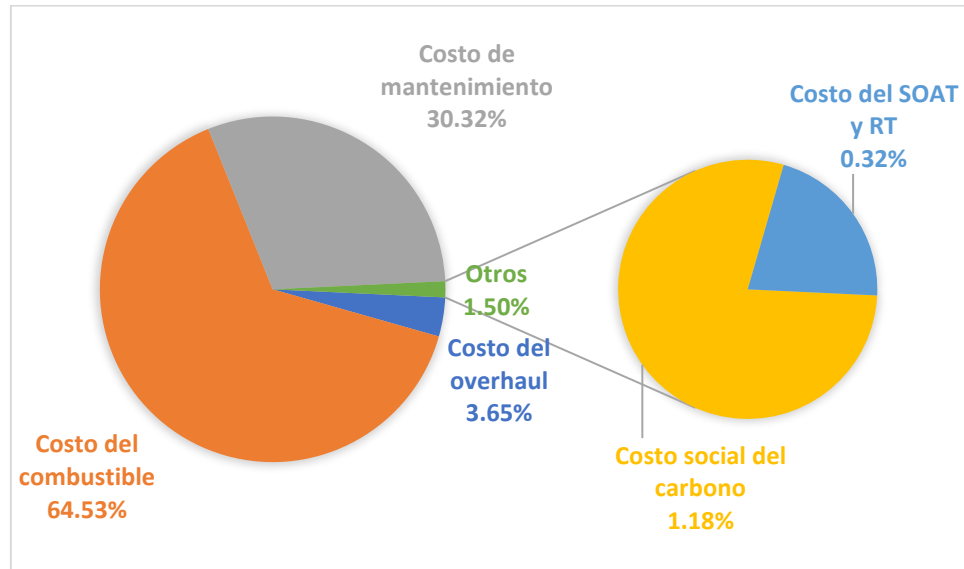
El costo de reventa de los buses urbanos (S/ 26.670) tiene el mismo valor para ambos casos, debido a que, para acceder al bono de chatarreo solo se requiere entregar el bus operativo (el bus debe ingresar al local por sus propios medios) y que las características del número de identificación vehicular (VIN) y el número de motor coincidan con los de la tarjeta de propiedad. En caso de venderse el motor y el chasis por separado, el precio sería similar o inferior al bono de chatarreo.

6.2 Discusión de resultados

6.2.1 Costo total de propiedad de un bus Mercedes Benz con motor diésel

Además del valor del CTP de los buses, se calculó la incidencia de las variables en el valor del CTP. Con respecto a los buses con motor diésel, en el periodo de vida útil del año 13 al 20, se determinó que más del 64,53% del CTP corresponde al costo del combustible, seguido por el costo de mantenimiento del bus que tiene 30,32% de incidencia. Por otro lado, en la Figura 6. las variables con menor incidencia son el costo del SOAT y la revisión técnica (RT), y el costo social del carbono.

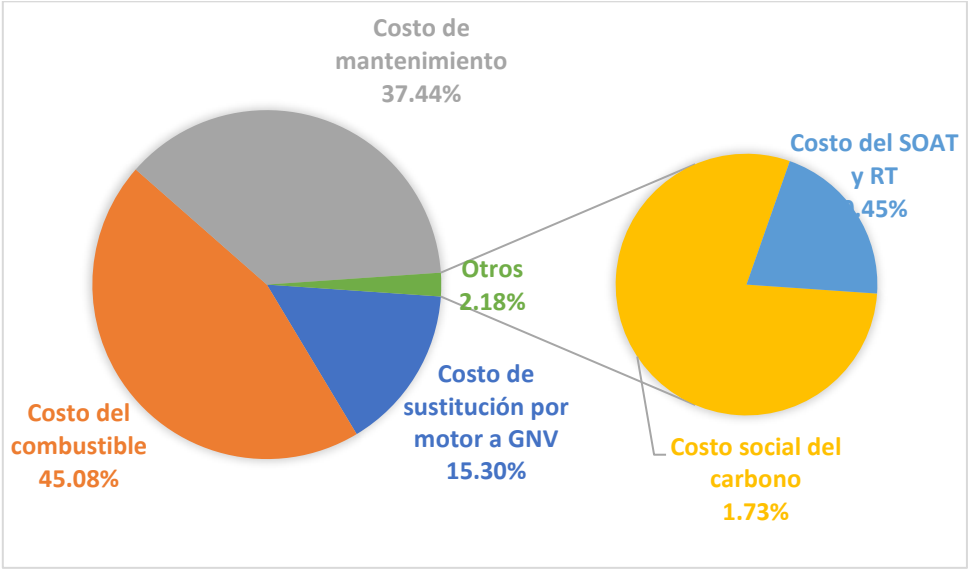
Figura 6.2 Incidencia de las variables en el valor del CTP de un bus Mercedes Benz con motor diésel.



6.2.2 Costo total de propiedad (CTP) de un bus Mercedes Benz con motor dedicado a GNV

Para el caso de la propuesta de sustitución de los motores diésel originales por motores dedicados a GNV, al igual que el caso del bus con motor diésel, el costo del combustible es el más alto del CTP, con 45,11 %; sin embargo, existe un decrecimiento debido a que el GNV es un combustible barato en comparación al petróleo diésel, tal como se aprecia en la Figura **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** El incremento porcentual de la incidencia del costo de mantenimiento ocurre, a pesar de que, en valor absoluto, disminuye, debido a la disminución del costo del combustible. El costo del seguro y el costo social del carbono continúan con una incidencia menor al 2%.

Figura 6.3 Incidencia de las variables en el valor del CTP de un bus Mercedes Benz con motor dedicado a GNV.



6.2.3 Costo total de propiedad acumulado

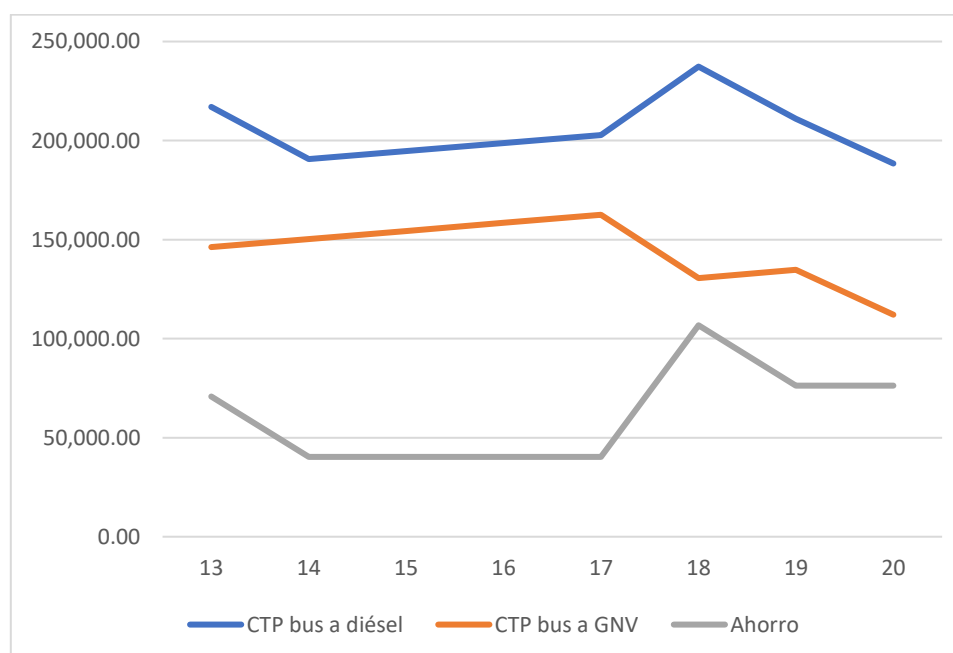
Para realizar el cálculo del CTP, se recopilaron todas las variables, con una proyección (extrapolación) desde el año 13 al año 20 de la vida útil de los buses Mercedes Benz de la ruta 9401. Lo indicado en Tabla se presenta el resumen del CTP de los dos casos analizados.

Tabla 6.1 Costo total de propiedad (CTP) acumulado del año 13 al año 20 de vida útil de un bus Mercedes Benz con motor diésel y del mismo bus con el motor sustituido por uno a GNV.

	Bus a diésel	Incidencia	Bus a GNV	Incidencia
Costo del overhaul del bus a diésel / Costo de sustitución por motor a GNV	S/ 60.860,00	3,65%	S/ 180.000,00	15,30%
Costo del combustible	S/ 1.076.253,12	64,53%	S/ 530.429,28	45,08%
Costo del SOAT y RT	S/ 5.320,00	0,32%	S/ 5.320,00	0,45%
Costo de mantenimiento	S/ 505.796,00	30,32%	S/ 440.532,00	37,44%
Costo social del carbono	S/ 19.697,09	1,18%	S/ 20.320,08	1,73%
Precio de reventa	-S/ 26.670,00		-S/ 26.670,00	
CTP	S/ 1.641.256,21	100,00%	S/ 1.149.931,36	100,00%

El CTP, en anualidades, indica que, desde el primer año en el que se realiza la sustitución por un motor a GNV existen ahorros significativos. Tal como se muestra en la Figura , a partir del año 17, la brecha entre los CTP de los casos se eleva debido a que en ese año se concluyeron los pagos de las cuotas por la conversión. Al llegar al año 20 de vida útil, se habrá ahorrado S/ 491.324,85 por unidad convertida; por lo tanto, si se convierte toda la flota de 43 buses Mercedes Benz, se ahorrarían S/ 21.126.968,57.

Figura 6.4 Costo total de propiedad de un bus de la flota (por año, en soles).



CONCLUSIONES

Para el bus urbano analizado con motor dedicado FPT a GNV, el costo del combustible es de 0,791 soles / km. En comparación, el mismo bus con un motor diésel Mercedes Benz tiene un costo de combustible de 1,6059 soles / km, esto confirma el ahorro significativo que se logra al sustituir el petróleo diésel por GNV. Dado que el costo del combustible es la principal variable del CTP, la disminución porcentual del 50,74% en esta variable tiene un impacto considerable en el valor final del CTP.

La diferencia económica entre sustituir un motor diésel Mercedes Benz por un motor dedicado FPT a GNV (costo: S/ 180.000) y realizar un overhaul al mismo motor diésel Mercedes Benz (costo: S/ 30.430), es de S/ 149.570, por lo que, de no ser por el financiamiento del FISE, el CTP experimentaría un incremento el primer año, lo cual podría influir negativamente en la decisión de optar por la sustitución.

El impacto ambiental evaluado en términos del costo social del carbono, de utilizar un motor dedicado FPT a GNV en un bus urbano frente a un motor diésel es similar. Esto podría deberse a que el consumo de GNV es de 1,883 km/m³, inferior al promedio de otras rutas, que es de 5 km/m³. Este bajo rendimiento resulta en que el bus a GNV emita 92,98 toneladas de CO₂ al año, superando las 90,13 toneladas de CO₂ producidas por el bus con motor diésel en el mismo trayecto.

Entre el año 13 y el año 20, el CTP acumulado para un bus urbano con motor diésel asciende a S/ 1.641.256,21. En contraste, la sustitución por un motor dedicado FPT a GNV resulta en un CTP de S/ 1.149.931,36. Esto representa un ahorro de S/ 491.324,85 por unidad, sumando un total de S/ 21.126.968,57 en ahorros para la flota de 43 buses Mercedes Benz.

Con este ahorro, la empresa de transporte podría adquirir 51 buses nuevos, cada uno valorado en S/ 407.900,00, lo que facilitaría la renovación completa de su flota.

RECOMENDACIONES

Evaluar la transición de los buses urbanos con motores diésel, a alternativas más sostenibles. Los buses urbanos con motores eléctricos son una opción viable debido a su alta eficiencia energética y su bajo costo de operación, otra opción sería los buses urbanos con motores a hidrógeno por su mínimo impacto ambiental.

Calcular el costo de realizar toda la sustitución del motor diésel por uno a GNV en un taller propio de la empresa de transporte para reducir gastos. Actualmente, el desembolso a MODASA es de S/ 180.000. Realzar la conversión en un taller propio podría disminuir este costo, siempre y cuando se cumplan todos los requisitos técnicos exigidos.

Realizar el cálculo del CTP para la sustitución en buses urbanos con motores diésel por motores dedicados a GNV en buses con menos de trece años de antigüedad. Este análisis permitirá identificar si hay un punto de equilibrio en el cual el CTP de un bus urbano con motor diésel sea inferior al mismo bus, con un motor dedicado a GNV.

Analizar el CTP por la conversión del motor diésel a sistema dual GNV en buses urbano. Esta alternativa podría representar una inversión inicial menor en comparación con la sustitución completa del motor diésel, manteniendo al mismo tiempo la confiabilidad del motor existente.

Evaluar el CTP en empresas de transporte urbano cuyos buses no califican para el apoyo financiero del FISE para la sustitución de sus motores diésel por motores dedicados a GNV. En estos casos, es crucial incluir la variable de intereses económicos derivados de financiamiento externo, como préstamos bancarios, para determinar la viabilidad de la sustitución.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aldana, J., Cornejo, E., Grajeda, A., & Reyes, Y. (2022). *Propuesta para la sustitución del combustible Diésel en los vehículos de transporte de pasajeros* [ESAN]. <https://hdl.handle.net/20.500.12640/3051>
- 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). *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(1), 103–112. https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num1_art:561
- Autolíder. (2021). *Ficha técnica OF 1721 /59*.
- Bae, C., & Kim, J. (2017). Alternative fuels for internal combustion engines. *Proceedings of the Combustion Institute*, 36(3), 3389–3413. <https://doi.org/10.1016/j.proci.2016.09.009>
- Bautista, R., Bocarejo, J., Hernández, C., & Wilmsmeier, G. (2022). *Giro Zero: Impulsando el transporte automotor de carga por carretera en Colombia hacia cero emisiones*.
- Bendezú, C. (2020). *¿Impuesto al carbono en Perú? Análisis crítico del impuesto a la emisión del carbono en modelos tributarios extranjeros y su aplicación en el Perú*. PUCP.
- Bernardo, P., & Pariona, L. (2023). *Evaluación de la factibilidad económica para cambiar la actual flota de autobuses convencionales por autobuses eléctricos en el Corredor Rojo en la Ciudad Metropolitana de Lima mediante la técnica del total Cost of Ownership en el periodo del 2020-2030* [Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. <http://hdl.handle.net/10757/661952>

Centro de Investigación de la Universidad del Pacífico. (2016). *Estimación del precio social del carbono para la evaluación social de proyectos en el Perú.*

Clasificación Vehicular y Estandarización de Características Registrables y Vehiculares, El peruano (2006).

Cummins newsroom. (2021). *Total cost of ownership: Improving TCO with Jacobs technology.*
<https://www.cummins.com/news/2021/01/01/total-cost-ownership-improving-tco-jacobs-technology>

Espinoza, A. (2023, June 30). *Movilizarse de la casa al trabajo cuesta el doble que hace 10 años: ¿cuánto gasta el peruano en pasajes?* <https://www.infobae.com/peru/2023/06/30/movilizarse-de-la-casa-al-trabajo-cuesta-el-doble-que-hace-10-anos-cuanto-gasta-el-peruano-en-pasajes/>

Fondo de Inclusión Social Energético. (n.d.). *¿Qué es el FISE?* Retrieved October 7, 2023, from <http://www.fise.gob.pe/que-es-fise.html>

Franzi, R., Galante, N., Macchello, S., & Trigubó, H. (2016, September). Utilización del combustible híbrido (GNC + H₂) en motores de uso vehicular. *Jornadas Iberoamericanas de Motores Térmicos y Lubricación*, 115–127.

Gil, S., Prieto, R., & Vassallo, J. (2021). *Costos e impactos ambientales de los distintos combustibles.* <https://www.researchgate.net/publication/350290166>

Gonzales, C. (2018). *Implementación del sistema de gas natural en la flota de camiones de las plantas de Lima de la empresa UNICON* [Universidad San Ignacio de Loyola]. <https://hdl.handle.net/20.500.14005/3717>

Hagman, J., Ritzén, S., Stier, J. J., & Susilo, Y. (2016). Total cost of ownership and its potential implications for battery electric vehicle diffusion. *Research in Transportation Business and Management*, 18, 11–17. <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2016.01.003>

Infogas. (2023a). *El Perú instalará los primeros grifos de GNL de Sudamérica.*

Infogas. (2023b). *Vehículos pesados a GNV vs precio promedio diésel.* <http://infogas.com.pe/estadisticas/>

Instituto Nacional de Defensa de la Competencia y de la Protección de la Propiedad Intelectual. (2004). *NTP 111.013 Tanques a GNV.*

Instituto nacional de defensa de la competencia y de la protección de la propiedad intelectual. (2022). *Estudio de mercado sobre combustibles líquidos y gas licuado de petróleo en el Perú.*

Iveco Motors. (2005). *Manual técnico y de reparación N60 ENTG.*

Iveco Powertrain. (2007). *Directiva de instalación.* www.ivecomotors.com

Lira, J. (2015). *El uso del GNV.* 5.

Marketwin. (2017). *Estudio de tráfico y tendencias de movilidad urbana en Lima.*

Mendoza, H. (2018). *El uso del gas natural vehicular (GNV) y su incidencia en el costo de transporte de una empresa avícola.*

Ministerio de Economía y Finanzas. (2019). *Directiva General del Sistema Nacional de Programación Multianual y Gestión de Inversiones.*
<https://elperuano.pe/normaselperuano/2019/01/23/1734202-1/1734202-1.htm>

Ministerio de Energía y Minas. (2019). *Balance Nacional de la Energía 2019.*

Ministerio de Energía y Minas. (2023). *Resolución Directoral No. 142-2023-MINEM-DGH.*

Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (2023). *Estadística - Servicios de Transporte Terrestre por Carretera - servicios de pasajeros.* <https://www.gob.pe/institucion/mtc/informes-publicaciones/344888-estadistica-servicios-de-transporte-terrestre-por-carretera-servicios-de-pasajeros>

Ministerio del Ambiente. (2016, July 12). *MINAM precisa información sobre Calidad del Aire y los vehículos automotores.* <https://www.minam.gob.pe/notas-de-prensa/minam-precisa-informacion-sobre-calidad-del-aire-y-los-vehiculos-automotores/>

Ministerio del Ambiente. (2019). *Inventario nacional de gases del efecto invernadero 2019.*
<https://infocarbono.minam.gob.pe/annios-inventarios-nacionales-gei/ingei-2019/>

Montero, L. (2023). *Evaluación de las prestaciones y emisiones contaminantes de un motor de encendido provocado con diferentes combustibles gaseosos.*

Municipalidad Metropolitana de Lima. (2017). *Informe Multianual de Inversiones en Asociaciones Público-Privadas correspondiente al ejercicio fiscal.*

Núñez, C. (2023, February 28). *¿Qué son los gases de efecto invernadero y cuáles son sus efectos?* National Geographic. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/gases-efecto-invernadero-que-son-hacen>

Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería. (2015). *La industria de los hidrocarburos líquidos en el Perú: 20 años de aporte al desarrollo del país.*

Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería. (2023a). *Boletín Estadístico de Gas Natural -Trimestre 2023-I.*

Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería. (2023b, October 26). *Precio Reportado por los operadores de las estaciones de servicio y grifos del diésel DB5.* <https://www.facilito.gob.pe/facilito/actions/PreciosCombustibleAutomotorAction.do>

Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería. (2023c, October 26). *Precio reportado por los operadores de los establecimientos de venta al público de GNV.* <https://www.facilito.gob.pe/facilito/actions/PreciosGNVAction.do>

Peña, I. (2018). *Evaluación del impacto ambiental asociado a una flota de autobuses públicos urbanos: la ciudad de Madrid como caso de estudio.*

Raslavičius, L., Keršys, A., Mockus, S., Keršiene, N., & Starevičius, M. (2014). Liquefied petroleum gas (LPG) as a medium-term option in the transition to sustainable fuels and transport.

Renewable and Sustainable Energy Reviews, 32, 513–525.
<https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.01.052>

Reporte de Costos de La Orden de Trabajo Número 89, Padrón 303 (2022).

Scheimberg, S. (2020). *Consideraciones acerca de la diversificación del transporte pesado en Argentina. Una mirada desde la Planificación Energética.*

SITEC. (n.d.). *¿GNV o GLP, cual es el mejor?* <https://www.sitec.pe/gnv-o-glp-cual-es-el-mejor/>.

Szumska, E. M., Pawełczyk, M., & Jurecki, R. (2022). Total Cost of Ownership analysis and energy efficiency of electric, hybrid and conventional urban buses. *Eksploatacja i Niezawodność*, 24(1), 7–14. <https://doi.org/10.17531/EIN.2022.1.2>

Taborelli, M. (2023). *Ya es factible una flota de buses a hidrógeno en Santiago.* <https://mobilityportal.lat/ya-es-factible-una-flota-de-buses-a-hidrogeno-en-santiago/#:~:text=Adem%C3%A1s%2C%20se%20concluy%C3%B3%20en%20que,kg%20H%20%20%2F100%20km.>

Unidad de Planeación Minero-Energética. (2019). *Primer balance de energía útil para Colombia, la cuantificación de las pérdidas energéticas relacionadas y la brecha de eficiencia energética.*

Varigas. (2023). *Convierte de diésel a dual dual.* <https://varigasdual.pe/>

Yuksel, A. (2021, September 29). *¿Qué es un motor de combustible dual y cuáles son sus beneficios para las aplicaciones de petróleo y gas?* <https://www.cummins.com/es/news/2021/09/29/what-dual-fuel-engine-and-its-benefits-oil-and-gas-applications>

ANEXOS

Anexo 1 Recorrido mensual de los buses Mercedes Benz OF 1721.	1
Anexo 2 Consumo mensual de combustible de los buses Mercedes Benz OF 1721...2	2
Anexo 3 Recorrido mensual de los buses Agrale MA 17.	3
Anexo 4 Consumo mensual de combustible de los buses Agrale MA 17.....	4
Anexo 5 Bus Mercedes Benz OF1721 con motor diésel de la ruta 9401	5
Anexo 6 Motor Mercedes Benz OM366 LA desmontado	5
Anexo 7 Bus Agrale MA 17 con motor FPT	6
Anexo 8 Motor FPT N60.....	6

Anexo 1 Recorrido mensual de los buses Mercedes Benz OF 1721.

Padrón	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre
301	7.799,40	8.356,50	8.975,50	8.170,80	6.190,00	8.000,00	7.812,50	7.437,50	8.125,00	6.250,00
302	7.242,30	9.161,20	9.470,70	8.170,80	6.809,00	7.625,00	4.125,00	8.500,00	7.437,50	7.625,00
303	7.366,10	6.190,00	NR	NR	NR	NR	NR	1.500,00	5.562,50	4.187,50
305	8.170,80	6.190,00	8.666,00	5.137,70	8.789,80	7.562,50	8.687,50	5.062,50	812,50	3.375,00
306	8.294,60	7.056,60	9.718,30	6.870,90	7.985,10	750,00	NR	NR	4.625,00	7.312,50
307	6.870,90	8.542,20	8.047,00	8.294,60	7.180,40	8.375,00	8.250,00	4.125,00	6.750,00	8.375,00
308	7.675,60	7.118,50	8.604,10	5.818,60	5.447,20	8.875,00	9.062,50	8.375,00	5.500,00	4.312,50
309	10.523,00	7.737,50	7.551,80	8.418,40	3.095,00	7.687,50	9.187,50	9.250,00	5.687,50	3.375,00
310	8.666,00	8.913,60	9.470,70	5.942,40	5.509,10	8.125,00	7.312,50	5.687,50	5.500,00	7.500,00
313	1.547,50	NR	NR	NR	2.476,00	3.875,00	8.500,00	7.500,00	8.000,00	6.937,50
314	9.285,00	8.108,90	8.666,00	5.694,80	8.542,20	8.312,50	7.625,00	7.875,00	7.187,50	6.187,50
315	6.499,50	5.942,40	9.099,30	7.551,80	9.037,40	9.375,00	5.625,00	4.875,00	7.250,00	6.562,50
316	9.470,70	6.747,10	7.304,20	7.799,40	7.551,80	7.375,00	6.750,00	7.812,50	7.750,00	8.375,00
317	8.542,20	6.809,00	8.851,70	7.675,60	5.818,60	7.812,50	8.437,50	8.375,00	8.125,00	7.437,50
318	9.161,20	7.985,10	6.313,80	7.056,60	5.323,40	2.687,50	NR	NR	NR	5.125,00
319	6.561,40	6.870,90	9.532,60	8.480,30	7.923,20	8.875,00	7.437,50	8.562,50	6.250,00	8.062,50
321	5.261,50	8.789,80	9.346,90	7.118,50	7.304,20	NR	NR	6.812,50	7.375,00	7.687,50
323	7.799,40	6.809,00	8.913,60	7.118,50	9.346,90	8.687,50	7.312,50	8.000,00	6.187,50	6.437,50
324	7.366,10	7.056,60	7.489,90	6.313,80	5.880,50	7.500,00	4.625,00	9.562,50	7.875,00	5.437,50
325	8.542,20	8.356,50	8.356,50	6.499,50	5.880,50	6.437,50	2.500,00	7.062,50	7.312,50	5.750,00
326	9.408,80	8.851,70	9.037,40	7.180,40	9.594,50	7.750,00	7.812,50	7.500,00	6.437,50	6.812,50
328	9.161,20	7.304,20	7.923,20	6.004,30	6.190,00	1.562,50	8.437,50	7.687,50	6.500,00	8.062,50
330	8.604,10	7.056,60	8.727,90	7.304,20	8.542,20	8.250,00	8.187,50	7.000,00	4.875,00	7.687,50
336	8.913,60	8.294,60	9.965,90	4.952,00	10.151,60	8.250,00	7.000,00	6.937,50	7.062,50	4.875,00
338	9.285,00	7.675,60	9.408,80	7.366,10	7.242,30	6.062,50	7.187,50	3.625,00	NR	NR
339	9.037,40	8.480,30	8.418,40	557,10	6.499,50	8.875,00	8.125,00	8.375,00	7.250,00	4.062,50
345	433,30	NR	1.238,00	6.809,00	5.571,00	5.062,50	NR	NR	5.062,50	9.437,50
348	7.428,00	8.108,90	5.880,50	6.190,00	6.499,50	8.125,00	8.500,00	7.750,00	8.000,00	5.000,00
376	8.789,80	6.375,70	7.551,80	8.727,90	7.799,40	8.375,00	4.125,00	6.812,50	5.437,50	8.812,50
377	9.718,30	7.799,40	8.232,70	8.727,90	9.346,90	2.437,50	NR	NR	2.750,00	5.750,00
378	9.037,40	5.199,60	9.223,10	7.304,20	7.366,10	7.125,00	7.250,00	2.750,00	1.375,00	6.562,50
379	8.418,40	8.418,40	10.151,60	8.789,80	6.313,80	9.062,50	5.125,00	5.875,00	5.375,00	5.437,50
380	9.408,80	6.128,10	8.480,30	8.851,70	6.747,10	8.750,00	8.812,50	9.250,00	8.875,00	8.375,00
381	6.004,30	9.285,00	7.489,90	7.737,50	8.666,00	7.500,00	8.062,50	8.250,00	7.500,00	6.625,00
382	7.118,50	5.818,60	7.799,40	6.004,30	7.242,30	5.125,00	NR	NR	812,50	8.375,00
383	10.089,70	7.923,20	9.780,20	7.304,20	3.466,40	8.500,00	7.875,00	5.187,50	NR	875,00
457	4.869,48	5.754,84	6.861,54	5.681,06	5.754,94	4.132,80	5.223,90	7.562,50	812,50	5.250,00

NR: no registró

Anexo 2 Consumo mensual de combustible de los buses Mercedes Benz OF 1721.

Padrón	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio	Julio	Agosto	Setiembre	Octubre
301	744,92	827,82	892,39	771,69	646,51	783,05	821,13	854,36	776,53	606,61
302	654,85	860,97	927,70	834,00	675,91	721,48	386,66	745,63	714,23	667,60
303	731,16	615,56	NR	NR	NR	NR	NR	162,44	597,93	421,59
305	843,58	657,04	878,81	514,10	832,79	734,39	950,14	478,65	21,16	340,01
306	806,09	692,16	945,49	700,51	796,94	63,10	NR	NR	441,57	686,97
307	737,64	900,91	925,96	851,32	784,70	868,45	869,58	416,87	630,97	806,45
308	710,27	731,00	836,03	506,73	554,39	803,31	804,92	783,54	719,45	564,55
309	895,89	683,32	749,25	791,53	278,90	695,28	800,49	819,50	481,34	340,27
310	871,89	907,43	983,10	653,39	618,82	847,46	857,98	652,29	670,18	874,74
313	159,95	NR	NR	NR	241,87	380,10	828,98	677,19	745,96	649,78
314	822,57	669,97	815,46	545,60	746,60	671,40	699,40	709,94	663,30	550,45
315	610,39	590,66	933,04	798,37	877,97	918,19	571,74	450,02	755,20	673,82
316	828,87	638,57	727,93	740,08	740,10	722,96	708,43	746,21	836,31	760,89
317	717,20	632,43	978,14	789,53	559,13	678,34	841,98	726,11	767,68	641,65
318	885,67	752,38	588,88	671,27	564,02	257,71	NR	NR	NR	553,80
319	631,74	755,11	1105,54	958,82	1065,38	1019,95	753,16	855,49	653,85	787,72
321	601,63	815,18	935,57	718,24	742,45	NR	NR	671,79	764,02	757,11
323	722,97	673,55	914,60	753,87	973,02	855,54	754,56	771,70	654,06	618,79
324	708,28	703,19	785,05	675,76	645,54	748,02	530,91	959,66	844,45	551,94
325	713,30	730,25	767,74	622,20	521,21	575,67	217,16	626,48	674,30	511,85
326	923,56	916,97	884,29	754,14	982,83	780,90	834,89	721,22	659,00	646,31
328	847,20	724,82	803,67	665,03	644,70	203,27	828,07	743,25	663,22	742,18
330	936,23	740,27	953,27	743,31	875,23	789,31	814,06	708,86	444,58	770,62
336	917,08	794,78	1052,01	538,02	1056,47	883,77	751,24	687,58	713,81	437,81
338	896,26	718,72	872,17	702,99	678,38	615,17	742,28	394,06	NR	33,74
339	869,89	843,02	847,59	35,81	683,46	852,20	846,85	810,62	770,89	443,86
345	93,15	NR	218,77	705,61	632,22	545,14	NR	NR	492,10	843,01
348	696,71	777,66	573,10	669,16	617,78	787,12	809,97	694,20	791,42	487,49
376	877,39	615,72	718,49	822,34	760,02	742,26	431,13	644,68	544,36	790,49
377	1037,19	820,57	913,05	955,07	1016,54	248,00	NR	NR	307,23	586,04
378	874,52	499,09	951,46	775,62	796,71	708,72	761,38	264,29	145,41	612,24
379	786,11	857,64	1041,89	892,63	644,33	877,15	555,89	609,91	571,62	538,57
380	820,74	604,94	793,15	848,07	669,03	826,12	896,74	919,64	879,64	838,63
381	620,30	987,26	828,50	824,15	967,82	768,38	815,76	864,84	816,08	660,28
382	776,08	859,63	1262,40	1007,54	1108,70	858,41	NR	NR	101,76	841,09
383	902,92	834,85	941,69	794,03	343,80	756,29	787,47	508,60	NR	175,36
457	483,86	469,17	691,22	624,79	589,95	406,62	498,80	667,66	103,84	471,88

NR: no registró

Anexo 3 Recorrido mensual de los buses Agrale MA 17.

Padrón	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Promedio mensual
2002	450,00	5.025,00	5.625,00	5.250,00	6.476,00	4.018,00	NR	3.239,00	4.297,57
2004	225,00	4.575,00	5.025,00	3.825,00	7.261,00	6.232,00	5.986,00	1.394,00	4.315,38
2012	225,00	450,00	4.050,00	5.025,00	3.198,00	1.845,00	4.182,00	5.412,00	3.048,38
2022	NR	1.800,00	6.075,00	5.925,00	3.936,00	6.109,00	6.888,00	6.601,00	5.333,43
2023	450,00	3.713,00	4.950,00	4.838,00	5.308,00	5.043,00	5.945,00	6.109,00	4.544,50
2028	NR	900,00	6.225,00	6.750,00	5.998,00	6.809,00	7.339,00	5.002,00	5.574,71
2032	NR	4.575,00	3.300,00	6.150,00	3.838,00	5.866,00	2.460,00	NR	4.364,83
2036	1.200,00	4.875,00	2.775,00	6.600,00	5.738,00	3.198,00	6.068,00	5.822,00	4.534,50
2038	150,00	3.787,00	3.488,00	5.775,00	6.291,00	6.399,00	6.724,00	5.330,00	4.743,00
2041	NR	NR	3.038,00	4.350,00	5.288,00	5.986,00	4.797,00	5.248,00	4.784,50
2042	NR	3.000,00	NR	NR	NR	NR	NR	NR	3.000,00
2043	NR	3.825,00	5.700,00	6.224,00	6.817,00	5.989,00	5.781,00	5.658,00	5.713,43
2044	NR	5.100,00	5.175,00	3.825,00	4.632,00	5.907,00	1.599,00	5.699,00	4.562,43
2045	NR	1.575,00	5.025,00	3.187,00	5.827,00	5.825,00	2.542,00	5.289,00	4.181,43
2046	NR	4.200,00	3.825,00	4.350,00	4.815,00	6.850,00	4.961,00	5.002,00	4.857,57
2047	NR	5.175,00	5.175,00	2.625,00	4.003,00	5.415,00	6.273,00	6.396,00	5.008,86
2048	NR	4.725,00	6.075,00	5.925,00	5.266,00	2.706,00	5.986,00	6.191,00	5.267,71
2049	NR	150,00	NR	NR	NR	NR	205,00	3.731,00	1.362,00
2050	825,00	4.950,00	4.575,00	6.000,00	6.489,00	4.018,00	6.232,00	6.683,00	4.971,50

NR: no registró

Anexo 4 Consumo mensual de combustible de los buses Agrale MA 17.

Padrón	May	Jun	Jul	Ago	Set	Oct	Nov	Dic	Promedio mensual
2002	278,50	2.541,42	2.881,28	2.761,08	3.294,90	2.151,12	NR	1.634,26	2.220,37
2004	129,34	2.564,99	2.628,26	1.996,55	3.757,20	3.273,74	3.209,14	700,83	2.282,51
2012	75,56	231,27	2.017,12	2.717,63	1.615,15	918,61	2.205,96	2.879,69	1.582,62
2022	NR	977,89	3.126,86	3.138,69	2.100,90	3.285,92	3.595,82	3.509,23	2.819,33
2023	243,42	1.985,76	2.686,78	2.402,53	2.569,73	2.421,25	2.844,64	2.992,87	2.268,37
2028	NR	488,65	3.107,20	3.699,67	3.265,04	3.727,00	3.938,58	2.716,73	2.991,84
2032	NR	2.429,16	1.729,23	3.250,76	2.095,06	3.247,67	1.274,84	NR	2.337,79
2036	657,41	2.616,24	1.523,42	3.669,37	3.109,86	1.747,58	3.393,62	3.292,11	2.501,20
2038	91,56	2.241,68	2.027,17	2.908,67	3.221,81	3.381,64	3.409,54	2.776,53	2.507,33
2041	NR	NR	1.663,08	2.383,14	3.060,71	3.369,98	2.744,00	2.895,48	2.686,07
2042	NR	1.611,29	NR	NR	NR	NR	NR	NR	1.611,29
2043	NR	2.050,37	3.100,01	3.303,88	3.137,41	3.055,56	2.937,23	3.024,31	2.944,11
2044	NR	2.830,46	2.832,21	2.087,01	2.481,80	3.321,32	856,02	3.081,22	2.498,58
2045	NR	888,20	2.767,34	1.700,09	2.769,91	2.887,84	1.367,06	2.765,87	2.163,76
2046	NR	2.244,02	2.067,38	2.341,39	2.657,39	3.576,10	2.723,95	2.832,16	2.634,63
2047	NR	2.951,59	2.835,06	1.424,55	2.133,57	2.771,78	3.249,64	3.227,58	2.656,25
2048	NR	2.265,96	2.879,88	2.960,51	2.618,22	1.307,37	2.973,63	3.103,11	2.586,95
2049	NR	86,13	NR	NR	NR	NR	90,33	1.866,05	680,84
2050	450,76	2.872,00	2.557,58	3.451,46	3.797,67	2.365,57	3.721,82	3.928,01	2.893,11

NR: no registró

Anexo 5 Bus Mercedes Benz OF1721 con motor diésel de la ruta 9401



Anexo 6 Motor Mercedes Benz OM366 LA desmontado



Anexo 7 Bus Agrale MA 17 con motor FPT



Anexo 8 Motor FPT N60

