

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA

FACULTAD DE INGENIERÍA INDUSTRIAL Y DE SISTEMAS



TESIS

**“APLICACIÓN DE LA PROGRAMACIÓN LINEAL PARA MEJORAR LA
RED DE ABASTECIMIENTO DEL GAS NATURAL LICUADO EN
VEHICULOS PESADOS DE LARGO RECORRIDO EN LA COSTA
PERUANA”**

PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO INDUSTRIAL

ELABORADO POR:

ROSA MARÍA VEGA TORRES

ID 0009-0007-6003-6127

ASESOR:

DR. CÉSAR ALDO CANELO SOTELO

ID 0000-0002-3335-7423

LIMA – PERÚ

2025

Citar/How to cite	Vega Torres [1]
Referencia/Reference	[1] R. Vega Torres, “ <i>Aplicación de la programación lineal para mejorar la red de abastecimiento de gas natural licuado en vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana</i> ” [Tesis de grado]. Lima (Perú): Universidad Nacional de Ingeniería, 2025.
Estilo/Style: IEEE (2020)	

Citar/How to cite	(Vega, 2025)
Referencia/Reference	Vega, R. (2025). <i>Aplicación de la programación lineal para mejorar la red de abastecimiento de gas natural licuado en vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana</i> . [Tesis de grado, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio institucional Cybertesis UNI.
Estilo/Style: APA (7ma ed.)	

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación lo dedico a mis padres María Torres y Pedro Vega por su amor incondicional y sacrificio para darme una educación con valores, a mi hermano Pedro Vega por ser un ángel que cuida mis pasos, a mis abuelas por enseñarme el valor de la moral y la fortaleza, a mis queridos amigos por sus ánimos y cariño constante, y a mis hijos de cuatro patas Blacky, Nikita y Lobita.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a mis padres y hermano, quienes con su confianza y amor han logrado motivarme para culminar este trabajo de investigación, a mis amigos por sus palabras de aliento y empuje, a mi casa superior de estudios, en especial a sus docentes quienes con su disposición y conocimiento supieron encaminar mis ideas para materializarlo en esta tesis.

Así también agradezco a la empresa Lindo Systems Inc., por brindarme soporte a través del uso libre del software Lingo versión 21, a nivel comercial, con propósito de investigación académica.

Finalmente, agradezco la libre disposición de los profesores y personal administrativo de mi casa de estudios, quienes me brindaron sus consejos y soporte lo largo del desarrollo de la tesis.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación analiza la optimización de la red de abastecimiento de gas natural licuado (GNL) para los vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana, a través de la técnica de la programación lineal (PL), para optimizar la eficiencia en el uso de los componentes de la red de abastecimiento, así como, la reducción en los costos de inversión. El estudio se focaliza en determinar puntos críticos de la actual red de abastecimiento, la cual se encuentra en un lento proceso de desarrollo, a fin de proponer una alternativa de solución que optimice los recursos.

El análisis incluye la determinación de los puntos de ubicación de las estaciones de servicio de GNL, la capacidad de almacenamiento en cada estación de servicio, la proyección de la demanda GNL para un horizonte de diez años y la cantidad de componentes a utilizar (tractos, cisternas criogénicas y tanques de almacenamiento de GNL), con la finalidad de asegurar la continuidad el abastecimiento de GNL, haciendo uso eficiente de los recursos.

Además, se realiza un análisis exhaustivo del subsidio del diésel para estimar un escenario futuro, en caso se persista por el diésel como única alternativa de combustible para los vehículos pesados, asimismo, se evalúa el impacto de la combustión del GNL y diésel en el ambiente, obteniendo valores de emisión de Gases de Efecto Invernadero (GEI), gases precursores de GEI y material particulado, lo cual puede coadyuvar en la toma de decisiones a nivel de política energética.

Finalmente, la investigación plantea recomendaciones para ampliar el estudio hacia campos específicos como el transporte de GNL integrado, tarifa única de transporte de GNL y propuestas de políticas públicas que podrían adoptarse para mejorar la calidad de vida de los ciudadanos.

Palabras clave: GNV, GNC, GNL, diésel, subsidio, GEI

ABSTRACT

This research work analyzes the optimization of the liquefied natural gas (LNG) supply network for long-haul heavy vehicles on the Peruvian coast, through the use of linear programming (LP), in order to optimize the efficiency of the components of the supply network, as well as the reduction of investment costs. The study focuses on determining critical points of the current LNG supply network, which is in a slow development process, in order to propose an alternative solution to maximize resources.

The analysis includes the evaluation of LNG refueling station locations, the storage capacity at each refueling station, the LNG demand projection for a ten-year horizon and the amount of components to be used (heavy trucks, cryogenic tanks, and LNG storage tanks), in order to ensure the supply of the continuous LNG demand, making efficient use of resources.

In addition, an exhaustive analysis of the diesel subsidy is carried out to estimate a future scenario in the event that diesel continues to be the only fuel alternative for heavy vehicles. Likewise, the impact of LNG and diesel combustion on the environment is evaluated, obtaining Greenhouse Gas (GHG) emission values, GHG precursor gases and particulate material, which can contribute to decision making at the energy policy level.

Finally, the research proposes recommendations to extend the study to specific fields such as integrated LNG transport, flat rate LNG transport and public policy proposals that could be adopted to improve the quality of life of citizens.

Key words: NGV, CNG, LNG, diesel, subsidy, GHG

TABLA DE CONTENIDO

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTO	iv
RESUMEN.....	v
ABSTRACT	vi
TABLA DE CONTENIDO	vii
LISTA DE TABLAS	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE ANEXOS.....	xviii
INTRODUCCIÓN.....	xix
CAPITULO I: PARTE INTRODUCTORIA DE LA TESIS	1
1.1 GENERALIDADES.....	1
1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	4
1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	7
1.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	8
1.4.1 Problema general	8
1.4.2 Problemas específicos.....	8
1.5 OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN.....	8
1.5.1. Objetivo general	8
1.5.2. Objetivos específicos.....	8
1.6 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN	9

1.6.1. Hipótesis general.....	9
1.6.2. Hipótesis específicas.....	9
1.7 MATRIZ DE CONSISTENCIA	10
1.8 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES.....	12
1.8.1. Variables de operacionalización	12
1.9 ALCANCES Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN	17
1.10 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN	18
1.11 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN.....	19
1.11.1. Diseño y nivel de investigación	20
1.11.2. Unidad de muestreo	20
1.11.3. Población.....	21
1.11.4. Muestra	23
1.11.5. Técnicas e instrumentación	25
CAPITULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL	29
2.1 ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN.....	29
2.1.1. Antecedentes internacionales.....	30
2.1.2. Antecedentes nacionales.....	35
2.2 MARCO TEÓRICO.....	37
2.2.1. Gas natural: Mercado internacional	37
2.2.2. Gas natural: Mercado nacional	66
2.3 MARCO CONCEPTUAL.....	79
2.3.1. Gas natural.....	79
2.3.2. Gas Natural Comprimido	80
2.3.3. Gas Natural Licuado.....	80
2.3.4. El GNL en vehículos pesados.....	81
2.3.5. Estación de servicio o suministro de GNL.....	82
2.3.6. Cisterna para el transporte de GNL	83

2.3.7. Tanque o depósito de almacenamiento de GNL	84
2.3.8. Vehículo pesado.....	85
CAPITULO III: DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN	87
3.1. PARQUE VEHICULAR DE TRANSPORTE DE LARGO RECORRIDO	88
3.1.1. Demanda de diésel vehicular al 2033	90
3.2. EL FEPC Y SU IMPACTO ECONÓMICO	94
3.2.1. Análisis del diésel como combustible vehicular en el FEPC	97
3.3. EMISIONES DE CONTAMINANTES	100
3.4. VEHÍCULOS PESADOS EN EL PERÚ.....	103
3.4.1. Características de los vehículos pesados en el Perú	103
3.4.2. Rutas de recorrido de los vehículos pesados en el Perú	105
3.4.3. Características del vehículo a GNL.....	107
3.5. ESTACIONES DE SUMINISTRO DE GNL EN LA COSTA.....	110
3.5.1. Ubicación de las estaciones de suministro de GNL	111
3.5.2. Capacidad de suministro de las estaciones de GNL	119
3.5.3. Abastecimiento de GNL a las estaciones de suministro GNL	125
3.6. PROGRAMACIÓN LINEAL EN LA RED DE ABASTECIMIENTO DE GNL....	128
3.6.1. Supuestos del modelo	130
3.6.2. Nomenclatura	133
3.6.3. Función objetivo	134
3.6.4. Restricciones del modelo de PL	134
3.6.5. Descripción del modelo de PL	135
3.6.6. Resultados del modelo de PL.....	136
CAPITULO IV: ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	139
4.1. RED DE ABASTECIMIENTO DE GNL	140
4.1.1. Tanques de almacenamiento de GNL	140
4.1.2. Cisternas criogénicas para abastecer a las estaciones de GNL	141

4.1.3. Tractos para trasladar las cisternas criogénicas	141
4.2. SUBSIDIO DEL DIÉSEL AUTOMOTOR.....	142
4.2.1. Precio de paridad de importación	142
4.2.2. Factores de aportación / compensación	145
4.2.3. Demanda de diésel automotor	147
4.3. IMPACTO DEL DIÉSEL AUTOMOTOR Y GNL EN LA CALIDAD DEL AIRE.	151
4.3.1. Emisiones de GEI.....	151
4.3.2. Emisiones de gases precursores del GEI	157
4.3.3. Material particulado (MP).....	160
4.4. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS.....	163
4.4.1. Contrastación de hipótesis general.....	164
4.4.2. Contrastación de hipótesis específicas.....	164
CONCLUSIONES	166
RECOMENDACIONES.....	168
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	170
ANEXOS	175

LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Unidad de muestreo/ análisis de la investigación	21
Tabla 2 Población de la investigación	22
Tabla 3 Muestra de la investigación.....	24
Tabla 4 Instrumentos de medición de la investigación	26
Tabla 5 Concesiones de distribución de gas natural	71
Tabla 6 Composición del gas natural de Camisea	79
Tabla 7 Correlación de variables	91
Tabla 8 Consumo promedio de energía por vehículo pesado	93
Tabla 9 Emisiones generadas por el transporte terrestre - 2021.....	101
Tabla 10 Característica del vehículo pesado de carga en el Perú.....	104
Tabla 11 Característica del vehículo pesado de pasajeros en el Perú	105
Tabla 12 Ejes transversales a la Carretera Longitudinal de la Costa	106
Tabla 13 Característica del vehículo de carga a GNL para Perú.....	108
Tabla 14 Número de galones de GNL requeridos por ruta.....	109
Tabla 15 Característica del vehículo de pasajeros a GNL para Perú	110
Tabla 16 Coeficiente de correlación: flujo vehicular pesado y consumo de diésel.....	111
Tabla 17 Relación logística cubierta por la red de abastecimiento de GNL.....	116
Tabla 18 Unidades de peaje para cada estación de suministro de GNL	121
Tabla 19 Información mensual de flujo vehicular pesado, periodo 2010 - 2023	121
Tabla 20 Restricciones para la red de abastecimiento de GNL.....	127

Tabla 21 Consideraciones para la red de abastecimiento de GNL.....	127
Tabla 22 Tanques adquiridos hasta el año 2033	137
Tabla 23 Cisternas criogénicos adquiridos hasta el año 2033	137
Tabla 24 Cisternas criogénicos adquiridos hasta el año 2033	138
Tabla 25 Demanda base de GNL y diésel	147
Tabla 26 Subsidio del diésel en millones de soles	148
Tabla 27 Demanda acumulada proyectada en TJ.....	155
Tabla 28 Factores de emisión GEI (kg/TJ).....	155
Tabla 29 Factores de emisión de gases precursores GEI (g/kg).....	159
Tabla 30 Demanda acumulada proyectada en kg	159
Tabla 31 Factor de emisión de MP _{2.5} (g/kg)	161

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 Actividades de la industria del gas natural en el Perú	3
Figura 2 Constructo de variables	12
Figura 3 Energía en el sector transporte (MBDOE).....	38
Figura 4 Flota vehículo pesado y consumo en 2015	38
Figura 5 GNV en el mundo en miles >80,600 unidades	39
Figura 6 Participación por tipos de vehículos GNV por regiones.....	39
Figura 7 Participación por tipo de vehículos GNV global (miles)	39
Figura 8 Total de vehículos pesados a GNV en el mundo	40
Figura 9 Combustibles de uso vehicular comparativo en el mundo.....	41
Figura 10 Subsidio total de los combustibles fósiles por sector - 2022.....	41
Figura 11 Consumo de combustible GNV en EE. UU. (MMcf)	42
Figura 12 Combustibles alternativos, impacto del uso de energía y reducción de emisiones de GEI, 2021.....	43
Figura 13 Consumo de gas natural por sectores.....	44
Figura 14 Precios de combustibles alternativos y convencionales (\$/GGE).....	45
Figura 15 Total de estaciones de combustibles alternativos	46
Figura 16 Estaciones de combustibles alternativos para vehículos pesados	46
Figura 17 Corredor de GNL	47
Figura 18 Consumo de gas natural en el transporte (Bcm)	48
Figura 19 Número de vehículos a gas natural.....	48

Figura 20 Venta de vehículos pesados por tipo de combustible.....	49
Figura 21 Cuota de ventas de vehículos pesados por tipo de combustible	49
Figura 22 Tecnologías de control de emisión en vehículos pesados	51
Figura 23 Comparación de precios	52
Figura 24 Por kilómetro recorrido.....	52
Figura 25 Estaciones de servicio de GNL	53
Figura 26 Número de buses a combustibles alternativos (M2/M3)	54
Figura 27 Número de camiones a combustibles alternativos (N2/N3)	54
Figura 28 Estaciones de servicio de GNC/GNL	56
Figura 29 Vehículos a gas natural (NGV) y vehículos/estaciones GNC/GNL	56
Figura 30 Número de buses a combustibles alternativos (M2/M3), 2022	57
Figura 31 Número de camiones a combustibles alternativos (N2/N3), 2022	58
Figura 32 Consumo final por tipo de combustible en transporte.....	60
Figura 33 Número de buses a combustibles alternativos (M2/M3)	60
Figura 34 Número de camiones a combustibles alternativos (N2/N3)	60
Figura 35 Infraestructura de gas natural	62
Figura 36 Cuatro corredores del <i>LNG Blue Corridors</i>	64
Figura 37 Evolución del GNL en el <i>LNG Blue Corridors</i>	65
Figura 38 Oferta interna bruta de energía primaria (TJ)	66
Figura 39 Consumo de gas natural por tipo de uso y/o sector (10^6 m^3).....	67
Figura 40 Consumo de energía en el transporte carretero (TJ).....	68
Figura 41 Balanza Comercial de Hidrocarburos - Exportaciones (MUSD).....	69
Figura 42 Balanza Comercial de Hidrocarburos - Importaciones (MUSD).....	70
Figura 43 Ubicación de las concesiones de distribución de gas natural.....	72
Figura 44 Número de camiones de GNL despachados.....	73
Figura 45 Número de vehículos a gas natural activos en el año	74

Figura 46 Volumen de gas natural vehicular acumulado (Miles m ³)	74
Figura 47 Vehículos convertidos por plaza en el año	75
Figura 48 Estaciones de servicio de gas natural por regiones y provincia	76
Figura 49 Estaciones de servicio de gas natural en Lima provincia	77
Figura 50 Estaciones de servicio a nivel nacional	78
Figura 51 Estaciones de servicio en Lima y Callao	78
Figura 52 Empresas de estaciones de servicio de gas natural.....	79
Figura 53 Suministro de gas natural comprimido	80
Figura 54 Suministro de Gas Natural Licuado.....	81
Figura 55 Esquema de Estación de GNL.....	82
Figura 56 Esquema del flujo de estación de GNL	83
Figura 57 Cisterna para GNL	84
Figura 58 Tanque o depósito de almacenamiento de GNL	85
Figura 59 Vehículos pesados de largo recorrido	86
Figura 60 Consumo de energía por sectores (TJ).....	87
Figura 61 Consumo de combustibles en el sector transporte (TJ)	88
Figura 62 Vehículos de largo recorrido 2005 - 2022	89
Figura 63 Vehículos por año de fabricación y uso de combustible	90
Figura 64 Modelo econométrico de consumo de diésel	92
Figura 65 Ecuación del modelo econométrico	92
Figura 66 Proyección 2024-2033 del consumo de diésel (TJ).....	93
Figura 67 Consumo de diésel (TJ) de vehículos de largo recorrido	94
Figura 68 Saldo FEPC por tipo de combustible en millones de soles.....	95
Figura 69 Deuda pública acumulada - FEPC	96
Figura 70 Transferencias por año fiscal presupuestado – FEPC	97
Figura 71 Factores de aportación y compensación para el diésel (S/galón).....	98

Figura 72 Diésel vehicular – Saldo en millones de soles.....	99
Figura 73 Combustible vehicular: diésel bajo azufre vs gas natural	100
Figura 74 Evolución de las emisiones anuales (10^6 kg), 2000 - 2017	101
Figura 75 Emisiones por el diésel (gramos/kilómetro).....	102
Figura 76 Emisiones diésel vs gas natural (gramos/kilómetro).....	102
Figura 77 Rutas transitadas por los vehículos pesados	107
Figura 78 Tanque de combustible de GNV y GNL	108
Figura 79 Flujo vehicular de vehículos pesados por departamentos.....	112
Figura 80 Consumo de diésel por departamento (miles de barriles/año)	113
Figura 81 Nodo logístico y flujo vehicular de carga nacional.....	115
Figura 82 Ubicación de estaciones de suministro de GNL	117
Figura 83 Ubicación de estaciones de suministro de GNL	118
Figura 84 Ubicación de peajes en la ruta de transporte de carga	120
Figura 85 Flujo vehicular pesado por unidad de peaje y estación de GNL.....	123
Figura 86 Flujo vehicular pesado por estación de GNL.....	124
Figura 87 Correlación de las capacidades de las estaciones de GNL.....	124
Figura 88 Factor de capacidad de suministro de las estaciones de GNL	125
Figura 89 Capacidad de suministro de las estaciones de GNL (m^3).....	128
Figura 90 Ubicación geoespacial de las estaciones de GNL.....	129
Figura 91 Demanda anual de GNL por estación (m^3).....	131
Figura 92 Constructo de variables	139
Figura 93 Datos históricos del PPI del diésel - Soles/Galón.....	143
Figura 94 Proyección del PPI con series de tiempo	144
Figura 95 Distribución del factor de aportación/compensación en porcentaje	145
Figura 96 Distribución de factores de aportación/compensación futuros en porcentaje	146

Figura 97 Análisis de sensibilidad de subsidio acumulado del diésel automotor en millones de soles	150
Figura 98 Emisiones de GEI para el GNL y diésel B5.....	156
Figura 99 Emisiones de gases precursores GEI para el GNL y diésel B5.....	160
Figura 100 Emisiones MP _{2.5} para el GNL y diésel B5	162

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1: Fuentes de energía para el transporte carretero	175
Anexo 2: Gráficos de dispersión de variables para el modelo de pronóstico.....	176
Anexo 3: Resultados de la proyección del modelo econométrico.....	177
Anexo 4: Cuadro comparativo de las características técnicas de los vehículos de carga en Perú	178
Anexo 5: Cuadro comparativo de las características técnicas de los vehículos pesados que usan GNL	179
Anexo 6: Cuadro comparativo de las características técnicas de los vehículos pesados de pasajeros en Perú	180
Anexo 7: Ajuste del flujo vehicular pesado 2010 - 2023, por unidad de peaje.....	181
Anexo 8: Costo de los componentes de la red de abastecimiento de GNL	183
Anexo 9: Datos de entrada para el modelo de PL.....	185
Anexo 10: Modelo de PL en el software Lingo 21.0	186
Anexo 11: Resultados del modelo de PL con la restricción por la seguridad energética	187
Anexo 12: Resultados del modelo de PL sin la restricción por la seguridad energética	188
Anexo 13: Factores de emisión para el diésel y GNL.....	189

INTRODUCCIÓN

Los vehículos de transporte pesado de largo recorrido en el Perú dependen básicamente del diésel como combustible, lo cual ha generado un gasto fiscal a través de continuos subsidios, así como, el poco incentivo en la mejora tecnológica de vehículos, tal es así que nuestro parque automotor de vehículos pesados está conformado ampliamente por vehículos del tipo Euro II y Euro III, lo cual genera un impacto negativo al ambiente. En ese sentido, el estudio se enmarca en el análisis del gas natural licuado (GNL) como combustible alternativo al diésel.

El GNL se ha convertido en una alternativa viable en países donde la industria del gas natural ha alcanzado un nivel de madurez, los cuales ha sido sujeto de estudio para identificar oportunidades que se puede aplicar a nuestro país, considerando que Perú es productor de gas natural y por ende se debe extender la matriz energética al uso del GNL como combustible.

Esta tesis propone abordar el análisis del uso del GNL en los vehículos pesados, a través de la red de abastecimiento de GNL a lo largo de la costa peruana, para un horizonte de diez años, para lo cual se hará uso de la técnica de programación lineal (PL) que permita optimizar los componentes y recursos de la red de abastecimiento, haciéndola eficiente y asegure la continuidad de la demanda de GNL. Asimismo, se analiza el costo fiscal que ha generado el subsidio del diésel automotor al Estado y se estima escenarios futuros en caso sigamos dependiente del diésel, así también, se estudia el impacto ambiental del GNL y el diésel, a fin de comparar las emisiones y adoptar políticas públicas que convengan al país.

En síntesis, se busca que el presente estudio contribuya a optimizar la red de abastecimiento de GNL desde un enfoque matemático, asimismo, se espera contar con un sistema de transporte más eficiente y respetuoso con el medio ambiente, aprovechando las ventajas del GNL y superando los desafíos actuales de la red de abastecimiento de GNL en la costa peruana.

CAPITULO I

PARTE INTRODUCTORIA DE LA TESIS

1.1 GENERALIDADES

El gas natural es un combustible fósil compuesto por hidrocarburos livianos y pesados, así como por pequeñas cantidades de otros elementos, tales como el nitrógeno (N_2), dióxido de carbono (CO_2), sulfuro de hidrógeno (H_2S), entre otros, no obstante, su componente principal es el metano (CH_4). El gas natural se encuentra almacenado en las profundidades del subsuelo, en depósitos rocosos llamados yacimientos de gas seco, húmedo o condensado (Rojas, 2005).

La cadena de valor del gas natural se encuentra dividida en tres segmentos: (i) el *upstream* que consiste en las actividades de exploración y explotación del gas natural, (ii) el *midstream* que incluye el procesamiento, transporte de gas natural y líquidos de gas natural por ductos y (iii) el *downstream* que agrupa las actividades de distribución de gas natural por redes, fraccionamiento, transporte de gas natural comprimido y licuado, y la exportación de gas natural licuado.

Con el descubrimiento de los yacimientos de gas natural de Camisea de la cuenca de Ucayali en 1984, ubicado en la provincia de La Convención, departamento de Cusco (Perupetro S.A., 2014) y el inicio de operaciones del proyecto Camisea en el 2004, el mismo que involucra actividades en todos los segmentos de la cadena de valor del gas natural, se dio apertura al desarrollo de la industria del gas natural y a la diversificación de la matriz energética en el país.

Como consecuencia, el consumo de gas natural tuvo un incremento significativo, tal es así que desde el 2005 se ha convertido en el segundo combustible de mayor demanda después del diésel. Una muestra de ello es que en el 2019 el gas natural

tuvo una participación en el consumo de combustibles del 30 % comparado con el 10 % del 2004¹.

Tras la puesta en marcha del proyecto Camisea, el Estado continúa promoviendo proyectos de inversión relacionados con las actividades de transporte y distribución de gas natural², que incluyen a más regiones del país como parte del proceso de masificación del gas natural en cumplimiento de la política energética nacional.

En la Figura 1 se muestra la descripción de las actividades involucradas en la industria del gas natural que se vienen desarrollando en el Perú, asimismo, se puede apreciar las instalaciones que forman parte de la propuesta de la red de abastecimiento de gas natural licuado (GNL)³ planteada en la presente tesis:

¹ Información elaborada en base a las estadísticas de hidrocarburos del Ministerio de Energía y Minas (Minem) y reportes de transporte de gas natural de Osinergmin.

² El 25 de julio de 2013, el Estado adjudicó el proyecto «Masificación del Uso de Gas Natural a Nivel Nacional», que consiste en el suministro de gas natural a través de redes de distribución a las ciudades de Chimbote, Trujillo, Huaraz, Cajamarca, Chiclayo, Lambayeque y Pacasmayo, denominada Concesión Norte; y a las ciudades de Arequipa, Moquegua, Ilo y Tacna, denominada Concesión Sur Oeste. Asimismo, el 08 de setiembre de 2017, Peru LNG S.R.L. inauguró el terminal de carga de camiones cisternas de gas natural licuado, ubicado en las instalaciones de la Planta de Licuefacción de Gas Natural Pampa Melchorita, para abastecer a las Concesiones Norte y Sur Oeste.

Por otra parte, el Estado viene realizando el proceso de convocatoria para la concesión del proyecto «Masificación del Uso de Gas Natural - Distribución de Gas Natural por Red de Ductos en las Regiones de Apurímac, Ayacucho, Huancavelica, Junín, Cusco, Puno y Ucayali»; asimismo, viene diseñando el proyecto cofinanciado «Sistema Integrado de Transporte de Gas Zona Sur del País» que consiste en un sistema de transporte de gas natural y líquidos de gas natural hacia las regiones de Cusco, Arequipa y Moquegua.

³ De acuerdo al «Glosario, Siglas y Abreviaturas del Subsector Hidrocarburos» aprobado por Decreto Supremo N° 032-2002-EM se define al gas natural licuefactado o gas natural licuado (GNL) como el «Gas Natural Convertido al estado líquido por procesos criogénicos u otros que sólo le cambian su naturaleza física, siendo considerado para todos sus efectos como Gas Natural.»

Figura 1 Actividades de la industria del gas natural en el Perú



Fuente: Pluspetrol, Peru LNG, Cálidda, Repsol, Osinergmin, otros
Elaboración propia

1.2 DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

Desde octubre de 2005, tras el inicio de operaciones del proyecto Camisea, el gas natural vehicular (GNV)⁴, gas natural comprimido a 200 bar de presión almacenado en cilindros, forma parte del mercado de combustibles de uso automotor, siendo este una alternativa a los combustibles líquidos derivados del petróleo como el gas licuado de petróleo (GLP), diésel, gasolina y gasoholes.

Sin embargo, el GNV está limitado principalmente a vehículos ligeros y vehículos pesados⁵ de corto recorrido, debido entre otros factores al peso del cilindro de GNV⁶, al espacio que ocupa este en el vehículo y a la frecuencia de cargas que requiere el cilindro GNV (IANGV, 2020). De otro lado, la demanda de GNV está concentrada en Lima y Callao, pues se requiere de mayor impulso para su masificación a nivel nacional. En el 2022 el consumo de GNV tuvo su mayor demanda en los vehículos ligeros con un 97.9 % y solo un 2.1 % para los vehículos pesados, y un 92 % del consumo total fue para Lima y Callao (Infogas, 2023).

Del análisis de la demanda de combustible vehicular automotor durante los últimos diez años⁷, se advierte que la participación de los combustibles se ha mantenido constante, en el cual el GNV solo tuvo un 8 % pese a que el Estado ha implementado diversas medidas para impulsar su consumo. De otro lado, el diésel sigue siendo el combustible automotor de mayor demanda, pues tiene una participación del 54 %; sin embargo; es el único combustible cuyo uso está orientado

⁴ De acuerdo con el «Reglamento para la instalación y operación de Establecimientos de Venta al Público de Gas Natural Vehicular (GNV)» aprobado por Decreto Supremo N° 006-2005-EM se define al gas natural vehicular como «Gas Natural empleado como combustible vehicular que se encuentre sometido a compresión para su posterior almacenamiento en cilindros de GNV. Este combustible es considerado como un producto diferente al Gas Natural que el Concesionario suministra por la Red de Distribución».

⁵ El agrupamiento de vehículos livianos y pesados se basa en la clasificación de vehículos según clase, realizadas por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones en su reporte estadístico. Vehículos livianos incluye automóviles, camionetas Station Wagon, Pick Up y Panel, mientras que los vehículos pesados incluyen a camiones, remolcadores, remolques, semiremolques y buses interprovinciales).

⁶ Según la norma ISO 11439:2013 Gas cylinders - High pressure cylinders for the on-board storage of natural gas as a fuel for automotive vehicles, los cilindros de GNV son del tipo 1: cilindro metálico de acero (pesado y de bajo costo), tipo 2: revestimiento metálico en la parte central del cilindro con una envoltura de fibra de vidrio o carbono, tipo 3: revestimiento metálico en todo el cilindro con una envoltura de fibra de vidrio o carbono y tipo 4: revestimiento polimérico con una envoltura de fibra de carbono.

⁷ Se realizó el cálculo para el periodo entre el 2012 y 2021 en MBEPD, con los datos procesados del Sistema de Control de Órdenes de Pedido del Osinergmin, teniendo una participación promedio del diésel (54 %), seguido del gasohol (25 %), gas natural (8 %), GLP (8 %) y gasolina (4 %).

a los vehículos pesados de largo recorrido⁸, lo cual pone en evidencia el bajo impacto del GNV como un combustible alternativo en este segmento vehicular.

Se debe tener en cuenta que, a causa de la regulación del contenido de azufre en el diésel automotor para mejorar la calidad del aire y la salud pública, el Estado ha implementado un marco legal que promueve la comercialización de diésel de bajo azufre⁹, lo cual ha conllevado a que el país importe alrededor del 66 %¹⁰ del total de la demanda interna de diésel, debido a que las refinerías en nuestro país no cuentan con la capacidad necesaria para cubrir la demanda¹¹.

Además, si consideramos que se mantenga la tasa de crecimiento mensual de 0.2 % en la demanda de diésel de bajo azufre, alcanzada durante los últimos siete años, y que la importación mensual continúe en un 66 %, a pesar del funcionamiento de la unidad de desulfurización de diésel de la refinería La Pampilla y la refinería Talara, el país tendría la necesidad de continuar con la importación de diésel de bajo azufre; debido a la alta demanda interna de dicho combustible.

Por otro lado, el precio de producción e importación de diésel de bajo azufre presenta un factor alto de correlación (0.928) respecto al precio internacional del petróleo; es decir, la volatilidad del precio del petróleo se traslada de manera inmediata al precio del diésel de bajo azufre, por lo cual el Estado ha determinado su regulación a través del mecanismo denominado Fondo para la Estabilización de Precios de los Combustibles Derivados del Petróleo (FEPC)¹², a fin de mitigar el traslado de la volatilidad en el precio del diésel de bajo azufre hacia el consumidor final.

⁸ Según el Balance Nacional de Energía Útil 2013 del Minem (Ministerio de Energía y Minas, 2016), del total de consumo de diésel automotor un 74 % corresponde al transporte de carga y un 26 % al de pasajeros.

⁹ Las características del contenido de azufre en el diésel automotor han variado en el tiempo. Las propiedades del diésel se iniciaron con el diésel 2, diésel B2, diésel B5, hasta llegar al diésel B5-S50 (diésel que se comercializa actualmente, excepto en los departamentos de Ucayali y Loreto, donde se consume el diésel B5 con contenido mayor a 50 ppm de azufre, según el D.S. N° 014-2021-EM).

¹⁰ De acuerdo con la información procesada desde enero de 2017 a junio del 2023, considerando los reportes de importación del Minem y reportes de venta nacional de Osinergmin.

¹¹ La refinería La Pampilla cuenta con una unidad de desulfurización desde agosto de 2016 y tiene una capacidad de producción es de 30 MBPD. La refinería Talara cuenta con una unidad de desulfurización desde enero del 2023 y tiene una capacidad de producción de 44.3 MBPD de diésel de bajo azufre.

¹² El FEPC se creó mediante Decreto de Urgencia N° 010-2004 como un fondo intangible, cuyo inicio de operación fue en octubre de 2004. A la fecha, los combustibles afectos al FEPC son los siguientes: GLP envasado, diésel automotor de bajo azufre y petróleo industrial para uso en la generación eléctrica en sistemas aislados, según los Decretos Supremos Nos 007-2020-EM, 025-2021-EM y 023-2021-EM.

El FEPC se constituye a través de la aplicación de factores de aportación y compensación que los productores e importadores aplican al volumen de combustible comercializado afecto por el FEPC¹³ (Osinergrmin, 2009). De acuerdo al reglamento de operación del FEPC se estableció un precio de referencia de mercado denominado precio de paridad (PP) que está compuesto por un precio de referencia y un margen de comercialización del mayorista, y una banda de precios que oscila entre un límite inferior y superior, si el PP es superior a la banda de precios se genera un factor de compensación a favor del productor e importador y si es inferior a la banda de precios se genera un factor de aportación a favor del FEPC.

Para el caso del diésel automotor, se han registrado precios de paridad de importación (PPI) que oscilan entre los 16.3 y 3.9 soles/galón, durante los últimos cuatro años¹⁴, a causa de la pandemia de la COVID-19 y la guerra de Ucrania; lo cual demuestra su alta volatilidad y la necesidad del Estado en intervenir para estabilizar el precio de venta hacia los consumidores finales.

A julio del 2023, el FEPC ha generado un costo fiscal de S/ 11,385 millones y una deuda de S/ 668 millones, que obliga al Estado realizar continuas transferencias financieras al FEPC, a fin de honrar las deudas generadas con los productores e importadores de los combustibles afectados al FEPC, lo cual demuestra que en la práctica el FEPC se ha convertido en un subsidio. Respecto al diésel, (para uso automotor y para generación eléctrica) se tiene un costo acumulado de S/ 7,376 millones, que representa el 60 % del costo total del FEPC¹⁵.

El BCRP advierte que si dicho costo se usara en sectores críticos se podría incrementar la capacidad productiva del país. A modo comparativo el referido costo respecto del Presupuesto Institucional de Apertura 2023 representa 9.6 veces el Programa Nacional de Saneamiento Urbano, 11 veces el Programa Pensión 65, 12.8 veces Previsión y control del cáncer y 14.5 Mejora de los servicios del sistema de justicia, entre otros (BCRP, 2023). Es decir, el Estado tiene que implementar medidas eficientes para evitar incurrir en más gastos que no generan valor productivo. En ese

¹³ Mediante Resolución Directoral N° 052-2005-EM-DGH se creó el reglamento operativo del FEPC. El precio de referencia lo determina Osinergrmin y la banda de precios lo establece la Dirección General de Hidrocarburos del Minem, quien es administrador del FEPC.

¹⁴ Información procesada de los reportes de Factores de Aportación y/o Compensación, desde octubre de 2004 a setiembre de 2023, publicados por el Minem.

¹⁵ Información procesada de los aportes y compensaciones (autoliquidaciones) e instrumentos legales de las transferencias realizadas al FEPC proporcionados por el Minem.

sentido surge el gas natural licuado (GNL) como un combustible alternativo al diésel, a fin de que en un mediano plazo dicho combustible no forme parte de los productos afectados por el FEPC.

Con relación a los índices de nocividad de los combustibles en el mercado nacional (INC)¹⁶, el Ministerio del Ambiente ha determinado que el gas natural es el combustible más limpio disponible en el país, otorgándole un índice de 1, mientras que al diésel automotor se le asignó un índice de 14.2. Esto significa que el diésel emite mayor cantidad de material particulado, dióxido de azufre y óxido de nitrógeno en comparación al gas natural, lo cual afecta la calidad del aire.

Lo expuesto deja en evidencia que actualmente el segmento vehicular pesado depende principalmente del diésel de bajo azufre, no obstante, este es un combustible subsidiado que genera un alto costo fiscal al país. Por su parte, el GNV, pese a tener un precio competitivo en el mercado, no ha logrado tener un impacto significativo en el segmento vehicular pesado debido a las limitaciones que posee (volumen y peso de los tanques, autonomía vehicular). En ese sentido, el GNL surge como una alternativa para promover el uso del gas natural en los vehículos pesados, puesto que no requiere un subsidio por parte del Estado y, además, brinda mayor autonomía frente a GNV¹⁷.

1.3 FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

En nuestro país, por más de una década, el diésel sigue siendo el combustible de mayor consumo en el segmento vehicular pesado, pese a que con el inicio del proyecto Camisea se dispone del GNV, que es un combustible económicamente más competitivo y menos nocivo para el ambiente; pero que debido principalmente al mayor peso y volumen del cilindro de GNV, y que brinda una menor autonomía vehicular, su uso está limitado a los vehículos livianos. Por lo tanto, si no se suministra al mercado vehicular con un combustible adecuado para sustituir al diésel, se

¹⁶ El INC se estableció mediante Decreto Supremo N° 007-2020-MINAM para el período 2020-2021. Los INC aplican a combustibles (gas natural, gas licuado de petróleo; gasoholes de 84, 90, 95, 97 y 98 octanos, diésel de bajo y alto azufre, turbo A1, petróleos industriales y carbones minerales) utilizados en los sectores de transporte, eléctrico, industrial y residencial.

¹⁷ Según el análisis de la data del consumo vehicular realizada por la Unión Europea a través del proyecto «LNG Blue Corridors» se tiene que para el equivalente en autonomía de 1 litro de diésel se requiere de 5 litros de GNV o 1.8 litros de GNL. Por su parte, GASAM en su artículo «El gas natural como combustible GNC y GNL» afirma que los vehículos pesados usan GNL debido a la mayor autonomía (aproximada de 1000 km) que este le provee al vehículo a diferencia del GNV (350 km).

continuará demandando un combustible subsidiado que genera un alto costo fiscal al país y al ambiente.

1.4 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN

1.4.1 Problema general

¿Cómo la aplicación de la programación lineal permitirá mejorar la red de abastecimiento de gas natural licuado en los vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana?

1.4.2 Problemas específicos

- ¿Cómo el análisis del flujo vehicular y el consumo de diésel permitirán determinar la ubicación estratégica de las estaciones de servicio de la red de abastecimiento de gas natural licuado en los vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana?
- ¿Cómo la aplicación de la programación lineal permitirá determinar el número de tanques fijos, cisternas criogénicas y tractos para la red de abastecimiento de gas natural licuado en los vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana?

1.5 OBJETIVO DE LA INVESTIGACIÓN

1.5.1. Objetivo general

Aplicar la programación lineal para mejorar la red de abastecimiento de gas natural licuado en los vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana.

1.5.2. Objetivos específicos

- Analizar el flujo vehicular y el consumo de diésel para determinar la ubicación estratégica de las estaciones de servicio de la red de abastecimiento de gas natural licuado en los vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana.

- Aplicar la programación lineal para determinar el número de tanques fijos, cisternas criogénicas y tractos para la red de abastecimiento de gas natural licuado en los vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana.

1.6 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.6.1. Hipótesis general

La aplicación de la programación lineal mejorará la red de abastecimiento de gas natural licuado en los vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana.

1.6.2. Hipótesis específicas

- El análisis del flujo vehicular y el consumo de diésel determinará la ubicación estratégica de las estaciones de servicio de la red de abastecimiento de gas natural licuado en los vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana.
- La aplicación de la programación lineal determinará el número de tanques fijos, cisternas criogénicas y tractos para la red de abastecimiento de gas natural licuado en los vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana.

1.7 MATRIZ DE CONSISTENCIA

TÍTULO						
APLICACIÓN DE LA PROGRAMACIÓN LINEAL PARA MEJORAR LA RED DE ABASTECIMIENTO DE GAS NATURAL LICUADO EN VEHÍCULOS PESADOS DE LARGO RECORRIDO EN LA COSTA PERUANA						
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
Problema general: ¿Cómo la aplicación de la programación lineal permitirá mejorar la red de abastecimiento de gas natural licuado en los vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana?	Objetivo general: Aplicar la programación lineal para mejorar la red de abastecimiento de gas natural licuado en los vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana.	Hipótesis general: La aplicación de la programación lineal mejorará la red de abastecimiento de gas natural licuado en los vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana.	Variable independiente: Programación lineal Variables del modelo P.L. - Estaciones de servicio ubicados en lugares estratégicos del corredor vial - Cisternas criogénicas y tractos para abastecer a los tanques fijos			Tipo de investigación Experimental Nivel de Investigación Preexperimental de corte longitudinal: pretest – posttest Diseño de la investigación científica Aplicada a la ingeniería con enfoque cuantitativo Técnica de Recolección: Información primaria de fuentes oficiales (entidades gubernamentales y entidades
Problemas específicos: ¿Cómo el análisis del flujo vehicular y el consumo de diésel permitirán determinar la ubicación estratégica de las estaciones de servicio de la red de abastecimiento de gas natural licuado en los vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana?	Objetivos específicos: Analizar el flujo vehicular y el consumo de diésel para determinar la ubicación estratégica de las estaciones de servicio de la red de abastecimiento de gas natural licuado en los vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana.	Hipótesis específicas: El análisis del flujo vehicular y el consumo de diésel determinará la ubicación estratégica de las estaciones de servicio de la red de abastecimiento de gas natural licuado en los vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana.				

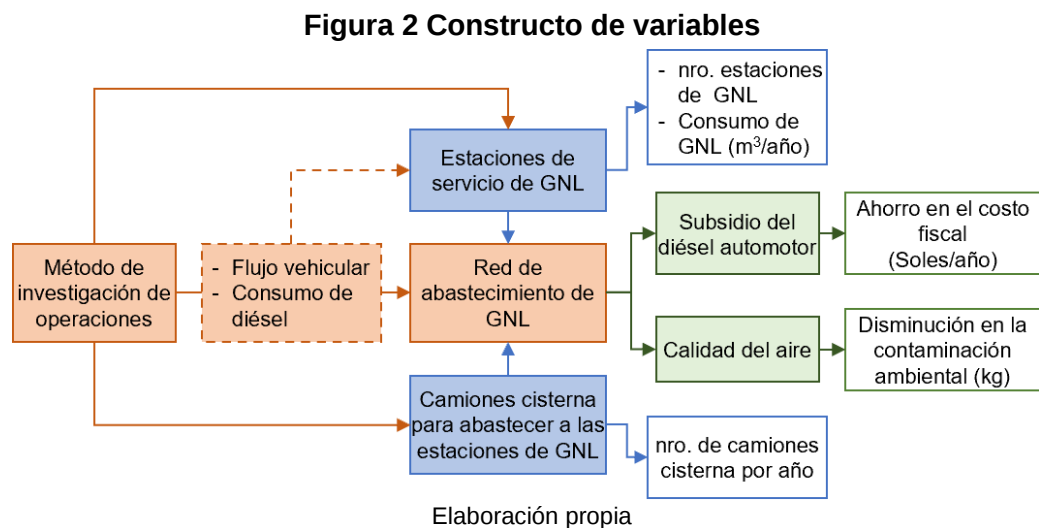
TÍTULO						
APLICACIÓN DE LA PROGRAMACIÓN LINEAL PARA MEJORAR LA RED DE ABASTECIMIENTO DE GAS NATURAL LICUADO EN VEHÍCULOS PESADOS DE LARGO RECORRIDO EN LA COSTA PERUANA						
PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES	METODOLOGÍA
¿Cómo la aplicación de la programación lineal permitirá determinar el número de tanques fijos, cisternas criogénicas y tractos para la red de abastecimiento de gas natural licuado en los vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana?	Aplicar la programación lineal para determinar el número de tanques fijos, cisternas criogénicas y tractos para la red de abastecimiento de gas natural licuado en los vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana.	La aplicación de la programación lineal determinará el número de tanques fijos, cisternas criogénicas y tractos para la red de abastecimiento de gas natural licuado en los vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana.	Variable dependiente: Red de abastecimiento de gas natural licuado (GNL)	Tanques fijos de gas natural licuado Cisternas criogénicas y tractos para transportar el gas natural licuado	- Número de tanques fijos de gas natural licuado por año - Demanda de gas natural licuado por año (m³/año) - Número de cisternas criogénicas y tractos por año	especializadas en energía)

1.8 OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

1.8.1. Variables de operacionalización

Las variables son características observables del sujeto en estudio, que al ser medidas varían de manera cuantitativa y cualitativa una en relación con la otra, para el caso de esta investigación variará en forma cuantitativa. Los tipos de variables están determinadas en base a la hipótesis, porque éstas contienen la variable independiente, dependiente e interviniente (Valderrama M., 2002).

En la Figura 2 se presenta el constructo de las variables correspondiente a la presente investigación.



1.8.1.1. Variable independiente

Definición conceptual

La investigación de operaciones (IO) comprende el modelado matemático, soluciones factibles, optimización y cálculos iterativos, que pueden ser aplicados a resolver problemas de diversas industrias como el petróleo, transporte, bancario, etc. La técnica más importante de la IO es la programación lineal, la cual está diseñada para modelos con funciones objetivos y restricciones lineales (Hamdy A., 2012). La programación lineal es considerada como uno de los avances científicos más importantes de mediados del siglo XX, siendo en la actualidad un herramienta que permite un ahorro significativo de recursos económicos en compañías y empresas medianas, asimismo, la programación lineal utiliza un modelo matemático

para describir el problema, entendiéndose que el término programación hace alusión a la planeación de actividades para obtener un resultado óptimo (Hillier & Lieberman, 2010).

Definición operacional

La red de abastecimiento de GNL tiene como componentes principales a los tanques fijos de almacenamiento de GNL, ubicados estratégicamente en las ciudades de la costa peruana, y los camiones cisterna criogénicos que trasladarán el GNL desde el cargadero de la Planta Melchorita hacia los tanques de almacenamiento de acuerdo con la demanda de los vehículos pesados. Dichos componentes presentan diferentes capacidades (m^3) y costos, por lo que la programación lineal será una herramienta que permita optimizar la red de abastecimiento a un menor costo, para mayor detalle de su aplicación revisar la sección de «Programación lineal en la red de abastecimiento de GNL» del capítulo IV de la presente investigación.

1.8.1.2. Variable dependiente

Definición conceptual

Si bien no existe una definición bibliográfica del significado de red de abastecimiento de GNL o corredor de GNL, se puede encontrar diversas referencias para determinar el nivel de su alcance, por ejemplo, en Europa se ha desarrollado el «Corredor Azul de GNL» (en inglés es *LNG Blue Corridors*) con el objetivo de tener puntos de repostaje de GNL para garantizar la disponibilidad del GNL en las carreteras de transporte a un costo competitivo y de manera simple, que implicó la construcción de aproximadamente 14 nuevas estaciones de GNL o GNC-L localizados en puntos críticos a lo largo del corredor azul y la creación de una flota cercana a los 100 vehículos pesados a GNL que operan a lo largo de los corredores.

La Administración Federal de Carreteras (en inglés *Federal Highway Administration*) del Departamento de Transporte de Estados Unidos, es la autoridad que establece corredores de combustibles alternativos para que los vehículos sean suministrados con GNC, GNL, electricidad, hidrógeno y GLP, para lo cual, dichos corredores o carreteras deben contar con puntos de

repostaje de combustible alternativo a lo largo de la ruta designada en el Sistema Nacional de Carreteras.

El Consorcio Camisea ha anunciado en junio del presente año, que desarrollará un proyecto denominado «Corredor Camisea GNL» con el objetivo de instalar 4 estaciones de servicio de GNL para cubrir las principales rutas de transporte del sur del país, así como, la incorporación de los primeros 120 camiones a GNL.

De las referencias citadas se puede entender que una red de abastecimiento de GNL es un sistema de suministro continuo de GNL dispuesto estratégicamente en determinadas rutas o corredores de transporte, compuesto por estaciones de servicio de GNL para abastecer a los vehículos de transporte pesado.

Definición operacional

Para el presente estudio de investigación se entenderá como red de abastecimiento de GNL al sistema de suministro de GNL ubicado a lo largo del eje longitudinal de la costa o eje vial PE-1N y PE-1S (carretera de la costa peruana de Tacna a Tumbes). Dicho sistema estará compuesto por las estaciones de servicio de GNL, camiones cisterna criogénicos y el cargadero de GNL, lo cual permitirá abastecer de GNL a los vehículos pesados de largo recorrido.

Dimensiones

La red de abastecimiento de GNL tendrá como punto de reposteo el terminal de carga de camiones cisterna de GNL, que se ubica en un área contigua a la Planta de Licuefacción de Gas Natural Pampa Melchorita, en el km 169 de la Panamerica Sur en el distrito de Cañete. Para lo cual se requiere de estaciones de servicio de GNL extendidas a lo largo de la carretera de la costa y de camiones cisterna criogénicas, estos dos componentes son indispensables para el funcionamiento del sistema de suministro de GNL.

Estaciones de servicio de GNL

Las estaciones de servicio o suministro de GNL se ubicarán en la red vial nacional de la costa peruana, según el Sistema Nacional de Carreteras del Perú. Para determinar la ubicación de las estaciones de GNL se analizará el flujo vehicular de cada peaje de incidencia a dicha red vial, considerando los nodos y corredores logísticos, asimismo, se hará un análisis técnico de la capacidad de autonomía vehicular para los vehículos pesados de GNL, así también, se analizará el consumo de diésel en los departamentos de incidencia en el eje longitudinal de la costa, para finalmente aplicar el método de Investigación de Operaciones, lo cual permitirá determinar el número de estaciones de GNL (tanques) con sus respectivos volúmenes de capacidad y consumo de GNL en galones o m³ por año.

Cisternas criogénicas y tractos para transportar el GNL

Las cisternas criogénicas serán abastecidas en el cargadero de la planta de Peru LNG en Pampa Melchorita. El número de cisternas criogénicas y tractos para abastecer a las estaciones de suministro de GNL está en función del número de estaciones de servicio, la capacidad volumétrica de los tanques de las estaciones de servicio de GNL y la capacidad volumétrica de las cisternas criogénicas de GNL, para lo cual se hará uso del método de Investigación de Operaciones.

1.8.1.3. Impacto de la red de abastecimiento de GNL

Según el Fondo Monetario Internacional (FMI), el costo de los subsidios a los combustibles fósiles en el mundo ha alcanzado para el 2022 un monto de USD 7 billones, que equivale aproximadamente a un 7.1 % del PIB global, cifra superior a lo que gastan anualmente los gobiernos en educación (4.3 % PBI global).

Considera que la mayoría de los países fijan los precios de manera incorrecta, al no considerar los costos sociales que implican el uso de los combustibles como la mano de obra, materias primas, entre otros; los costos ambientales que incluyen las emisiones de CO₂, contaminación ambiental

local; y externalidades asociadas al consumo del combustible como la congestión de carreteras e impuestos a los bienes de consumo.

Asimismo, sugiere como base conceptual del precio económicamente eficiente de un combustible, aquello que cuantifique los subsidios explícitas e implícitas que se deriven de la subfacturación en los costos de suministro, los costos ambientales e impuesto general al consumo, planteando lo siguiente (International Monetary Fund, 2023):

$$\begin{aligned} & [\text{coste unitario de suministro} + \text{coste unitario medioambiental}] \\ & * [1 + \text{tasa del impuesto al consumo, en caso aplica}] \end{aligned}$$

El FMI ha manifestado su preocupación, en diversos documentos de trabajo acerca del subsidio de los combustibles fósiles, sobre dos ejes importantes, el impacto económico y ambiental, lo cual guarda relación con los problemas identificados en la sección «Realidad problemática» de la presente investigación. En ese sentido, se considera que el modelo de red de abastecimiento de gas natural licuado tendrá un impacto en el subsidio del diésel automotor y la calidad del aire.

Subsidio del diésel automotor

En el país los vehículos pesados usan principalmente el diésel de bajo azufre como combustible, siendo este un combustible subsidiado por el Estado a través del Fondo de Estabilización de los Precios de los Combustibles (FEPC). Con la propuesta de la red de abastecimiento de GNL se procura que el operador del vehículo pesado acceda al GNL como un combustible alternativo al diésel, por lo que el indicador estará orientado a medir el consumo de GNL, cuya equivalencia de energía al diésel, afectada por el factor de aportación (FA) y/o compensación (FC) del FEPC sobre el diésel se obtendrá el valor del subsidio ahorrado en el año, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$[GNL_{Galones} \cong Diésel_{Galones}] * \left[\frac{FA_{Soles}}{Galón} + \frac{FC_{Soles}}{Galón} \right]$$

Calidad del aire

De acuerdo con el Ministerio del Ambiente el sector transporte es una fuente de contaminación significativa a nivel global, debido a la emisión de agentes contaminantes como material particulado, óxidos de nitrógeno (NO_x), dióxido de carbono (CO₂), entre otros, así como, a la tecnología para controlar las emisiones y la calidad de combustible. Asimismo, señala que solo Lima y Callao son responsables del 58 % de las emisiones de MP de 2.5 micrómetros de diámetro, así como del 10 % de las emisiones de los gases de efecto invernadero a nivel nacional. Respecto a los motores diésel resalta que el material particulado y los óxidos de nitrógeno son los contaminantes más nocivos para la salud humana¹⁸.

Dichos agentes contaminantes afectan de manera directa la calidad del aire, la cual está relacionada con la combustión de los combustibles del sector transporte. La red de abastecimiento de GNL promueve el uso del GNL como combustible automotor en lugar del diésel. Para obtener la cantidad de emisiones por combustión se multiplicará el volumen de combustible consumido por sus respectivos factores de emisión¹⁹.

1.9 ALCANCES Y LIMITACIONES DE LA INVESTIGACIÓN

Para la presente investigación se estudiará el comportamiento del tráfico de los vehículos pesados que transitan por el eje longitudinal de la costa o eje PE-1N y PE-1S y por los ejes transversales²⁰ que comunican la costa con la sierra y selva del

¹⁸ Exposición de motivos del Decreto Supremo N° 029-2021-MINAM, Decreto que modifica el Decreto Supremo N° 010-2017-MINAM, que establece Límites Máximos Permisibles de emisiones atmosféricas para vehículos automotores.

¹⁹ Para el cálculo de la contaminación de combustibles se hará uso de los factores de emisión establecidos por la Environmental Protection Agency de Estados Unidos.

²⁰ Denominación de la ruta de acuerdo con el anexo del Decreto Supremo N° 011-2016-MTC que aprobó la clasificación de rutas del Sistema Nacional de Carreteras (SINAC).

país, para analizar el potencial mercado de consumo de diésel de bajo azufre que puede ser sustituido por el gas natural licuado (GNL).

Se analizará el flujo vehicular pesado por peajes para determinar los puntos estratégicos donde se ubicarán las estaciones de servicio de suministro de GNL, para lo cual se considerará también la ubicación del cargadero o estación de carga de GNL de la única planta de licuefacción de gas natural del país «Pampa Melchorita», de donde se abastecerá el GNL a través de camiones cisterna criogénicas a las estaciones de suministro de GNL.

Se presentará una propuesta de costo de inversión de los componentes de la red de abastecimiento de GNL de implementarse, como los costos de inversión de los camiones cisterna criogénicos y estaciones de servicio de GNL (Horna, 2012) que usarán GNL, así como, el análisis del impacto en la mejora de la calidad del aire al sustituir el diésel de bajo azufre por el GNL.

Como limitante se tiene que la red de abastecimiento de GNL en la costa peruana se viene desarrollando de manera muy lenta y no está integrada, es decir se va implementando de acuerdo a la iniciativa de los concesionarios, como el caso de la estación de GNL en Lima, que se inauguró a mediados de junio del 2023; sin embargo, a la fecha no registra una madurez en la demanda, por el lado de la concesión norte se inauguró dos estaciones pero se encuentran en etapa de prueba por lo que no se cuenta con información oficial de la demanda; se proyecta la construcción de una estación en el sur pero a la fecha no se tiene mayor detalle. Al no contar con información oficial, se hará uso de información de las noticias, conferencias, entre otros medios, para estimar la demanda de GNL y el número de vehículos de GNL, a fin de realizar estimaciones para la red de abastecimiento de GNL, que para efectos de la presente investigación tendrá un tratamiento integrado a lo largo de la costa peruana.

1.10 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN

El presente trabajo de investigación propone un modelo de red de abastecimiento de gas natural licuado (GNL) en la costa peruana que permita sustituir gradualmente el consumo de diésel de bajo azufre en los vehículos pesados, debido a que éste genera un alto costo fiscal al Estado. De otro lado, a pesar de que el país cuenta con el gas natural vehicular (GNV), no ha conseguido tener un alto impacto

en el segmento vehicular de largo recorrido, debido a su baja autonomía y al incremento en el peso del vehículo, debido a que requiere almacenar un mayor número de tanques de GNV para su funcionamiento a diferencia de los vehículos que hacen uso del tanque de diésel o GNL, pues estos requieren un menor volumen de almacenamiento de combustible y otorgan una mayor autonomía vehicular. Por lo tanto, el GNL al compartir características similares con el diésel automotor (peso y volumen del tanque y, autonomía vehicular), es el combustible adecuado para sustituir al diésel, además, no requiere de un subsidio y es menos nocivo con el ambiente.

1.11 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

Una investigación es aplicada si los resultados pueden usarse de manera inmediata para resolver problemas cotidianos, así también, la investigación aplicada identifica el problema y busca posibles soluciones (Horna, 2012). En ese sentido, considerando que la presente investigación tiene como objetivo plantear una alternativa de solución al alto costo fiscal en que viene incurriendo el Estado a través del subsidio del diésel automotor por medio del Fondo de Estabilización de los Precios de los Combustibles (FEPC), obedece al tipo de investigación aplicada.

El enfoque cuantitativo de una investigación se presenta como un proceso secuencial, orientado a comprobar ciertas suposiciones. Hace uso del análisis estadístico, datos numéricos e instrumentos estandarizados. Este enfoque es apropiado cuando se busca medir magnitudes u ocurrencias de los fenómenos y probar hipótesis (Hernández S. & Mendoza, 2018). El presente estudio parte de la identificación de un problema y plantea una solución, respetando el orden de las distintas fases del enfoque cuantitativo, tales como la revisión y análisis de distintos casos en los que ha implementado una red de abastecimiento de GNL, el estudio tiene como objeto de análisis a los vehículos pesados que transitan a lo largo de la costa peruana, se ha planteado una hipótesis y se han definido las respectivas variables, asimismo, el proceso de recolección de datos se enmarca en información oficial a cargo de las entidades gubernamentales del sector transporte y energía, dicha información permitirá determinar el comportamiento vehicular pesado, tanto a nivel de flujo y de consumo de combustible, se hará uso de la herramienta ingenieril denominada programación lineal que nos permitirá optimizar el diseño de la red de

abastecimiento de GNL. En ese sentido, por las consideraciones expuestas esta investigación presenta un enfoque cuantitativo.

1.11.1. Diseño y nivel de investigación

En el proceso cuantitativo se puede disponer de dos tipos de diseño de investigación: investigación experimental y no experimental, donde la primera se clasifica en preexperimental (presenta un grado de control mínimo), experimental puro y cuasiexperimental (Hernández S., Fernández C., & Baptista L., Metodología de la Investigación, 2014). Asimismo, lo preexperimental está relacionado con estudios exploratorios y descriptivos, cuyo diseño se da a través de un grupo con preprueba y posprueba o estadístico de dos grupos (Valderrama M., 2002). Por lo tanto, considerando las características del presente estudio, le corresponde el diseño de investigación experimental, del nivel preexperimental del tipo diseño de un grupo con preprueba y posprueba, de acuerdo con lo siguiente:

Preprueba	Variable independiente	Posprueba
Y ₁	X	Y ₂

Donde:

- Y₁: Medirá los elementos de la red de abastecimiento de GNL antes de aplicar el método de investigación de operaciones (prueba preliminar).
- X: La aplicación del método de investigación de operaciones a la red de abastecimiento de GNL (aplicación del tratamiento experimental).
- Y₂: Medirá nuevamente los elementos de la red de abastecimiento de GNL tras la aplicación del método de investigación de operaciones (prueba posterior).

1.11.2. Unidad de muestreo

Para seleccionar la muestra de la investigación en curso, como paso previo se determinará la unidad de muestreo/ análisis, a fin de asegurar la coherencia con los objetivos de la investigación, considerando para ello como

unidad de muestreo/ análisis a individuos, organizaciones, periodos, eventos, comunidades, entre otros (Hernández S., Fernández C., & Baptista L., 2014).

Tabla 1 Unidad de muestreo/ análisis de la investigación

Pregunta de investigación	Unidad de muestreo/ análisis
¿La aplicación de la programación lineal permitirá mejorar la red de abastecimiento de gas natural licuado en los vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana?	- La red de abastecimiento de GNL. - Vehículos pesados de largo recorrido.
¿El análisis del flujo vehicular y el consumo de diésel permitirán determinar la ubicación estratégica de las estaciones de servicio de la red de abastecimiento de gas natural licuado en los vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana?	- Flujo vehicular mensual por peajes de incidencia en la red vial nacional de la costa. - Demanda mensual histórica del diésel. - Análisis de la infraestructura actual de las instalaciones relacionadas al suministro de GNL. - Demanda de vehículos pesados de GNL que harán uso de la red de abastecimiento de GNL.
¿La aplicación de la programación lineal permitirá determinar el número de camiones cisterna de la red de abastecimiento de gas natural licuado en los vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana?	- Análisis de la capacidad volumétrica de los tanques de las estaciones de suministro. - Análisis de las características de las cisternas que usan los comercializadores de GNL.

Elaboración propia

1.11.3. Población

Es importante tener una correcta delimitación del universo o población, la cual dependerá de los criterios del investigador a fin de que cumpla con los

objetivos del estudio, por lo que deben ser establecidos de manera específica, con la finalidad de delimitar cuáles serán los parámetros muestrales. La población debe situarse por sus características de contenido, lugar y tiempo (Hernández S., Fernández C., & Baptista L., 2014).

La fuente de información primaria para cumplir con los objetivos de la investigación se conoce como población, siendo esta un conjunto de todos los individuos a investigar como objetos, personas, documentos, data, etc. Una investigación puede tener más de una población, que dependerá de la complejidad y variedad del objetivo del estudio (Horna, 2012).

A continuación, se muestra la población correspondiente a cada unidad de muestreo/ análisis.

Tabla 2 Población de la investigación

Unidad de muestreo/ análisis	Población
- La red de abastecimiento de GNL. - Vehículos pesados de largo recorrido.	- La red de abastecimiento de GNL en la costa peruana. - Vehículos pesados de largo recorrido de la costa peruana
- Flujo vehicular mensual por peajes de incidencia en la red vial nacional de la costa. - Demanda mensual histórica del diésel. - Análisis de la infraestructura actual de las instalaciones relacionadas al suministro de GNL. - Demanda de vehículos pesados de GNL que harán uso de la red de abastecimiento de GNL.	- Flujo vehicular de vehículos pesados que transitan por las zonas de incidencia de la red vial nacional de la costa. - Demanda de diésel para cada departamento de la costa peruana. - Características de las estaciones de suministro existentes en la costa peruana. - Análisis de las características técnicas de los vehículos pesados de mayor demanda en el país.
- Análisis de la capacidad volumétrica de los tanques de las estaciones de suministro.	- Estaciones de suministro de GNL ubicadas en las zonas de incidencia de la red vial nacional de la costa.

Unidad de muestreo/ análisis	Población
- Análisis de las características de las cisternas que usan los comercializadores de GNL.	- Camiones cisterna de comercializadores de GNL que se abastecen en el cargadero de GNL de Cañete.

Elaboración propia

1.11.4. Muestra

La muestra es un subgrupo de la población, categorizada en dos ramas: la probabilística y la no probabilística (muestras dirigidas), en la primera todos los elementos de la población tienen la misma probabilidad de ser escogidos para la muestra, mientras que en la segunda la elección de los elementos depende de causas relacionadas con las características del estudio o propósito del investigador, donde la elección dependerá del planteamiento y diseño de la investigación, así como de la contribución que se pretende con el estudio, son utilizadas en investigaciones cuantitativas y cualitativas (Hernández S., Fernández C., & Baptista L., 2014).

El muestreo no probabilístico obedece a técnicas que siguen criterios de selección basadas en el conocimiento del investigador, economía, alcance, etc., con el objetivo de ser lo más representativa posible (Horna, 2012). Uno de los muestreos no probabilísticos más usados y que está relacionado con el objetivo de la presente investigación es el muestreo intencional o por criterio.

El muestreo por criterio se realiza sobre la base del conocimiento y criterio del investigador. Está basado principalmente en la experiencia de la población. Dicho muestreo es el mejor y el más frecuente en las investigaciones científicas, que exige mucha claridad y detalle en las razones y procedimientos para la elección de la muestra (Horna, 2012).

A continuación, se presenta la muestra para cada población identificada en el estudio de investigación.

Tabla 3 Muestra de la investigación

Población	Muestra ^{1/}
- La red de abastecimiento de GNL en la costa peruana. - Vehículos pesados de largo recorrido de la costa peruana	- La red de abastecimiento de GNL en la costa peruana ubicados en el eje longitudinal de la costa o eje vial PE-1N y PE-1S. - Vehículos pesados de largo recorrido, como los camiones, remolcadores y buses de pasajeros, del tipo de emisión Euro III en adelante, que transiten por el eje longitudinal de la costa o eje vial PE-1N y PE-1S.
- Flujo vehicular de vehículos pesados que transitan por las zonas de incidencia de la red vial nacional de la costa. - Demanda de diésel para cada departamento de la costa peruana. - Características de las estaciones de suministro existentes en la costa peruana. - Análisis de las características técnicas de los vehículos pesados de mayor demanda en el país.	- Flujo vehicular por peaje de incidencia en el eje longitudinal de la costa o eje vial PE-1N y PE-1S. - Demanda de diésel de bajo azufre para vehículos pesados para cada departamento de la costa. - Estaciones de suministro de GNL con incidencia en el eje vial PE-1N y PE-1S. - Vehículos pesados de largo recorrido, como los camiones, remolcadores y buses de pasajeros, del tipo de emisión Euro III en adelante, que transiten por el eje longitudinal de la costa o eje vial PE-1N y PE-1S.
- Estaciones de suministro de GNL ubicadas en las zonas de incidencia de la red vial nacional de la costa.	- Estaciones de suministro de GNL con incidencia en el eje vial PE-1N y PE-1S. - Camiones cisterna de comercializadores de GNL que se

Población	Muestra ^{1/}
- Camiones cisterna de comercializadores de GNL que se abastecen en el cargadero de GNL de Cañete.	abastecen en el cargadero de GNL de Cañete y abastecen a zonas de incidencia en el eje vial PE-1N y PE-1S.

^{1/} La información para el análisis se realizará para un periodo mínimo de los últimos diez años.

Elaboración propia

1.11.5. Técnicas e instrumentación

En toda investigación cuantitativa se aplica un instrumento para medir las variables contenidas en las hipótesis. Esa medición es eficaz si el instrumento de recolección de datos en realidad representa las variables que tenemos en mente. Asimismo, debe cumplir con ser confiable o fiable (grado en que el instrumento produce resultados consistentes y coherentes), válido (grado en que el instrumento mide en verdad la variable que se pretende medir) y objetivo (grado en que el instrumento no sea manipulable por el investigador que administra, califica e interpreta la información) (Hernández S., Fernández C., & Baptista L., 2014).

Recolectar datos fiables que respondan a las preguntas de investigación significa: elegir un instrumento de medición ya existente o desarrollar uno propio, aplicar el instrumento de medición y preparar los datos obtenidos para un análisis correcto. La selección de las técnicas requeridas dependerá de la naturaleza del problema y metodología de investigación aplicada, por ejemplo, en caso se busca determinar estadísticas y datos de producción o comercialización, lo más apropiado sería alguna técnica de registro documental. En caso existan instrumentos apropiados para la investigación, lo que se debe hacer es adaptar dichos instrumentos para su aplicación.

Asimismo, en caso de que el propósito de la investigación tenga como finalidad el uso del análisis de información registrada en documentos, anuarios estadísticos o base de datos se recomienda el instrumento de la revisión documental o entrevista a profundidad (Horna, 2012).

Para que la revisión documental guarde coherencia con los objetivos de la investigación, se ha generado la muestra para cada objetivo del estudio a

fin de detallar la información que corresponda de manera específica a cada objetivo. Para asegurar la validez y objetividad del instrumento de medición se hará uso únicamente de datos primarios que provengan de fuentes oficiales gubernamentales y/u organizaciones especializadas del sector energético. En la siguiente tabla se presenta la información que será parte de la revisión documental de manera detalla para cada muestra del propósito de la investigación.

Tabla 4 Instrumentos de medición de la investigación

Muestra	Instrumentos de medición
- La red de abastecimiento de GNL en la costa peruana ubicados en el eje longitudinal de la costa o eje vial PE-1N y PE-1S. - Vehículos pesados de largo recorrido, como los camiones, remolcadores y buses de pasajeros, del tipo de emisión Euro III en adelante, que transiten por el eje longitudinal de la costa o eje vial PE-1N y PE-1S.	• Documentos de trabajo sobre el tema: - Revisión de tesis de maestría relacionada al gas natural (Instituto de Tecnología de Massachussets MIT y otros) y trabajos de investigación citadas en fuentes oficiales (Exxon Mobil, British Petroleum, Comisión Europea, Sedigas, Osinergmin, otros). - Análisis de casos de corredores de GNL en Asia, Europa y Estados Unidos, proyecto de corredor Azul de Europa (fuentes oficiales). • Datos estadísticos: - Vehículos y consumo GNL (Revista especializada en gas natural vehicular de Europa, Asia y Estados Unidos). - Transporte carretero, flujo vehicular, mapas viales (Ministerio de Transporte y

Muestra	Instrumentos de medición
	Comunicaciones, Instituto Nacional de Estadística e Informática, otros). - Consumo de combustibles (Osinergrmin). - Balance de Energía (Minem) • Instrumentos legales - Emitidos por el Minem y el Estado. • Otra información primaria, tomada de fuentes oficiales.
- Flujo vehicular por peaje de incidencia en el eje longitudinal de la costa o eje vial PE-1N y PE-1S. - Demanda de diésel de bajo azufre para vehículos pesados para cada departamento de la costa. - Estaciones de suministro de GNL con incidencia en el eje vial PE-1N y PE-1S. - Vehículos pesados de largo recorrido, como los camiones, remolcadores y buses de pasajeros, del tipo de emisión Euro III en adelante, que transiten por el eje longitudinal de la costa o eje vial PE-1N y PE-1S.	• Documentos de trabajo sobre el tema: - Logística y transporte del Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC). - Estudios del Sistema Nacional de Carreteras del MTC. • Datos estadísticos: - Flujo vehicular por unidades de peaje del MTC - Consumo de combustible (Osinergrmin y Minem) - Transporte carretero y mapas viales del MTC • Instrumentos legales - Emitidos por el Minem y MTC. • Otra información primaria, tomada de fuentes oficiales.

Muestra	Instrumentos de medición
- Estaciones de suministro de GNL con incidencia en el eje vial PE-1N y PE-1S. - Camiones cisterna de comercializadores de GNL que se abastecen en el cargadero de GNL de Cañete y abastecen a zonas de incidencia en el eje vial PE-1N y PE-1S.	• Documentos de trabajo sobre el tema: - Transporte de GNL (Osinerghmin) • Datos estadísticos: - Cargas y volumen de venta de GNL para camiones cisterna (Osinerghmin) • Factores Instrumentos legales - Emitidos por el Minem y Osinerghmin • Otra información primaria, tomada de fuentes oficiales.

Elaboración propia

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

El marco o fundamento teórico es una síntesis analítica y crítica de toda la información que contribuyó al tema de la investigación, su función primordial es la de sustentar bibliográficamente la investigación, consta de tres partes interrelacionadas: i) antecedentes, ii) bases teóricas e iii) hipótesis (Horna, 2012).

Luego del planteamiento del problema de investigación, habiendo evaluado previamente su relevancia y factibilidad, corresponde sustentar teóricamente el estudio, que implica exponer y analizar teorías, conceptualizaciones, investigaciones previas y los antecedentes en general; esto proporcionará una visión sobre dónde se sitúa el planteamiento del estudio dentro del campo del conocimiento de nuestro interés (Hernández S., Fernández C., & Baptista L., 2014).

De lo expuesto, se entiende que el marco teórico es el soporte bibliográfico de la presente investigación, el cual debe ser desarrollado luego del planteamiento del problema de investigación, el mismo que fue materializado en el capítulo anterior y que además incluyó el planteamiento de la hipótesis. En consecuencia, en el presente capítulo corresponde desarrollar los antecedentes y la base teórica, con el rigor que demanda el fundamento teórico.

2.1 ANTECEDENTES DE INVESTIGACIÓN

Para el desarrollo de los antecedentes bibliográficos se tendrá en cuenta la citación de referencias académicas de calidad (tesis, artículos científicos, publicaciones serias, datos estadísticos de instituciones reconocidas, etc.), se buscará responder a ¿qué han encontrado en sus investigaciones?, ¿cuáles son los

principales hallazgos?, entre otros cuestionamientos relevantes que aporten al sustento de la presente investigación (Horna, 2012).

2.1.1. Antecedentes internacionales

The Role Of Naural Gas as a Vehicle Transportation Fuel: Master of Sciencie in Technology and Policy, Massachusetts Institute of Technology, 2010.

La investigación se enfoca en estudiar el gas natural comprimido (GNC) o gas natural licuado (GNL) como un combustible para el transporte en Estados Unidos. Identifica las barreras de mercado para favorecer el ingreso del gas natural. Asimismo, analiza el segmento vehicular donde la tecnología del gas natural vehicular alcanzó el nivel de madurez y que por consiguiente no requiere subvención pública, por lo tanto, puede competir económicamente con otros combustibles comparables.

El estudio concluye que el gas natural desempeña un rol útil en el transporte vehicular estadounidense, pero de una manera poca significativa, donde destaca el GNC en vehículos ligeros de alto kilometraje y en vehículos pesados de corto recorrido. Plantea que para reducir la barrera de mercado se debe reducir el costo incremental y mejorar el rendimiento de los vehículos a GNC hasta los niveles europeos.

Asimismo, asevera que un mayor uso del GNC reduciría las emisiones de gases de efecto invernadero en el sector transporte y proporcionaría protección a los consumidores ante una volatilidad de los precios internacionales del petróleo. Respecto a los vehículos pesados de corto recorrido a GNC, se reduciría además la contaminación por óxidos de nitrógeno en comparación a los vehículos a diésel.

Finalmente, respecto a los vehículos pesados de largo recorrido a GNL, concluye que, pese a que existe un mercado potencial para dicho segmento vehicular, las perspectivas para su desarrollo se encuentran limitadas, debido a los costos incrementales, problemas operativos sin resolver, limitada infraestructura de abastecimiento de GNL y la reticencia de la industria del transporte de carga (Jarod M., 2010).

Modelling the Global Prospects and Impacts of Heavy Duty Liquefied Natural Gas Vehicles in Computable General Equilibrium: Master of Science in Technology and Policy, Massachusetts Institute of Technology, 2014.

El estudio analizó los principales factores y tendencias que afectan la adopción del gas natural vehicular en el sector transporte, así como los costos de los vehículos, costos de la infraestructura y el desempeño económico del combustible. Este último, resultó ser competitivo para el gas natural licuado (GNL) en comparación con el diésel, siempre y cuando la producción y distribución sea a escala, tanto para Estados Unidos, la Unión Europea y China.

Tras la aplicación de un modelo económico de equilibrio general computable para incorporar a los vehículos pesados a gas natural en el sector transporte, se observa una adopción significativa de los camiones de GNL en Estados Unidos, con una penetración del 10 % de los camiones pesados en 2020 y de hasta el 100 % en 2040; mientras que en la Unión Europea y China la adopción se prevía más lenta debido al aumento de los precios del gas natural.

Según el modelo económico, la incorporación de camiones a GNL en Estados Unidos se tradujo en precios del gas natural moderadamente más altos al diésel y una pequeña reducción de las emisiones totales de los gases de efecto invernadero, respecto a los escenarios sin disponibilidad de camiones de GNL.

La investigación resalta que el desarrollo del transporte alimentado con gas natural aún se encuentra en una etapa incipiente y la modelización del equilibrio general computable ofrece una herramienta que puede ser aplicada para probar una diversidad de supuestos de evolución de costos y precios relativos (Chun Y., 2014).

LNG as a transport fuel: Oxford Energy Forum (Artículo de revista), Oxford Institute for Energy Studies, 2017.

El artículo analiza el desempeño del gas natural licuado (GNL) como combustible en el sector transporte carretero y marítimo, y como la presente

investigación está enfocada solo en el GNL para vehículos pesados, se mostrará los resultados relacionados con el transporte carretero.

El GNL ofrece una ventaja medioambiental, emite menores cantidades de dióxido de carbono (CO₂), ausencia de material particulado (MP), óxidos de nitrógeno (NO_x) y óxidos de azufre (SO_x). Otro punto importante es el argumento financiero a favor del GNL que depende del diferencial de precios con el diésel. Desde la perspectiva de la oferta, se tiene mayor disponibilidad de GNL y de terminales de GNL, y la presencia de algunos mercados de un sector no conectado a la red existente abastecido por GNL.

Como desventaja se ha identificado la grabación de impuestos en el punto de venta del GNL, lo cual podría elevar su precio final, a pesar de tener un precio competitivo frente al diésel en el precio internacional. Otro punto para mejorar es que el costo y disponibilidad de vehículos adecuados, y de infraestructura de repostaje. En comparación con los vehículos a diésel, y pese a la creciente gama de camiones de GNL se carece de una extensa red de mantenimiento y reparación.

Se destaca como mercados regionales de GNL con mejores perspectivas a Norteamérica, Europa y China, debido a que poseen un sector importante de transporte de mercancías a través de carreteras de larga distancia, así como, infraestructuras de GNL existentes. Norteamérica tiene a su favor que es un productor de GNL a bajo costo, produce vehículos y motores a GNL.

La fiscalización de precios de GNL en el transporte en Europa hace que el GNL presente un precio más bajo que el diésel, por su lado la Unión Europea sigue fomentando proyectos de corredores azules de GNL; sin embargo, la adopción del GNL sigue siendo relativamente lenta.

La consternación por la calidad del aire en China ha conllevado que el Gobierno fije como objetivo que el GNL represente el 10 % del consumo total en el sector transporte en el 2020. China cuenta con una amplia cadena de suministro de GNL y una cantidad significativa de vehículos a GNL (Le Fevre, 2017).

A MILP formulations for highway petrol station replenishment in initiative distribution mode: Petroleum Science (2021) 18:994 -1010 (Artículo de investigación), 2021.

El estudio hizo un análisis de optimización del abastecimiento de combustibles a unas gasolineras de carretera, a través de la aplicación del MILP, donde se buscó obtener los mínimos costos operativos como los costos de carga y descarga de combustible, costos de transporte, entre otros, para cual se tuvo en cuenta que cada camión puede llevar únicamente un producto y este puede ser distribuido a diversas gasolineras considerando el inventario, distancia, congestión de la carretera, entre otros. Los camiones parte de un garaje y al término de la jornada llegan al garaje. El MILP se aplicó a un caso real compuesto por ocho gasolineras de carretera, un depósito, un garaje y ocho camiones.

Para el modelo se consideró 18 horas de periodo en estudio, en el cual se observó que la tasa de ventas de cada gasolinera varía frecuentemente y un cambio de inventario de cada gasolinera y depósito, ello en comparación con el plan de programación real de la empresa. Asimismo, se advirtió que el modelo conlleva a menos costos operativos al tiempo que controla los inventarios a un nivel bajo pero confiable, los productos se envían a la gasolinera en un momento preciso, lo cual mejora la asignación de combustibles y aumenta la estabilidad del suministro de la gasolinera.

Por otro lado, el estudio advierte que el problema de programación de camiones es algo complicado, que requiere exigencias estrictas de tiempo y espacio de cálculo. Para el caso de un modelo matemático, es adecuado si se aplica para obtener la solución óptima para un problema relativamente pequeño, debido a que la eficacia de la resolución está estrechamente relacionada con la escala del modelo (Xin-Tong Wei, 2021).

A set of models for optimization of gas distribution networks: A study in Process and Systems Engineering, Åbo, Akademi University, Finland, 2019.

El estudio hizo un análisis de optimización de la distribución de gas natural por tuberías, a través del uso de camiones para transportar el gas natural comprimido (CNG) y/o licuefactado (GNL), combustible alternativo (biogás o gas sintético) en la región de Finlandia, para lo cual uso el MILP.

En el modelo se tuvo en cuenta que el GNL es recibido en tanques de almacenamiento en los puertos de la costa de Finlandia, para ser trasladados por camiones de GNL a los clientes remotos o reinyectados a las tuberías de gas natural de la región, para lo cual se ha considerado que la zona cuenta con combustible alternativo para atender parte de la demanda, así como, los clientes que reciben GNL también pueden abastecer a sus vecinos a través de la reinyección a las tuberías de gas natural.

El objetivo del modelo fue minimizar los costos de operación e inversión, los costos de inversión incluyen nuevos proyectos de ductos de gas natural, el cargadero de GNL y los tanques de almacenamiento de GNL para los clientes finales, los costos operacionales incluyen el costo de transportar el gas natural, costo de la energía requerida para comprimir el gas natural y transportar en los camiones CNG. Se usaron variables binarias o decisorias para las instalaciones de unidades de gasificación, para el caso en que los clientes requieren CNG o GNL o combustibles alternativo.

La inclusión de variables binarias y enteras incluidas en el MILP hizo posible encontrar una solución óptima a los problemas con conexiones potenciales de gas natural y diámetros de tuberías desconocidas, así como, determinar los flujos y presión óptimos en las tuberías de gas natural (Mikolajková-Alifov, 2019).

A MILP model for truck-shovel scheduling to minimize fuel consumption:

Department of Electrical, Electronic and Computer Engineering, University of Pretoria, Pretoria 0002, South Africa (Artículo de investigación), The 8th International Conference on Applied Energy - ICAE 2016.

El estudio presenta un modelo de optimización para minimizar el consumo de combustible utilizado en la maquinaria de carga y transporte de materiales (etapa de acarreo) en las minas de cielo abierto, para lo cual se aplicó la técnica de la Programación Lineal Entera Mixta (MILP).

Para el modelo matemático se usaron parámetros técnicos como la carga útil de los volquetes, capacidad de los volquetes, capacidad de carga de las palas, consumo de combustibles en función de las condiciones de funcionamiento de los equipos, turno de 8 horas, entre otros, para construir una estrategia de despacho de m-volquetes por n-palas.

Como resultado se obtuvo un indicador de eficiencia energética de 0.1370 L/ton y un consumo de 5154.15 L de combustible para las operaciones de acarreo, y comparado con la política de despacho fijo de la mina, el modelo de optimización energética se obtuvo un ahorro de combustible del 4.64 % (D.M. Bajany, 2017).

2.1.2. Antecedentes nacionales

Propuesta de utilización del Gas Natural Licuefactado en los camiones mineros – Evaluación de beneficios: Maestría en Gestión de la Energía, Universidad ESAN, 2019.

El estudio analizó la viabilidad técnica y económica de la sustitución parcial o total del diésel por el gas natural licuado (GNL) en los camiones mineros de carga interna, de sistema de combustible dual diésel-GNL, utilizados en la minería de tajo abierto, así como, el impacto ambiental tras la sustitución del diésel. Se resalta que parte de la viabilidad técnica es que la mina cuente con una planta satélite de GNL para abastecer a los camiones.

Como resultado se obtuvo que al sustituir de manera parcial el diésel se generara un ahorro para las mineras, siempre y cuando, el precio el GNL sea menor a US\$ 19/MMBTU. Asimismo, dicha sustitución de combustible permite una disminución del 28 % en CO₂.

Finalmente recomienda que para reducir la dependencia de la importación del diésel se requiere evaluar un combustible sustituto, que se produzca en el país, como el GNL (Gonzales, Loayza, More, & Simeon, 2019).

Propuesta de uso del GNL como combustible para transporte vehicular de carga pesada e interprovincial de pasajeros a lo largo del corredor vial costero en el Perú: Maestría en Gestión de la Energía, Universidad ESAN, 2021.

El estudio analizó la viabilidad técnica, económica y financiera de implementar estaciones de servicio para suministrar gas natural licuado (GNL) en el transporte vehicular de carga pesada e interprovincial de pasajeros en

el corredor vial costero peruano, que incluye el diseño de instalación de las estaciones de servicio de GNL en el norte y sur del país, así como, la evaluación del marco legal de promoción del uso y suministro de GNL para vehículos pesados. Cabe señalar que se hizo un diagnóstico de las estaciones de servicio de diésel para referenciar las ubicaciones de las estaciones de servicio de GNL (fusionar una estación de suministro existe de diésel con una de GNL).

Como resultado se obtuvo que los departamentos de Lima, Arequipa, La Libertad e Ica tienen potencial para ubicar las estaciones de servicio de GNL, tomando como referencia la demanda de diésel, PBI, población y proyectos mineros e hidrocarburíferos a desarrollarse en los próximos años, y que los sectores de transporte y minería tienen mayor potencial para el consumo de GNL en vehículos pesados.

Finalmente, de las entrevistas realizadas se destaca lo siguiente: i) Transportes Rodrigo Carranza manifestó que no renovaron el 50 % su flota de vehículos a GNL (según contrato con Quavii) debido a que no hay mercado, no existe el servicio de posventa de repuesto del tipo de camiones a GNL, ii) Scania del Perú informó que sus camiones a GNL tienen una limitación a los 3,000 *m.s.n.m.* y que sus productos no tienen liberación para trabajar fuera de carretera, solo asfalto y iii) Modasa indicó que para el transporte el gas natural es más barato que el diésel; sin embargo, en la actualidad ya no es tan competitivo por la inversión que se tiene que hacer en la compra del camión, asimismo, aseguró que un buen financiamiento de adquisición del vehículo es lo más importante (Berrospi, Colina, Holguín, & Zuñiga, 2021).

Optimización de una red de abastecimiento de gas natural licuado:

Megaprojects: Building Infrastructure by fostering engineering collaboration, efficient and effective integration and innovative planning (Artículo de investigación), The Latin American and Caribbean Consortium of Engineering Institutions, 2012.

El estudio realizó un análisis de optimización de recursos (tanques y cisternas) para la red de abastecimiento de gas natural licuado (GNL) a

diferentes ciudades del Perú, a través de la aplicación de la programación lineal y modelo heurístico. Se trabajó bajo dos escenarios i) se evalúa para cada ciudad, la cantidad y costos de tres flotas de cisternas, una para cada sector (residencial, vehicular e industrial) y ii) evalúa lo mismo que el primer escenario, pero con la diferencia de que utiliza una sola flota para abastecer los tres sectores.

Se concluyó que para el caso del cálculo de las cisternas se obtuvieron resultados similares con ambos modelos, siendo la mejor la obtenida con programación lineal. Para el cálculo de tanques se obtuvieron resultados diferentes, siendo la de programación lineal la de menor costo. Asimismo, se advierte que el enfoque de programación lineal genera una solución menos costosa que el enfoque heurístico (Cornejo, Atoche, & Mejía, 2012).

2.2 MARCO TEÓRICO

Se puede entender como bases teóricas a la representación del análisis sistemático y sintético de las principales teorías que darán soporte al tema de la investigación, que además cumplan con ser coherente (no generar contradicciones), consistente (tener argumentos sólidos), objetiva (no debe basarse en ideologías), entre otros (Horna, 2012). Por otro lado, se debe tener claro que marco teórico no es lo mismo que teoría, por lo que, no todos los estudios que contengan un marco teórico tienen que fundamentarse en una teoría (Hernández S., Fernández C., & Baptista L., 2014).

2.2.1. Gas natural: Mercado internacional

En el sector transporte, la demanda mundial de energía está en continuo crecimiento, se prevé un aumento del 30 % entre el 2021 y el 2050 (ver Figura 3). China y Europa en conjunto representan cerca de la mitad del incremento total del sector. Del análisis de Exxon Mobil sobre el artículo *The Future of Trucks Implications for energy and the environment* de la Agencia Internacional de Energía (ver Figura 4), en el 2015 los vehículos pesados de larga distancia, conformó el 15 % de la flota total y utilizaban el 55 % del combustible para el transporte en carretera (Exxon Mobil, 2023).

Se puede observar que el diésel es el combustible de mayor consumo en los vehículos pesados, debido a su amplia disponibilidad y la capacidad tecnológica de los motores diésel.

En algunas regiones, el gas natural se perfila como un combustible alternativo en los vehículos pesados. Esta tendencia está siendo impulsada por los posibles beneficios económicos a los operadores de camiones. Si bien el costo inicial de los camiones a gas natural ya sea para GNC o GNL, es mayor a los camiones a diésel convencionales, en algunos mercados los precios del gas natural en relación con el diésel con el tiempo pueden proporcionar importantes ahorros de costes en combustible. Además, el gas natural puede proporcionar beneficios en la reducción de las emisiones (Exxon Mobil, 2015).

Figura 3 Energía en el sector transporte (MBDOE)

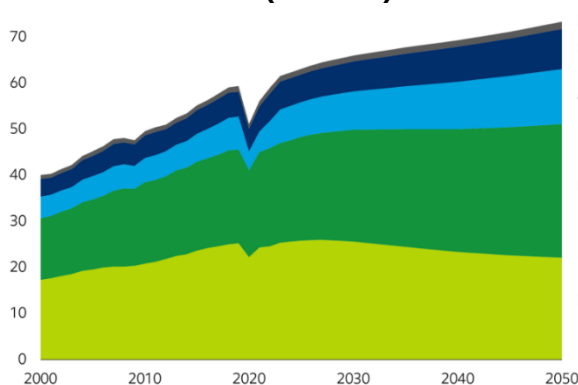
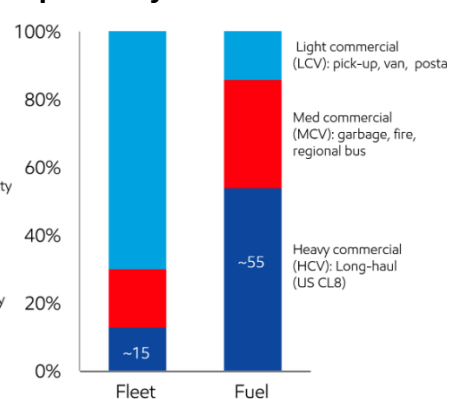


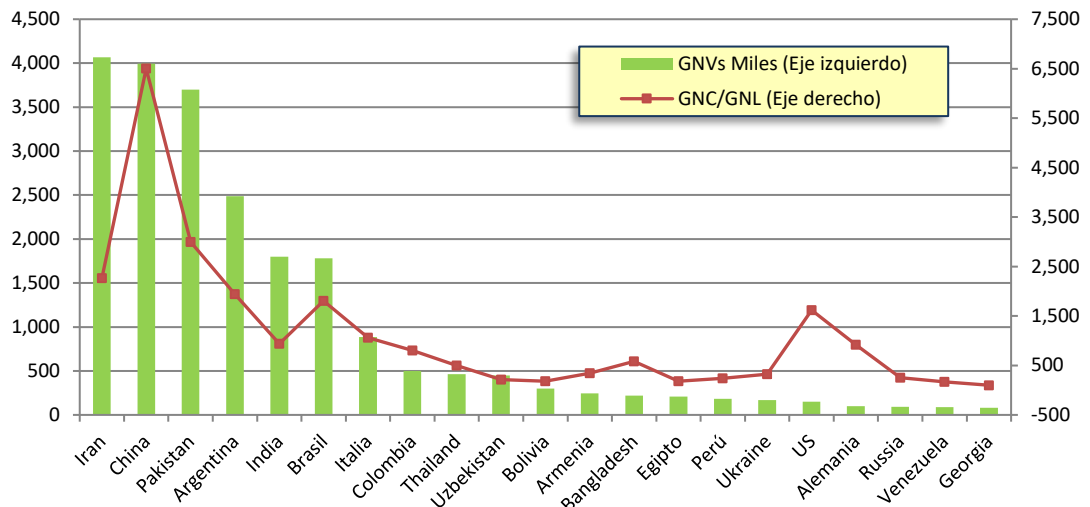
Figura 4 Flota vehículo pesado y consumo en 2015



Fuente: Exxon Mobil Global Outlook: Our view to 2050

El mercado del Gas Natural Vehicular (GNV) hace referencia a los vehículos que usan como combustible al gas natural comprimido (GNC) o licuado (GNL). A abril del 2015, se registró 22 432 657 de GNV y 26 740 estaciones de servicio de GNC/GNL en el mundo (NGV communications group, 2015). En la Figura 5 se puede observar que Asia es la región con mayor participación en este mercado, debido al costo del gas natural en comparación de los combustibles tradicionales y a su compromiso con el medio ambiente.

Figura 5 GNV en el mundo en miles >80,600 unidades



Fuente: NGV Communications 2015
Elaboración propia

En Centro y Sudamérica y África los vehículos pesados (MD/HD trucks) tienen poca incidencia, a diferencia de los vehículos livianos (cars/LDV), lo cual genera una gran oportunidad en estas regiones para ampliar el uso del gas natural en los vehículos pesados (ver Figura 6). De total de vehículos que usan gas natural, los vehículos livianos tienen una participación del 85 %, mientras que, los vehículos pesados representan un 4 %, esto se debe a que la tecnología para usar el GNL en los vehículos es más compleja que el GNC (ver Figura 7); sin embargo, durante los últimos años ha alcanzado mejores niveles de eficiencia.

Figura 6 Participación por tipos de vehículos GNV por regiones

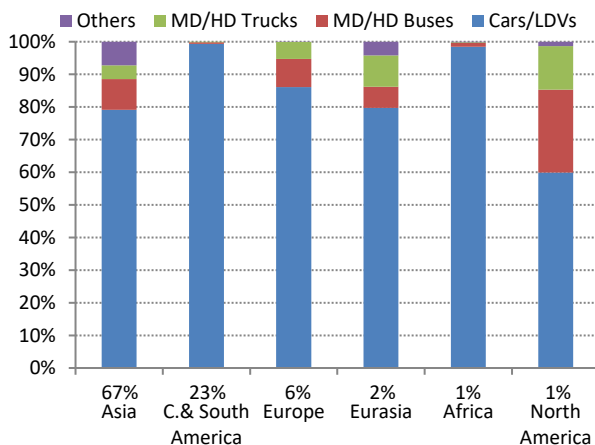
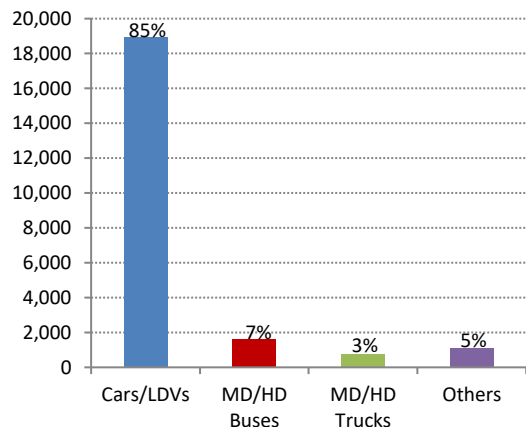
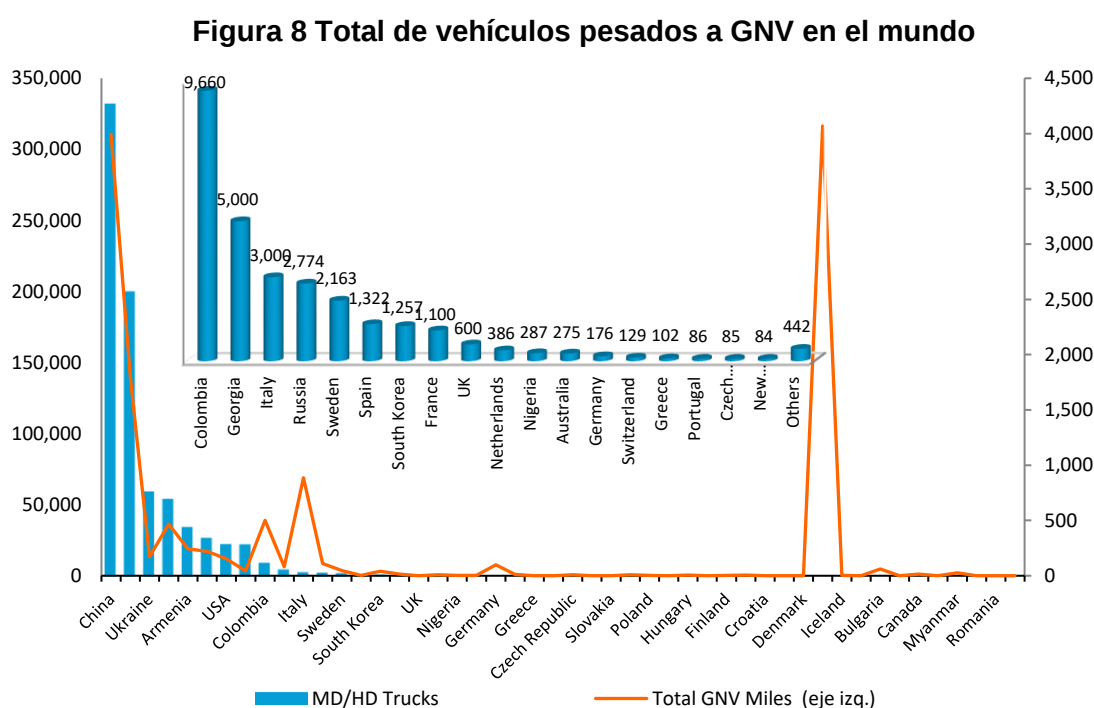


Figura 7 Participación por tipo de vehículos GNV global (miles)



Fuente: NGV Communications 2015
Elaboración propia

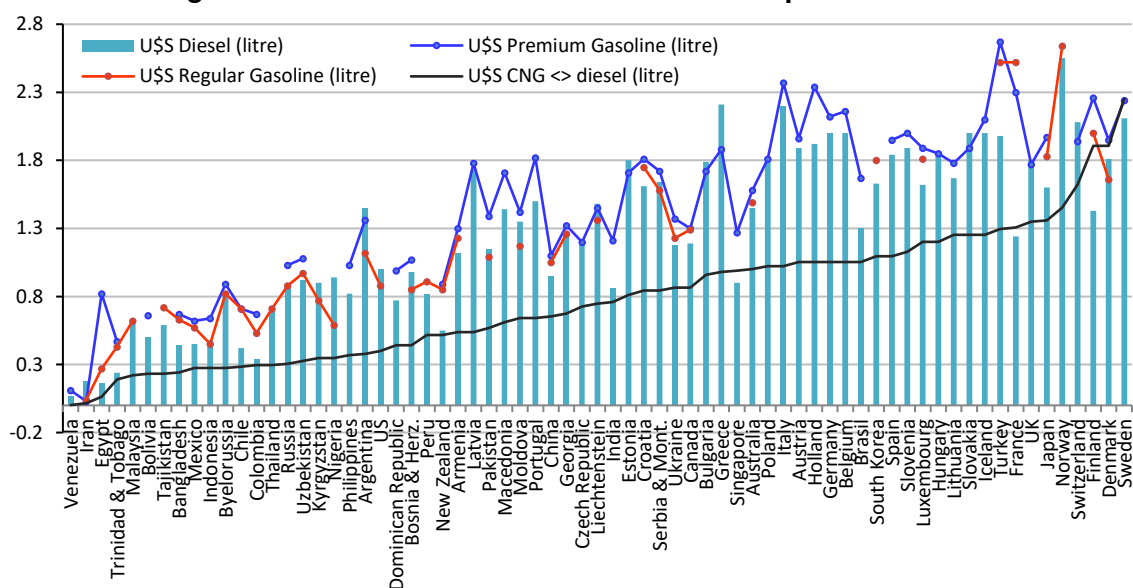
En la Figura 8 se observa que el mercado de vehículos pesados a GNV está liderado por Asia, seguido por Europa. Con relación a Irán que es el país con el mayor número de GNV, solo posee 16 vehículos pesados a GNV, esto se debe a que el precio del diésel en ese país es el más barato en el mundo y cambiar la tecnología actual para adaptar sus vehículos pesados a GNL resulta poco atractiva.



Fuente: NGV Communications 2015
Elaboración propia

En la Figura 9 se muestra un gráfico comparativo de los combustibles vehiculares (las barras sombreadas son aquellos países que tienen vehículos pesados a gas natural). Los vehículos pesados suelen usar diésel y se puede observar la ventaja económica del gas natural sobre el diésel. En aquellos países donde el precio del diésel es cercano al precio del gas natural, el diésel es subsidiado, por ello el GNC y GNL son una alternativa para reformar paulatinamente dichos subsidios, como en China, India, Brasil, etc. Siendo Perú productor de gas natural, debería tener un precio de mercado competitivo respecto al diésel, haciendo más atractivo su uso.

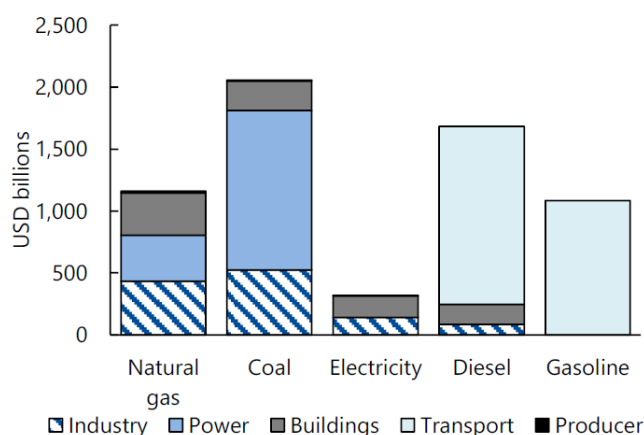
Figura 9 Combustibles de uso vehicular comparativo en el mundo



Fuente: NGV Communications 2015, Osinergmin (Facilito)
Elaboración propia

Se debe tener en cuenta que los países que están implementando reformas a la política de subsidio de los combustibles del petróleo han visto una alternativa económica energética en el gas natural por su bajo costo comparativo. Según el Fondo Monetario Internacional el costo de los subsidios a los combustibles fósiles en todo el mundo ascendió a USD 7 billones en el 2022 y se estima que en 2030 alcance los USD 8 billones, tal como se muestra en la Figura 10.

Figura 10 Subsidio total de los combustibles fósiles por sector - 2022

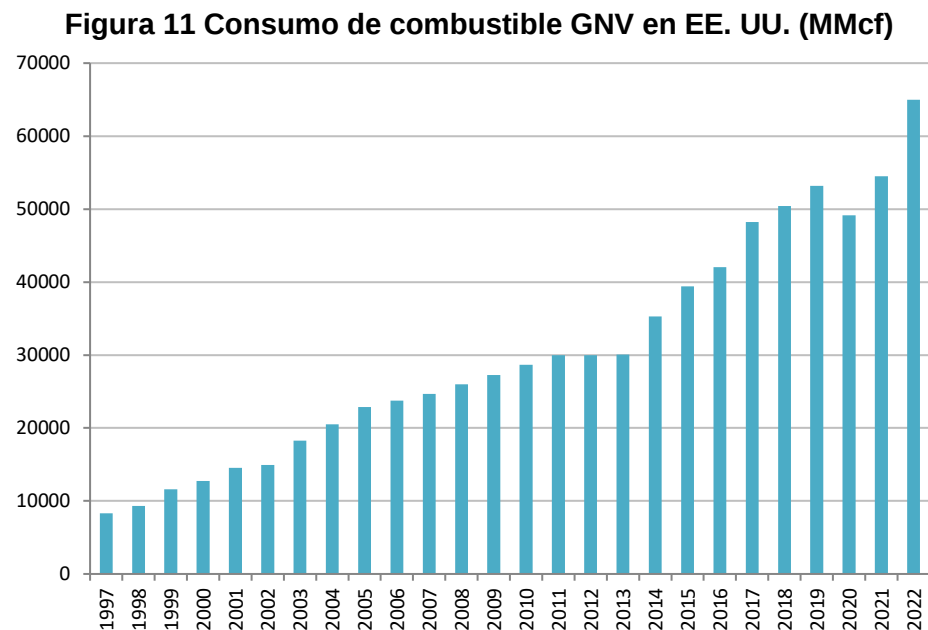


Fuente: IMF Fossil Fuel Subsidies, Data: 2023 Update

2.2.1.1. GNV en Estados Unidos

El uso del gas natural se ha incrementado notablemente en el sector transporte, alcanzando los 64,994 MMcf en el 2022, a una tasa de crecimiento anual del 8 % (ver Figura 11).

Dicho crecimiento es respaldado por diversas políticas ambientales, por ejemplo, el 2021 se promulgó la Ley Bipartidista de Infraestructura²¹ que por primera vez proporcionó la financiación en proyectos de infraestructura de combustibles alternativos. La Administración Federal de Carreteras está desarrollando directrices para las nuevas designaciones en corredores para CNG, GNL y otros combustibles alternativos (NGV America , 2023).



Fuente: US Energy Information Administration, 2023
Elaboración propia

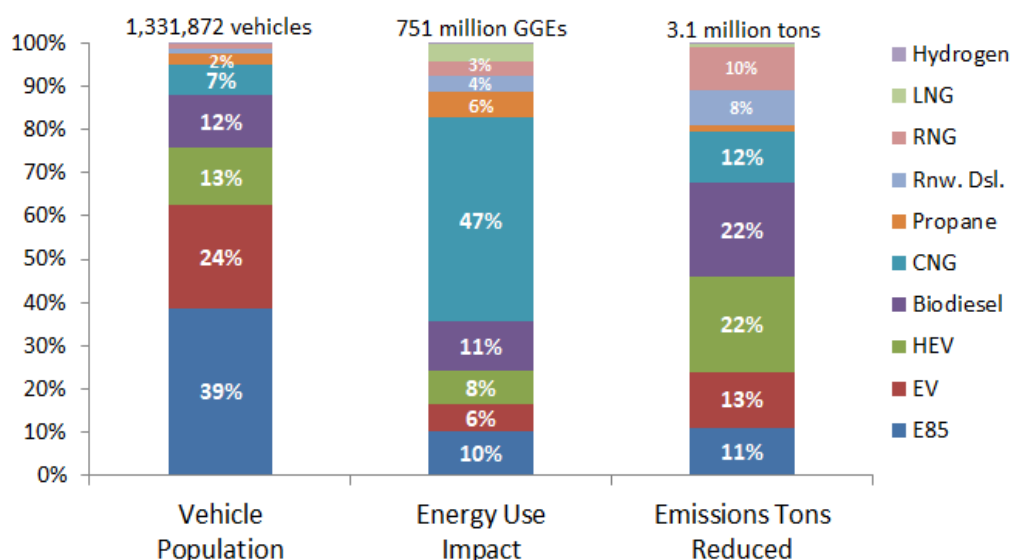
De otro lado, de acuerdo con el Laboratorio Nacional del Departamento de Energía de Estados Unidos, en el 2021 se registraron 1,331,872 vehículos de combustibles alternativos (ver Figura 12), donde los vehículos de mezcla de etanol de alto nivel (E85), vehículos eléctricos (EV), vehículos eléctricos híbridos (HEV) y vehículos a biodiesel dominan el mercado; mientras que,

²¹ Public Law 117-58—NOV, 117th Congress. 15, 2021. La Ley Bipartidista de Infraestructuras, promulgada en la Ley de Inversión en Infraestructuras y Empleo, autoriza hasta 108.000 millones de dólares para el transporte público, la mayor inversión federal en transporte público de la historia del país.

según el impacto por uso de energía es el CNG con un 47 % quien lidera el consumo.

Para el 2021 se han registrado 93,788 vehículos pesados, donde el biodiesel (45 %) y el CNG (27 %) lideran el mercado, el GNL solo representa un 2 %. Los combustibles de mayor consumo fueron el GNL (20 %), hidrógeno (19 %), CNG (15 %) y renovable de gas natural (13 %) (National Renewable Energy Laboratory, 2023).

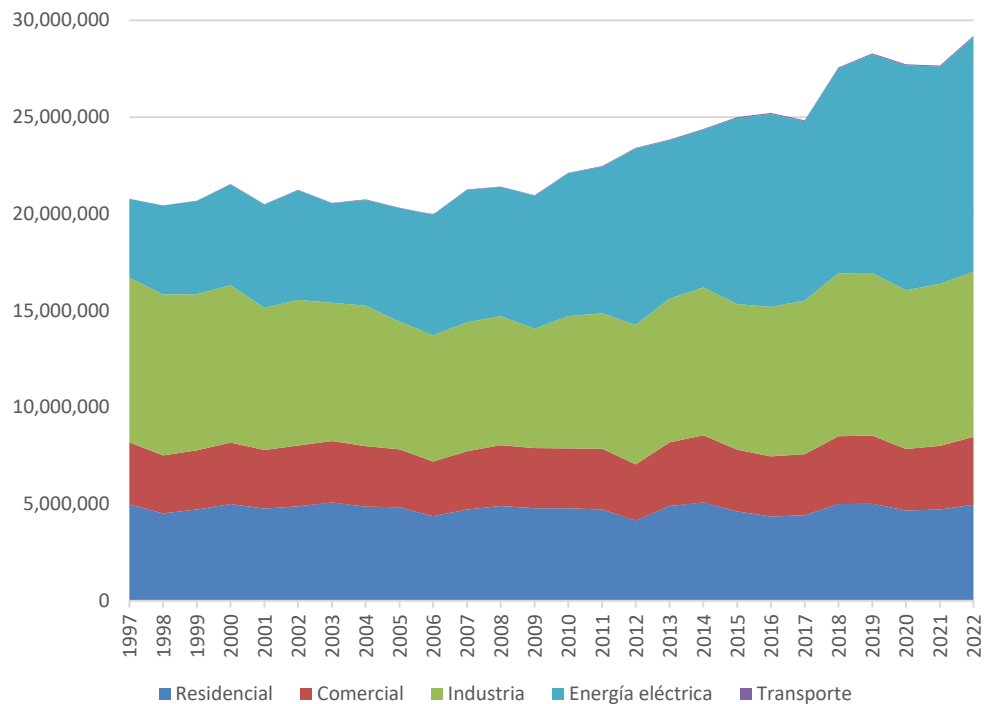
Figura 12 Combustibles alternativos, impacto del uso de energía y reducción de emisiones de GEI, 2021



Fuente: National Renewable Energy Laboratory, Clean Cities Coalitions 2021

De lo descrito, se observa que, si bien el gas natural vehicular tiene un crecimiento sostenido, este no tiene un impacto significativo en el sector transporte y menos aún el GNL, esto debido a que Estados Unidos viene promoviendo la descarbonización de los combustibles a través de vehículos eléctricos, renovables de gas natural (metano), mezcla de etanol de alto nivel, entre otros. En la Figura 13 se puede observar que, del total de consumo del gas natural en el 2022, solo un 0.22 % fue para sector transporte.

Figura 13 Consumo de gas natural por sectores

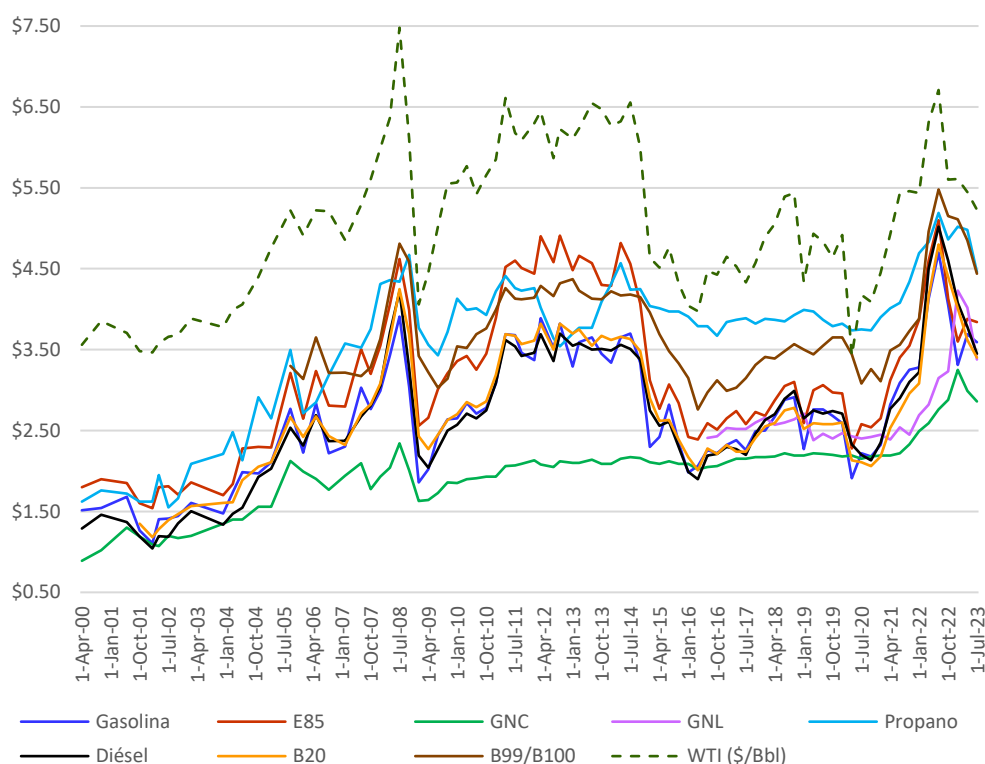


Fuente: US Energy Information Administration, 2023

Elaboración propia

Otro aspecto importante es considerar el precio comparativo entre los combustibles alternativos y convencionales, en la Figura 14 se observa que los combustibles que tienen relación con el petróleo son los más inestables como la gasolina, diésel, biodiésel, etanol y propano; y se encuentran por encima del precio del GNC, que ha presentado un precio relativamente estable y competitivo; sin embargo, para el caso del GNL, si bien presenta un precio estable, su costo se ve afectado directamente por el precio de los combustibles convencionales, es decir, es atractivo siempre y cuando el precio del petróleo (WTI) va al alza, asimismo, se observa que los combustibles competidores al GNL respecto al consumo de combustibles para vehículos pesados son el GNC, mezcla de etanol de alto nivel (E85), diésel, propano y biodiésel (B99/B100).

Figura 14 Precios de combustibles alternativos y convencionales (\$/GGE)



(*) GGE: Galones de Gasolina Equivalente, Bbl: Barril
Fuente: Alternative Fuels Data Center, US Department of Energy, 2023
Elaboración propia

Estados Unidos dispone de 77,102 estaciones de suministro de combustible alternativo, incluyendo estaciones de repostaje de gas licuado de petróleo (GLP), de los cuales el 85 % está dirigido a los vehículos eléctricos, el GNC participa con un 2 % y el GNL no llega ni al 1 % (ver Figura 15). Respecto a los vehículos pesados, se tiene 3,840 estaciones de servicio, donde el GLP (59 %) y GNC (31 %) tienen el dominio del mercado, mientras que, las estaciones de GNL solo representan un 2 % (ver Figura 16).²²

²² Análisis de la base de datos de las estaciones de combustibles alternativos de Alternative Fuels Data Center, U.S. Department of Energy, los datos corresponden al 01 de octubre del 2023

Figura 15 Total de estaciones de combustibles alternativos

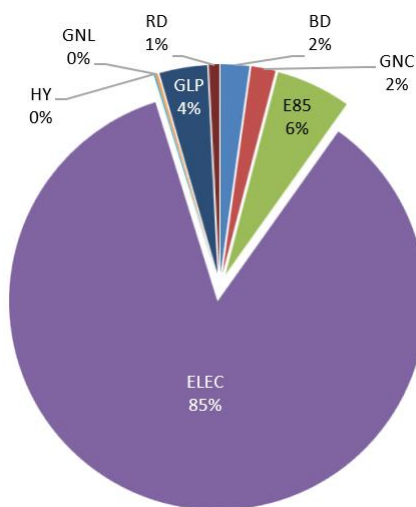
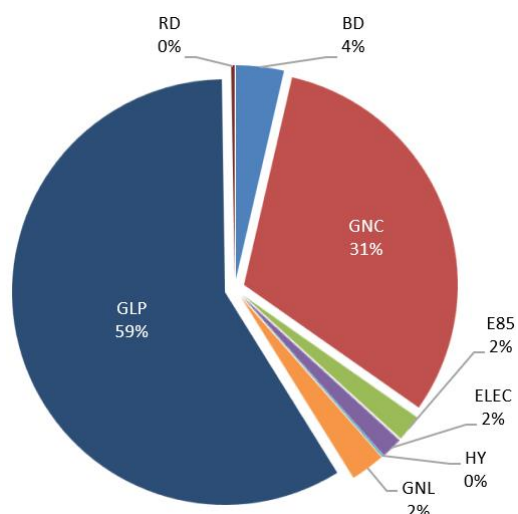


Figura 16 Estaciones de combustibles alternativos para vehículos pesados



(*) RD: Diésel renovable, HY: Hidrógeno, E85: Etanol de alta mezcla, BD: Biodiésel de 20 a más, ELEC: Eléctrico, GLP: Gas licuado de petróleo

Fuente: Alternative Fuels Data Center, U.S. Department of Energy. 01 octubre del 2023.
Elaboración propia

La planificación de corredores de combustibles hace posible el posicionamiento estratégico de las estaciones de servicio con base en políticas ambientales y económicas. En Estados Unidos la Administración Federal de Carreteras (*Federal Highway Administration*) es la entidad responsable de brindar apoyo a los gobiernos estatales y locales en el diseño, construcción y mantenimiento del sistema de carreteras, mediante la asistencia financiera y técnica, así también, es responsable de garantizar que las carreteras y autopistas sean seguras y vayan de la mano con la tecnología.

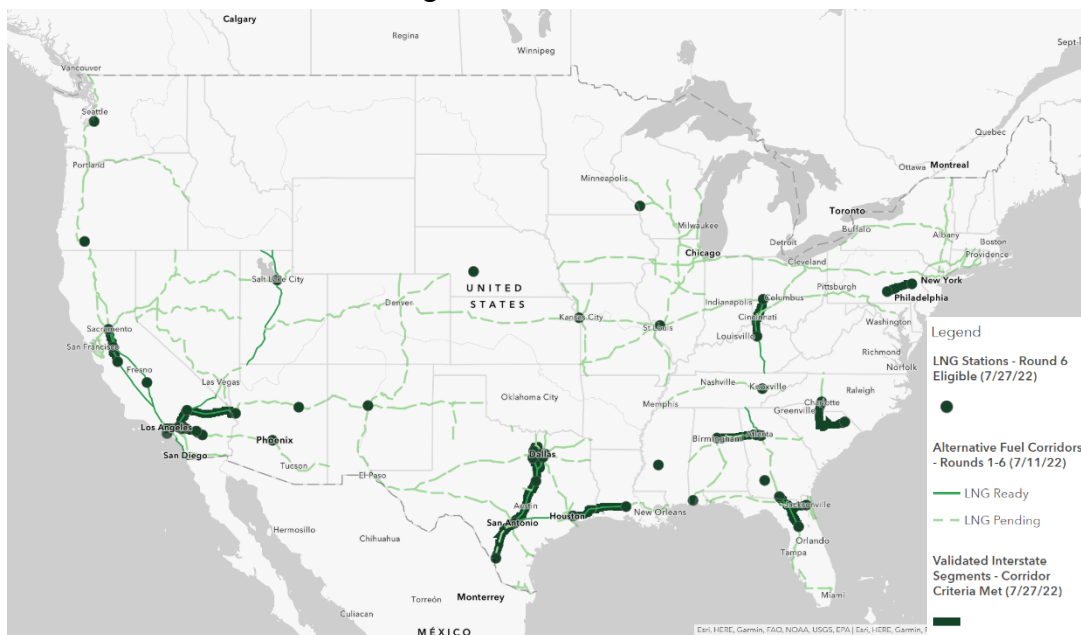
El primer corredor de combustible fue el Interstate Clean Transportation Corridor (ICTC), fue una asociación pública - privada con puesta en marcha en 1995 para unir las principales ciudades de California, Salt Lake, Las Vegas y Reno, posteriormente se crearon otros corredores como Texas Clean Transportation Triangle - Texas, Rocky Mountain Corridor - Rocky Mountain, Pennsylvania Clean Transportation Corridor - Pennsylvania, etc. (FC Gas Intelligence, 2014).

A la actualidad los corredores están enfocados en promover los combustibles alternativos a través de la instalación de infraestructuras de repostaje de vehículos eléctricos, hidrógeno, propano y gas natural; y más aún con la Ley Bipartidista de Infraestructuras que estableció el Programa

Fórmula de Infraestructura Nacional de Vehículos Eléctricos y el Programa de Subvenciones Discrecionales para Infraestructuras de Carga y Abastecimiento de Combustible, ambos de los cuales proporcionan elegibilidad basada en designaciones de corredores de combustible alternativo, para el financiamiento de vehículos de pasajeros y de mercancías, así como, la conversión de corredores «pendientes» en corredores «listos» mediante el uso de asociaciones público-privadas, a fin de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la movilidad de los vehículos de pasajeros y mercancía (Federal Highway Administration, 2023).

El corredor de GNL es el de más lento crecimiento en comparación con el corredor eléctrico, propano y CNG; sin embargo, con se observa en el Figura 17, el GNL tiene perspectiva para desarrollarse a nivel del país, además, se tiene 33 estaciones de servicio en proyecto.

Figura 17 Corredor de GNL



Fuente: Adaptación del LNG Alternative Fuel Corridors (ArcGIS), U.S. Department of Transportation, U.S. Department of Energy, consulta realizada el 01 octubre del 2023.

De otro lado, el lento desarrollo del GNL en el transporte podría deberse a que un impuesto federal perjudica al GNL, el impuesto al consumo para el GNL y el diésel es de 24.3 centavos por galón, teniendo en cuenta que se necesita 1.7 galones de GNL para producir la misma cantidad de energía que

1 galón de diésel, significa que el GNL se grava a una tasa del 70% más que el diésel (FC Gas Intelligence, 2014). Es por ello que el crecimiento del segmento de vehículos pesados a gas natural es lento en comparación a países europeos o asiáticos.

2.2.1.2. GNV en China

En los últimos años China viene presentando un crecimiento acelerado con relación a los vehículos a gas natural consolidándose en un mercado muy importante en Asia Pacífico y en el mundo, impulsado esencialmente por su Gobierno mediante políticas energéticas limpias para mitigar la contaminación ambiental y disminuir los subsidios de los combustibles derivados del petróleo.

Figura 18 Consumo de gas natural en el transporte (Bcm)

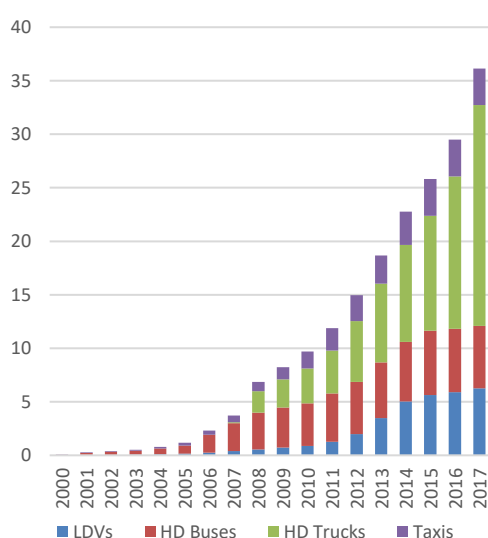
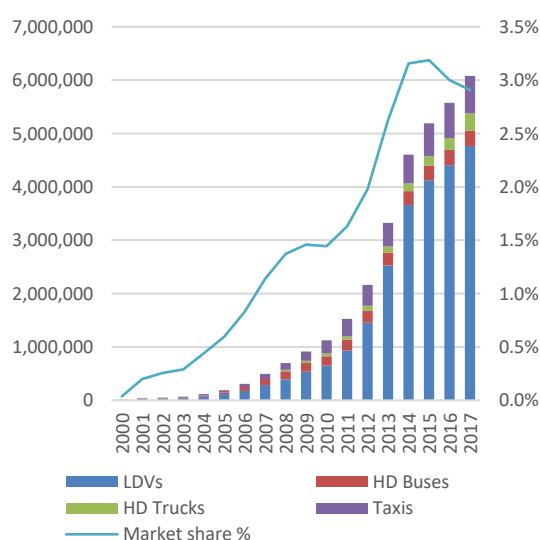


Figura 19 Número de vehículos a gas natural



(*) LDV: Light duty vehicles, HD: Heavy duty

Fuente: Nature Communications, Methane emissions from natural gas vehicles in China, 2020
Elaboración propia

En las Figuras 18 y 19 se puede ver que China cuenta aproximadamente con 6.1 millones de vehículos y tiene consumo de gas natural de 36.1 (Billion m³ o 100 mil m³) en el 2017. Los camiones y buses consumen alrededor del 70 % del gas natural vehicular; sin embargo, en número representan el 10 % del total de vehículos a gas natural. Otro aspecto importante es la

desaceleración en el crecimiento de buses, taxis y vehículos livianos a diferencia de los camiones que presentan un crecimiento sostenido de un 30 % anual, asimismo, en la Figura 26 se observa que los vehículos a gas natural representan un 3 % del total de vehículos del transporte de China.

Dicha desaceleración se debe a una transición energética por parte de los vehículos livianos hacia combustibles más limpios como el hidrógeno y electricidad. China tiene el mercado más grande del mundo de vehículos pesados, tan solo en el 2021 se vendieron 1.4 millones de nuevos vehículos pesados, conllevando a una preocupación sobre el impacto del aire por la contaminación urbana vehicular (International Council On Clean Transportation, 2022). Según Jefferies Group, China es uno de los países con mayor contaminación presentando una concentración de estas partículas menores de 0.2 micras en $80\mu\text{g}/\text{m}^3$, esto causado por las emisiones del diésel en general (Jefferies Group LLC, 2015).

En la Figura 20 y 21 se observa que el parque vehicular pesado está compuesto por vehículos a diésel, representaron el 96 % de las ventas totales en el 2021, mientras que, los vehículos eléctricos crecieron un 4 %.

Figura 20 Venta de vehículos pesados por tipo de combustible

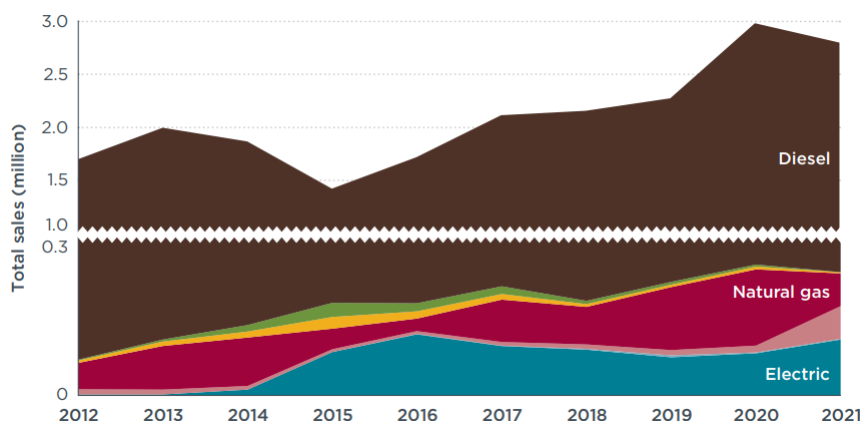
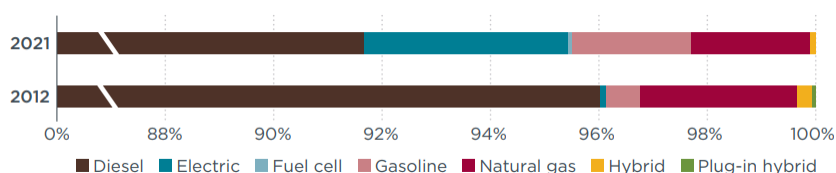


Figura 21 Cuota de ventas de vehículos pesados por tipo de combustible



Fuente: International Council On Clean Transportation, The evolution of heavy-duty vehicles in China, working paper 2022-27

Las emisiones de los vehículos pesados fueron casi el 50 % de las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI) de todos los tipos de vehículos y casi el 3 % de las emisiones totales de GEI de toda China. En ese sentido el gobierno viene regulando las emisiones bajo distintas normas desde el año 2000 (International Council On Clean Transportation, 2022).

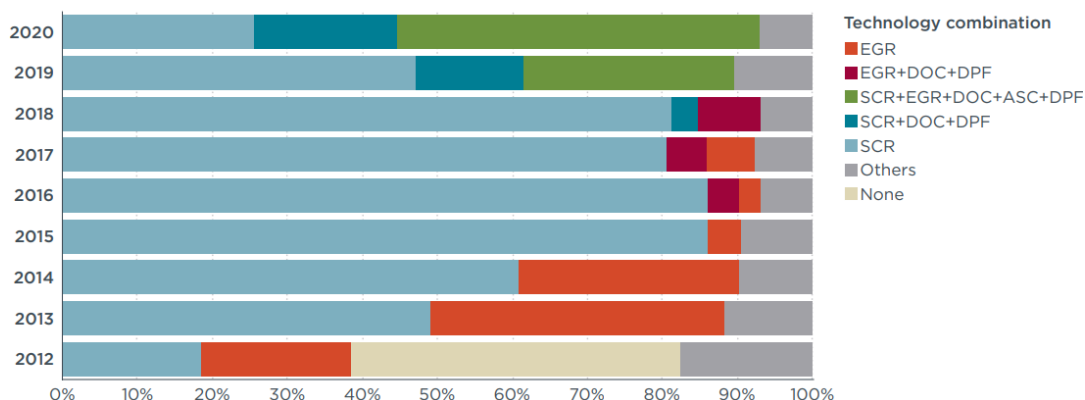
Una de las políticas más estrictas de regulación de emisiones de contaminantes en el sector transporte se dio a través de la Norma Nacional VI sobre emisiones de los vehículos a motor que establece «Límites de Emisiones Contaminantes y Métodos de Medición para Vehículos Ligeros (China Etapa 6)», a aplicarse desde julio del 2020 y «Límites de Emisiones Contaminantes y Métodos de Medición para Vehículos Diesel Pesados (China Etapa 6)», a aplicarse desde julio de 2019²³.

Dicha norma busca prevenir y controlar la contaminación de los vehículos de motor y mejorar la calidad del aire ambiente, incluye a los vehículos de gas natural, gasolina, diésel, gas licuado de petróleo, híbridos eléctricos, entre otros. Los fabricantes están obligados a garantizar que los vehículos que producen y venden cumplan los requisitos de conformidad en uso de esta norma, por ejemplo, los vehículos deberán estar equipados con filtros de partículas diésel.

En la Figura 22 se puede observar la evolución de las tecnologías de control de emisiones en los vehículos pesados, adoptados por China. Desde el 2013 al 2018 la tecnología más utilizada fue la reducción catalítica selectiva, que reduce las emisiones de óxido de nitrógeno a través de la inyección de urea o amoníaco para su conversión a nitrógeno y una pequeña porción de CO₂, y desde 2019, debido a las nuevas regulaciones se viene utilizando una combinación de tecnologías para emitir la menor cantidad de contaminantes, como el filtro de partículas de diésel usada para capturar y eliminar las partículas de diésel de las emisiones en el tubo de escape (International Council On Clean Transportation, 2022).

²³ Normas GB 18352.6-2016 y GB 17691-2018, publicadas el 23 de diciembre de 2016 y 22 de junio de 2018, respectivamente, por el 生态环境部 (Ministerio de Ecología y Medio Ambiente).

Figura 22 Tecnologías de control de emisión en vehículos pesados



EGR: Recirculación de gases de escape, DOC: Catalizador de oxidación diésel, DPF: Filtro de partículas diésel, SCR: Reducción catalítica selectiva y ASC: Catalizador de deslizamiento de amoníaco.

Fuente: International Council On Clean Transportation, The evolution of heavy-duty vehicles in China, working paper 2022-27

La Comisión Nacional de Desarrollo y Reforma y la Administración Nacional de Energía emitieron de manera conjunta el «Plan de Mediano y Largo Plazo para el Desarrollo de la Industria Energética del Hidrógeno (2021-2035)»²⁴, que consiste en desarrollar el hidrógeno como una fuente de energía limpia y renovable, a fin de disminuir las emisiones de carbono. En el sector transporte, el Plan está orientado al uso del hidrógeno verde en vehículos comerciales y de transporte público que abarcarán tanto a los camiones como a los buses, así como, a la construcción masiva de estaciones de recarga vehicular.

De lo explicado, se puede ver que el gobierno de China viene implementando políticas para contrarrestar la contaminación vehicular, por lo que el GNL, a pesar de su baja participación en el mercado de combustibles para vehículos pesados, sigue siendo una alternativa para acceder a un combustible menos contaminante que el diésel. El GNL vehicular sigue creciendo y tiene como respaldo el desarrollo de proyectos como «More LNG Stations for Green China» que construirá 10,000 estaciones de GNL a cargo

²⁴ El documento «氢能产业发展中长期规划 (2021-2035 年) » se encuentra publicado en la página oficial de la república Popular China, 国家发展和改革委员会.

de Yantai Jereh Oilfield Services Group²⁵. Todo ello a fin de soportar el crecimiento sostenible de los vehículos a GNV (Asia Pacific Natural Gas Vehicles Association, 2023).

Por otro lado, el precio del GNL vehicular puede resultar más atractivo que el diésel. Del análisis de la competitividad del costo del GNL, realizado por Shell, se tiene dos escenarios i) comparación de precios (ver Figura 23) y ii) kilometraje cubierto (ver Figura 24). Tomó como ejemplo a la provincia de Zhejiang, ubicada en la costa, que posee estaciones de servicio de GNL se abastecen con GNL importado. En el primer escenario se tiene un ahorro de hasta 40 %, debido a que el precio del barril de petróleo oscilaba entre los 40 y 50 dólares, mientras que en el segundo escenario la ventaja competitiva del GNL puede disminuir un poco más (Shell, 2019).

Figura 23 Comparación de precios

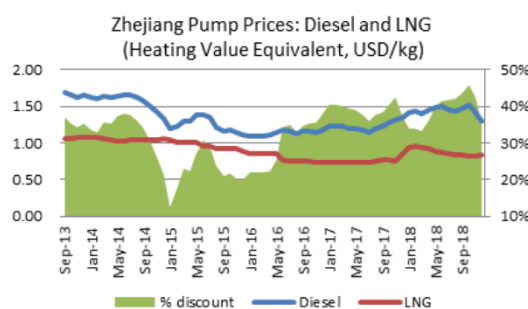
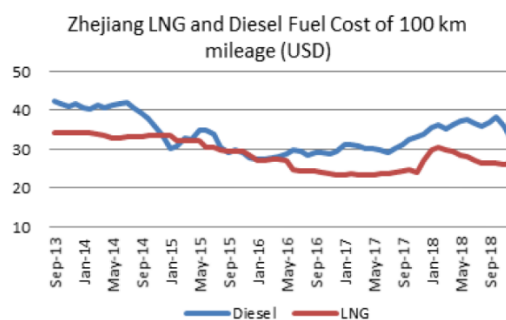


Figura 24 Por kilómetro recorrido

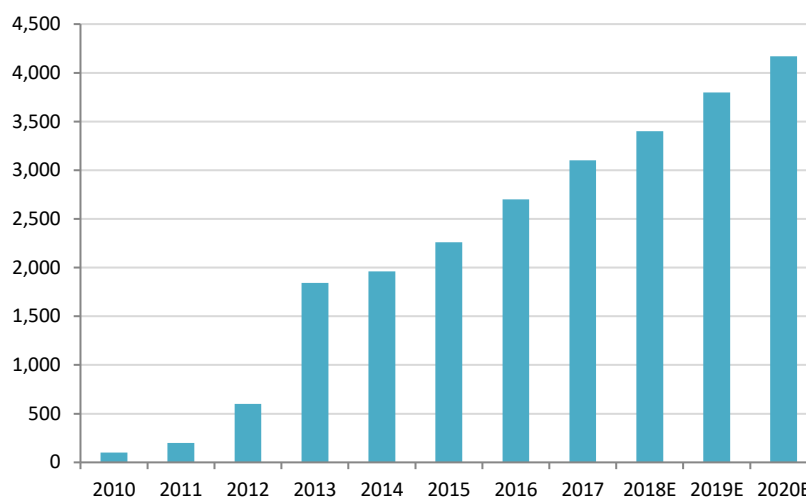


Fuente: Shell, China - The move to LNG: Examining the Primary Drivers for Uptake of LNG as a Transport fuel in China, 2019

Con relación a las estaciones de servicio de GNL, en la Figura 25 se observa un crecimiento sostenido desde el 2015, a una tasa anual de crecimiento promedio del 11%, asimismo, desde el 2014 se observa una desaceleración en el incremento del repostaje de GNL, debido a la caída en el precio internacional del petróleo, sin embargo, ante la coyuntura actual, las estaciones de GNL presentan un futuro prometedor, pues presentan muchas ventajas, como el período corto de construcción, alta flexibilidad y movilidad (Report Buyer, 2015).

²⁵ El 29 de mayo del 2020, Jereh a través de su página <https://new.jereh.com/en/>, comunicó que en 2018 se lanzó dicho proyecto para ayudar a concientizar a la población sobre las energías limpias y mejorar el ambiente.

Figura 25 Estaciones de servicio de GNL



Fuente: 前瞻产业研究院, 2021 (Foresight Industry Research Institute)
Elaboración propia

2.2.1.3. GNV en la Unión Europea

La política de la Unión Europea (UE) está fuertemente orientada a favor del uso del gas natural y el biometano proveniente de los desechos como combustible vehicular, esto por su compromiso de reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero (GEI), pues se estima que los carros aportan el 20% del total de CO₂ de las emisiones en Europa (NGVA Europe, 2015). Se establecieron normas estándares²⁶ para el despliegue de la infraestructura de puntos de recarga para vehículos eléctricos y estaciones de servicio para gas natural en los países de la UE, en atención a ello la UE culminó en 2017 uno de los proyectos más grandes en el mundo denominado «LNG Blue Corridors» dirigido a los vehículos pesados de medio y largo recorrido, para impulsar el consumo de GNL como un combustible alternativo al diésel²⁷.

En la Figura 26 se puede observar que el parque vehicular de buses de medio y largo recorrido de combustibles alternativos están dominados por el gas natural comprimido (CNG), con un 63.5 % en el 2022 y los buses eléctricos con un 31 %; sin embargo, desde el 2019 los buses a CNG

²⁶ Directive 2014/94/EU of the European Parliament and of the Council of 22 October 2014 on the deployment of alternative fuels infrastructure, Electric and gas-powered vehicles - recharging/refuelling stations.

²⁷ Plataforma de proyectos culminados de la UE: <https://www.2zeroemission.eu/projects/>

presentaron una desaceleración en el crecimiento (tasa de crecimiento anual de 5 %), mientras que, los buses eléctricos crecen a una tasa promedio anual de 48 %; respecto a los buses de gas natural licuado (GNL) su participación en el mercado es insignificante, en el 2022 fue tan solo del 0.3 % del total de buses.

Figura 26 Número de buses a combustibles alternativos (M2/M3)

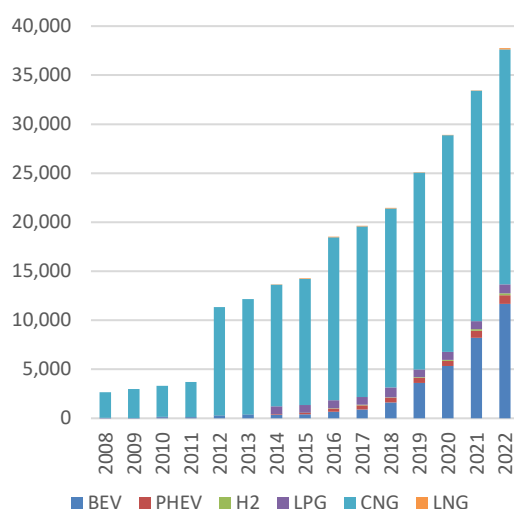
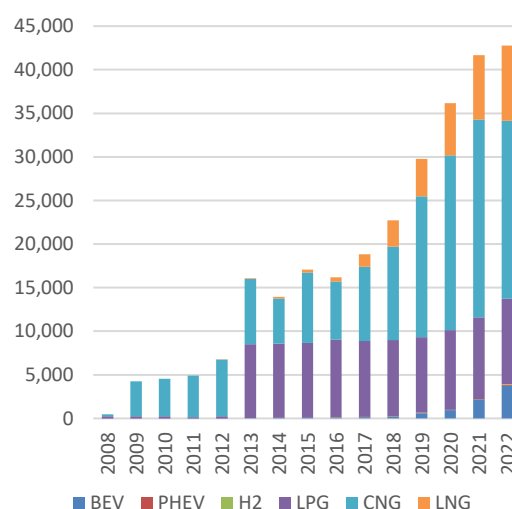


Figura 27 Número de camiones a combustibles alternativos (N2/N3)



(*) Clase M2 y M3: vehículo de pasajeros de más de 8 asientos, hasta y de más de 5 toneladas, Clase N2 y N3: vehículos para mercancías, hasta y de más de 12 toneladas

(**) BEV: Vehículo eléctrico a batería, PHEV: Vehículo eléctrico híbrido conectable, H2: Hidrógeno

Fuente: European Alternative Fuels Observatory
Elaboración propia

Con relación a los camiones de combustibles alternativos (ver Figura 27), los vehículos a CNG, GNL y gas licuado de petróleo (GLP) predominan en el mercado, para el 2022 tuvieron una participación del 48 %, 20 % y 23 %, respectivamente. De otro lado, desde el 2013 se observa un decrecimiento sostenido de los camiones a GLP (tasa anual del 2 %), debido principalmente al ingreso de los camiones a GNL, que presentan una tasa de crecimiento anual del 60 % y a los camiones eléctricos, mientras que los camiones a CNG mantienen su participación en el mercado del 48 %, durante los últimos 10 años, es decir, en el mediano plazo los camiones a GNL y eléctricos pueden sustituir progresivamente a los vehículos a GLP.

Se debe tener en cuenta que la UE ha adoptado medidas más estrictas en su legislación para promover la descarbonización del sector transporte, por

lo que busca el uso masivo de vehículos con baja y cero emisiones, es decir consumir combustibles renovables principalmente, como ejemplo, se tiene el *Fit for 55*, que es un paquete de políticas de la UE que busca reducir el 55 % de las emisiones de los gases de efecto invernadero fijadas para el 2030, en el sector transporte se insta principalmente al uso de los vehículos eléctricos y a la generación de puntos de recarga. En esa misma línea, la UE tiene en proceso de desarrollo 30 proyectos de cero emisiones en el transporte carretero *Towards zero emission road transport (2Zero)*, los proyectos están orientados exclusivamente a promover los vehículos eléctricos de batería y vehículos eléctricos híbridos conectable, con sus respectivos puntos de recarga, cuya ejecución culmina entre el 2023 y 2027.

La Asociación de Vehículos de Gas Natural y Biogás (NGVA Europe), mostró su preocupación sobre la Regulación de la Infraestructura de Combustibles Alternativos (AFIR) que forma parte del paquete del *Fit for 55*, al no promover el despliegue de la infraestructura del GNC/GNL, que podría ayudar a descarbonizar el sector transporte²⁸. Sostienen que el GNC y GNL cada vez contienen mayores proporciones de biometano y e-metano (gas natural sintetizado del CO₂ e hidrógeno), lo cual ayudará a la reducción de los GEI. Asimismo, demandan el apoyo a largo plazo a la promoción de infraestructura de GNC/GNL, pues estos pueden ser usados para suministrar combustibles mediante mezclas o sustituciones con biometano licuado (bioGNL) o combustibles electrónicos gaseosos sintéticos renovables y bajos en carbono (e-gas).

Debido al interés de la UE en impulsar el crecimiento de los vehículos eléctricos en el mediano y largo plazo, el crecimiento del mercado vehicular de gas natural se ha visto afectado, en la Figura 28 se puede ver que las estaciones de GNC tienen una tasa de crecimiento anual del 4 %, mientras que, las estaciones de GNL tienen una tasa del 31 %, es decir, el GNC va perdiendo mercado frente a los vehículos eléctricos (sector de vehículos livianos), a diferencia del GNL, que al estar dirigido a los vehículos pesados, mantiene un crecimiento constante, junto a los vehículos eléctricos. En la Figura 29 se observa que la razón del número de vehículos a gas natural entre

²⁸ Joint letter AFIR – CNG/LNG road transport infrastructure, The Natural & bio Gas Vehicle Association (NGVA Europe), 28 de febrero de 2022.

el total de estaciones de gas natural está en decrecimiento desde el 2019 (5 %), que significa que la infraestructura para atender a los vehículos a gas natural requiere de mayor inversión, por lo que la NGVA *Europe* ha expuesto su preocupación ante las políticas de descarbonización de la UE, al impulsar solo proyectos de vehículos eléctricos.

Figura 28 Estaciones de servicio de GNC/GNL

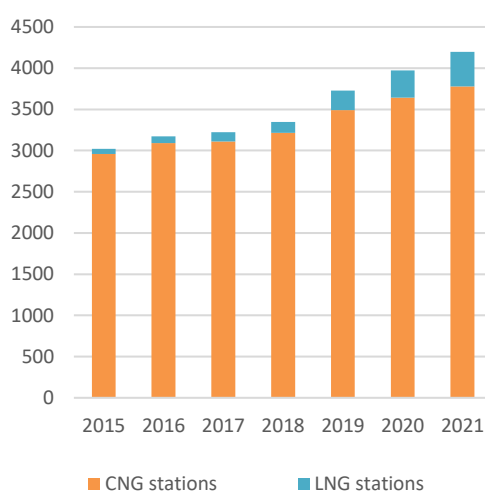
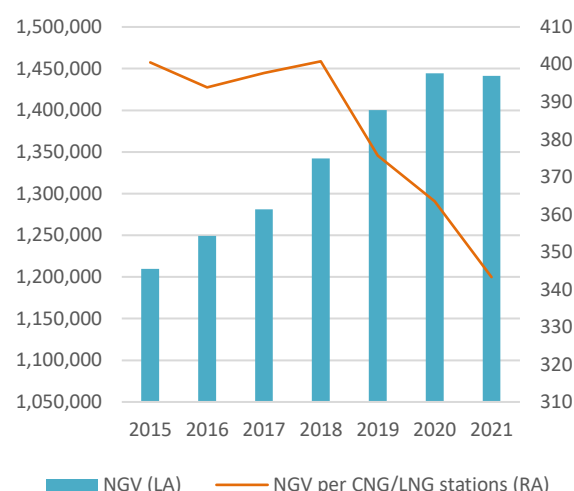


Figura 29 Vehículos a gas natural (NGV) y vehículos/estaciones GNC/GNL



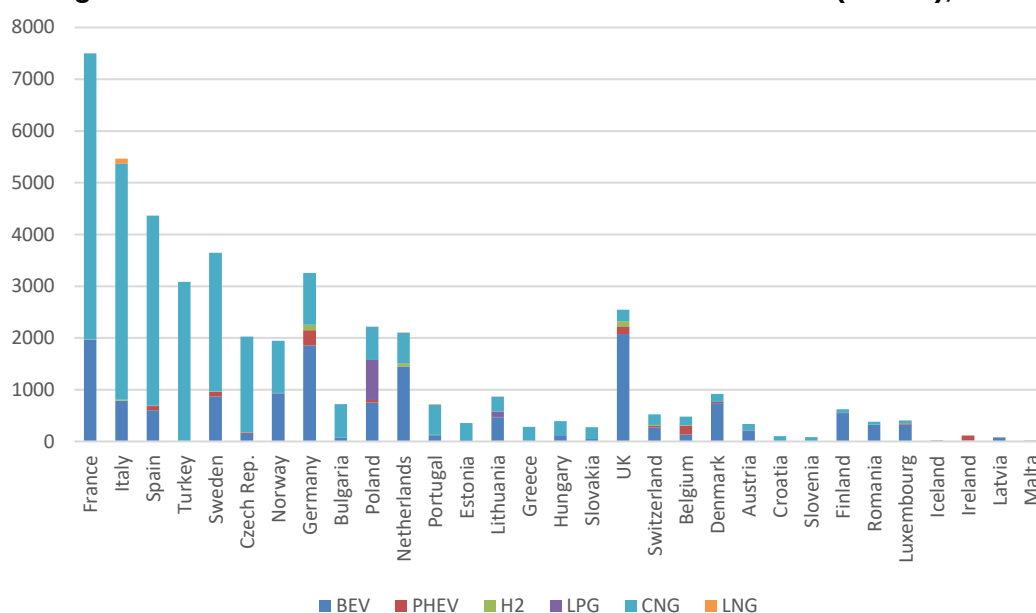
Fuente: European Alternative Fuels Observatory
Elaboración propia

De los buses que hacen uso de los combustibles alternativos disponibles en los países de la UE²⁹, se observa en la Figura 30, que los buses eléctricos vienen desplazando al GNC, y posiblemente al término del 2027, debido al desarrollo de los proyectos de vehículos eléctricos, sean los de mayor demanda. Por otro lado, la participación del GNL es muy bajo, para el 2022 se han registrado 111 buses a GNL en la UE, habiendo 96 buses solo en Italia. Con relación a Polonia, el consumo de GLP se debe a que la gasolina está gravada por impuestos especiales que incrementan de manera significativa su precio en comparación con el GLP, lo cual incentiva su demanda³⁰.

²⁹ Solo para las estadísticas por países del 2022, se entenderá a la UE como la UE (27) más la inclusión de Reino Unido, Noruega, Islandia, Suiza, Turquía y Liechtenstein.

³⁰ Poland, Fossil Fuel Support Country Note, Organisation for Economic Co-Operation and Development, 2018.

Figura 30 Número de buses a combustibles alternativos (M2/M3), 2022



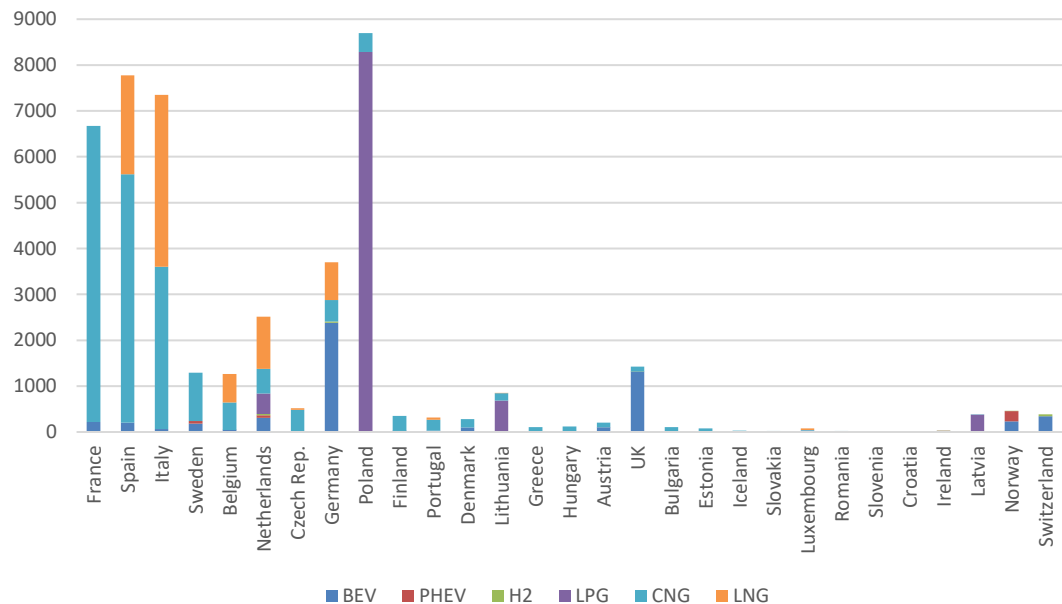
(*) Clase M2 y M3: vehículo de pasajeros de más de 8 asientos, hasta y de más de 5 toneladas
(**) BEV: Vehículo eléctrico a batería, PHEV: Vehículo eléctrico híbrido conectable, H2: Hidrógeno

Fuente: European Alternative Fuels Observatory
Elaboración propia

Con relación a los camiones de combustibles alternativos, se observa en la Figura 31 que el GNL tiene demanda en España, Italia, Bélgica y Países Bajos, principalmente, mientras que, en países como Reino Unido, Alemania, Noruega y Suiza se imponen los vehículos eléctricos, lo cual irá en aumento con las políticas de *Fit for 55*. El consumo significativo de GLP en Polonia, Lituania y Letonia se debe a su bajo costo en comparación a los otros combustibles fósiles.

De los países de la UE, Italia es el de mayor consumo de gas natural (GNC y GNL) en los vehículos pesados, esto debido a los incentivos gubernamentales, el costo competitivo del gas natural como combustible frente al diésel y la gasolina, normativa ambiental para reducir los GEI y las inversiones en infraestructura de suministro de gas natural. En la siguiente sección se desarrollará con mayor detalle el mercado italiano de vehículos a gas natural.

Figura 31 Número de camiones a combustibles alternativos (N2/N3), 2022



(*) Clase N2 y N3: vehículos para mercancías, hasta y de más de 12 toneladas

(**) BEV: Vehículo eléctrico a batería, PHEV: Vehículo eléctrico híbrido conectable, H2: Hidrógeno

Fuente: European Alternative Fuels Observatory
Elaboración propia

GNV en Italia

El gobierno de Italia mantiene políticas alineadas con la UE para promover un transporte carretero sostenible, es así que a través del *Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (NRRP)*,³¹ dispuso medidas orientadas a la expansión de las energías renovables, que incluyen ampliación de capacidades de instalaciones, modernización de infraestructuras de redes e investigación y desarrollo de tecnologías, incentivos a la inversión privada en proyectos de energía renovable y transición desde los combustibles fósiles hacia fuentes de energía más limpias y sostenibles.

Respecto al hidrógeno la NRRP tiene una postura favorable, debido a que es considerado un elemento clave para lograr la neutralidad de carbono y un futuro energético sostenible, por lo que ha dispuesto el desarrollo de

³¹ Plan Nacional de Recuperación y Resiliencia (NRRP) del 30 de abril de 2021, está compuesto por seis objetivos: Digitalización, innovación, competitividad, cultura y turismo; Revolución verde y transición ecológica; Infraestructura para la movilidad sostenible; Educación e investigación; Inclusión y cohesión, y Salud, cuyo valor alcanza los € 191.5 mil millones.

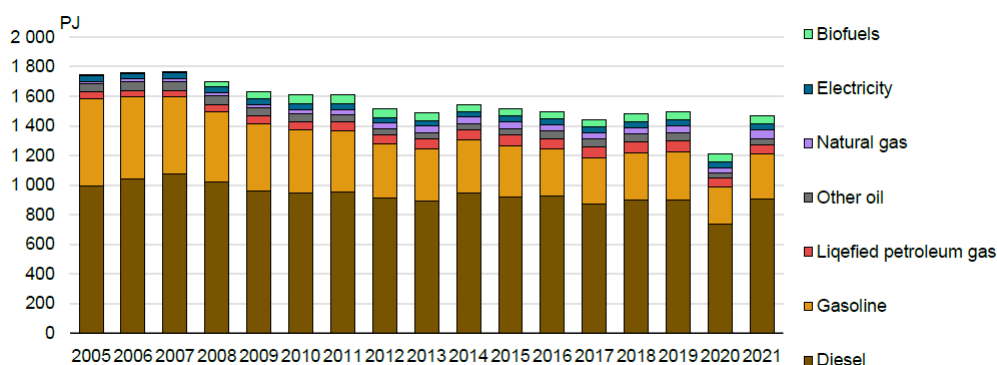
instalaciones de producción de hidrógeno, en particular hidrógeno verde, que se produce a partir de fuentes de energía renovables, ampliar el uso del hidrógeno en diversos sectores, incluido transporte, realizar inversiones en investigación y desarrollo en tecnologías del hidrógeno, así como el desarrollo de un marco regulatorio para la producción y el uso de hidrógeno.

Así también se promueve la mejora de las infraestructuras de redes de transporte, para facilitar el movimiento eficiente de mercancías y personas, la inversión en iniciativas de ciudades inteligentes para mejorar la infraestructura urbana, reducir la congestión y promover la planificación urbana sostenible, reducir el impacto ambiental del transporte. El NRRP también fomenta la adopción de vehículos eléctricos y el desarrollo de infraestructura de carga de vehículos eléctricos, busca implementar políticas para reducir las emisiones del sector transporte e invertir en sistemas de transporte público más limpios y eficientes.

Estas medidas vienen cambiando la demanda de combustibles en el sector transporte, en la Figura 32 se observa que el principal combustible utilizado en el transporte es el diésel, que tuvo una participación del 61 % de la demanda energética en 2021, seguido de la gasolina con un 21 %, mientras que el gas natural tuvo un 4 %. Los porcentajes de automóviles alimentados en el 2021 con GLP (6.4 %) y gas natural (2.5 %) en Italia son significativamente superiores a las medias de la UE (3 % para el GLP y 0.5 % para el gas natural).

El transporte por carretera representó el 94 % del uso de energía del transporte en 2019. Los vehículos de pasajeros representaron el 51 %, seguidos de los vehículos pesados con un 36 %. El transporte por carretera depende significativamente de los combustibles fósiles, la electricidad es usada principalmente en el ferrocarril y representa alrededor del 3 % de la demanda total de transporte. Con el aumento de los vehículos eléctricos, la cuota de electricidad en el transporte por carretera se multiplicó por cuatro entre 2010 y 2020, aunque sigue representando sólo el 0.06 % (International Energy Agency, 2023).

Figura 32 Consumo final por tipo de combustible en transporte



Fuente: Italy 2023 Energy Policy Review, International Energy Agency

De lo descrito, se concluye que el transporte carretero depende principalmente del diésel, a pesar de las políticas de gobierno en promover el consumo de combustibles alternativos; sin embargo, esto significa una oportunidad para incrementar el consumo del gas natural debido a que es menos nocivo que el diésel. La demanda de gas natural vehicular (GNC y GNL) está dirigido a los buses y camiones, como se puede observar en las Figuras 33 y 34.

Figura 33 Número de buses a combustibles alternativos (M2/M3)

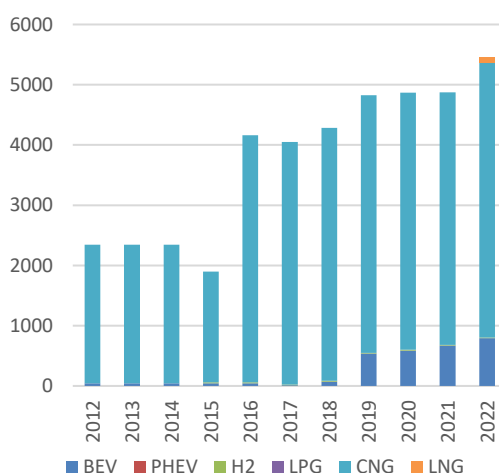
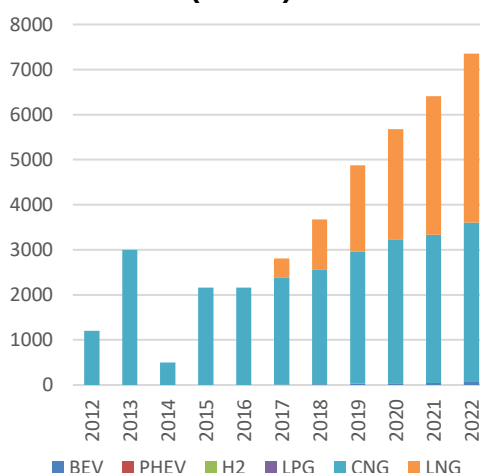


Figura 34 Número de camiones a combustibles alternativos (N2/N3)



(*) Clase M2 y M3: vehículo de pasajeros de más de 8 asientos, hasta y de más de 5 toneladas, Clase N2 y N3: vehículos para mercancías, hasta y de más de 12 toneladas

(**) BEV: Vehículo eléctrico a batería, PHEV: Vehículo eléctrico híbrido conectable, H2: Hidrógeno

Fuente: European Alternative Fuels Observatory
Elaboración propia

Con relación a los buses se observa en la Figura 33 que desde el 2019 los vehículos eléctricos vienen incrementando su participación en el mercado, a diferencia del GNC que va disminuyendo. En el 2022, el GNC tuvo una demanda del 84 % y los vehículos eléctricos alcanzaron el 14 %. Respecto a los camiones, en la Figura 34, si bien el ingreso de los vehículos eléctricos inició en 2017 y va en aumento, su participación en el mercado es muy pequeña, al 2022 solo llega al 1 %. En la Figura 41, se muestra que el GNL desde 2017 viene creciendo en el mercado a una tasa promedio anual del 28 %, a diferencia del GNC que crece a una tasa promedio anual del 6 %; al 2022 el GNC tuvo una participación en el mercado vehicular del 48 % y el GNL del 51 %.

Se puede ver que Italia ha disminuido progresivamente el rol del gas natural en el sector transporte; pero continúa la dependencia significativa del diésel y la gasolina, entonces, ¿cuál es el futuro de los combustibles tradicionales en Italia?, ¿continuará siendo el gas natural un combustible clave en la matriz energética italiana? De la revisión de la *Italy 2023 Energy Policy Review* elaborado por la *International Energy Agency* se puede extraer algunos puntos importantes para dar respuesta a las preguntas planteadas.

Italia es un país importador neto de gas natural, que representa el 42 % de su matriz energética. El mayor consumo se da en el sector eléctrico (41 %), seguido del residencial (27 %), industria (18 %), servicios (11 %) y tan solo un 3 % es demandado por el sector transporte. En la Figura 35 se muestra la infraestructura de gas natural, donde se observa que tiene seis puntos de reconexión de gas natural y tres terminales de GNL, que le permite importar y exportar, la red de gasoducto (tiene la capacidad de flujo inverso) alcanza aproximadamente 32,000 km y abastece el 95 % del mercado interno, depende principalmente del gas ruso (41 %).

Uno de los objetivos de Italia es dejar la dependencia del gas ruso, para lo cual tiene en marcha proyectos de unidades flotantes de almacenamiento y regasificación, un gasoducto de € 2,400 millones, una red de distribución de gas de 600 km, plantas de regasificación, depósitos costeros de almacenamiento y un proyecto de modernización de la red de gasoductos de € 400 millones que entrará en operación en el 2029.

El gobierno italiano prevé que el gas natural participará en el largo plazo con el 40 % en la matriz energética, continuará promoviendo los gases renovables, biometano, metano sintético e hidrógeno. De otro lado, el precio del gas natural en Italia es de los más altos de la UE, debido a la poca liquidez del mercado, la predominancia de los contratos de gas a largo plazo y la falta de competidores (oligopolio del gas natural).

Figura 35 Infraestructura de gas natural



Con relación al petróleo, es la segunda fuente energética de Italia, representa el 32 %, cuyo acceso depende de las importaciones. Se espera disminuir su consumo gradualmente, en el mediano y largo plazo, a causa de las políticas gubernamentales, con la adopción de vehículos eléctricos y combustibles alternativos en el sector transporte. La demanda de combustibles fósiles se concentra en el sector transporte que representa el 60 % del consumo total en 2021. El diésel es el producto de mayor consumo, representa el 41 % de la demanda total de productos petrolíferos en 2021.

Se promueve el uso de los vehículos eléctricos en vehículos de pasajeros, mayor consumo de gas natural e hidrógeno en vehículos pesados y potencialmente en el transporte marítimo; sin embargo, el petróleo será predominante en la próxima década y más allá. Respecto al precio, el diésel y la gasolina tienen un alto costo con un impuesto del 51 % y 55 %, respectivamente.

En resumen, el gas natural tendrá un rol importante en el sector transporte carretero, orientado a los vehículos pesados principalmente, debido a que el gobierno continúa invirtiendo en infraestructura para asegurar el suministro continuo de gas natural. Otro punto a favor del gas natural es el precio competitivo frente al diésel, de acuerdo con el *European Alternative Fuels Observatory*, el CNG tiene un 6 % menos cada 100 km de recorrido.

LNG Blue Corridors

El Proyecto fue cofinanciado por la Comisión Europea con un monto de €7.96 millones del total de la inversión de €14.33 millones y 27 participantes de 11 países, todos miembros de NGVA *Europe*. El periodo de ejecución del Proyecto fue desde mayo 2013 a abril 2017 (European Commission, 2023).

El objetivo fue consolidar al GNL como un combustible alternativo para el transporte de media y larga distancia, para luego convertirlo en un adecuado sustituto del diésel y reducir las emisiones de los gases de efecto invernadero, así como la dependencia del petróleo (la UE importa el 84 % del petróleo que necesita) y asegurar la continuidad en el suministro de combustible, debido a que la mayor parte del petróleo proviene de zonas políticamente inestables (Applus IDIADA, 2018).

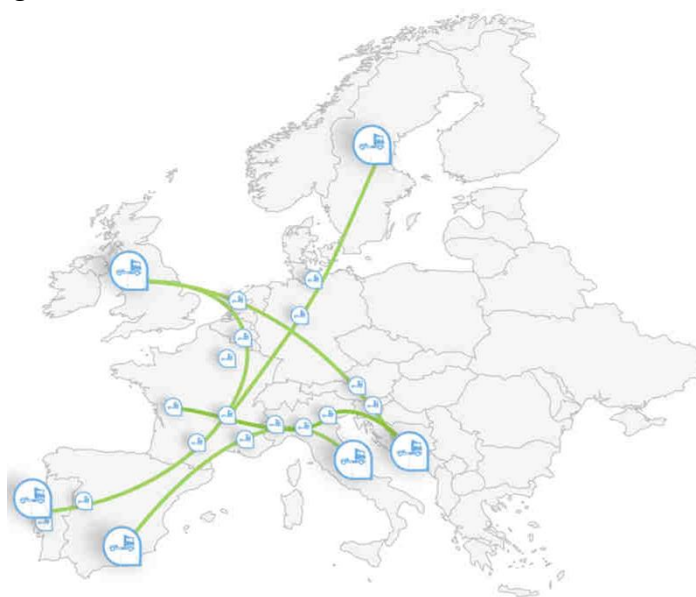
Para ello desarrolló la infraestructura mínima necesaria en cuatro corredores con 13 nuevas estaciones de GNL de última generación, en un periodo de cinco años para suministrar combustible de GNL a por lo menos 100 vehículos pesados, con la finalidad de remover las barreras que no permiten que el GNL se convierta en un combustible real que soporte el desarrollo del mercado, conectando a más de 11 países de la UE.

Es importante resaltar que el Proyecto es el resultado de un equipo diverso conformado por 59 socios de 11 países entre los cuales se tienen a

empresas expertas en tecnología vehicular de GNL, empresas de suministro de combustible GNL, empresas de estaciones de GNL, fabricantes de vehículos pesados, operadores de flotas, asociaciones y centros de investigación (European Commission, 2023).

Para los cuatro corredores diseñados (Mediterranean corridor, Atlantic corridor, South-North corridor y Western-Eastern corridor), ver Figura 36, se han evaluado factores como la carga del transporte en términos de capacidad actual y futura de las estaciones de servicio, la conexión a terminales y densidad del tráfico en términos de locación geográfica, entre otros. Asimismo, se consideró las estaciones de servicio públicas de GNL y se determinó las nuevas estaciones de GNL a fin de cubrir los espacios existentes, considerando una distancia mínima entre puntos de repostaje de GNL de 400 km (Applus IDIADA, 2018).

Figura 36 Cuatro corredores del LNG Blue Corridors



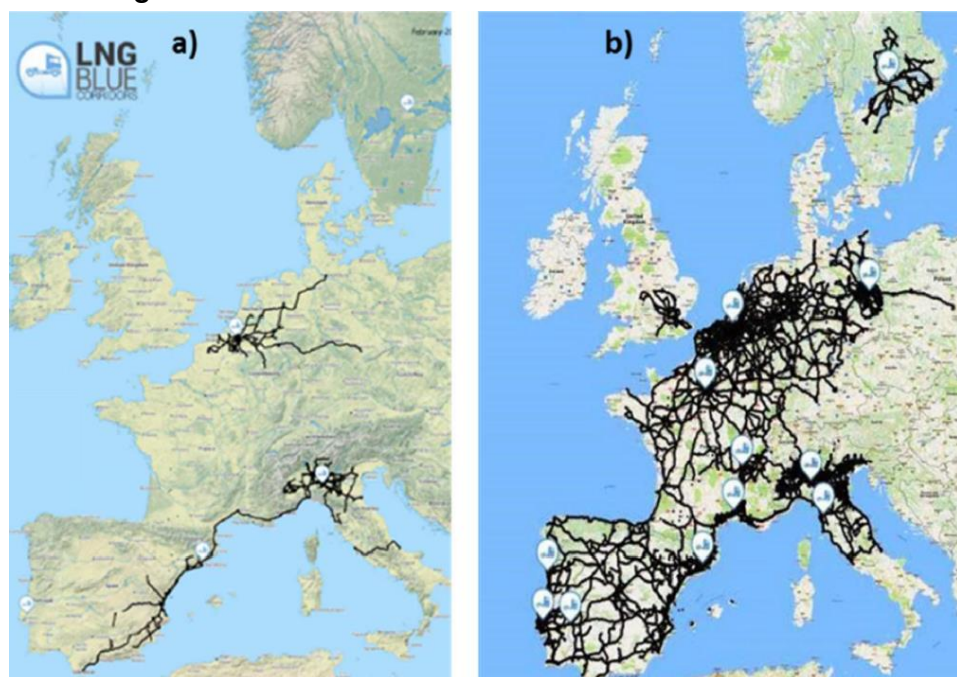
Fuente: European Commission, LNG Blue Corridors

El Proyecto constó de ocho paquetes de trabajo para desarrollar distintos aspectos del GNL: i) relacionado a la gestión del proyecto (Idiada Auomotive Technology S.A.), ii) tecnología del vehículo a GNL (Iveco España S.L.), iii) logística del combustible de GNL (Naturgy Energy Group S.A.), iv) regulaciones, homologaciones y aspectos de seguridad para alcanzar estándares de la UE

(Idiada Automotive Technology S.A.), v) construcción y operación de las 13 estaciones de servicio de GNL y creación de la flota mínima de 100 vehículos pesados a GNL (Idiada Automotive Technology S.A.), vi) rendimiento de las estaciones de servicio de GNL, de los vehículos a GNL y los datos GPS se procesan durante 4 años para evaluar el desempeño del proyecto (Vlaamse Instelling voor Technologisch Onderzoek), vii) definición de la hoja de ruta para el rol de del *LNG Blue Corridors* (NGVA Europe) y viii) difusión y aprovechamiento de los resultados (NGVA Europe).

A setiembre del 2017 se alcanzó los 147 vehículos pesados a GNL en funcionamiento, superando los 100 vehículos establecidos inicialmente, debido al nuevo camión Iveco Stralis Euro VI a GNL, que representa aproximadamente el 77 % del total de vehículos pesados del proyecto, el 23 % restante corresponde al camión Volvo Metano-Diésel Euro V. En la Figura 37 se observa el impacto del Proyecto, mostrado con datos del GPS instalado en los vehículos pesados de GNL operativos, que recorrieron poco más de 2 300 000 km con GNL, para lo cual realizaron más de 58 000 eventos de llenado en las 12 estaciones de servicio de GNL construido (Applus IDIADA, 2018).

Figura 37 Evolución del GNL en el *LNG Blue Corridors*



a) Año 2014

b) Año 2017

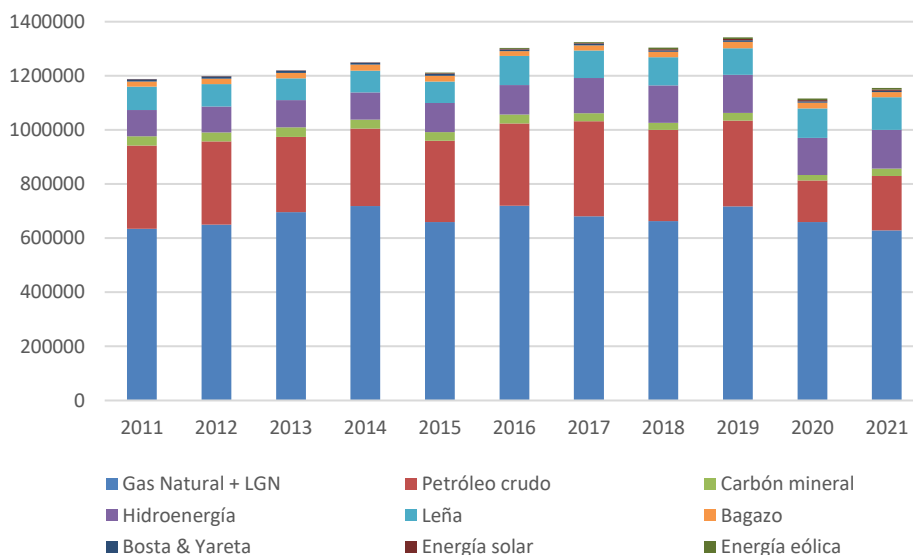
Fuente: Transport Research Arena, Vienna 2018 A digital era for transport, LNG Blue Corridors: A summary of the main activities performed during the first four years of the project

De la ejecución del Proyecto queda demostrado que el GNL puede ser usado como combustible para vehículos pesados de manera sostenible, lo cual implica un esfuerzo inicial por parte del gobierno y la participación de los actores clave de la industria de GNL y operadores de flotas de vehículos, además del cofinanciamiento del Proyecto.

2.2.2. Gas natural: Mercado nacional

Desde que inició las operaciones del Proyecto Camisea en el 2004, el gas natural se ha convertido en la principal fuente de energía de nuestro país. Como se puede observar en la Figura 38, en el 2021, el gas natural tuvo una participación del 54 %, seguido del petróleo con un 18 % en la oferta interna bruta de energía primaria³².

Figura 38 Oferta interna bruta de energía primaria (TJ)



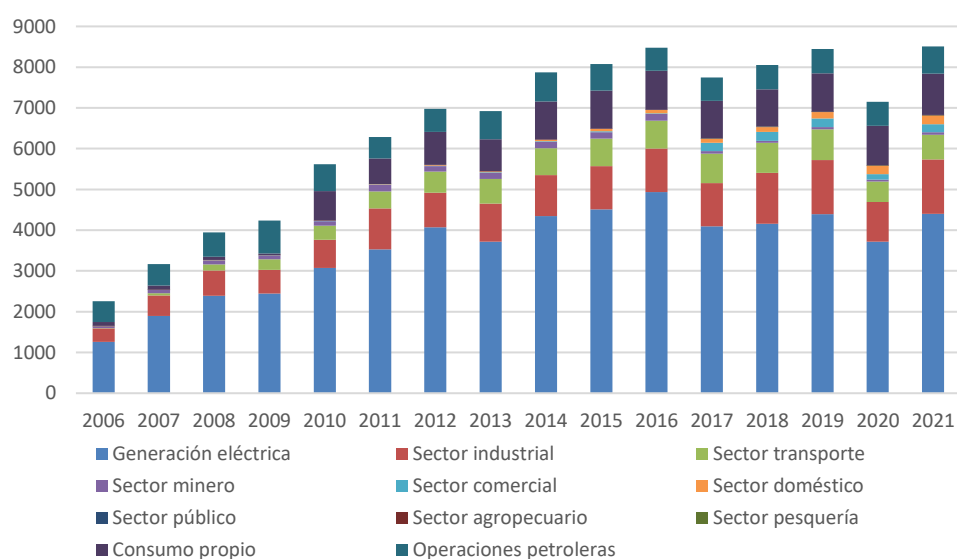
(*) LNG: Líquidos de gas natural, TJ: Terajoule
Fuente: Ministerio de Energía y Minas, Balance Nacional de Energía, 2023
Elaboración propia

³² La oferta interna bruta de energía primaria considera de forma agregada a la producción total, la variación de inventarios y las importaciones, descontando la energía no aprovechada y las exportaciones, de acuerdo a lo establecido en el Balance Nacional de Energía.

Según el estudio realizado por Ministerio de Energía y Minas «Matriz Energética Sostenible en el Perú», prevén un crecimiento para el 2040 de gas natural en un 13.1 % y el petróleo disminuirá en un 17.7 %, respecto del 2010 (Minem - Numes, 2012). Esta proyección no incluye al gas natural orientado a vehículos pesados, lo cual haría aún más significativa la participación del gas natural en los próximos años.

En la Figura 39 se puede observar que el gas natural tiene como mayor demanda a la generación eléctrica, al 2021 tuvo una participación del 52 %, seguido del sector industrial con un 16 %. Respecto al sector transporte, en el 2021 el gas natural tuvo una participación del 7 %, a pesar de que el gas natural tuvo un crecimiento sostenido desde 2006 hasta antes de la pandemia de a una tasa anual promedio del 38 %; sin embargo, el porcentaje de su demanda en el mercado se ha mantenido desde el 2011 en 8 % en promedio.

Figura 39 Consumo de gas natural por tipo de uso y/o sector (10^6 m^3)

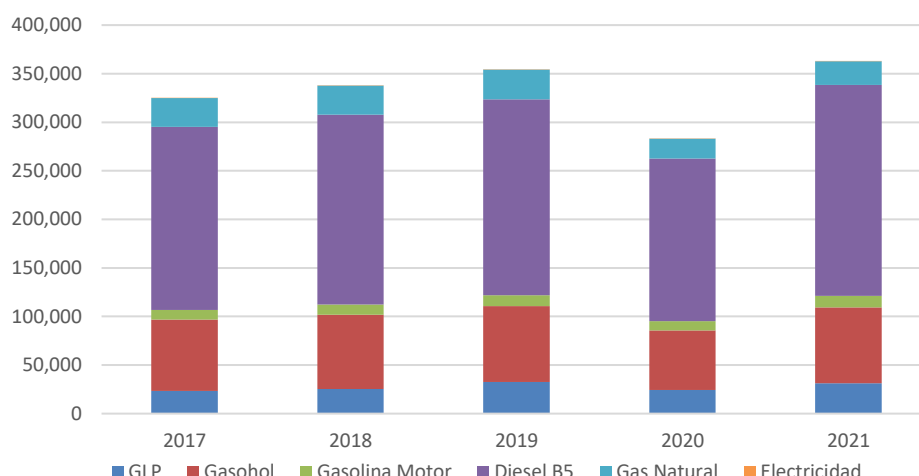


Fuente: Ministerio de Energía y Minas, Balance Nacional de Energía, 2023
Elaboración propia

Con relación al consumo de combustibles disponibles en nuestro país, de acuerdo con la Figura 40, desde 2017 al 2021, se mantiene la participación en el mercado, en cual predomina el diésel (58 %), el gasohol (22 %), mientras que, el GLP y el gas natural participan con un 8 %, cada uno. Este panorama, nos muestra el poco avance de penetración del gas natural en el transporte carretero, debido a que en la actualidad el gas natural licuado (GNL) se encuentra en un

proceso de desarrollo para convertirse en un combustible alternativo real al diésel, que está dirigido a los vehículos pesados. Cabe señalar, que los demás combustibles están orientados a abastecer a los vehículos livianos, lo cual genera competitividad frente al gas natural, para que este incremente su participación en dicho parque vehicular.

Figura 40 Consumo de energía en el transporte carretero (TJ)



Fuente: Ministerio de Energía y Minas, Balance Nacional de Energía, 2023
Elaboración propia

Perú produce GNL desde el año 2010, a través de la empresa transnacional Perú LNG, que construyó la primera planta de gas natural licuado en Sudamérica, que consiste en una planta de procesamiento, instalaciones marítimas para buques metaneros y un gasoducto de 408 km. En el 2017, Perú LNG construyó el terminal de carga de camiones de GNL para impulsar la masificación del gas natural mediante el transporte de GNL hacia las demás regiones del país³³.

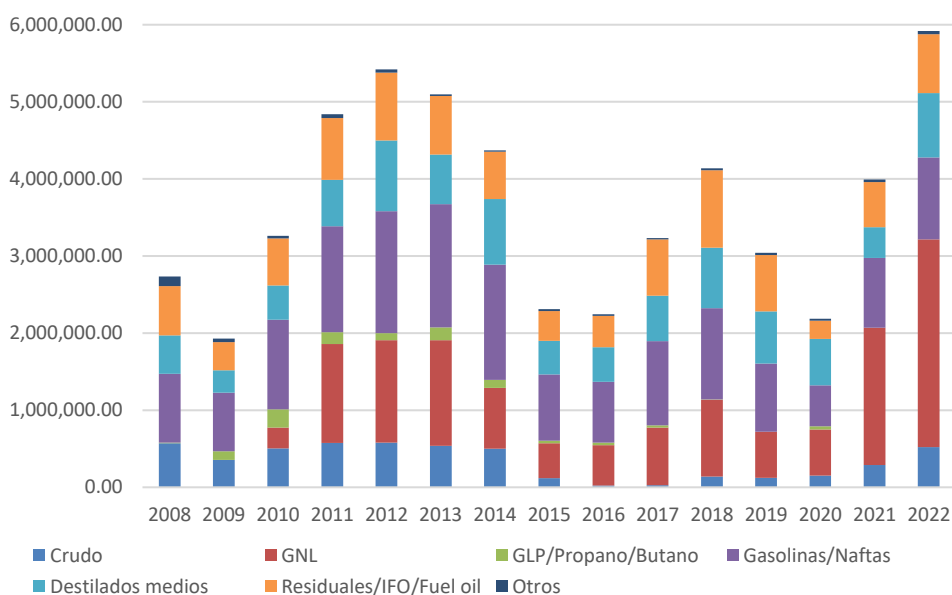
De acuerdo con Perúpetro, a octubre de 2023, se han registrado 740 embarques para exportación de GNL a 21 países, cuyo volumen total es de 2,460,709 MMPC, entre los cuales España es el país de mayor consumo con un 26 %, seguido de México (23 %), Corea del Sur (16 %), Japón (11 %), Reino Unido (8 %), China (6 %) y otros³⁴.

³³ Información extraída de la página oficial de la empresa Perú LNG, <https://perulng.com/>.

³⁴ Información procesada de la plataforma de estadística de «Exportación de Gas Natural», al 23 de octubre del 2023.

En la Figura 41 se observa que el GNL se ha convertido en un combustible relevante de la Balanza Comercial de Hidrocarburos, en 2010 solo representaba un 8 % equivalente de USD 269 millones, al 2022 participó con un 46 % equivalente a USD 2,692 millones.

Figura 41 Balanza Comercial de Hidrocarburos - Exportaciones (MUSD)



Fuente: Ministerio de Energía y Minas, Anuario Estadístico de Hidrocarburos, 2023
Elaboración propia

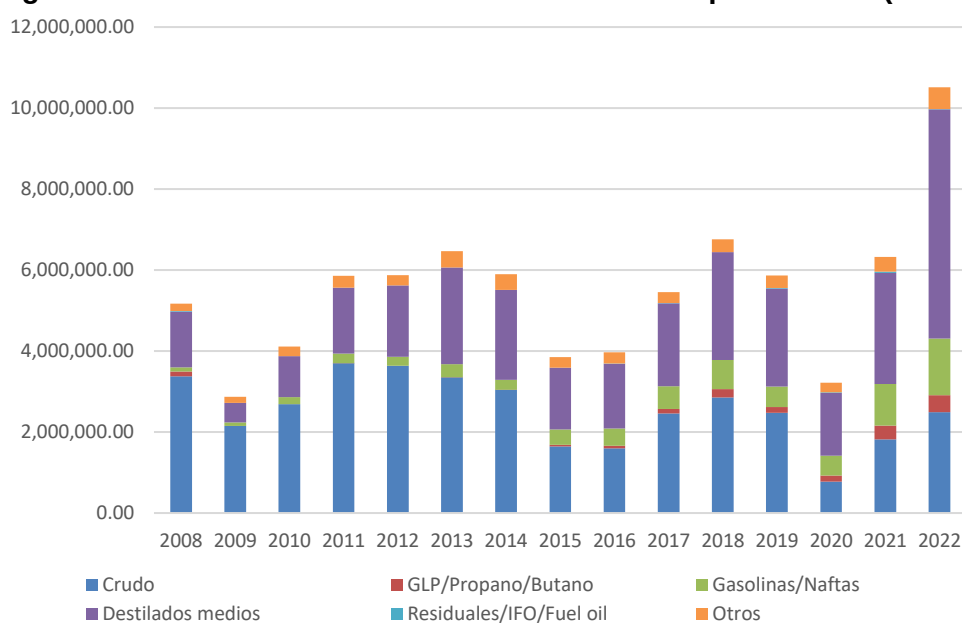
Respecto a las importaciones de combustibles, se puede ver en la Figura 42 que los combustibles de mayor impacto en la Balanza Comercial de Hidrocarburos fueron principalmente el petróleo o crudo y los destilados medios, el cual incluye al diésel, cuyo valor de importación en el 2022 fue de USD 2,494 millones y USD 5,662 millones, respectivamente. Durante los últimos 15 años, el valor de la importación del crudo ha disminuido significativamente, pasando de una participación de 65 % en 2008 al 24 % en el 2022; caso contrario ocurrió con los destilados medios, que pasaron de un 27 % a un 54 %.

Se puede observar que entre 2008 y 2022, se tiene como resultado en el saldo de la Balanza Comercial de Hidrocarburos un déficit comercial permanente, a pesar de que desde 2010 se exporta GNL, debido a que el país es deficitario de petróleo y destilados medios. En el 2022 se tuvo un saldo un récord negativo por un monto de USD 4,596 millones. Es decir, nuestra

dependencia energética de la importación de combustibles viene representando un alto costo para el país.

Una alternativa que puede ayudar a obtener el equilibrio en la Balanza Comercial de Hidrocarburos, es la inversión en la masificación de gas natural aplicado a todos los sectores económico, en especial al sector transporte, para lo cual se requiere ampliar a nivel nacional infraestructura de redes de abastecimiento de gas natural, así como, el desarrollo de infraestructura de redes de abastecimiento de GNL, el cual está dirigido a los vehículos pesados, para impulsar el consumo de GNL y disminuir la dependencia del diésel de manera progresiva.

Figura 42 Balanza Comercial de Hidrocarburos - Importaciones (MUSD)



Fuente: Ministerio de Energía y Minas, Anuario Estadístico de Hidrocarburos, 2023
Elaboración propia

2.2.2.1. GNV en Perú

Nuestro país ha otorgado la concesión de distribución de gas natural a nivel nacional a seis empresas. Las áreas concesionadas se ubican en las regiones de la costa peruana tal como se muestra en la Figura 50. En el siguiente cuadro se puede ver que a la fecha tenemos cinco concesiones vigentes.

Según la «Memoria de Gestión del Ministerio de Energía y Minas 2022» la concesión a Gas Natural de Tumbes S.A.C. se encuentra en un proceso de

demanda arbitral para culminar la concesión e indemnizar al Estado por daños y perjuicios, debido a que la empresa incumplió con la fecha de inicio de puesta en operación comercial (POC) establecida en el contrato.

Respecto a la concesión Sur Oeste, concesionada a Naturgy Perú S.A., se declaró su caducidad mediante Resolución Suprema N° 009-2020-EM, debido a la imposibilidad de la empresa en prestar el servicio por causa de insolvencia económica, asimismo, se dispuso que el Ministerio de Energía y Minas (Minem) asuma la administración de la concesión de manera provisional, a través de un tercero por un espacio de tres años, para garantizar la continuidad del servicio, es así que con Decreto Supremo N° 029-2020-EM se otorgó a la concesión a Petroperú S.A., de manera provisional, por lo que no se pudo generar nueva infraestructura.

De acuerdo con el diario oficial El Peruano, Petroperú S.A. y el Minem firmaron un convenio específico de inversiones que permite que el Minem ejecute la construcción de redes de gas natural mediante empresas especializadas, por un monto aproximado de S/ 173 millones, proveniente del Fondo de Inclusión Social Energético (FISE) y el plan Con Punche Perú³⁵. En la Tabla 5 se lista las concesiones de distribución de gas natural que existen en el país y en la Figura 43 se muestra de manera gráfica el nivel de alcance de cada concesión.

Tabla 5 Concesiones de distribución de gas natural

Titular	Operador	Área de influencia	POC	Plazo de la concesión
Gas Natural de Tumbes S.A.C. (*)	Especialistas en Gas del Perú S.A.C.	Tumbes	15-10-2021	20 años
Gases del Norte del Perú S.A.C. (Gasnorp)	Surtigas S.A. ESP.	Talara, Sullana, Paita, Piura y Sechura	14-09-2022	32 años
Gases del Pacífico S.A.C. (Quavii)	Surtigas S.A. ESP.	Chimbote, Huaráz, Chiclayo, Trujillo, Cajamarca, Lambayeque, y Pacasmayo	07-12-2017	19 años

³⁵ Noticia publicada en el diario oficial El Peruano, el 30 de octubre del 2023, en la sección de Economía, «Gobierno ampliará cobertura del gas natural en el sur a 36,000 clientes residenciales», <https://www.elperuano.pe/noticia/226605-gobierno-ampliara-cobertura-del-gas-natural-en-el-sur-a-36000-clientes-residenciales>.

Titular	Operador	Área de influencia	POC	Plazo de la concesión
Gas Natural de Lima y Callao S.A. (Cálidda)	EBB Perú Holdings	Lima y Callao	20-08-2004	33 años
Contugas S.A.C.	TGI S.A. ESP.	Ica	30-04-2014	30 años
Petroperú S.A. (**)		Arequipa, Tacna, Ilo y Moquegua	05-12-2017	3 años desde 19-12-2020

(*) Proceso arbitral, (**) Concesión provisional

Fuente: Osinergmin, Boletín Estadístico de Gas Natural de la División de Supervisión de Gas Natural, 2020 al 2023

Por otro lado, la participación de los accionistas en las concesiones de distribución total de gas natural está dividido en dos grandes grupos empresariales, Grupo Energía Bogotá (57.1 %) y Promigas de Colombia (41.4 %) ³⁶.

Figura 43 Ubicación de las concesiones de distribución de gas natural



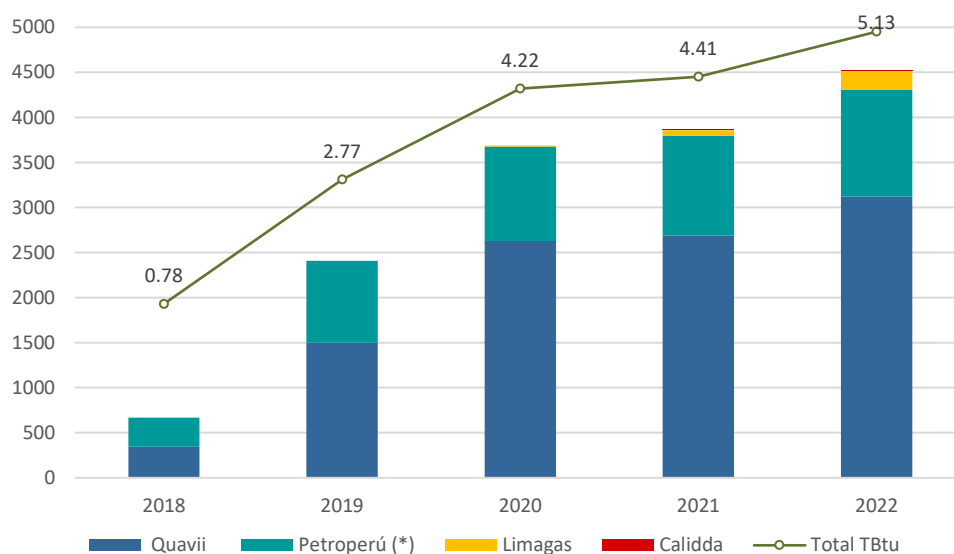
Fuente: Ministerio de Energía y Minas, Anuario Estadístico de Hidrocarburos, 2023

El terminal de carga de camiones cisterna de GNL se ubica en las instalaciones de la planta de licuefacción de gas natural Perú LNG. En marzo

³⁶ Boletín Estadístico de Gas Natural de la División de Supervisión de Gas Natural del Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinergmin), 2020 al 2023.

de 2018 se obtuvo los permisos del Osinergmin y el 09 de julio se declaró el inicio de la operación comercial. Este cargadero abastece de GNL a través de camiones T3S3 criogénicos de 50 m³ a las estaciones de regasificación en el norte y sur oeste del país, a cargo de Shell GNL Perú S.A.C., y a Cusco a través de Lima Gas desde el 2020³⁷. Este gas se transporta a las ciudades peruanas de Lambayeque, Chiclayo, Cajamarca, Pacasmayo, Trujillo, Chimbote, Huaraz, Arequipa, Moquegua, Ilo, Tacna, Lima y Cusco. En la siguiente figura se muestra la evolución de la demanda para el mercado doméstico de GNL para su regasificación, principalmente. Es importante señalar que la empresa Gases del Norte del Perú S.A.C. obtiene gas natural de la planta de Pariñas, Talara, por lo que no necesita transportar GNL para su regasificación. En la Figura 44 se puede observar la evolución del número de camiones de GNL que fueron repostado en el cargadero de GNL.

Figura 44 Número de camiones de GNL despachados



(*) Desde diciembre de 2019, Petroperú reemplaza a Naturgy. TBtu: medida de energía

Fuente: Perú LNG, Memoria y Reporte anual, 2017 al 2022
Elaboración propia

³⁷ Información contenida en la Memoria y Reporte anual de Perú LNG, de 2017 al 2022.

Según Infogas³⁸, a diciembre del 2023 se tuvo 449,334 vehículos activos a gas natural, al 2022 los vehículos a gas natural representaron el 12 % del parque automotor a nivel nacional. Se puede ver en la Figura 45 una recuperación del mercado vehicular de gas natural tras la pandemia de la *covid-19*, esto gracias al impulso del Estado en la conversión de vehículos. Sin embargo, en la Figura 46 se muestra una lenta desaceleración en el consumo de gas natural vehicular, este se mantiene alrededor de 742 MMm³ desde el 2015 (sin considerar el consumo durante la pandemia). Eso es un indicador de que la industria del gas natural vehicular a diferencia de los sectores como residencial, comercial, industrial y generación eléctrica, presenta un escenario de poco crecimiento.

Figura 45 Número de vehículos a gas natural activos en el año

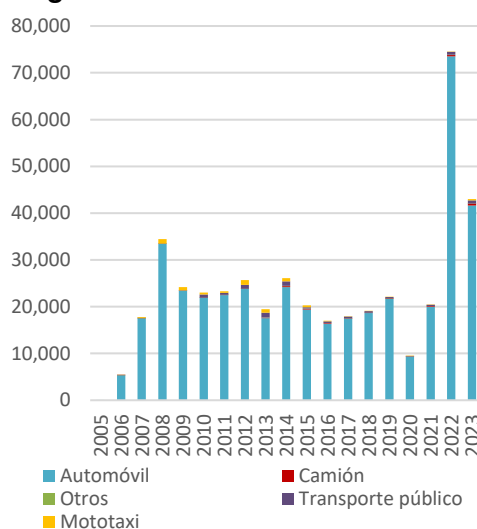
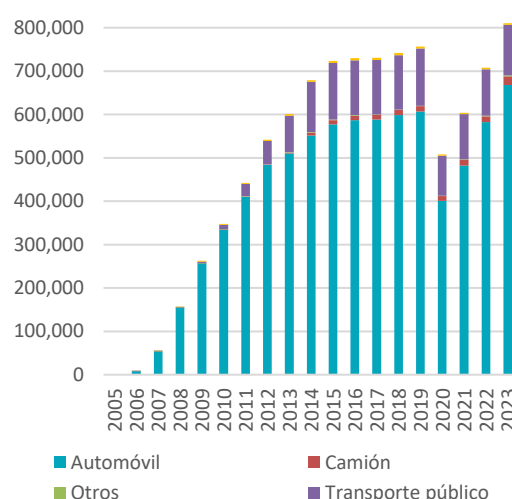


Figura 46 Volumen de gas natural vehicular acumulado (Miles m³)



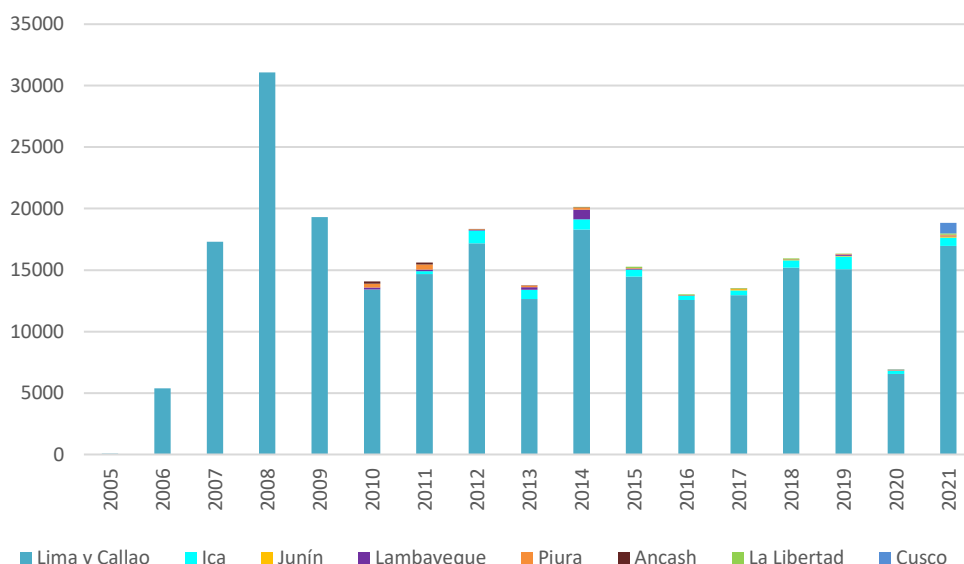
Fuente: Infogas 2023
Elaboración propia

En la Figura 47 se observa que en el 2021 Lima y Callao tienen el 88.7 % del total de vehículos a gas natural, seguido de Ica (4.2 %), Piura (1.3 %) y La Libertad (1.2 %). Por otro lado, aún no se dispone de información por tipo de consumo de gas natural (comprimido o licuado), pero se presume que no

³⁸ Entidad creada mediante Decreto Supremo N° 006-2005-EM, para administrar la información generada por todos los participantes de la cadena comercial del GNV en el Perú, a través del Sistema de Control de Carga de Gas Natural Vehicular.

se dispone de vehículos a GNL a nivel comercial, según el diario Gestión, no se ha vendido una sola molécula de GNL³⁹.

Figura 47 Vehículos convertidos por plaza en el año



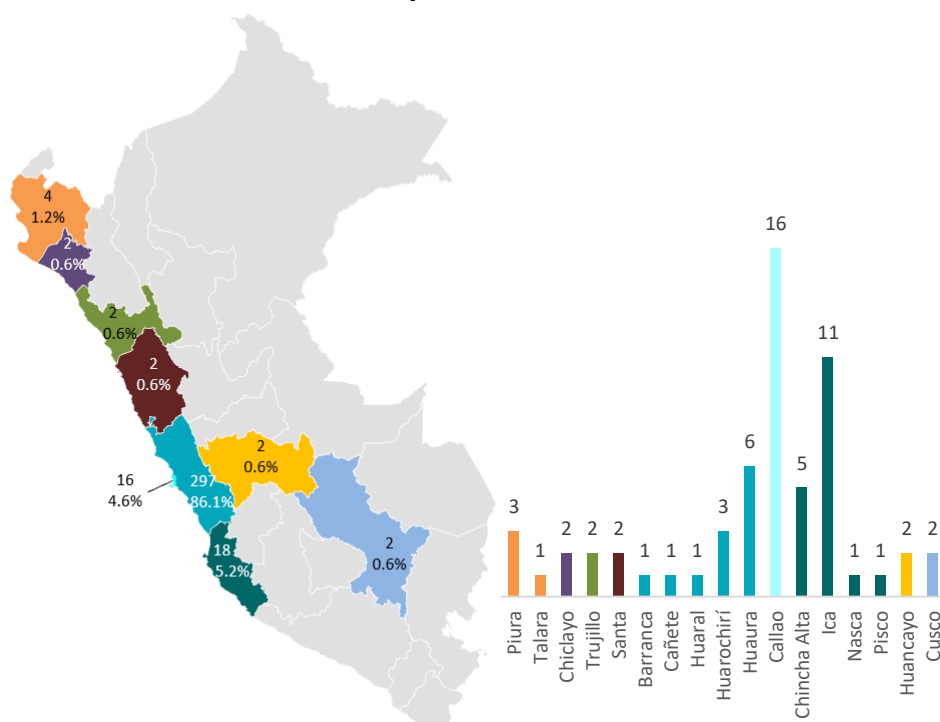
Fuente: Infogas 2023
Elaboración propia

A noviembre de 2023, de acuerdo con Infogas, el país tiene 345 estaciones de servicio de gas natural en operación, donde el 86.1 % del total de estaciones se encuentran en Lima. Cabe señalar que en enero del 2024 se inauguró la primera estación de servicio de GNL, en Puente Piedra, Lima, asimismo, en junio de 2023 se inauguró la primera estación de GNL en el norte, ubicado en Trujillo (aún no entra en operación) y se encuentra en construcción una segunda estación de GNL que se ubicará en Chiclayo⁴⁰. En la Figura 48 se muestra la distribución por regiones y provincias a nivel nacional.

³⁹«GNL vehicular no termina de prender: grifos y flotas sin una molécula vendida», 8 de mayo del 2023.

⁴⁰ Noticia de El Comercio «Se inaugura la primera estación de gas natural licuado» de 20 de enero de 2023 y «Promigas y Cálidda forman el primer corredor de gas natural licuado (GNL) del Perú» de 27 de junio de 2023.

Figura 48 Estaciones de servicio de gas natural por regiones y provincia

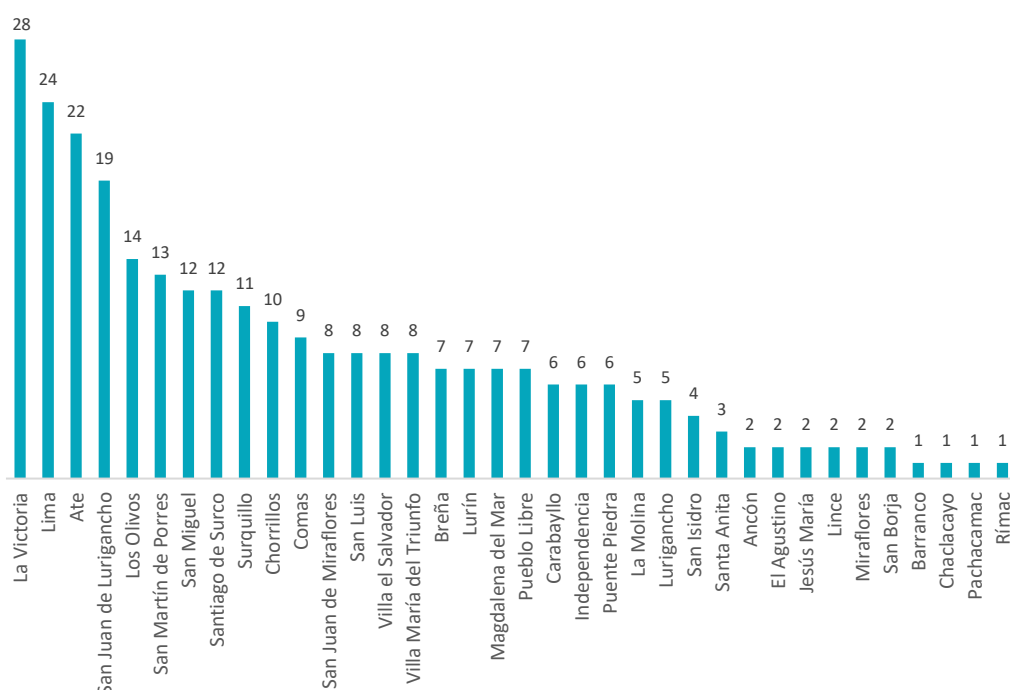


(*) El gráfico de barras no contiene datos de Lima provincia, para una mejor visualización.

Fuente: Página web de Infogas, Estaciones GNV, noviembre 2023
Elaboración propia

Se puede observar que Lima y Callao presentan un mayor desarrollo de la industria del GNV, esto se debe a que desde agosto de 2004 entró en operación la concesión Gas Natural de Lima y Callao S.A. que impulsó con ayuda del Estado la masificación de gas natural. Por otro lado, en las otras regiones las concesiones iniciaron años después, de acuerdo con la Tabla 6. En la Figura 49 se muestra la distribución de las 285 estaciones de servicio en 36 distritos de la provincia de Lima, donde el 50 % se concentra en La Victoria, Lima, Ate, San Juan de Lurigancho, Los Olivos, San Martín de Porras, San Miguel y Santiago de Surco.

Figura 49 Estaciones de servicio de gas natural en Lima provincia



Fuente: Página web de Infogás, Estaciones GNV, noviembre 2023
Elaboración propia

Por otro lado, de acuerdo con lo informado por Rumbo Minero, el Consorcio Camisea y Limagas Natural tienen planeado un proyecto denominado «Corredor Camisea GNL» dirigido al transporte de carga pesada que abarcará las regiones de Cusco, Arequipa y Nazca, el proyecto tiene un costo estimado de US\$ 2.4 millones, y constará de 4 estaciones de servicio de GNL, para impulsar el consumo de GNL se creará un fondo de financiamiento de cero intereses para promover la compra de nuevos buses y camiones a GNL⁴¹. De consumarse este proyecto, se integrará con la estación de servicio de GNL en Lima y norte del país, ampliando de manera progresiva la infraestructura del GNL que haga posible el consumo del GNL como un combustible alternativo al diésel.

En las Figuras 50 y 51 se muestra las ubicaciones geográficas de las estaciones de servicio de gas natural, donde se aprecia una gran diferencia en el desarrollo de infraestructura de gas natural, entre Lima y Callao y el resto

⁴¹ Noticia de Rumbo Minero «Corredor Camisea GNL demandará una inversión de US\$ 2.4 millones» del 27 de octubre del 2023.

de las regiones. Por otro lado, es importante mencionar que el Estado a través del Fondo de Inclusión Social Energético (FISE)⁴² viene impulsando, a través de los concesionarios de gas natural, la masificación de gas natural a nivel nacional, es decir sin este apoyo económico, a través de programas de ahorro y promoción de GNV, probablemente las inversiones en infraestructura de gas natural serían mucho menores.

Figura 50 Estaciones de servicio a nivel nacional

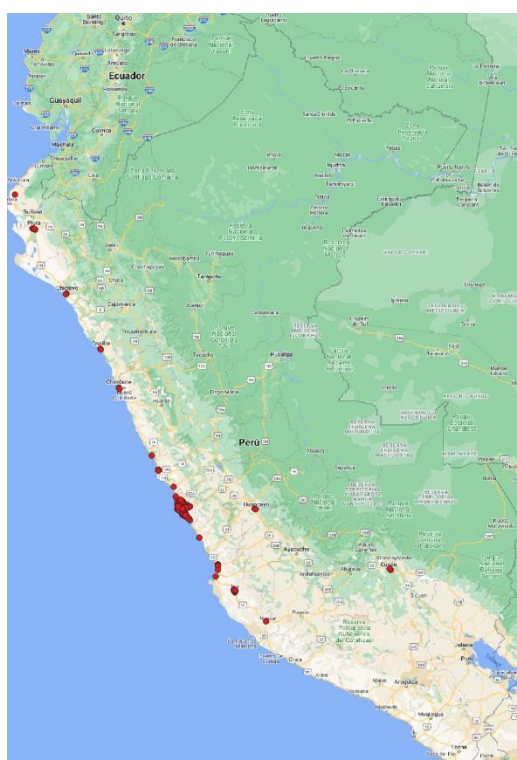
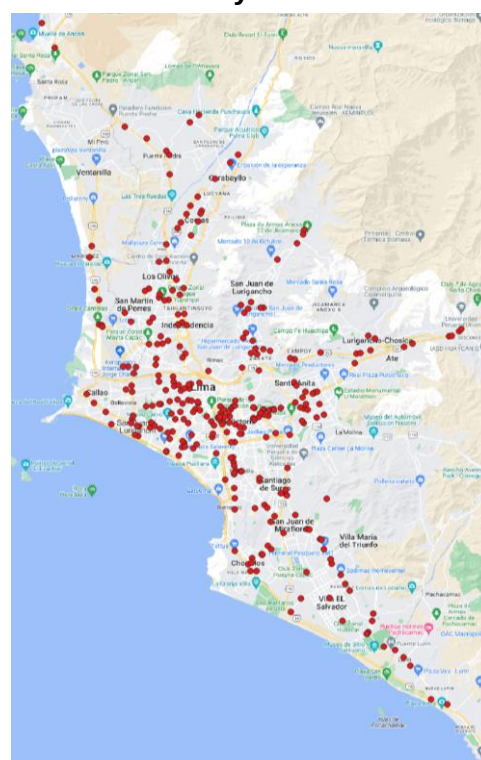


Figura 51 Estaciones de servicio en Lima y Callao

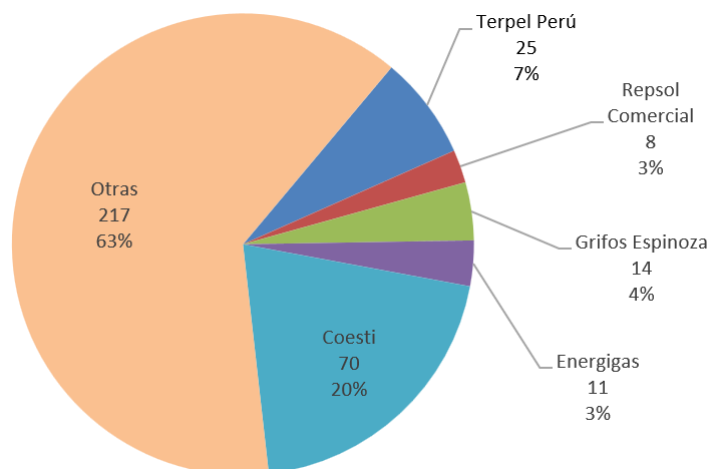


Fuente: Adaptado de la página web de Infogas, Estaciones GNV, noviembre 2023
Elaboración propia

De acuerdo con Infogas, existen 201 empresas de estaciones de servicio de gas natural, destacando Coesti S.A. de Corporación Primax, Terpel Perú S.A.C. (capitales colombianos), Grifos Espinoza S.A., Energigas S.A.C. y Repsol Comercial S.A.C., concentrado un 37 % del mercado, como se puede ver en la siguiente Figura 52.

⁴² Mediante Ley N° 29852 se creó el Sistema de Seguridad Energética en Hidrocarburos y el Fondo de Inclusión Social Energético, publicado el 13 de abril del 2012.

Figura 52 Empresas de estaciones de servicio de gas natural



Fuente: Página web de Infogas, Estaciones GNV, noviembre 2023
Elaboración propia

2.3 MARCO CONCEPTUAL

El marco conceptual de la presente investigación reunirá conceptos estructurados, complementarios a los conceptos planteados en la sección de «Variables de operacionalización» del Capítulo I.

2.3.1. Gas natural

El gas natural es un combustible fósil compuesto por metano (CH_4), etano (C_2H_6), una menor proporción de otros hidrocarburos más pesados, y cantidades menores de otros elementos. Se encuentra almacenado en las profundidades del subsuelo, en depósitos rocosos llamados yacimientos, pudiendo estar en yacimientos exclusivos de gas natural o asociado en yacimientos de petróleo.

Tabla 6 Composición del gas natural de Camisea

Componente	Nomenclatura	Fracción molar (%)	Estado Natural
Metano	CH_4	89.4919	Gas
Etano	C_2H_6	9.0532	Gas
Propano	C_3H_8	0.0816	Gas Licuable
n-Butano, Iso-Butano	C_4H_{10}	0.0011	Gas Licuable
n-Pentano, Iso-Pentano	C_5H_{12}	0.0001	

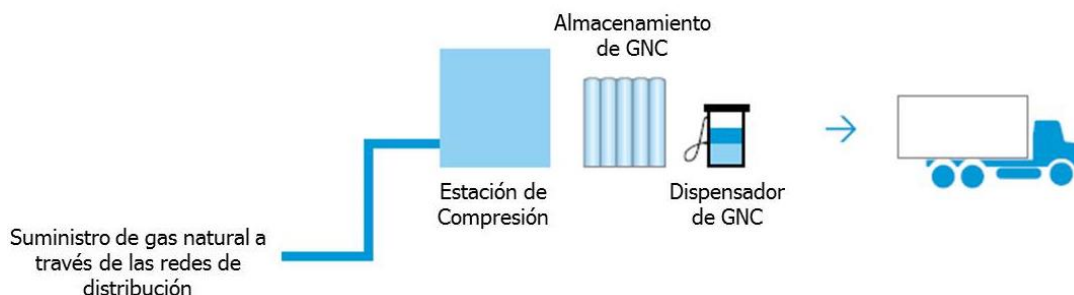
Componente	Nomenclatura	Fracción molar (%)	Estado Natural
Nitrógeno	N ₂	1.1216	Gas
Dióxido de Carbono	CO ₂	0.2505	Gas

Fuente: Minem y Pluspetrol, 2020
Elaboración propia

2.3.2. Gas Natural Comprimido

De acuerdo con el Reglamento de comercialización de gas natural comprimido (GNC) y gas natural licuefactado (GNL), aprobado con Decreto Supremo N° 057-2008-EM, se define al GNC como aquel gas natural que ha sido comprimido en una estación de compresión, a una presión máxima de 25 MPa (250 bar), para su posterior almacenamiento, transporte y/o comercialización. Debido al proceso adicional de compresión, el GNC se considera un producto distinto al gas natural. En la Figura 53 se muestra el esquema del proceso de suministro de GNC.

Figura 53 Suministro de gas natural comprimido



Fuente: Adaptado de GazMétro
Elaboración propia

2.3.3. Gas Natural Licuado

El gas natural licuado (GNL) es el gas natural purificado que ha sido sometido a un proceso criogénico mediante el uso de refrigerantes, hasta alcanzar un estado líquido, esto ocurre a una temperatura de -162°C a presión atmosférica.

Posteriormente el GNL se almacena en tanques criogénicos y se transporta a su destino, llevándolos sobre embarcaciones especiales, por vía terrestre, marítima, fluvial o lacustre. En el lugar de destino, el GNL es

regasificado mediante calentamiento a fin de pasarlo al estado gaseoso para distribuirlo a los puntos de consumo.

Su uso como combustible se orienta a vehículos de alto consumo y largos recorridos por la autonomía que puede tener ya que almacena una gran cantidad de combustible en un espacio reducido como camiones de carga, remolcadores o buses interprovinciales. En la Figura 54 se muestra el esquema del proceso de suministro de GNL.

Figura 54 Suministro de Gas Natural Licuado



Fuente: Adaptado de GazMétro
Elaboración propia

2.3.4. El GNL en vehículos pesados

El gas natural como combustible vehicular hace uso de una tecnología avanzada y eficiente. Para vehículos pesados de corto recorrido es adecuado usar tanques pequeños de GNC, al no requerir mayor consumo de combustible y el costo por sistema vehicular es menor, mientras que, para vehículos pesados de gran recorrido el GNL es atractivo debido a la reducción de peso a bordo y el espacio pequeño del tanque, además los costos para el sistema vehicular pesado son menores para el GNL.

GNL puede ser transportado a través de barcos, barcazas, ferrocarriles o remolques de carretera para suministrar las estaciones de servicio de GNL. El método de transporte más común es el remolque de carretera. Estos remolques llevan aproximadamente 45,000 litros de GNL en función de las limitaciones de peso para la zona.

Con relación al costo del transporte del GNL a la estación de servicio no es un impedimento significativo de contar con una distribución más amplia de

fuentes de GNL, pero si la fuente de GNL es remota, el transporte es un costo adicional y puede ser una desventaja competitiva.

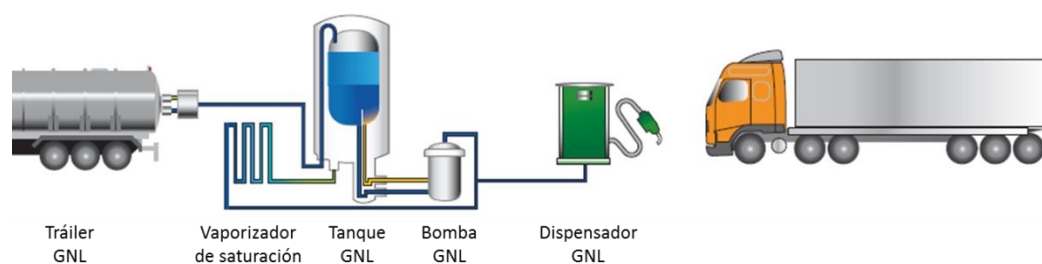
Respecto al costo de instalación de las estaciones de servicio de GNL, es mayor respecto a las estaciones de servicio de combustibles convencionales en términos de equipamiento, como el GNL debe ser almacenado, manipulado y se dispensa a temperaturas criogénicas. Los componentes para la instalación de GNL incluyen el tanque de almacenamiento de GNL, la bomba de GNL y dispensador de combustible (United Nations, 2003).

Por otro lado, el GNL es el combustible más seguro en su manipulación respecto de los combustibles tradicionales, esto conlleva a un mejor manejo de la seguridad y gestión de riesgos.

2.3.5. Estación de servicio o suministro de GNL

En la Figura N° 55, de manera referencial, se muestra el sistema de reabastecimiento de GNL que cuenta con un tanque de almacenamiento de GNL permite repostar el GNL a una presión por encima de los 20 bar.

Figura 55 Esquema de Estación de GNL

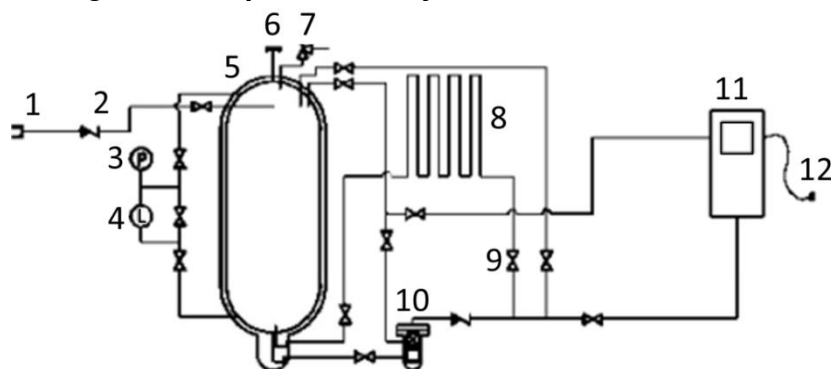


Fuente: Adaptado de CHART, 2014
Elaboración propia

Algunas estaciones operan sin la bomba criogénica de GNL que implica ligeramente una proporción de flujo menor y a veces una alta presión de almacenamiento, alrededor de 12 bar comparado con una presión de 3 a 8 bar). El GNL es enviado a diferentes presiones según el diseño del vehículo pesado, puede ser de 3.8 bar o 18 bar. La capacidad del tanque GNL esta

generalmente en función de su uso. Puede ser de 10 m³ de capacidad correspondiente a 4.5 T o reabastecimiento a menos de 30 vehículos pesados. Así también, puede ser de 60 m³ o más que puede reabastecer a 200 vehículos pesados (CHART, 2014). En la Figura 56, se muestra el esquema del flujo para una estación de servicio de GNL.

Figura 56 Esquema del flujo de estación de GNL



- | | | |
|-----------------------------|------------------------------|---------------------------|
| 1. Recepción del GNL | 2. Válvula de no retorno | 3. Tanque de almac. GNL |
| 4. Medidor de nivel de liq. | 5. Medidor de presión | 6. Válvula de alivio |
| 7. Dispositivo de seguridad | 8. Vaporizador de saturación | 9. Válvula de aislamiento |
| 10. Bomba de GNL | 11. Dispensador de GNL | 12. Manguera con boquilla |

Fuente: Adaptado de CHART, 2014
Elaboración propia

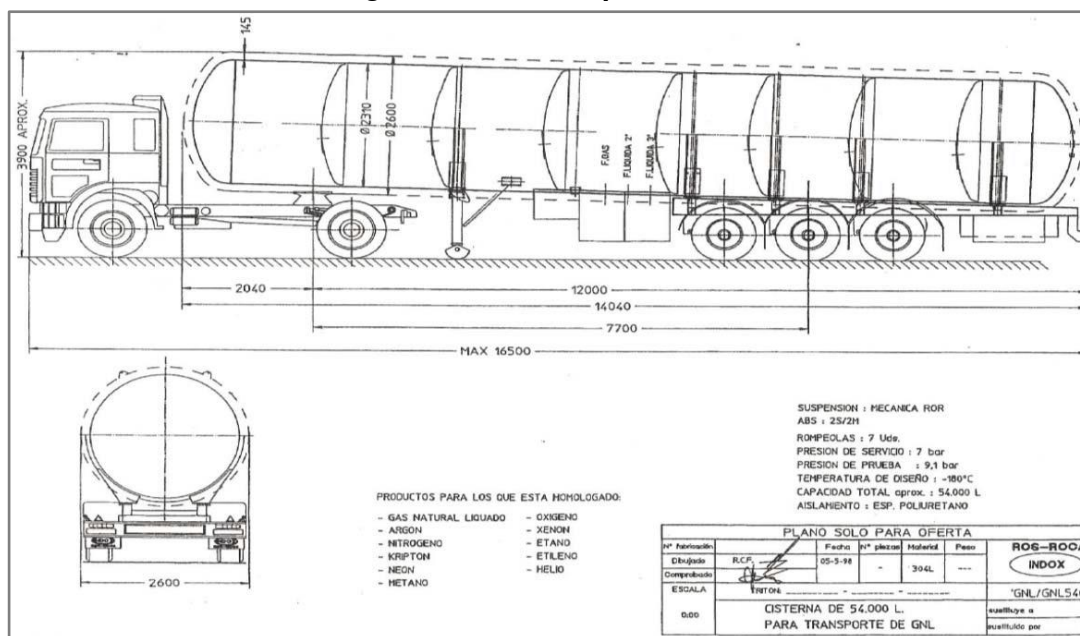
2.3.6. Cisterna para el transporte de GNL

Son contenedores con aislamiento térmico para mantener el GNL a una temperatura de -160°C, durante el traslado del GNL. De acuerdo con la Asociación Española de Gas (Sedigas)⁴³ se tiene dos tipos de contenedores: i) cisterna aislada al vacío (usada comúnmente para distribución de GNL) y ii) cisterna aislada con poliuretano. La segunda es utilizada para el transporte de GNL por su eficiencia al trasladar más GNL a igualdad de tonelaje, modalidad punto a punto, cuya descarga de GNL se realiza por diferencia de presión entre la cisterna y el depósito, está constituida por un único depósito en acero inoxidable alrededor del cual se forra con espuma de poliuretano, por el exterior tiene un acabado con chapa de aluminio lacado (Sedigas, 2017). En

⁴³ Especificaciones técnicas de Sedigas para conductores de cisternas que realizan descargas de GNL, Unidad 4 - Transporte en cisternas, julio 2017.

la Figura 57 se muestra un plano de una cisterna criogénica para transportar GNL.

Figura 57 Cisterna para GNL



Fuente: Sedigas

En la normativa peruana se usa el término camión tanque de GNL o vehículo transportador de GNL para referirse a las cisternas que abastecen GNL a las estaciones de servicio⁴⁴.

2.3.7. Tanque o depósito de almacenamiento de GNL

Según la NTP 111.032-1:2020 un tanque de almacenamiento de GNL es un recipiente criogénico estacionario utilizado para el almacenamiento de GNL.

De acuerdo a Sedigas⁴⁵ un depósito criogénico es un conjunto formado por el recipiente, aislamiento, envoltorio, soportes, equipos de puesta en presión, tuberías, valvulería, instrumentación y elementos de control que

⁴⁴ De acuerdo a la Norma Técnica Peruana NTP 111.032-1:2020 y Reglamento de Comercialización de Gas Natural Comprimido (GNC) y Gas Natural Licuefactado (GNL), aprobado con Decreto Supremo N° 057-2008-EM.

⁴⁵ Especificaciones técnicas de Sedigas para las actividades de Técnico de Plantas Satélite de GNL, Unidad 3 - Definiciones, febrero 2019.

forman un conjunto que almacena GNL, así también hace referencia al depósito fijo como un depósito de GNL que dispone de una conexión para su llenado *in situ*, que no requiere ser trasladado a una planta de llenado para su posterior retorno a la ubicación original de la instalación de GNL (Sedigas, 2019). En la Figura 58 se muestra un esquema de almacenamiento de GNL en una estación de servicio.

Figura 58 Tanque o depósito de almacenamiento de GNL



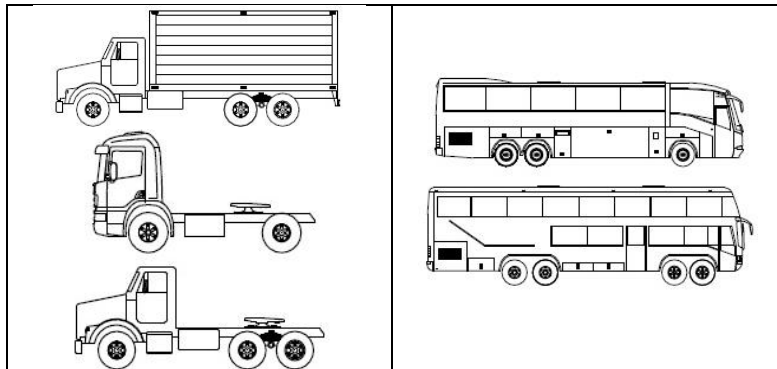
Fuente: Cryospain

2.3.8. Vehículo pesado

De acuerdo con la normativa peruana, un vehículo pesado se puede definir como un vehículo automotor comercial diseñado para el transporte de personas y mercancía de dos o más ejes como el ómnibus interurbano, camiones, remolcador o tracto camión⁴⁶, para la presente investigación no se considera a los remolques y semirremolques por ser vehículos no motorizados. En la Figura 59 se muestra de manera gráfica los tipos de vehículos pesados que hay en el país.

⁴⁶ Reglamento de Placa Única Nacional de Rodaje aprobado con Decreto Supremo N° 017-2008-MTC, Reglamento Nacional de Vehículos aprobado con Decreto Supremo N° 058-2003-MTC e Informe N° 021-04-GRE-OSITRAN del Organismo Supervisor de la Inversión en Infraestructura de Transporte de Uso Público.

Figura 59 Vehículos pesados de largo recorrido



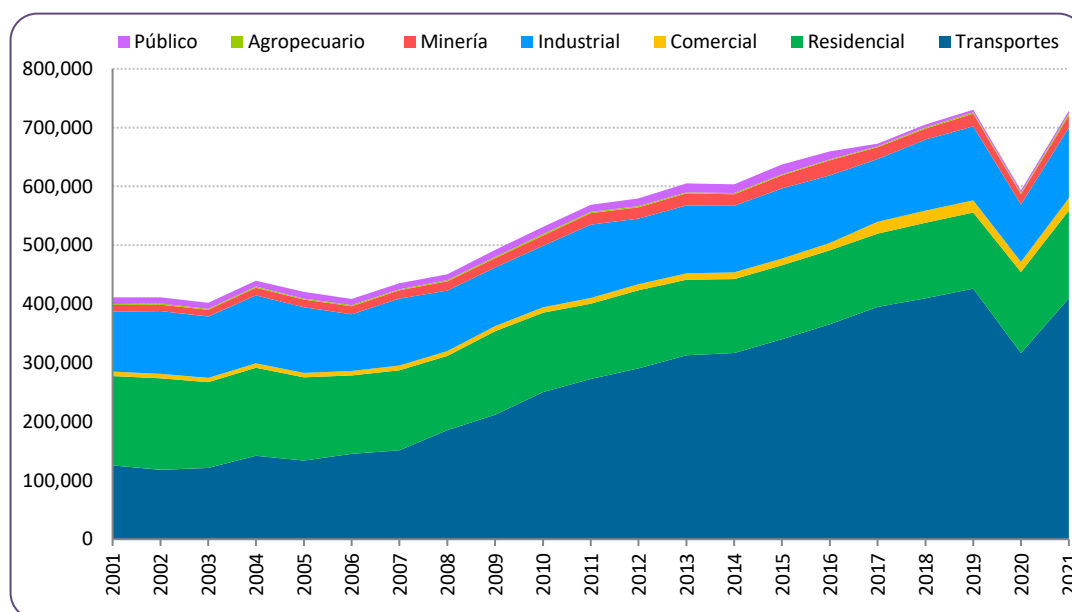
Fuente: Adaptado de Ministerio de Transporte y Comunicaciones (MTC)

CAPITULO III

DESARROLLO DEL TRABAJO DE INVESTIGACIÓN

El sector transporte es el sector de mayor consumo de energía, pasando de una participación del 30 % en el 2001 a un 56 % en el 2021 (409,538 TJ), como se observa en la Figura 60, además es el sector que presenta el mayor crecimiento sostenido. Cabe señalar que la caída en el consumo del año 2020 ocurrió a causa de la pandemia de la *covid-2019*.

Figura 60 Consumo de energía por sectores (TJ)



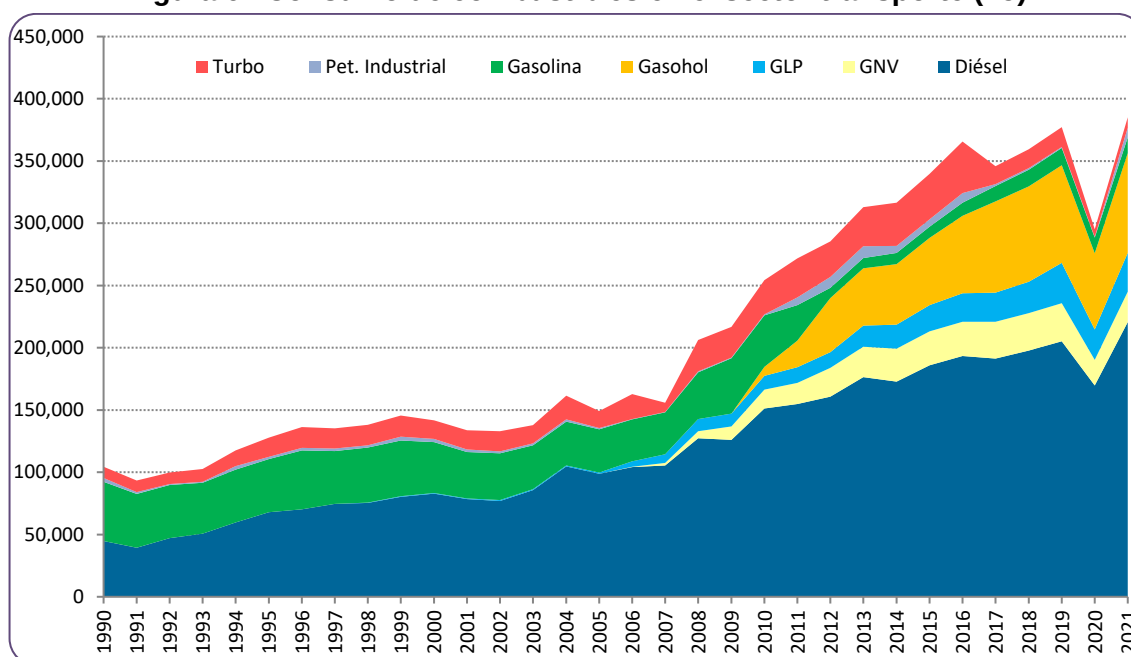
Fuente: INEI, Anuario de Estadísticas Ambientales 2023. Minem, Dirección General de Eficiencia Energética

TJ: Unidad de medida de energía (Terajoule)
Elaboración propia

Con relación al consumo de combustibles en el sector transporte, el diésel es el combustible de mayor consumo y crecimiento, alcanzando una participación promedio del 55 % durante la última década, mientras que el gas natural solo tuvo una penetración en el mercado vehicular de un 8 %, debido a que su uso actualmente

está orientado a los vehículos livianos, siendo sus competidores directos la gasolina, gasohol y el GLP, quienes representan en su conjunto el 30 % de consumo vehicular, tal como se puede apreciar en la Figura 61. De otro lado, el diésel al ser el único combustible que está orientado a los vehículos de largo recorrido como los ómnibus, camiones y remolcadores, es una oportunidad para que el gas natural ingrese en este nicho de mercado vehicular pesado, tal como se explicó en el capítulo anterior.

Figura 61 Consumo de combustibles en el sector transporte (TJ)

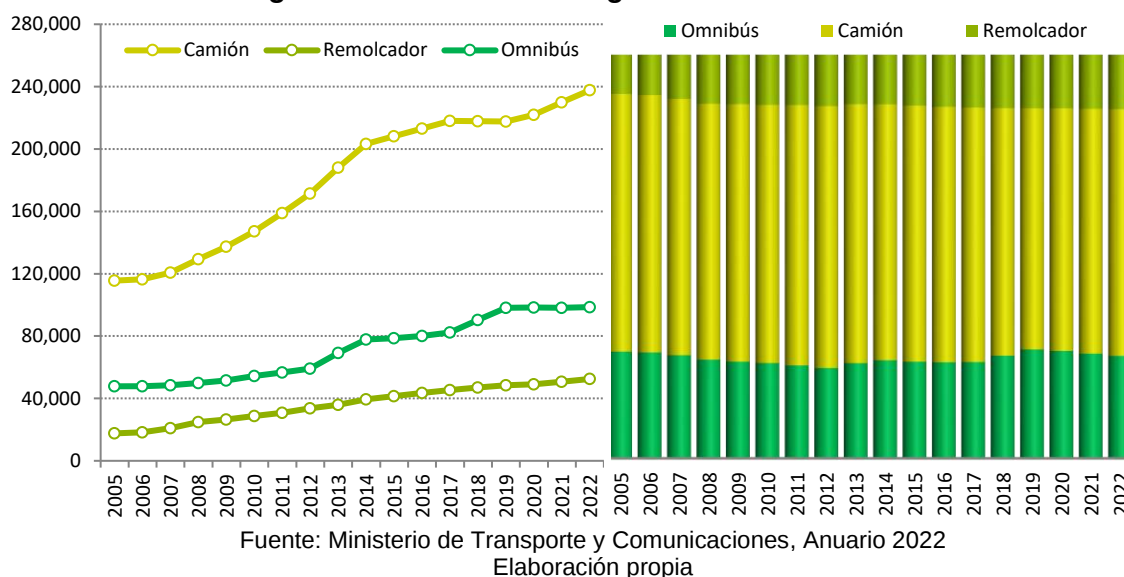


Fuente: INEI, Anuario de Estadísticas Ambientales 2023. Minem, Dirección General de Eficiencia Energética
Elaboración propia

3.1. PARQUE VEHICULAR DE TRANSPORTE DE LARGO RECORRIDO

Para el presente análisis se ha considerado a los vehículos de largo recorrido que consumen primordialmente el diésel, como los camiones, remolcadores y ómnibus. En la Figura 62 se muestra la evolución del número de vehículos desde el 2005 al 2022, donde se observa que la tasa de crecimiento promedio anual es de un 4 % para los camiones y ómnibus, y una tasa del 6 % para los remolcadores, asimismo, se tiene que los camiones representan alrededor del 60 % de los vehículos consumidores de diésel, seguido de los ómnibus con un 25 %.

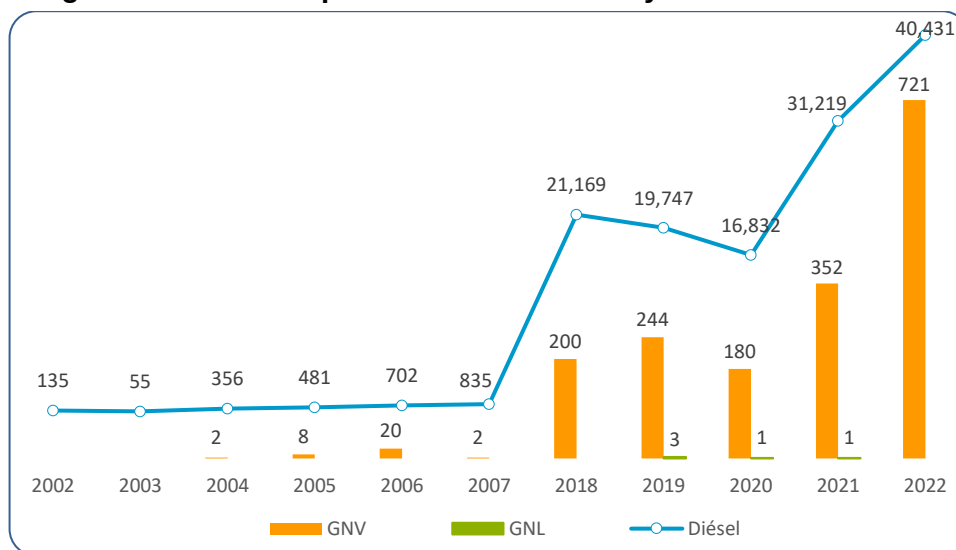
Figura 62 Vehículos de largo recorrido 2005 - 2022



Respecto al parque automotor correspondiente al 2022, un 26 % de los vehículos de carga (camión, remolcador, remolque y semirremolque) y un 43 % de los vehículos de transporte de pasajeros tienen una antigüedad de hasta 5 años y, los vehículos de más de 5 años de antigüedad corresponden en su mayoría a una estándar Euro II y Euro III, siendo esta una oportunidad para renovar las flotas antiguas por vehículos que cumplan con una emisión estándar más rigurosa como el Euro V o Euro VI. A modo de ejemplo, EEUU y Europa promueven los vehículos de GNL de emisión estándar como el Euro VI (Unión Europea) o el EPA 10 (Estados Unidos), debido a las bajas emisiones de contaminantes que emiten este tipo de vehículos.

En la Figura 63 se muestra el total de vehículos vigentes al 2022, según año de fabricación y consumo de aquellos combustibles relacionados con el presente estudio como el diésel y gas natural. Si consideramos este grupo de vehículos como el nicho de mercado para promover el uso del gas natural (GNV o GNL), se puede observar que el gas natural representa solo el 1.3 %; sin embargo, como se explicó en capítulos anteriores el GNV está orientado a vehículos livianos o vehículos pesados de corto recorrido, lo cual significa que el GNL tiene un gran nicho de mercado para incursionar, siempre y cuando se den las condiciones de infraestructura como la red de abastecimiento de GNL. Al 2022 en el país hay 5 vehículos que operan a GNL, que pertenecen a las empresas fabricantes de vehículos como Scania del Perú S.A. y San Bartolomé S.A., y a la empresa de servicio de carga Transportes Dace E.I.R.L.

Figura 63 Vehículos por año de fabricación y uso de combustible



Fuente: Ministerio de Transporte y Comunicaciones, Acceso a la información 2023
Elaboración propia

3.1.1. Demanda de diésel vehicular al 2033

De acuerdo con la evolución histórica del consumo de diésel en los vehículos de largo recorrido, se observan incrementos constantes de crecimiento; sin embargo, es importante conocer la demanda futura para planificar y establecer o fortalecer políticas de Estado que permitan optimizar los recursos energéticos disponibles en el país a un costo eficiente. De otro lado, se debe tener en cuenta que un modelo de pronóstico de demanda vehicular permitirá identificar factores o variables que incidan en el consumo de diésel, y así entender el rol de los vehículos de largo recorrido en la dinámica de la economía.

Por lo tanto, para la presente investigación se ha realizado un pronóstico de consumo de diésel para los próximos diez años, que involucra a los vehículos como los camiones, remolcadores y ómnibus, que son consumidores prioritariamente de diésel, debido a que el mercado de los combustibles no dispone de un combustible alternativo para esta esta clase de vehículos.

Como modelo de pronóstico se aplica el Modelo Autorregresivo Integrado de Promedio Móvil (ARIMA), simulado en el software EViews. Dicho modelo ha sido utilizado para predecir el comportamiento de los combustibles, a modo

de ejemplo se cita los *Modelos de proyección de demanda de combustibles* de la Comisión Nacional de Energía (CNE) de Chile y la *Metodología y proyección de demanda de combustibles líquidos y GLP* de la Unidad de Planeación Minero Energética de Colombia.

Para la construcción del modelo econométrico se analizaron diversas variables económicas sectoriales (datos anuales desde 1989 al 2023) relacionadas con el consumo del diésel. En la Tabla 7 se muestra las variables que se estudiaron para el modelo con su correlación respectiva sobre el diésel, y en el Anexo 2 se muestra los gráficos de dispersión donde se observa con mayor detalle las relaciones de intensidad entre el diésel y las otras variables.

Tabla 7 Correlación de variables

	PBI Construcción	PBI Comercio	PBI Agropecuaria	PBI Electricidad y agua	PBI Hidrocarburos	PBI Manufactura
Diésel (TJ)	0.980838	0.987386	0.981409	0.988091	0.547888	0.949037

	PBI Minería	PBI Percápita	PBI Pesca	PBI Servicio	Tipo de cambio	WTI
Diésel (TJ)	0.944078	0.969163	0.768415	0.985635	0.623995	0.695912

Fuente: BCRP e INEI
Elaboración propia

Se aplicó la prueba de raíz unitaria de Dickey-Fuller para determinar la no estacionariedad de las variables exógenas del modelo econométrico. La elección del modelo tuvo como base los criterios de Akaike y Schwarz, y la prueba de Durbin-Watson, tal como se muestran en la Figura 64, donde se observa que algunas variables exógenas previamente seleccionadas al no presentar significancia para el modelo no fueron consideradas. Para el caso del tipo de cambio monetario y el precio internacional no tendría un impacto en el consumo del diésel debido que este combustible aún no tiene un sustituto en el mercado de combustibles.

Figura 64 Modelo econométrico de consumo de diésel

Dependent Variable: D(D(DIESEL))				
Method: ARMA Maximum Likelihood (BFGS)				
Date: 05/01/24 Time: 21:27				
Sample: 1991 2023				
Included observations: 33				
Convergence achieved after 9 iterations				
Coefficient covariance computed using outer product of gradients				
Variable	Coefficient	Std. Error	t-Statistic	Prob.
D(COMERCIOF(-1))	-2.333941	0.310767	-7.510251	0.0000
D(PESCAF(-1))	-10.10700	2.593298	-3.897353	0.0006
D(MINERIAF)	1.009699	0.223145	4.524863	0.0001
D(CONSTRUCCIF)	2.785645	0.356512	7.813598	0.0000
AR(2)	-0.793355	0.163620	-4.848768	0.0001
AR(1)	-0.664808	0.157751	-4.214293	0.0003
SIGMASQ	27049437	10242332	2.640945	0.0138
R-squared	0.877999	Mean dependent var	-456.6683	
Adjusted R-squared	0.849845	S.D. dependent var	15120.98	
S.E. of regression	5859.350	Akaike info criterion	20.43994	
Sum squared resid	8.93E+08	Schwarz criterion	20.75738	
Log likelihood	-330.2590	Hannan-Quinn criter.	20.54675	
Durbin-Watson stat	1.865453			

Fuente: Modelo elaborado en EViews
Elaboración propia

En la Figura 65 se muestra la ecuación del modelo econométrico, donde se observa que los sectores de construcción, comercio, pesca y minería presentan una significancia que explican el comportamiento de la demanda del diésel a través de su historia.

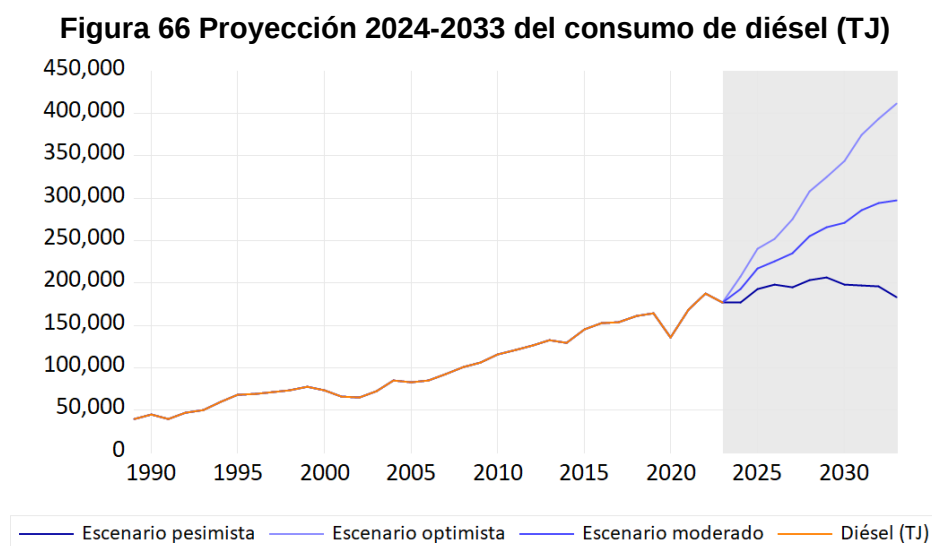
Figura 65 Ecuación del modelo econométrico

$D(D(DIESEL)) = -2.33394124183 \cdot D(COMERCIOF(-1)) - 10.1069988753 \cdot D(PESCAF(-1)) + 1.00969874659 \cdot D(MINERIAF) + 2.785645265 \cdot D(CONSTRUCCIF) + [AR(2)=-0.793355423615, AR(1)=-0.66480849826, UNCOND, ESTSMPL="1991 2023"]$

Fuente: Modelo elaborado en EViews
Elaboración propia

Como resultado del *forecast* o estimación del modelo econométrico para la demanda del diésel, que se muestra en la Figura 66, para el periodo comprendido entre el año 2024 y 2033, se tiene múltiples escenarios de ocurrencia; sin embargo, para efectos prácticos del trabajo de investigación se resaltará solo el escenario más probable (moderado) y los escenarios de

menos probabilidad (optimista y pesimista). En el Anexo 3 se muestra mayor detalle de los resultados del pronóstico del modelo.



Fuente: Modelo elaborado en EViews
Elaboración propia

Para distribuir el consumo de diésel (Terajoule - TJ), según la clase de vehículo de transporte de carga y de pasajeros, se consideró el consumo de energía neta en el sector transporte elaborado en el Balance Nacional de Energía Útil 1998 del Ministerio de Energía y Minas, y el número de vehículos de largo recorrido correspondiente al año 1998 reportado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), de acuerdo con la Tabla 8. En el Anexo 1 se muestra mayor detalle de la conversión de energía.

Tabla 8 Consumo promedio de energía por vehículo pesado

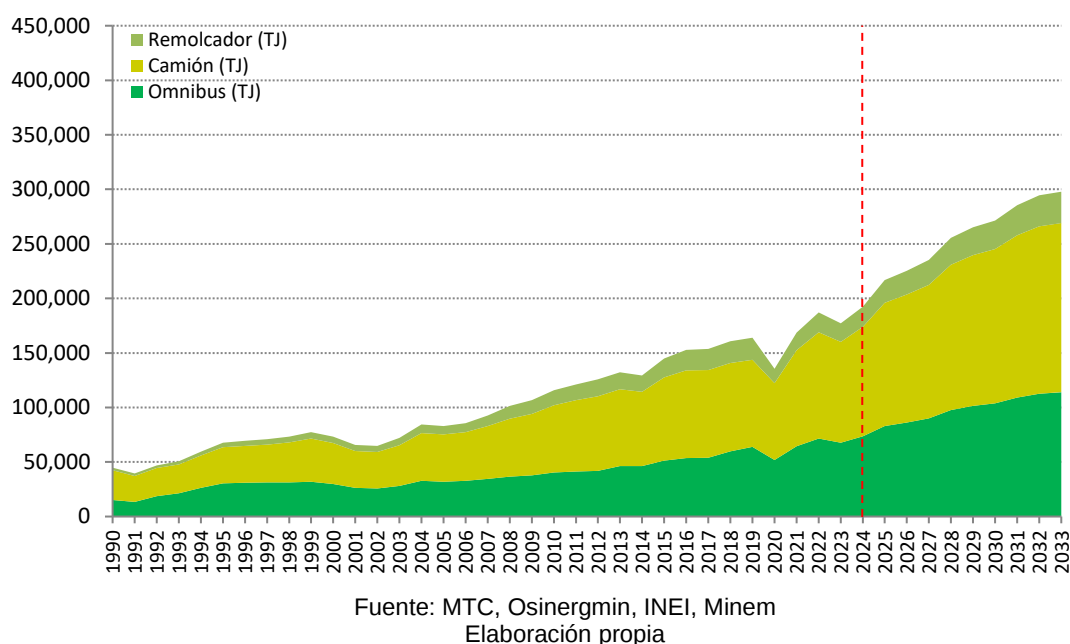
	Camión	Remolcador	Ómnibus
N° de vehículos	91,380	11,423	43,366
Energía TJ	31,320	4,489	26,443
TJ/Und	0.34	0.39	0.61

Fuente: Minem, Balance Nacional de Energía Útil 1998
Elaboración propia

En la Figura 67 se muestra los datos históricos y la demanda futura de diésel para el 2033, por tipo de vehículo, en base a un escenario de mayor

probabilidad de ocurrencia, donde se observa que para el 2033 el consumo de diésel se podría incrementar a razón de una tasa de crecimiento anual de 4 % desde el 2024. Esto podría generar un impacto económico para el país, sino se promueve el uso de un combustible alternativo, debido a que el diésel es un combustible subsidiado por el Estado.

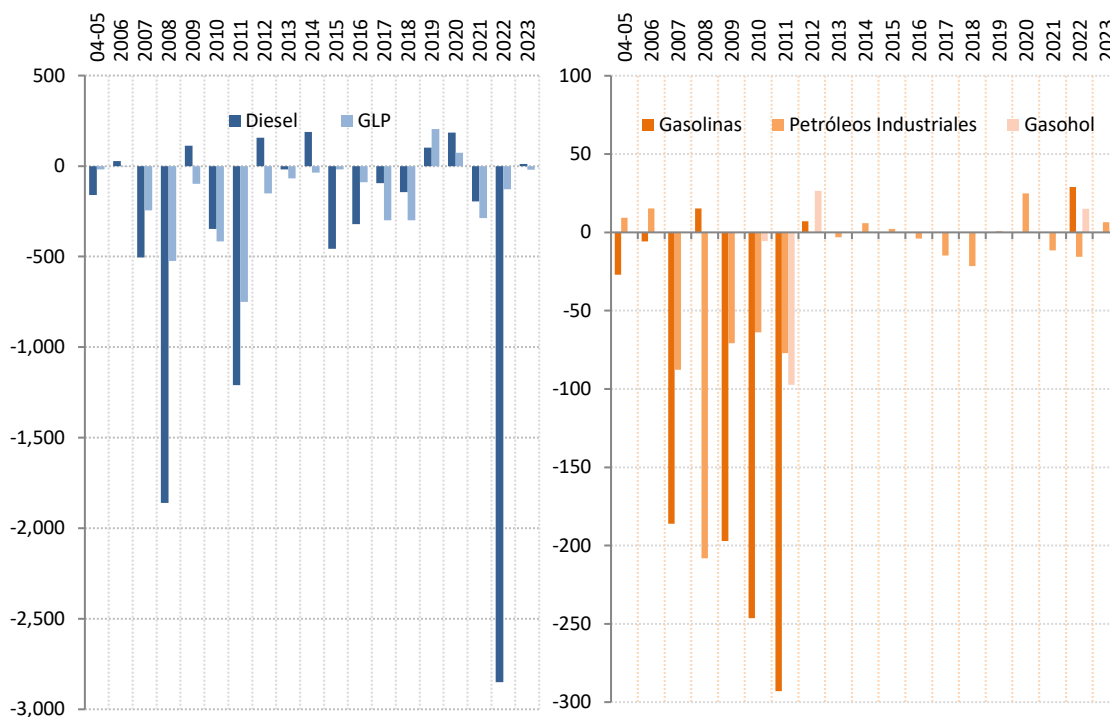
Figura 67 Consumo de diésel (TJ) de vehículos de largo recorrido



3.2. EL FEPC Y SU IMPACTO ECONÓMICO

El Fondo para la Estabilización de Precios de los Combustibles Derivados del Petróleo (FEPC) se creó mediante el Decreto de Urgencia N° 010-2004, como un fondo intangible destinado a evitar que la alta volatilidad de los precios del petróleo crudo y sus derivados se traslade a los consumidores. La operación del FEPC consiste en los aportes (a cargo de productores e importadores), si el precio de paridad de importación (PPI) del producto afecto por el FEPC está por debajo de la banda de precios, y compensaciones (a cargo del Estado) si el PPI está por encima de dicha banda. En la Figura 68 se muestra las aportaciones y compensaciones generadas según el tipo de combustible, desde la vigencia del FEPC hasta setiembre del 2023. Se puede observar que el diésel es el combustible que más gastos viene generando al Estado.

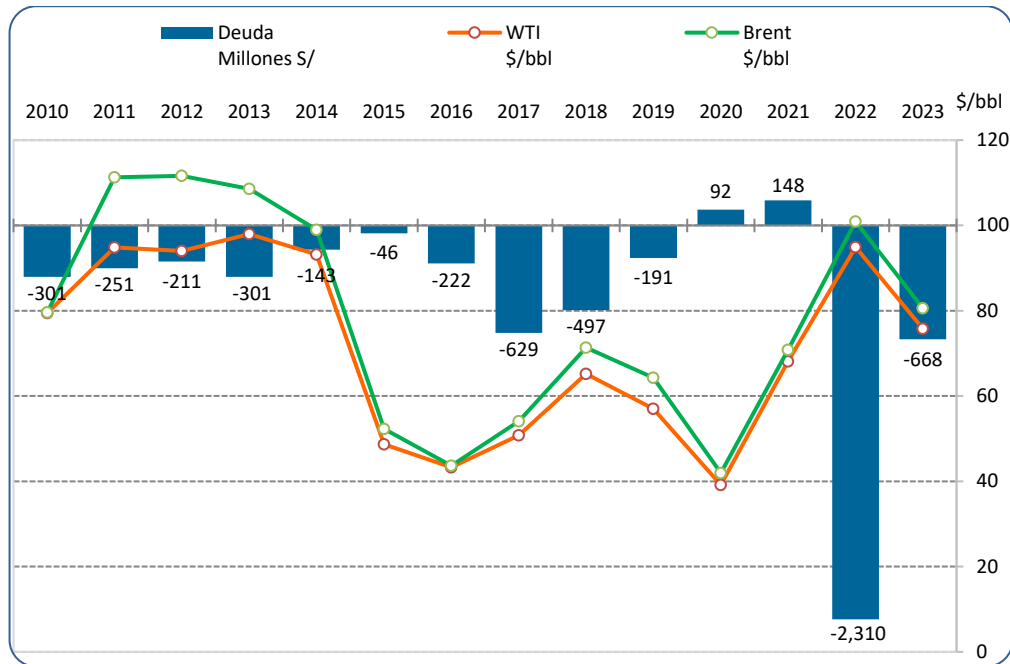
Figura 68 Saldo FEPC por tipo de combustible en millones de soles



Fuente: Minem – DGH
Elaboración propia

Si bien el FEPC tiene como objetivo estabilizar los precios para el consumidor final, lo cierto es que viene generando deudas al Tesoro Público, debido al comportamiento impredecible del precio internacional del petróleo. En la Figura 69 se observa la deuda acumulada, teniendo para el año 2022 una deuda máxima acumulada de S/ 2310 millones, la cual se fue pagada progresivamente a través del Tesoro Público, por lo que al 2023 se tuvo una deuda acumulada de S/ 668 millones. Por otro lado, se observa que a pesar de que el precio internacional del petróleo ha bajado alrededor de 40 \$/bbl, esto no ha tenido mayor impacto en la disminución de la deuda.

Figura 69 Deuda pública acumulada - FEPC

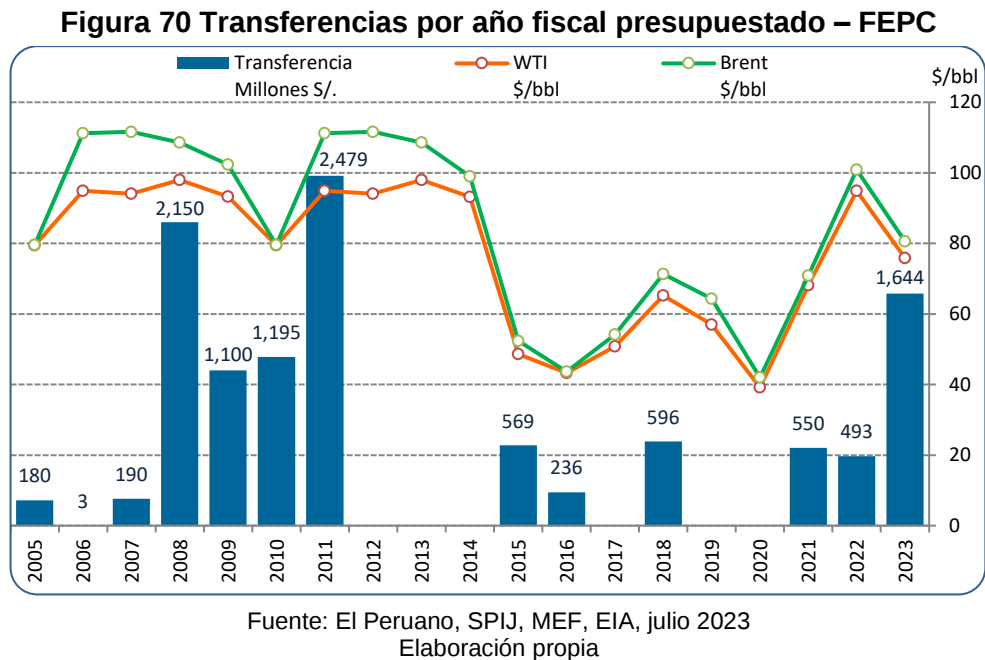


Fuente: Minem – DGH, julio del 2023
Elaboración propia

El FEPC inició sus operaciones en octubre de 2004 y desde entonces el Estado viene transfiriendo recursos económicos mediante Decretos de Urgencia y Decretos Supremos, debido al impacto de la volatilidad del precio internacional del petróleo en sus combustibles derivados. Está claro que, pese a la penetración del gas natural como sustituto del GLP, gasolinas y gasoholes, nuestro país aún es altamente dependiente de los combustibles derivados del petróleo, en especial del diésel que es un combustible usado ampliamente en el transporte y en un menor grado en las generadoras eléctricas. Según Energy Information Administration⁴⁷ de Estados Unidos el precio del petróleo estaría cercana a valores próximos a los 80 \$/bbl para el año 2024 y 2025, lo que implicaría, en caso no se tomen medidas que cambien la dependencia del diésel, el Estado seguirá destinando recursos al FEPC para subsidiar los combustibles. En la Figura 70 se puede ver que a julio del 2023 el Estado, a través del Ministerio de Economía y Finanzas, el Estado ha transferido al FEPC S/ 11,385 millones para subsidiar el consumo de los combustibles, asimismo,

⁴⁷ Artículo de Energy Information Administration «STEO Between the Lines: What is the outlook for crude oil prices in 2024 and 2025?», publicado el 6 de febrero del 2024.

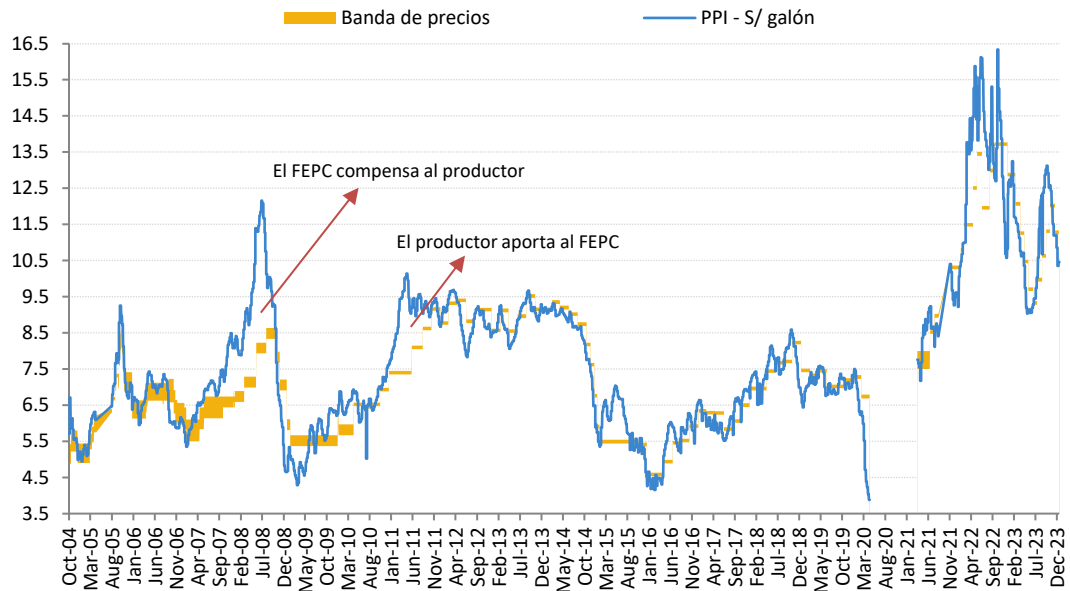
se puede observar que el monto de las transferencias de recursos al FEPC están supeditadas a la volatilidad del precio internacional del petróleo.



3.2.1. Análisis del diésel como combustible vehicular en el FEPC

En la Figura 71 se muestra la aplicación del FEPC para el diésel de bajo azufre para uso vehicular, para el caso de los productores (conocido en la actualidad como diésel B5 UV $0 < S < 2500$ ppm). Se observa que, desde octubre de 2004 a diciembre del 2023, a precios diarios, el PPI ha sufrido fluctuaciones que van desde los 3.88 S/galón hasta los 16.34 S/galón, asimismo, se observa que las bandas de precios (precio de límite inferior y superior) se han acortado y ajustado de una forma más rápida a la volatilidad del PPI; sin embargo, al aplicar los factores de compensación y aportación respecto a los límite superior e inferior de la banda de precios, el monto a ser compensado al productor es mucho mayor a lo que el productor puede aportar el FEPC. De otro lado, desde el 28 de abril de 2020 al 29 de marzo del 2021, el diésel vehicular fue retirado del FEPC; pero fue reincorporado al FEPC, tras un acuerdo con los transportistas, debido a las quejas por los precios superiores del diésel en comparación a cuando pertenecían al FEPC.

Figura 71 Factores de aportación y compensación para el diésel (S/galón)



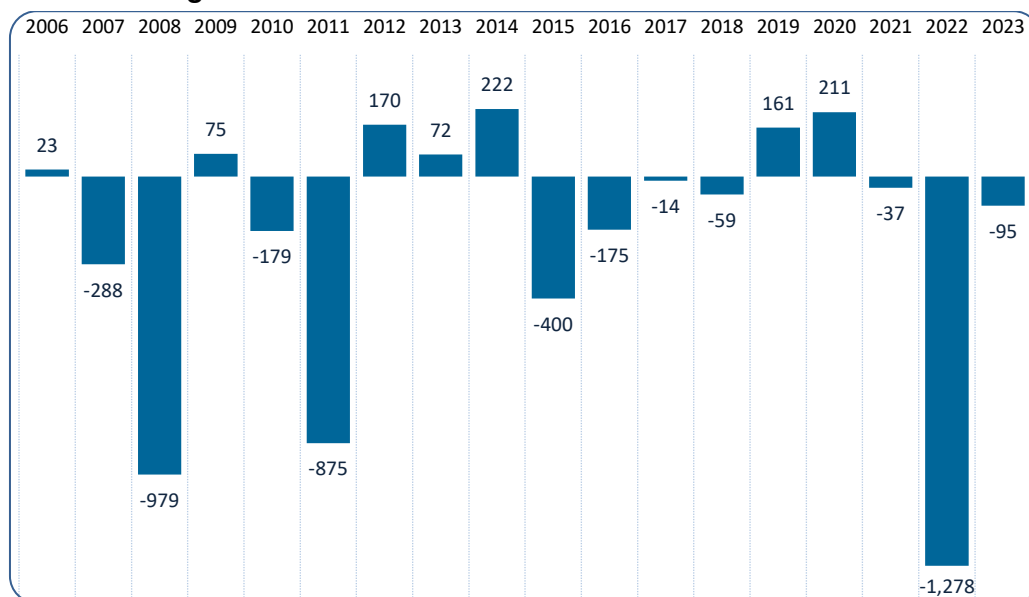
Fuente: Minem - DGH, 2023
Elaboración propia

A modo de ejemplo práctico, en la Figura 72 se muestra el saldo aproximado por año respecto al diésel de uso vehicular, para el caso de los productores (diésel B5 UV 0 < S < 2500 ppm) desde el año 2006 a diciembre de 2023. Para este ejemplo se ha considerado la venta de diésel vehicular de bajo azufre por día, tomado del Sistema de Control de Órdenes de Pedido (SCOP) del Osinergmin (galones/día), multiplicado por el factor de aporte o compensación, según corresponda, teniendo como resultado el monto neto a compensar al productor o de aportación al FEPC, según la formula siguiente:

$$[\text{Diésel}_{\text{Galones}}] * \left[\frac{\text{FA}_{\text{Soles}}}{\text{Galón}} + \frac{\text{FC}_{\text{Soles}}}{\text{Galón}} \right]$$

Se puede ver que las compensaciones a los productores fueron mayores a las aportaciones que estos realizaron al FEPC, generándose una deuda para el Estado. En este ejemplo, desde el 2006 al 2023 el FEPC habría destinado un saldo neto de S/ 3444.3 millones a los productores solo por el diésel vehicular de bajo azufre.

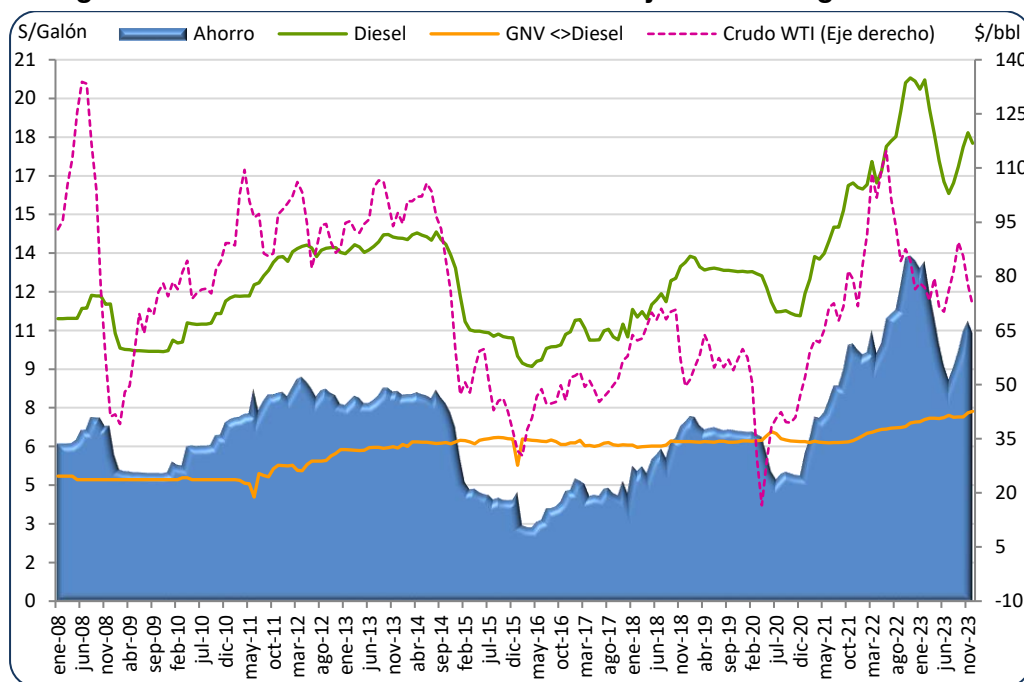
Figura 72 Diésel vehicular – Saldo en millones de soles



Fuente: Minem, Osinergmin – SCOP, 2023
Elaboración propia

Desde que el gas natural vehicular (en su forma gaseosa) está disponible en el mercado peruano, su uso está orientado básicamente a los vehículos livianos y vehículos pesados de corto recorrido como los camiones recolectores de basura, los buses del Metropolitano, entre otros; sin embargo, es importante analizar bajo el escenario actual los precios del gas natural y el diésel, debido a que el precio es uno de los factores decisores para la compra de determinados vehículos. En la Figura 73 se muestra la competitividad económica del gas natural respecto del diésel, para lo cual se ha analizado datos mensuales desde enero del 2008 a diciembre del 2023, donde se puede observar que si el transportista hubiera reemplazado el diésel por el gas natural habría obtenido un ahorro promedio del 47 %, asimismo, se puede ver que el precio del diésel en nuestro país, a pesar de estar dentro del FEPC, está fuertemente correlacionado con el precio internacional del petróleo, lo cual ha conllevado a continuos gastos de subsidio por parte del Estado. Por otro lado, tengamos en cuenta de que el Perú posee yacimientos de gas natural, por lo que el costo de este combustible en comparación al diésel debería ser competitivo. En los siguientes capítulos se analizarán los costos que determinarán el precio del gas natural licuado (GNL) en el mercado sin intervención económica por parte del Estado, y evaluar su competitividad económica frente el diésel.

Figura 73 Combustible vehicular: diésel bajo azufre vs gas natural



Fuente: Osinergmin, COES, Contrato de Suministro de GNL, OLADE, Perupetro
Elaboración propia

3.3. EMISIONES DE CONTAMINANTES

En el Perú los mayores contaminantes del aire están conformadas por las emisiones de dióxido de carbono (CO_2) y monóxido de carbono (CO) como se puede observar en la Figura 74.a. Asimismo, en la Figura 74.b se puede observar que el sector transporte es uno de los principales responsables de dichas emisiones, teniendo una participación promedio del 79 % en el óxido nitroso (N_2O), 65 % en el CO_2 , 20 % en el CO , 19 % en el metano (CH_4), 15 % en el dióxido de azufre (SO_2) y 7% en las partículas.

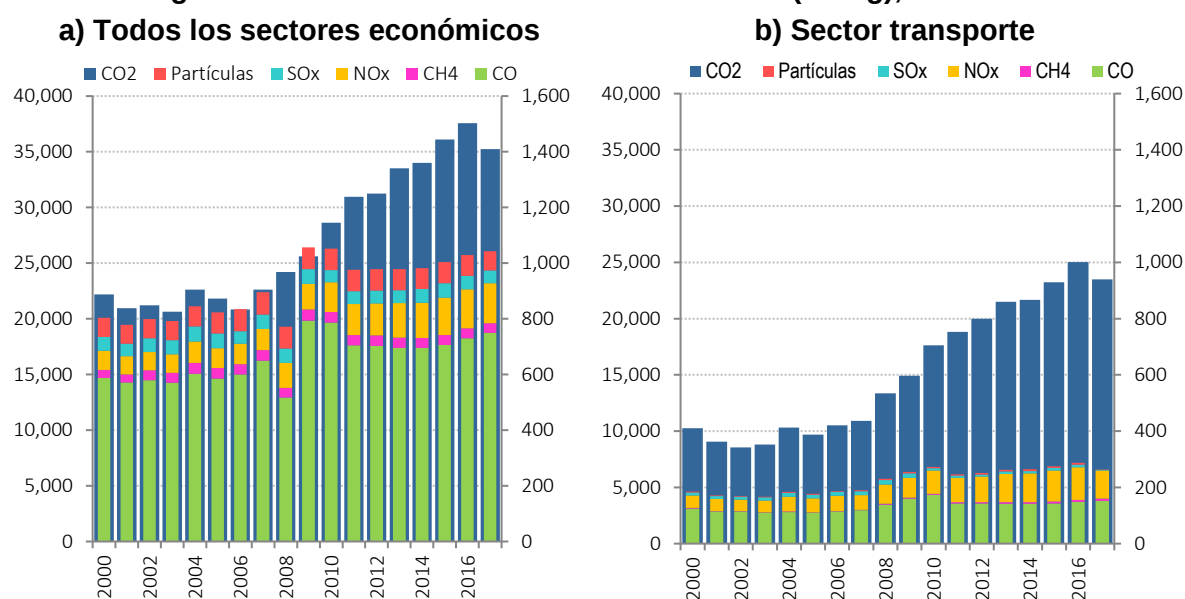
Por otro lado, el Ministerio de Energía y Minas en su Balance Nacional de Energía del 2021, ha realizado un comparativo en las emisiones de los combustibles para el transporte terrestre. En la Tabla 9, se muestra las emisiones para el diésel B5 y el gas natural, donde se puede apreciar que el gas natural genera menos contaminación respecto al N_2O y CO_2 .

Tabla 9 Emisiones generadas por el transporte terrestre - 2021

10 ⁶ kg	N ₂ O	CH ₄	CO ₂
Diesel B5	0.85	0.85	15,349.0
GN	0.07	2.25	1,379.4

Fuente: Minem, Balance Nacional de Energía 2021
Elaboración propia

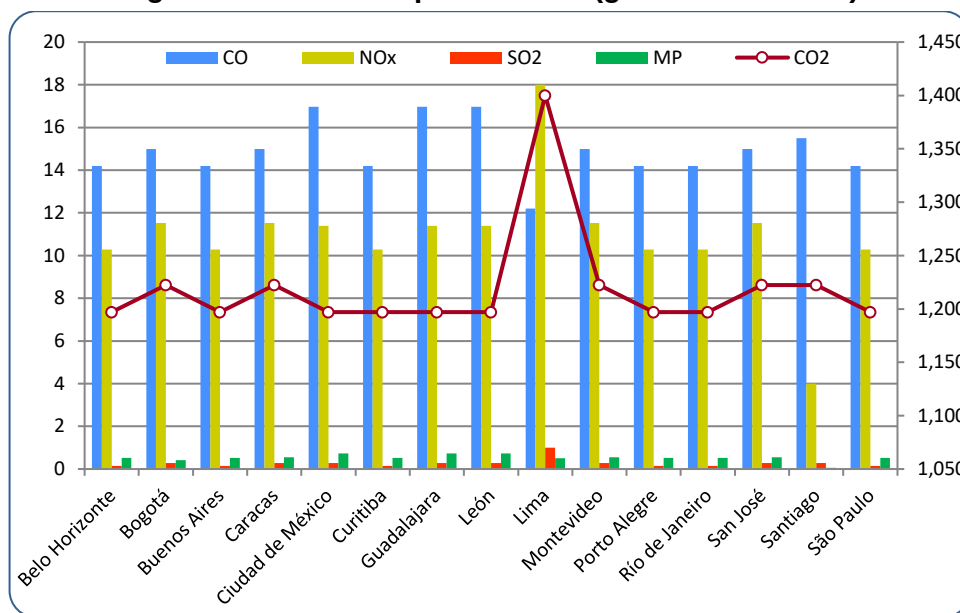
Figura 74 Evolución de las emisiones anuales (10⁶ kg), 2000 - 2017



Nota: CO₂ se mide en el eje izquierdo del gráfico
Fuente: INEI, Anuario de Estadísticas Ambientales, 2023
Elaboración propia

De acuerdo con los datos publicados por el CAF (Development Bank of Latin America) con relación al informe del Observatorio de la Movilidad Urbana 2007, donde se registra las emisiones contaminantes por tipo de combustible, se aprecia que el diésel en nuestro país (Lima como punto referencial) presenta mayores contaminantes respecto del CO₂, NO_x y el SO_x en comparación con otras ciudades Latinoamericanas, tal como se muestra en la siguiente Figura 75.

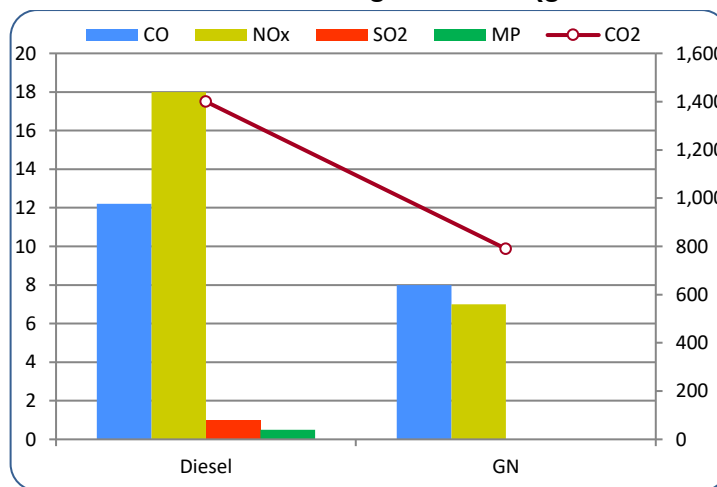
Figura 75 Emisiones por el diésel (gramos/kilómetro)



Fuente: CAF, 2015
Elaboración propia

Por otro lado, el Informe demuestra que el gas natural es un combustible menos contaminante que el diésel, que es el combustible que se usa en el transporte de carga. En la Figura 76 se puede ver que el gas natural en comparación al diésel no emite SO_2 , emite menos del 96 % de partículas, 44 % menos de CO_2 , 34 % menos de CO y 61 % menos de NO_x .

Figura 76 Emisiones diésel vs gas natural (gramos/kilómetro)



Fuente: CAF, 2015
Elaboración propia

De lo expuesto, el sector transporte al ser uno de los sectores que genera emisiones contaminantes, necesita una reforma estructural respecto al consumo de combustibles para disminuir las emisiones contaminantes que afectan la calidad de vida. Una vía alterna es extender el gas natural a los vehículos de recorrido de larga distancia, debido a que el gas natural está compuesto básicamente de metano (CH_4) mientras que el diésel está compuesto por un complejo hidrocarburo ($\text{C}_{14}\text{H}_{30}$) (Cummins Westport, 2011).

3.4. VEHÍCULOS PESADOS EN EL PERÚ

En esta sección se determinará las características que debe tener un vehículo pesado de GNL para un recorrido de larga distancia en nuestro país, debido a que los recorridos mínimos deben ser interdepartamentales, pues de esta manera se justifica el uso del GNL como combustible. Según Andy Douglas (Gerente Nacional de Ventas de Kenworth) manifiesta que «En general, si tu rango de operación está por encima de 400 millas, usualmente es mejor usar GNL, por debajo de 400 millas, el uso de GNC puede ser la mejor opción». Esto por el tema de costos, debido a que un vehículo a GNL tiene un mayor costo que un vehículo de gas natural comprimido (GNC) y por lo tanto no se debería incurrir en costos innecesarios por parte de los operadores (Kenworth, 2015).

3.4.1. Características de los vehículos pesados en el Perú

De acuerdo con el Ministerio de Transporte y comunicaciones (MTC) los vehículos pesados incluyen principalmente a los camiones, remolques y semirremolques para el transporte de mercancía y a los buses para el transporte de pasajeros interdepartamentales⁴⁸.

⁴⁸ Según el Reglamento Nacional de Vehículos aprobado mediante el Decreto Supremo N° 058-2003-MTC, la categoría L (vehículo con menos de cuatro ruedas) y M1 (vehículo de cuatro ruedas para el transporte de pasajeros con ocho asientos o menos) corresponde a los vehículos ligeros, la categoría M (con excepción de la M1), N (vehículo de cuatro ruedas o más para el transporte de mercancías), O (remolques y semirremolques) y S (combinaciones especiales de los M, N y O) corresponde a los vehículos pesados. Por otro lado, según el Manual de Carreteras-Diseño Geométrico DG 2018, aprobado con Resolución Directoral N° 03-2018-MTC/14, los vehículos de pasajeros están compuestos por el jeep o auto o bus (B2, B3, B4 y BA) o camión C2, mientras que los vehículos de carga están compuestos por el pick-up (equivalente a remolque simple T2S1) o camión C2 o camión C3 y C2CR o T3S2.

Para determinar las principales características de los vehículos pesados se ha revisado las fichas técnicas de los vehículos de mayor demanda en el país durante la última década⁴⁹, de los cuales se ha seleccionado aquellos vehículos de mayor potencia a fin de realizar largos recorridos que cubran rutas de los ejes transversales a la costa peruana, para mayor detalle ver el Anexo 4. En la Tabla 10 y 11 se muestra las características esenciales de los vehículos pesados del parque automotor peruano, donde el cálculo del rendimiento se obtuvo del consumo promedio óptimo de combustible cada 100 km, obtenidos en los últimos cuatro «Green Truck Award». Sin embargo, de acuerdo con la Guía de Orientación del Uso Eficiente de la Energía y de Diagnóstico Energético del Minem, se tiene un rendimiento promedio de 30 km/galón. Por otro lado, de acuerdo con la información de algunos operadores de carga pesada se tiene un rendimiento promedio de 8 km/galón.

Tabla 10 Característica del vehículo pesado de carga en el Perú

	Combustible	Diésel
	Volumen barrido	12.7 a 12.8 litros
	Cilindros	En línea 6
	Cabezas de cilindro	6
	Válvulas por cilindro	4
	Diámetro x recorrido	130x160 mm
	Ratio de compresión	18:1
	Potencia máxima	370 a 400 hp
	Torque máximo	2000 Nm
	Capacidad de tanque	162 a 240 galones
	Rendimiento	15 km/galón
	Viaje de ida y vuelta	696 a 960 km
	Emisiones	Euro 3 a 5

Fuente: Varios
Elaboración propia

⁴⁹ Según el MTC las marcas de vehículos de mayor demanda durante la última década para el transporte de pasajeros son Mercedes Benz, Scania, Hyundai y Volvo y, para los vehículos de carga son Volvo, Hyundai, Mitsubishi, Hino, International, Isuzu, Freightliner, Mercedes Benz, Jac y Scania.

Tabla 11 Característica del vehículo pesado de pasajeros en el Perú

	Combustible	Diésel
	Volumen barrido	10.8 a 13 litros
	Cilindros	En línea 6
	Cabezas de cilindro	6
	Válvulas por cilindro	4
	Potencia máxima	360 a 410 hp
	Torque máximo	2250 Nm
	Capacidad de tanque	162 a 240 galones
	Rendimiento	20 km/galón
	Viaje de ida y vuelta	696 a 960 km
	Emisiones	Euro 3 a 5

Fuente: Varios
Elaboración propia

3.4.2. Rutas de recorrido de los vehículos pesados en el Perú

Del análisis del transporte de carga en la Red Vial Nacional elaborado por el Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC) basado en el flujo de vehículos que determinan las rutas de mayor demanda y la identificación de los nodos y corredores logísticos⁵⁰, se ha identificado las principales ciudades y rutas, teniendo en cuenta que el objetivo de la red de abastecimiento de gas natural licuado (GNL), es decir rutas de grandes distancias que justifiquen el uso del GNL en los vehículos pesados.

En la Tabla 12 se muestra las rutas de un viaje de ida y vuelta entre las ciudades principales que demandan grandes distancias, donde se observa que las rutas Lambayeque -Tumbes, Lambayeque - Moyobamba, Lima - Tingo María, Lima - Ayacucho y Nazca - Ayacucho son las rutas de mayor distancia y por lo tanto requieren de un vehículo con gran autonomía vehicular.

⁵⁰ Plan de Desarrollo de los Servicios Logísticos de Transporte Plan de Mediano y Largo Plazo (PMLP), elaborado por Advanced Logistics Group en agosto de 2014 para el MTC y el Banco Interamericano de Desarrollo.

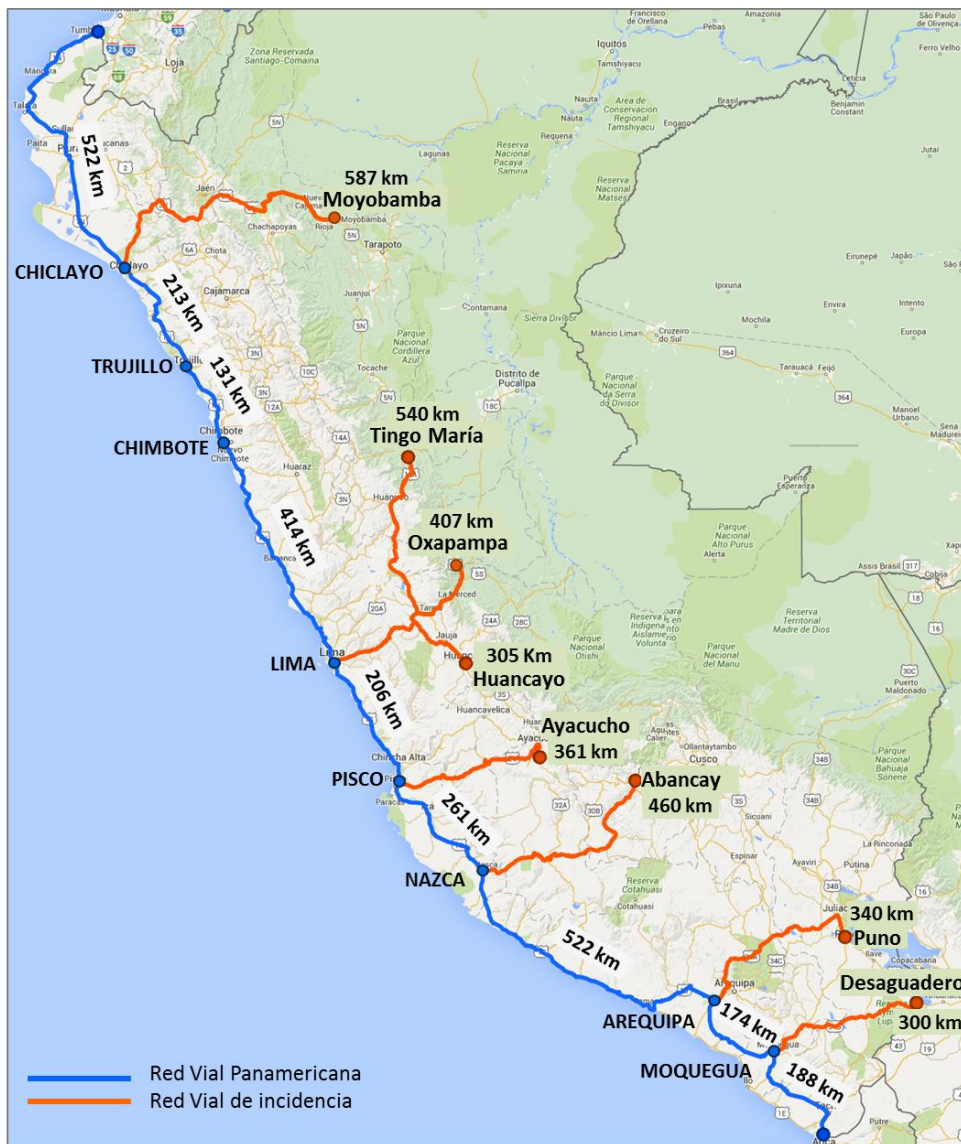
Tabla 12 Ejes transversales a la Carretera Longitudinal de la Costa

Ruta		Viaje ida y vuelta (km)
Chiclayo	Tumbes	996
Chiclayo	Moyobamba	1188
Lima	Tingo María	1080
Lima	Oxapampa	814
Lima	Huancayo	608
Lima	Ayacucho	1134
Nazca	Ayacucho	1244
Nazca	Abancay	924
Arequipa	Puno	586
Arequipa	Desaguadero	948
Arequipa	Tacna	738

Fuente: Google Earth
Elaboración propia

En la Figura 77 se muestra las distancias de las rutas viales de mayor flujo vehicular del transporte pesado, se ha omitido las distancias pequeñas, puesto que no es una barrera en la autonomía de un vehículo a GNL. Se puede observar que las distancias entre las principales ciudades ubicadas a lo largo de la Carretera Longitudinal de la Costa, no representa ningún inconveniente para el tránsito de vehículos pesados debido a la gran autonomía vehicular que poseen estos vehículos. De otro lado, se puede observar que los vehículos pesados que transitan a través de los ejes transversales a la Carretera Longitudinal se pueden beneficiar de la red de abastecimiento de GNL; sin embargo, es importante identificar las distancias máximas respecto de las principales ciudades de la costa para conocer la mínima autonomía que deben tener los vehículos pesados que transitan por estas rutas.

Figura 77 Rutas transitadas por los vehículos pesados



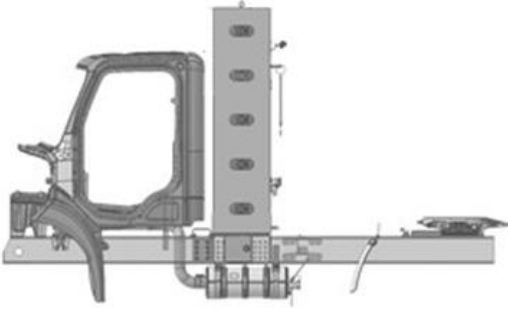
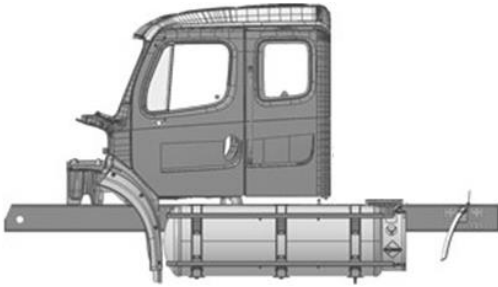
Fuente: MTC y Google Earth
Elaboración propia

3.4.3. Características del vehículo a GNL

Como se ha explicado en capítulos anteriores el gas natural vehicular (GNV) y el gas natural licuado (GNL) pueden ser usados como combustible en los vehículos pesados; sin embargo, el GNL está orientado a vehículos pesados de recorridos de larga distancia, es decir recorridos interdepartamentales, gracias a que el tanque de combustible del GNL permite almacenar mayor volumen de gas natural, otorgándole un menor peso en comparación al cilindro de GNV, y en consecuencia proporciona al vehículo

una mayor autonomía y rendimiento. Por el contrario, se recomienda el GNV a los vehículos que realizan recorridos intradepartamentales, puesto que se requiere menor potencia y autonomía vehicular. En la Figura 78 se muestra una comparación entre los tanques de combustibles del GNV y GNL.

Figura 78 Tanque de combustible de GNV y GNL

Vehículo a GNV	Vehículo a GNL
	
El tanque de combustible ocupa un volumen de 5 veces el diésel para generar el mismo poder calórico. Esto implica que el vehículo carga un mayor peso.	El tanque de combustible ocupa un volumen de 1.8 veces el diésel para generar el mismo poder calórico.

Fuente: Minem, Olade, LNG Blue Corridors
Elaboración propia

De otro lado, se ha analizado los vehículos de carga de GNL que actualmente existen en el mercado y se ha seleccionado un grupo de vehículos cuya característica es similar al desempeño de los vehículos pesados en el Perú (ver Anexo 5). Un vehículo pesado de 300 galones de GNL tiene una autonomía de 1341 km (ITS-UC Davis, 2013) a 1500 km (Chart Ferox, 2014). En la Tabla 13 se muestra las características de un vehículo pesado a GNL para las rutas de gran distancia en nuestro país.

Tabla 13 Característica del vehículo de carga a GNL para Perú

	Combustible	GNL
	Volumen barrido	11.9 litros
	Cilindros	En línea 6
	Cabezas de cilindro	6
	Válvulas por cilindro	4

	Diámetro x recorrido	130x150 mm
	Ratio de compresión	18:1
	Potencia máxima	400 hp
	Torque máximo	1898 Nm
	Capacidad de tanque	300 galones
	Viaje de ida y vuelta	1341 a 1500 km
	Emisiones	EPA 10

Fuente: Varios
Elaboración propia

En la Tabla 14 se muestra el volumen de GNL requerido como combustible para realizar un viaje de ida y vuelta por el vehículo de carga, para ello se ha considerado el estudio de ITS-UC Davis, debido a que nos da una menor autonomía para un volumen de 300 galones de GNL, y como se puede observar, con un vehículo a GNL con las características mostradas en el cuadro anterior se cubre totalmente la Carretera Longitudinal de la Costa y los ejes transversales a esta.

Tabla 14 Número de galones de GNL requeridos por ruta

Ruta		Galones GNL	Viaje ida y vuelta (km)
Chiclayo	Tumbes	223	1044
Chiclayo	Moyobamba	266	790
Lima	Tingo María	242	1080
Lima	Oxapampa	182	814
Lima	Huancayo	136	610
Lima	Ayacucho	254	1134
Nazca	Ayacucho	278	1244
Nazca	Abancay	207	920
Arequipa	Puno	131	680
Arequipa	Desaguadero	212	948
Arequipa	Tacna	165	724

Fuente: Google Maps, Institute of Transportation Studies - Davis
Elaboración propia

Es importante tener en cuenta que la invención de vehículos pesados para el transporte de pasajeros que consuman GNL se encuentra aún en

desarrollo. Sin embargo, la empresa Scania ha producido el primer bus interdepartamental de GNL en el mundo denominado «Scania Interlink Medium Decker», el mismo que fue presentado en el evento europeo «Sustainable Bus Awards 2020»⁵¹, quedando como finalista. En la actualidad dicho vehículo se ha comercializado en países como España y Polonia. En la Tabla 15 se muestra sus principales características.

Tabla 15 Característica del vehículo de pasajeros a GNL para Perú

	Combustible	GNL
	Volumen barrido	9.3 litros
	Cilindros	En línea 5
	Potencia máxima	320 hp
	Torque máximo	1500 Nm
	Capacidad de tanque	2 tanques de 99 y 115 galones
	Viaje de ida y vuelta	1300 km
	Asientos	55
	Emisiones	Euro VI

Fuente: Scania
Elaboración propia

3.5. ESTACIONES DE SUMINISTRO DE GNL EN LA COSTA

Para determinar el número mínimo de estaciones de suministro de gas natural licuado (GNL) se debe analizar el flujo de vehículos pesados en las unidades de peaje, de acuerdo con las rutas establecidas en la Figura 77, así como, la demanda de combustible para cada departamento que incluya la ruta principal y de incidencia de la red de abastecimiento de GNL, así también se analizará los principales nodos logísticos en la Red Vial Nacional, a fin de asegurar la confiabilidad en el abastecimiento de GNL para los vehículos pesados.

⁵¹ El Premio «Sustainable Bus Award» se inició en el año 2016, los jurados representan a siete países europeos: Francia, Alemania, Italia, Países Bajos, Polonia, Rumania, España. Tiene como finalidad reconocer a la empresa que tiene como objetivo ampliar los límites de lo que se ha hecho hasta ahora en la industria de autobuses y autocares, en términos de consumos, emisiones y relación costo-beneficio.

3.5.1. Ubicación de las estaciones de suministro de GNL

El análisis del comportamiento del flujo vehicular pesado y consumo de diésel en la costa peruana permitirá evaluar la disponibilidad de una estación de suministro de GNL dentro de la red de abastecimiento de GNL, por lo que se ha estudiado datos mensuales desde el enero del 2007 a diciembre del 2023⁵² para una mayor precisión en el análisis. Es importante señalar que se ha considerado solo aquellos departamentos de la costa peruana, por ser parte del alcance en la red de abastecimiento de GNL, tal como se muestra en la Figura 77.

El flujo vehicular fue medido en los puntos de peaje, donde se observó que, en muchos casos se han registrado solo entradas, solo salidas o entradas y salidas, a lo largo del periodo en estudio, asimismo, debido a acontecimientos de fuerza mayor como el fenómeno de El Niño, desactivación temporal de cobro de peajes debido a conflictos sociales y el estado de emergencia nacional a consecuencia de la *covid-19*, los datos presentaron anomalías. Para el caso del diésel, se ha considerado el consumo registrado en los establecimientos de venta al público, donde se observó un bajo consumo durante el periodo de la pandemia.

Del análisis de la correlación entre el flujo vehicular y el consumo de diésel se pudo constatar que luego de realizar un ajuste al registro de flujo vehicular para obtener datos de entradas y salidas por peaje, y normalizar los datos respecto al fenómeno de El Niño se obtuvo un coeficiente de correlación superior a 0.8. tal como se muestra en la Tabla 16.

Tabla 16 Coeficiente de correlación: flujo vehicular pesado y consumo de diésel

	Tumbes	Piura	Lambayeque	La Libertad	Ancash
Sin ajuste	0.351	0.698	-0.248	0.525	0.358
Con ajuste	0.813	0.966	0.979	0.964	0.915
	Lima	Ica	Arequipa	Moquegua	Tacna
Sin ajuste	0.846	0.406	0.879	0.063	0.725

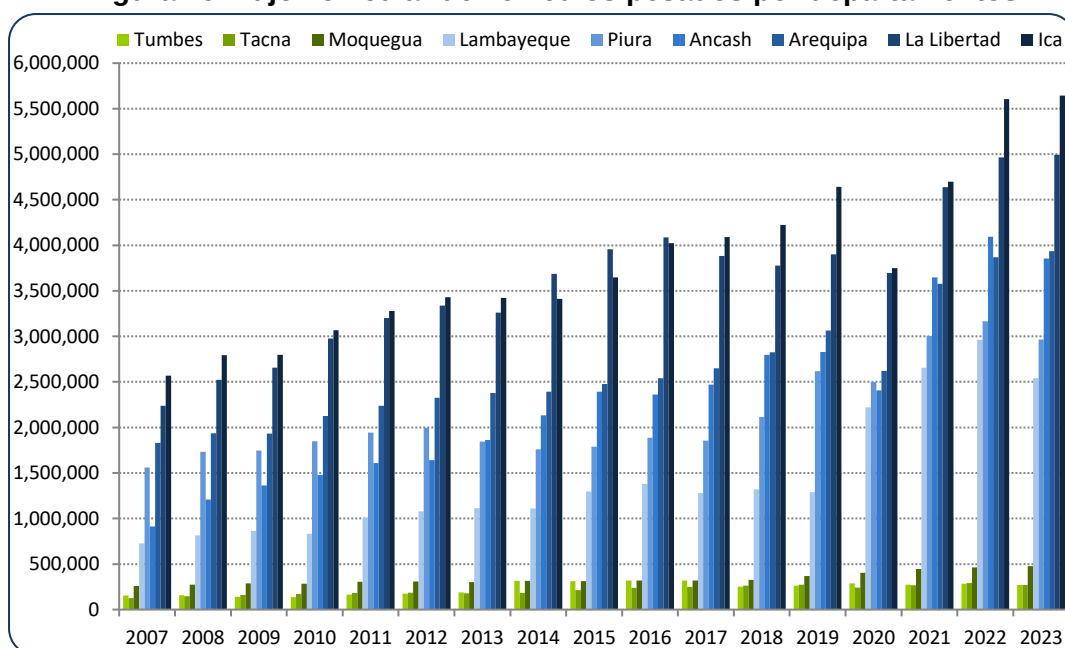
⁵² El flujo vehicular pesado se ha tomado de los informes técnicos mensuales del flujo vehicular por unidades de peaje del Instituto Nacional de Estadísticas e Informática (INEI) y el consumo de diésel corresponde a los documentos SCOP de Osinergmin, publicados en sus páginas web respectivas.

Con ajuste	0.884	0.946	0.936	0.811	0.979
------------	-------	-------	-------	-------	-------

Fuente: INEI, Ministerio de Transporte y Comunicaciones
Elaboración propia

En la Figura 79 se muestra el flujo vehicular pesado anual para los departamentos de la costa con excepción de Lima. El departamento de Lima tiene un alto flujo vehicular⁵³ lo cual significa que es un punto estratégico para el movimiento de pasajeros y de carga, asimismo se observa que Arequipa, La Libertad e Ica son los departamentos con mayor flujo vehicular después de Lima, mientras que Tumbes, Tacna y Moquegua son los departamentos con menos flujo vehicular.

Figura 79 Flujo vehicular de vehículos pesados por departamentos



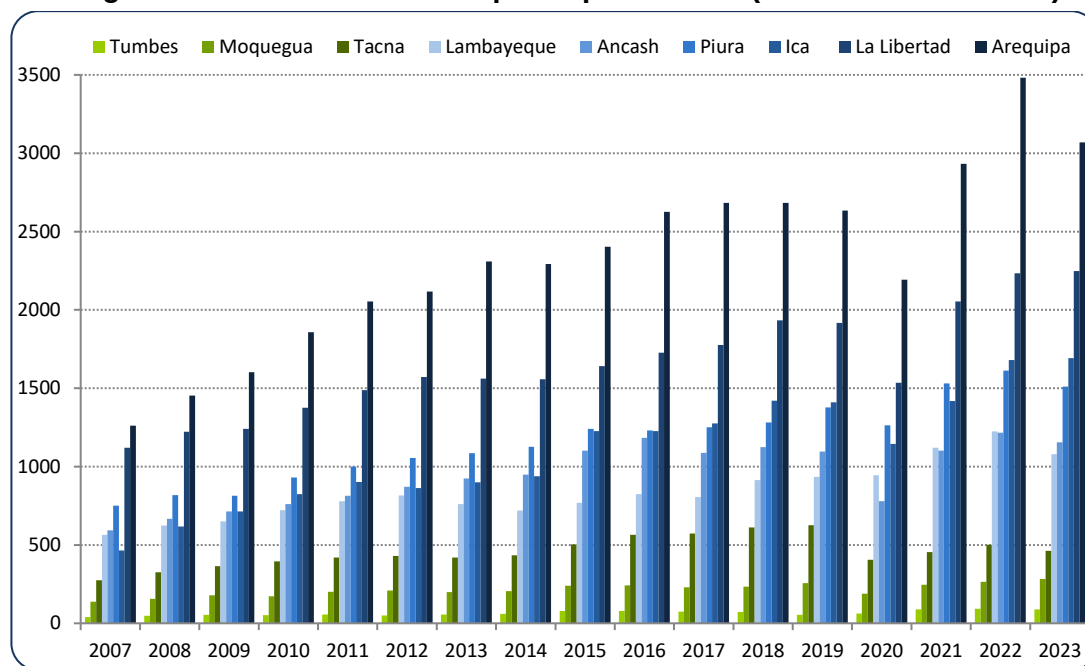
Fuente: INEI, Ministerio de Transporte y Comunicaciones
Elaboración propia

En la Figura 80 se muestra el consumo de diésel para los departamentos de la costa con excepción del departamento de Lima. Se puede observar que Ica, La Libertad y Arequipa son los departamentos de mayor consumo de

⁵³ Para el 2023, Lima tuvo un registro de 8 527 189 como flujo vehicular pesado, representa aproximadamente un 26 % del total del flujo vehicular de la costa.

diésel después de Lima⁵⁴, y los departamentos de Tumbes, Tacna y Moquegua son los departamentos con menor consumo de diésel.

Figura 80 Consumo de diésel por departamento (miles de barriles/año)



Fuente: Osinermin – SCOP
Elaboración propia

Los departamentos de Lima, La Libertad, Arequipa e Ica demandan un mayor tránsito de vehículos pesados, debido al crecimiento económico del sector agropecuario, construcción y minería e hidrocarburos principalmente, por lo que deben ser considerados como parte de los departamentos críticos para contar con una estación de GNL.

Es importante considerar también la distancia mínima que debe existir entre estaciones de suministro de GNL y la autonomía mínima de los vehículos pesados. Al respecto, de acuerdo a la Directiva 2014/94/UE del departamento Europeo y del Consejo⁵⁵, se recomienda una distancia media de 400 km entre puntos de repostaje de suministro de estaciones de GNL a

⁵⁴ Para el 2023, Lima tuvo un consumo de 9520 miles de barriles de diésel por año. Lima representa aproximadamente un 47 % del total del consumo de la costa.

⁵⁵ Directiva 2014/94/UE del Parlamento Europeo y del Consejo, de fecha 22 de octubre de 2014, relativa a la implantación de una infraestructura para los combustibles alternativos. Se precisa que en la norma peruana no se establece la mínima distancia entre estaciones de suministro de GNL.

lo largo de la red transeuropea de transporte (RTE-T), plan que se espera cumplir para el año 2025, y con relación a la autonomía del vehículo pesado a GNL existen en el mercado vehículos que recorren hasta 1500 km con una sola carga de combustible.

En el diagnóstico del sistema logístico nacional incluido en el «Plan de Desarrollo de los Servicios Logísticos de Transporte Plan de Mediano y Largo Plazo (PMLP)» se ha identificado los nodos logísticos relacionados con la costa, en la cual existe la preponderancia del nodo principal de Lima-Callao que organiza la distribución de mercancías hacia el sur, norte y centro del país, asimismo en la zona norte se ha identificado el nodo principal de Chiclayo que articula el eje logístico hacia Yurimaguas e Iquitos y los nodos secundarios de Trujillo y par nodal de Paita-Piura vinculado al puerto; en la zona sur se tiene al nodo de Arequipa que distribuye mercancías a Juliaca-Puno, Cusco, Moquegua-Ilo, Tacna, etc.

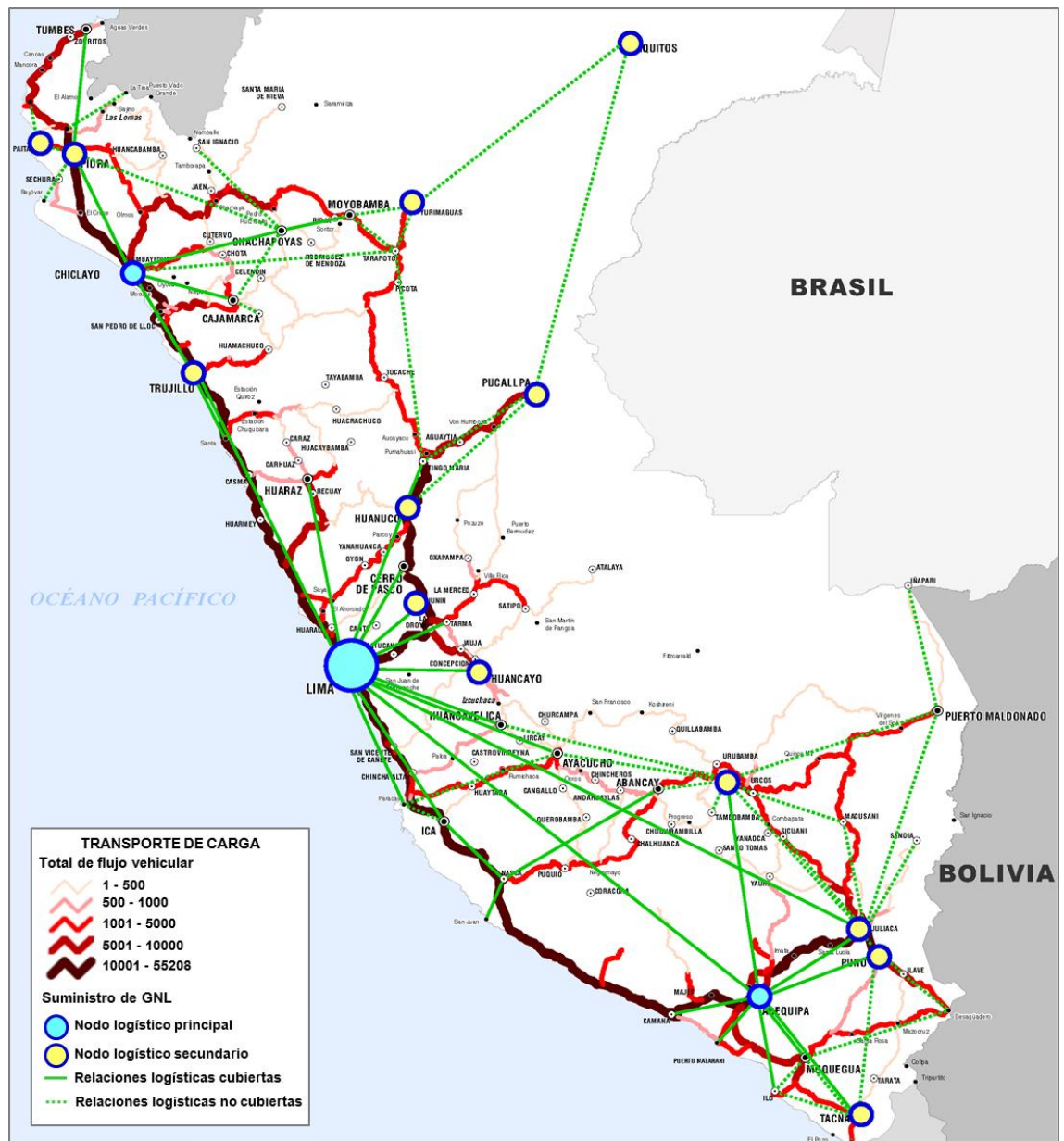
Para evaluar el impacto de la relación entre los nodos logísticos en la ubicación de las estaciones de suministro gas natural licuado (GNL), se ha graficado sobre el mapa del transporte de carga, elaborado por el Ministerio de Transporte, 13 nodos logísticos secundarios y 3 nodos logísticos principales, así como las relaciones logísticas entre las principales ciudades como se puede ver en la Figura 81.

Al respecto, se observa que los nodos principales se ubican en los departamentos de Lambayeque (Chicayo), Lima y Arequipa y los nodos secundarios relacionados a la costa se ubican en los departamentos de Piura, La Libertad y Tacna, lo cual significa que la Carretera Longitudinal de la Costa es el eje estructural para el transporte de vehículos pesados a nivel nacional.

Asimismo, se determina junto al análisis flujo vehicular y consumo de diésel que los departamentos que deben contar con una estación de suministro de GNL son Lima y Arequipa por ser nodos principales y tener el mayor movimiento de vehículos pesados. En la zona norte el nodo principal de Chiclayo tiene mayor incidencia que el nodo de Paita-Piura, además de presentar un mayor flujo vehicular pesado, lo que lo convierte en un punto importante para contar con una estación de suministro de GNL. A fin de asegurar la confiabilidad de la red de abastecimiento de GNL se debe contar

con una estación de GNL entre Lima y Chiclayo, debido a la gran distancia entre estos puntos, correspondiendo a La Libertad (Trujillo) por ser un nodo secundario, tener un mayor consumo de diésel y mayor flujo vehicular a diferencia de otros departamentos comprendidos entre Lima y Lambayeque.

Figura 81 Nodo logístico y flujo vehicular de carga nacional



Fuente: Ministerio de Transporte y Comunicaciones
Adaptación propia

Con relación a la zona sur, existen dos puntos importantes entre Lima y Arequipa para contar con una estación de suministro de GNL, son las provincias de Pisco y Nazca, debido a que tienen similares características en cuanto al flujo vehicular pesado y relaciones logísticas con los nodos principales, se determina Nazca como el punto a contar con una estación de GNL por estar localizado en un punto intermedio entre Lima y Arequipa.

Las relaciones logísticas entre las principales ciudades que pueden ser cubiertas por la red de abastecimiento de GNL, tenemos a las ciudades de Chiclayo, Trujillo, Lima, Nazca y Arequipa, considerando una distancia máxima de 600 km desde la estación de suministro de GNL, según la Tabla 17.

Tabla 17 Relación logística cubierta por la red de abastecimiento de GNL

Relación logística	Distancia (km)	Relación logística	Distancia (km)
Chiclayo-Tumbes	498	Lima-Ayacucho	567
Chiclayo-Piura	214	Lima-Ica	305
Chiclayo-Moyobamba	594	Lima-Paracas	259
Chiclayo-Chachapoyas	448	Lima-Nazca	447
Chiclayo-Cajamarca	267	Nazca-Abancay	462
Chiclayo-Trujillo	211	Nazca-San Juan	80
Trujillo-Chimbote	131	Nazca-Arequipa	566
Trujillo-Lima	558	Arequipa-Cusco	527
Lima-Huaraz	403	Arequipa-Juliaca	267
Lima-Tingo María	490	Arequipa-Puno	293
Lima-Huánuco	371	Arequipa-Moquegua	222
Lima-Cerro de Pasco	268	Arequipa-Tacna	369
Lima-Junín	236	Arequipa-Ilo	248
Lima-Tarma	237	Arequipa-Camaná	175
Lima-Huancayo	304	Arequipa-Matarani	114
Lima-Huancavelica	427		

Fuente: Google Earth
Elaboración propia

En la Figura 82 se muestra la ubicación de las estaciones de suministro de GNL, así como los ejes transversales a la Carretera Longitudinal de la

Costa, cuya distancia máxima desde la estación de GNL es de 600 km, a través del cual los vehículos pesados pueden transitar con una sola carga en la estación de GNL. Asimismo, se puede observar que la estación de GNL ubicada en Lima tiene una alta incidencia en la zona central de país, además de las zonas norte y sur, lo que implica su alto nivel de importancia en la red de abastecimiento de GNL.

Figura 82 Ubicación de estaciones de suministro de GNL



Fuente: Ministerio de Transporte y Comunicaciones
Adaptación propia

Por otro lado, con los datos de geolocalización de Infogas y la ubicación de las dos nuevas estaciones de GNL en Chiclayo y Mala, se han identificado 347 estaciones de GNV a nivel nacional, según se muestra en la Figura 83, estos datos, junto a la información geoespacial de las redes viales de transporte de carga del Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC), fueron procesadas en el software de información geográfica QGIS.

Figura 83 Ubicación de estaciones de suministro de GNL



Fuente: Infogas, Quavii, EVA, Datos geoespaciales del MTC, QGIS, 2024
Elaboración propia

Para el estudio de investigación se identificaron una cantidad mínima de estaciones de GNL necesarias para el correcto funcionamiento de la red de abastecimiento a lo largo de la costa peruana. Como se puede observar en la Figura 82, a la fecha el Perú cuenta con cuatro estaciones de GNL; sin embargo, solo tres se encuentran dentro del alcance del análisis de los puntos estratégicos de la red de abastecimiento de GNL.

La ubicación de las estaciones de GNL es de acuerdo con lo siguiente: i) La estación de GNL Lima⁵⁶ se ubica a la altura del kilómetro 27.5 de la Panamericana Norte, en el distrito de Puente Piedra, cuyo tanque de almacenamiento o contenedor GNL es horizontal de 5523 galones (21 m³), y su primera carga comercial la realizó en setiembre del 2023, ii) La estación de GNL Trujillo⁵⁷ se ubica en el Alto Moche, inaugurada en junio del 2023, cuyo tanque vertical tiene una capacidad de 34 m³. iii) La estación de GNL Chiclayo⁵⁸ se ubica en prolongación Bolognesi y la Panamericana Norte, inaugurada en junio de 2024, cuyo tanque horizontal tiene una capacidad aproximada de 30 m³ y iv) La estación GNL Mala⁵⁹ se ubica en el kilómetro 86.5 de la Panamericana Sur, en el distrito de Mala, cuyo contenedor GNL es horizontal de 80 m³, y su primera carga comercial tuvo lugar en junio de 2024.

3.5.2. Capacidad de suministro de las estaciones de GNL

Para determinar las capacidades que deben tener las estaciones de GNL se estudiará el flujo de vehículos pesados a lo largo de la Carretera

⁵⁶ Estación que opera en alianza entre Cálidda y Grifos Espinoza S.A.C., cuyo monto de inversión según su estudio ambiental es de S/ 988 mil. Cabe indicar que Grifos Espinoza S.A.C. tiene un estudio ambiental aprobado por el Minem, para construir una estación de GNL en San Juan de Miraflores, a la altura del kilómetro 18.5 de la Panamericana Sur, que constaría de dos tanques criogénicos verticales de 80 m³ cada uno. Estudio ambiental aprobado con Resolución Directoral N° 442-2019-MINEM-DGAH.

⁵⁷ Estación de la empresa Quavii (Promigas) cuyo operador es Primax, y tendría la capacidad de atender a 160 vehículos por día, asimismo, de acuerdo con lo informado por RPP, se tiene proyectado construir una estación adicional en Chiclayo, cuya inversión junto a la de Trujillo demandaría S/ 14 millones. Artículo «Quavii presentó la primera estación de Gas Natural Licuado (GNL) en el norte del Perú» de RPP.

⁵⁸ Estación de la empresa Quavii (Promigas) cuyo operador es Primax, cuya información se obtuvo de la red social oficial Facebook de Quavii de fecha 22 de junio del 2024.

⁵⁹ Estación que opera a través de la sociedad denominada Energía de Valor Ambiental (EVA), conformada entre Limagas y grupo HAM. De acuerdo con la información del 30 de mayo del 2024 del portal web de EVA esperan inaugurar nuevas estaciones de GNL en Nazca y Arequipa.

Longitudinal de la Costa. Para lo cual se ha identificado a las unidades de peaje⁶⁰ más próximas al punto de ubicación de las estaciones de GNL, que actúan como un nodo vial en el cual confluyen los vehículos pesados, tal como se ve en la Figura 84.

Figura 84 Ubicación de peajes en la ruta de transporte de carga



Fuente: Ministerio de Transporte y Comunicaciones
Adaptación propia

⁶⁰ Estos datos son proporcionados por el Proyecto Especial de Infraestructura de Transporte Nacional (PROVIAS Nacional), unidad ejecutora del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

En la Tabla 18 se muestra las unidades de peajes consideradas por cada estación de GNL.

Tabla 18 Unidades de peaje para cada estación de suministro de GNL

Estación GNL	Carretera Longitudinal de la Costa	Eje transversal
Chiclayo	Morrope y Pacanguilla	Mocce y Cuculí
Trujillo	Chicama y Virú	Menocucho
Lima	Variante Pasamayo, Serpentín Pasamayo y Chilca	Cornona
Nazca	Nazca, Marcona y Yauca	Pampa Galera
Arequipa	Uchumayo	Patahuasi

Fuente: Ministerio de Transporte y Comunicaciones
Elaboración propia

Se ha analizado datos mensuales de los flujos de vehículos pesados desde enero del 2010 a diciembre del 2023, a fin de tener una mayor representatividad de la información de los peajes seleccionados. Se advirtió que los datos requerían un ajuste estadístico, debido a algunos eventos de fuerza mayor como la declaratoria del estado de emergencia por la pandemia de la *covid-19*, fenómeno de El Niño, algunos conflictos sociales que afectaron el registro de datos vehiculares, y evitar una distorsión en el tratamiento de datos.

En la Tabla 19 se muestra las características y anomalías de los datos de flujo vehicular pesado para cada unidad de peaje. Así también, se ha observado que algunas unidades de peajes registran flujos vehiculares de salida, mientras que otras registran flujos de entrada y salida, o en algunos casos para la misma unidad de peaje han cambiado en el transcurso de un periodo de tener un registro de salida a tener un registro de entrada y salida.

Tabla 19 Información mensual de flujo vehicular pesado, periodo 2010 - 2023

Unidad de peaje	Registro	Afectación de datos
Morrope	Salida	No se reporta en abril de 2017
Pacanguilla	Salida, salida-entrada desde setiembre de 2018	No se reporta en abril de 2017

Unidad de peaje	Registro	Afectación de datos
Cuculí	Salida-entrada	No se reporta en abril de 2017 Protesta social entre enero de 2022 y enero de 2023
Mocce	Salida-entrada, salida desde diciembre de 2014	Suspensión por emergencia del fenómeno del Niño Costero desde marzo de 2017. A la fecha no se ha restablecido
Chicama	Salida, salida-entrada desde noviembre de 2017	No se reporta en abril de 2017
Virú	Salida, salida-entrada desde noviembre de 2017	No se reporta desde abril a agosto de 2017
Menocucho	Salida-entrada, salida desde setiembre de 2014	Inicio de operaciones el 30 de abril de 2012 Suspensión por emergencia del fenómeno del Niño Costero desde marzo a agosto de 2017
S. de Pasamayo	Salida-entrada	
V. de Pasamayo	Salida-entrada	
Chilca	Salida	Protesta social entre enero de 2022 y enero de 2023
Corcona	Salida-entrada, salida desde octubre 2010 hasta marzo 2012, salida-entrada	
Nazca	Salida-entrada	
Marcona	Salida-entrada	Protesta social entre enero de 2022 y enero de 2023
Yauca	Salida-entrada	Suspensión por paro de transportistas desde marzo de 2019, hasta que se culmine el 70% de ejecución de obras de mantenimiento.
Pampa Galera	Salida-entrada	Protesta social entre enero de 2022 y enero de 2023
V. Uchumayo	Salida-entrada	No se reporta en octubre y diciembre de 2018 Protesta social entre enero de 2022 y enero de 2023
Patahuasi	Salida-entrada	No se reporta en octubre y diciembre de 2018 Protesta social entre enero de 2022 y enero de 2023

Nota: La pandemia afectó a todos los peajes vehiculares

Fuente: MTC, OSITRAN, Informe Técnico Flujo Vehicular INEI
Elaboración propia

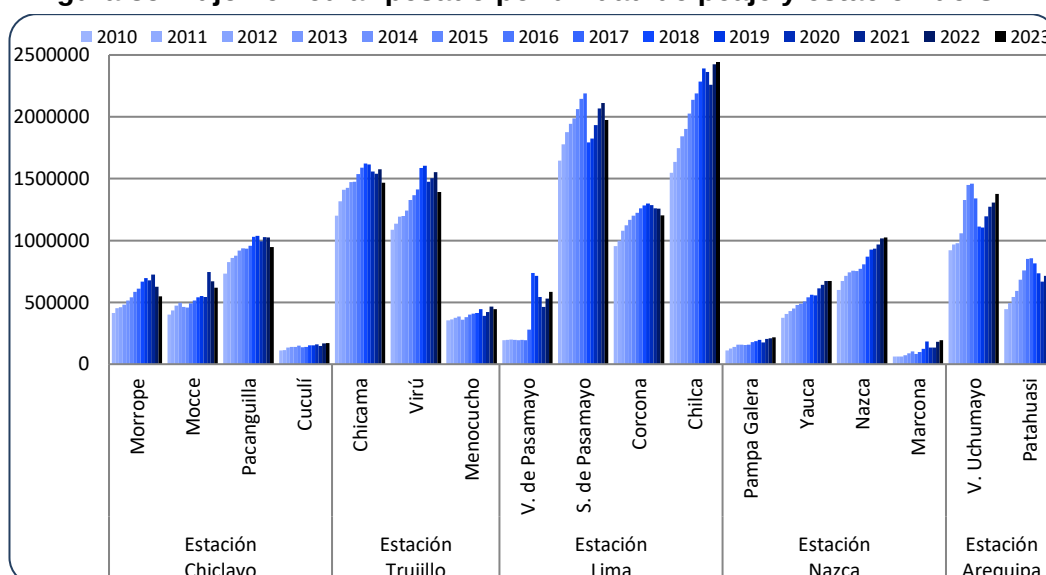
Se puede observar que los datos históricos del flujo vehicular pesado de las unidades de peaje en estudio presentan distintos registros y datos vacíos para algunos meses, por lo que antes de hacer uso de dicha información, se ha procedido a su ajuste estadístico, y se ha optado por uniformizar los

registros a entrada-salida, a fin de contar con un flujo máximo de vehículo que debe soportar la red de abastecimiento de GNL.

Para la corrección de las distorsiones de los datos se ha analizado la correlación de los datos históricos entre las unidades de peajes que pertenecen a una misma concesión vial, asimismo, se analizó el ciclo anual de la información para cada unidad de peaje, se ha revisado los informes de desempeño de las concesiones viales elaboradas por el Organismo Supervisor de la Inversión en Infraestructura de Transporte de Uso Público (Ositran), y para aquellas unidades de peajes que no presentan un patrón de comportamiento definido ni presenta alguna correlación con las unidades de peaje de su misma concesión vial se ha realizado una comparación con los datos históricos de la unidad peaje más próxima o se aplicado el método de interpolación Catmull-Rom Spline en EViews. De esta manera se ha logrado obtener una información válida, la cual se puede observar en el Anexo 7.

En la Figura 85 se muestra la evolución del flujo vehicular pesado de las unidades de peaje correspondiente a cada estación de servicio de GNL de la red de abastecimiento de GNL, para los últimos 14 años.

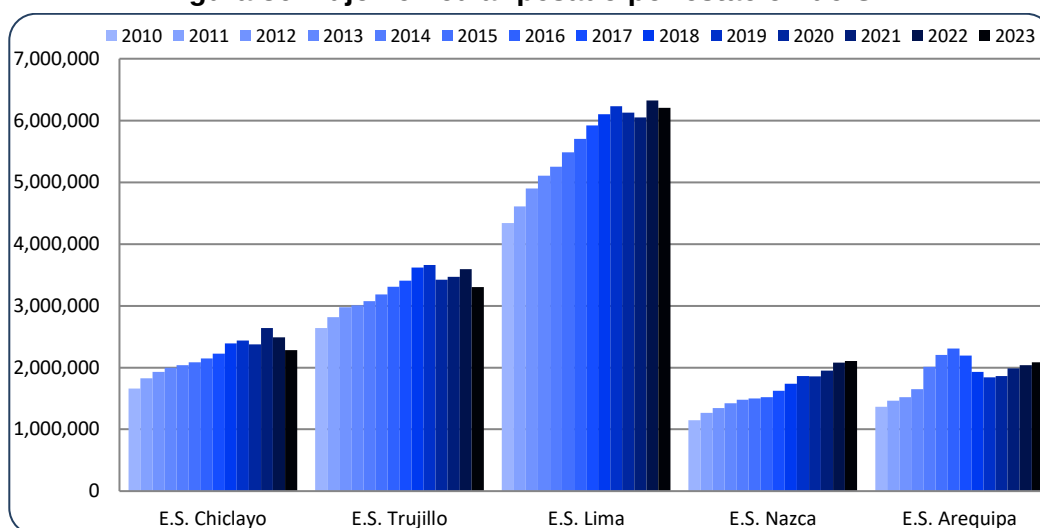
Figura 85 Flujo vehicular pesado por unidad de peaje y estación de GNL



Fuente: Ministerio de Transporte y Comunicaciones y OSITRAN
Elaboración propia

En la Figura 86 se muestra el flujo vehicular pesado acumulado para cada estación de servicio de GNL, donde se observa que la estación Lima presenta el mayor tráfico vehicular pesado durante el periodo en estudio.

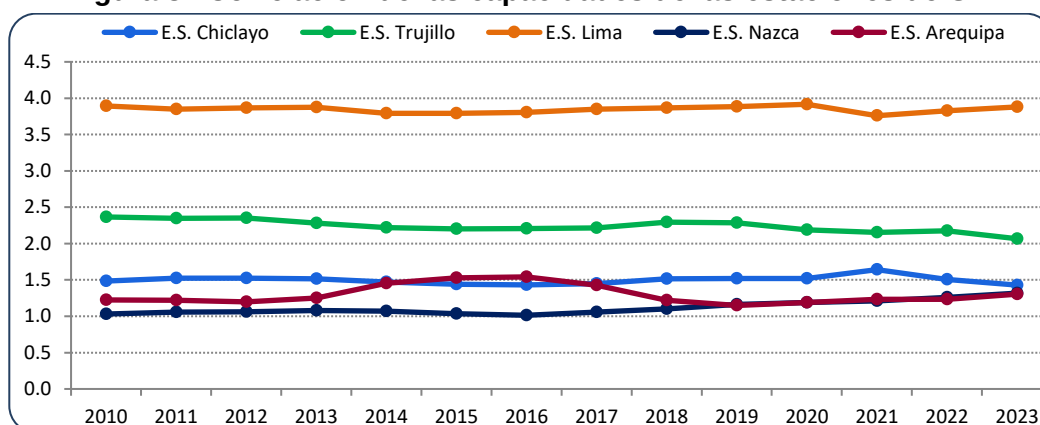
Figura 86 Flujo vehicular pesado por estación de GNL



Fuente: Ministerio de Transporte y Comunicaciones
Elaboración propia

Del análisis de la relación entre el flujo vehicular pesado para las 5 estaciones de GNL, se observa en la Figura 87 que las estaciones tienen una correspondencia similar para cada año, a excepción de la estación Arequipa para el periodo 2014 al 2017.

Figura 87 Correlación de las capacidades de las estaciones de GNL

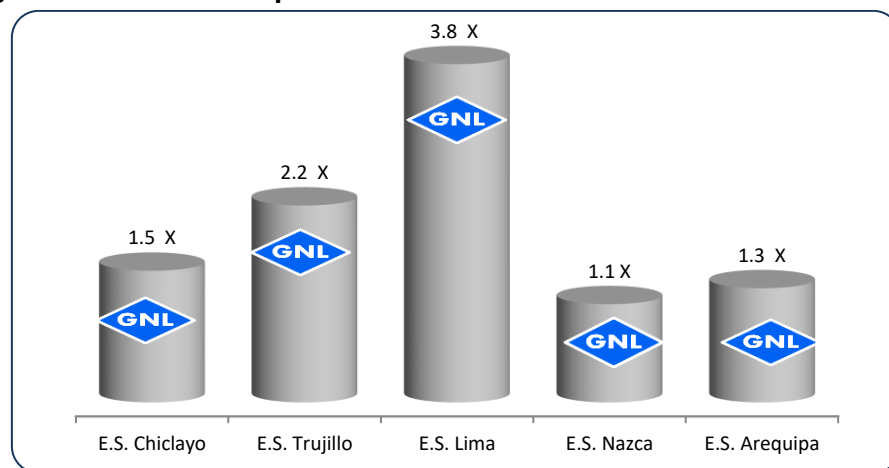


Fuente: Ministerio de Transporte y Comunicaciones
Elaboración propia

Por lo que se ha considerado como un factor común de correspondencia para las estaciones de GNL el promedio de los 14 años, es decir, para las estaciones Chiclayo, Trujillo, Lima, Nazca y Arequipa le corresponde un factor de 1.5, 2.2, 3.8, 1.1 y 1.3 respectivamente, como se muestra en la Figura 88. Por otro lado, se debe calcular el volumen de GNL que multiplicará a dichos factores para obtener la capacidad de suministro de las estaciones de la red de abastecimiento de GNL.

Se debe tener en cuenta que en el país no existen precedentes del uso masivo del GNL como combustible vehicular a diferencia del gas natural comprimido (GNC), gasolina, GLP o diésel, por lo que se asumirá una demanda de GNL y se propondrá depósitos de almacenamiento de GNL y camiones cisterna de GNL para la red de abastecimiento de GNL basados en componentes disponibles en el mercado de la industria de gas natural.

Figura 88 Factor de capacidad de suministro de las estaciones de GNL



Fuente: Ministerio de Transporte y Comunicaciones
Elaboración propia

3.5.3. Abastecimiento de GNL a las estaciones de suministro GNL

La red de abastecimiento de GNL contempla el transporte de GNL a través de camiones cisterna de GNL desde el Cargadero de GNL, ubicada cerca de las instalaciones de la «Planta Melchorita», aproximadamente en el kilómetro 169 de la Carretera Panamerica Sur, hacia las cinco estaciones de servicio de GNL. Para las especificaciones técnicas y de seguridad de los depósitos de almacenamiento y cisternas criogénicas de GNL, se ha tomado como referencia la legislación europea, al ser más específica que la peruana

y sobre todo por qué la industria del GNL está bastante desarrollada en Europa.

Para el transporte de GNL se considera el tipo de cisternas criogénicas de GNL cuya descarga de GNL se realiza a través de una diferencia de presión entre la cisterna y el depósito de GNL de la estación de suministro, porque resulta ser más segura y práctica la descarga de GNL, considerando que el destino de la carga que se transporta es el 100 % para cada estación de GNL. Estas cisternas tienen una envoltura única de chapa de acero inoxidable con aislamiento externo de poliuretano, lo que permite que sea más económica y ligera.⁶¹ Para el tiempo de carga de las cisternas de GNL y trasvase de GNL a los tanques de almacenamiento de GNL en las estaciones se considerará de una velocidad de flujo de 60 m³/h.⁶²

Para las cisternas criogénicas de GNL se tiene como referencia el modelo homologado para LIN-LOX-LAR-GNL, optimizado para GNL de capacidad de 58 m³ de la empresa Indox Energy Systems S.L.⁶³, y para la capacidad de los depósitos de GNL de las estaciones de servicio se tiene como referencia los volúmenes⁶⁴ de 20 m³, 30 m³ y 60 m³, usados en el «LNG Blue Corridors Project» de la Unión Europea.

Los depósitos de almacenamiento de GNL están constituidos por una doble pared metálica, la interior de acero aleado y la exterior de acero de carbono, con vacío intermedio en el que se ha efectuado el vacío y se ha llenado de perlita expandida. Este diseño garantiza una regasificación natural

⁶¹ Especificaciones técnicas de la Asociación Española del gas (Sedigas) para las actividades de Técnico de Plantas Satélite de GNL, Unidad 4: Composición y funcionamiento de las Plantas Satélite, de febrero de 2019, también se usa cisternas de descarga con bomba criogénica; sin embargo, como esta bomba va incorporada a la propia cisterna y se abastece de electricidad desde el propio camión cisterna se tiene que mantener el motor encendido durante la descarga, lo cual incrementa el riesgo ante una eventual fuga de GNL. Por otro lado, respecto a las cisternas de GNL cuya descarga utiliza la diferencia de presión, se estima una duración para la descarga entre 11/2 hora en promedio y 2 horas como máximo.

⁶² Ficha técnica del proyecto: Estación de Carga de GNL en camiones cisterna, publicada por Osinergmin en 2015. Se considera un tiempo de 1 hora para una carga nominal de 60 m³.

⁶³ Empresa española de presencia internacional, fabricante de equipos para el transporte, distribución y almacenaje de carburantes y gases licuados (gases del aire, GNL, CO₂). Los datos técnicos de la cisterna criogénica de GNL fueron proporcionados por una representante en Latinoamérica mediante correo electrónico de fecha 09 de febrero de 2020.

⁶⁴ Datos tomados del análisis económico de las estaciones de suministro de GNL «Cost analysis of LNG refuelling stations» disponible en la página web del proyecto «LNG Blue Corridors Project» de la Unión Europea, concluido en mayo de 2018, <http://lngbc.eu/>.

máxima de 0.12 % en 24 horas por evaporación a causa de las entradas de calor a través del aislante y los soportes. Estos depósitos cilíndricos suelen ser horizontales o verticales de acuerdo con las necesidades de espacio y capacidad. Para mantener el enfriamiento del depósito se recomienda conservar un 5 % de la capacidad geométrica del depósito de GNL (Sedigas, 2019).⁶⁵

Con relación al grado máximo de llenado de GNL de cisternas criogénicas y depósitos de almacenamiento respecto a su capacidad geométrica, se tiene que para las cisternas criogénicas de GNL se permite hasta un nivel máximo del 85 % y para los depósitos de almacenamiento de GNL se permite un llenado máximo de 95 % (Sedigas, 2019).⁶⁶ En la Tabla 20 y 21, se muestra a modo de resumen, las consideraciones para el cálculo de la capacidad de las estaciones de GNL.

Tabla 20 Restricciones para la red de abastecimiento de GNL

Componente	Característica	Restricción
Depósito de almacenamiento	Grado máximo de llenado	95 %
	Regasificación máxima en 24 horas	0.12 %
	Volumen mínimo para conservar	5 %
Cisterna criogénica	Grado máximo de llenado	85 %
	Tiempo de carga y descarga	60 m ³ /h

Fuente: Sedigas y Osinergmin
Elaboración propia

Tabla 21 Consideraciones para la red de abastecimiento de GNL

Componente	Característica	Restricción
Depósito de almacenamiento	Capacidades nominales	20 m ³ , 30 m ³ y 60 m ³

⁶⁵ Especificaciones técnicas de Sedigas para las actividades de Técnico de Plantas Satélite de GNL, Unidad 1: Las Plantas Satélite y el GNL, Unidad 4: Composición y funcionamiento de las Plantas Satélite y Unidad 7: Operación de las Plantas Satélite, de febrero de 2019. Para la primera descarga de GNL se debe realizar la puesta en frío de los depósitos de almacenamiento de GNL, lo cual se utiliza el nitrógeno líquido a aproximadamente -196° C y se debe repetir cada vez que el depósito permanezca a temperatura ambiente.

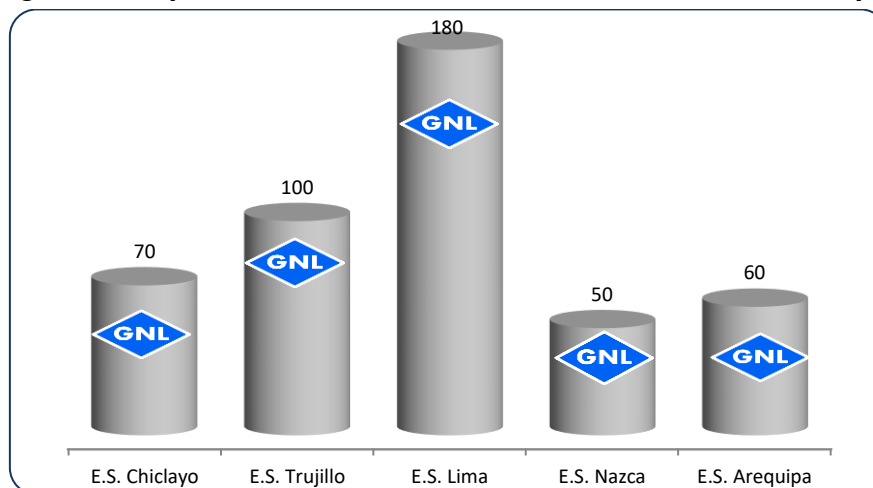
⁶⁶ Especificaciones técnicas de Sedigas para las actividades de Técnico de Plantas Satélite de GNL, Unidad 1: Las Plantas Satélite y el GNL, de febrero de 2019. Con base en el Acuerdo europeo sobre transporte internacional de mercancías peligrosas por carretera (ADR) y la Instrucción Técnica Complementaria MIE-AP15 del Reglamento de Aparatos a Presión relacionado a las instalaciones de GNL en depósitos criogénicos a presión.

Componente	Característica	Restricción
Cisterna criogénica	Capacidad nominal	30 m ³ , 40 m ³ y 50 m ³

Fuente: Indox, LNG Blue Corridors Project
Elaboración propia

Para determinar la capacidad inicial de las estaciones de la red de abastecimiento de GNL, se ha tomado como referencia la capacidad de la estación de GNL de Puente Piedra - Lima (operación) y la posible estación de GNL de San Juan de Miraflores - Lima, que cuenta con la certificación ambiental; sin embargo, no se ha confirmado su construcción, ambas estaciones tendrían una capacidad nominal aproximada de 180 m³, y de acuerdo con el factor de relación entre las capacidades de las estaciones de GNL de la Figura 88 y las capacidades nominales de los depósitos de almacenamiento de la Tabla 21, se ha establecido las capacidades nominales para las estaciones de la red de abastecimiento de GNL, tal como se muestra en la Figura 89.

Figura 89 Capacidad de suministro de las estaciones de GNL (m³)



Fuente: MTC
Elaboración propia

3.6. PROGRAMACIÓN LINEAL EN LA RED DE ABASTECIMIENTO DE GNL

Con la técnica de optimización de programación lineal (PL), se tendrá como objetivo minimizar los costos fijos más importantes de inversión en la red de abastecimiento de GNL, como el costo de los tanques de almacenamiento de las

estaciones de servicio de venta de GNL, cisternas criogénicas y tractos principalmente. En la Figura 90 se muestra los puntos de suministro de GNL ubicados en Chiclayo, Trujillo, Lima, Nazca y Arequipa, que serán abastecidos desde la zona de carga de GNL de la Planta Melchorita.

Figura 90 Ubicación geoespacial de las estaciones de GNL



Fuente: Infogás, Datos geoespaciales del MTC, QGIS, 2024, Google Maps
Adaptación propia

Con la técnica de PL se busca simular el funcionamiento de la red de abastecimiento de GNL en la costa peruana bajo ciertos parámetros a través de ecuaciones matemáticas que permitan determinar un modelo óptimo considerando

los tiempos de viaje de los tractos, capacidad de carga y almacenamiento de los tanques, disponibilidad de operación, costo de inversión, demanda de GNL, tiempo de repostaje de las cisternas criogénicas, entre otros.

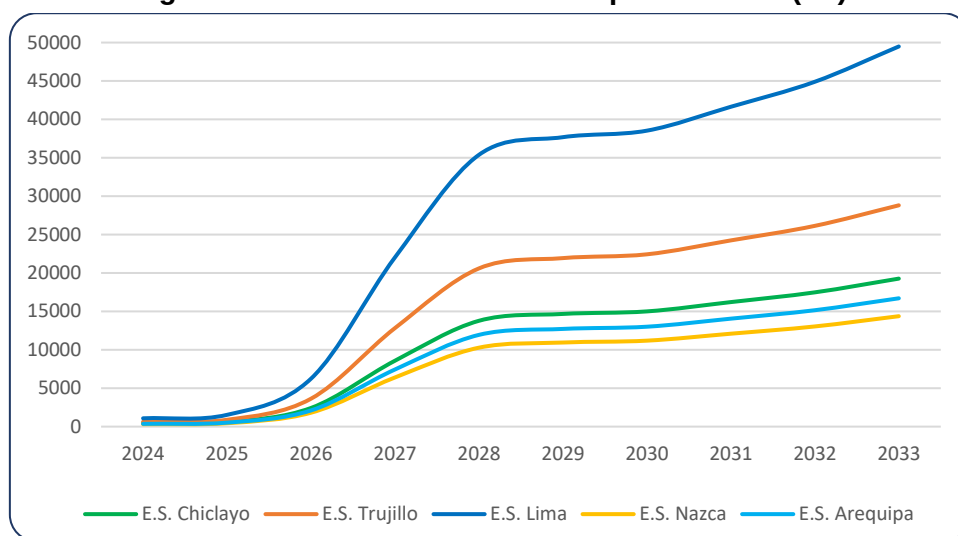
3.6.1. Supuestos del modelo

La cantidad de GNL disponible en la planta Melchorita destinada para el mercado interno es ilimitada, cada tracto y cisterna criogénica suministra a un solo nodo o punto de suministro de GNL, la conducción de los tractos se realiza bajo una velocidad óptima y uso eficiente de combustible, el flujo de masa del GNL se encuentra balanceado, en estado líquido a la misma temperatura de $-165\text{ }^{\circ}\text{C}$ en toda la cadena de comercialización.

3.6.1.1. Demanda base de GNL

En la proyección de la demanda de diésel desde el 2024 hasta el 2033 (Figura 66) se tiene que el promedio de las tasas de crecimiento anual de los tres escenarios posibles es de 3.6 %. La tasa de crecimiento promedio anual para la demanda del diésel para los últimos 10 años antes de pandemia fue de 3.5 %. Por otro lado, del análisis del crecimiento de la demanda del gas natural para los automóviles, que tuvo su inicio en agosto de 2005, se observa que el mercado vehicular alcanzó un nivel de madurez en el 2013 (Figura 45), desde entonces ha crecido a una tasa promedio anual de 2.5 % hasta antes de la pandemia. Sin embargo, considerando que la demanda de GNL en los vehículos de largo recorrido se encuentra en una etapa temprana en su desarrollo, se estimará un escenario de crecimiento similar al gas natural comprimido en los vehículos livianos, tomando en cuenta que para el 2024 se tiene 34 camiones a GNL autorizados, bajo el supuesto de que cada camión tiene una capacidad de consumo de 300 galones de GNL y que la recarga o *refueling* se realiza cada cinco días. En la Figura 91 se muestra la demanda anual estimada para un periodo de 10 años, considerando los factores de suministro de capacidad de GNL mostradas en la Figura 88.

Figura 91 Demanda anual de GNL por estación (m³)



Fuente: Infogas, otros
Elaboración propia

3.6.1.2. Tanques fijos, cisternas criogénicas y tractos

Para el modelo se considera a modo de referencia los datos de las Tablas Nos 20 y 21. Para la estimación de los costos de los tanques fijos de almacenamiento, cisternas criogénicas y tractos se utilizó la información aduanera proporcionada por la Superintendencia Nacional de Administración Tributaria⁶⁷ (Sunat), correspondiente a los últimos cinco años, a precio CIF (por sus siglas en inglés *Cost, Insurance and Freight*), es decir incluye el costo del producto importando, seguro y flete de traslado al punto de entrega⁶⁸.

Del análisis de la información se advierte que, para el caso de los tanques de almacenamiento de GNL, en la sección de descripción de mercancías, solo los productos importados de China muestran la capacidad volumétrica de los tanques (m³), lo cual ayuda a determinar la relación entre capacidad y costo,

⁶⁷ La información fue solicitada por Acceso a la Información Pública (Orden 88044636 del 04 de febrero del 2025), correspondiente a la partida arancelaria N° 7311.00.90.00 para tanques criogénicos de almacenamiento de GNL, partida arancelaria N° 8716.31.00.00 para cisternas criogénicas de GNL y partida arancelaria N° 87.01.29.00.00 para los tractos de GNL.

⁶⁸ El país origen de importación es China y el punto de entrega es Aduanas 118 – Marítima del Callao.

razón por la que se ha considerado para el modelo de PL trabajar únicamente con productos de dicho país, a fin de homogenizar los costos⁶⁹.

Para el caso de las cisternas criogénicas de GNL, cuya capacidad no se encuentra en la descripción de mercancías de aduanas, se hizo un comparativo con las cisternas consignadas en el «Registros de hidrocarburos hábiles» de Osinergmin⁷⁰. En el Anexo 8 se muestra los cálculos realizados para obtener el costo de los tanques fijos de almacenamiento, cisternas criogénicas y tractos.

Con relación a los tractos de GNL, se realizó la búsqueda a través de la plataforma de SUNAT denominada «Consulta Importador/Exportador», donde se observó que durante el 2024 se importaron de China tractos del mismo modelo de la marca Shacman⁷¹. El tracto al ser un remocador que acoplará a la cisterna GNL, se considera como un único tipo de tracto para el modelo de PL.

Respecto a la vida útil de los tractos se considera 5 años, de acuerdo con la información consignada por Osinergmin en la «Fijación de las tarifas de distribución de gas natural del norte, para el periodo 2024 -2028»⁷² para la Concesión norte.

⁶⁹ A modo de ejemplo, para el caso de las cisternas importadas de España su costo es un 40 % más que las cisternas importadas de China, esto significa que dependiendo del país de origen de importación el costo tiene un impacto en la optimización del modelo.

⁷⁰ Se consultó la base de datos de la «Unidad móvil de GNL» y «Vehículo transportador de GNL», donde se identificaron las placas de las cisternas con las que se realizó la búsqueda en la Superintendencia Nacional de los Registros Públicos relacionado al servicio de «Consulta vehicular», de donde se extrajo el Número de Identificación del Vehículo (VIN), y con esta información se realizó la búsqueda en la base de datos proporcionada por la SUNAT, en cuyo caso si contenía esta información entonces la capacidad de dicha cisterna era la consignada en la base de datos de Osinergmin. Cabe precisar que, para se encontraron cisternas de las marcas Lecitrailer, Indox y Chart, donde para el caso de las dos primeras marcas (importadas de España) no hubo una correlación entre capacidad y costo.

⁷¹ El tracto o remocador corresponde al modelo SX42595X384TL, de tracción 6x4, de capacidad de 1350 litros de GNL.

⁷² «Anexo 2 – Costos del transporte virtual», correspondiente a la sección «10. Resolución que fija las tarifas de distribución de gas natural por red de ductos para el periodo 2024-2028», de las Tarifas de distribución de gas natural de la Concesión norte, ubicado en el siguiente enlace: https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/institucional/regulacion-tarifaria/procesos-regulatorios/gas-natural/tarifas-distribucion-gas-natural/Fijacion_gas_natural_norte_2024_2028

3.6.1.3. Otras consideraciones

El modelo toma en cuenta la distancia del punto de carga de las cisternas criogénicas a los tanques fijos de las estaciones, la velocidad de los tractos que trasladan las cisternas llenas y vacías, tiempo de maniobra antes de la carga y descarga del GNL, tiempo de operación efectivo para los tanques, tractos y cisternas criogénicas, para el mantenimiento o contingencia. Los datos utilizados en el modelo son referenciales y pueden ser ajustados sin afectar la estructura del modelo de PL. Los datos se muestran en el Anexo 9.

3.6.2. Nomenclatura

$i = \{1,2,3\}$	Capacidad de los tanques fijos a tierra en m^3
$j = \{1,2,3\}$	Capacidad de las cisternas criogénicas en m^3
$l = \{1,2,3,4,5\}$	Puntos de destino de las estaciones de GNL
$k = \{1,2,3, \dots, 10\}$	Periodo proyectado en años
$Tanq_{ikl}$	Cantidad de tanques fijos a tierra de capacidad i a comprar en el año k para la estación l
$Total_Tanq_{ikl}$	Cantidad total de tanques fijos a tierra de capacidad i en el año k para la estación l
$Cist_{jk}$	Cantidad de cisternas criogénicas de capacidad j a comprar en el año k
$Total_Cist_{jk}$	Cantidad total de cisternas criogénicas de capacidad j disponibles en el año k
$Cist_Anual_k$	Cantidad total de cisternas criogénicas en el año k
$Tracto_k$	Cantidad total de tractos a comprar en el año k
$Costo_Tanq_i$	Costo del tanque fijo a tierra de capacidad i
$Costo_Cist_j$	Costo de la cisterna criogénica de capacidad j
Vol_Tanq_i	Volumen del tanque fijo a tierra de capacidad i
Vol_Cist_j	Volumen de la cisterna criogénica de capacidad j
$Reuso_Max_i$	Reúso máximo de tanques fijos a tierra de capacidad i en el año
D_{lk}	Demanda de GNL en la estación l en el año k
Num_Viaje_{jkl}	Número de viaje del camión cisterna criogénico de capacidad j en el año k hacia la estación l

$Tiempo_Viaje_{jl}$ Tiempo de viaje del camión cisterna criogénico de capacidad j a la estación l

3.6.3. Función objetivo

Minimizar el costo de inversión de la compra de los tanques fijos a tierra y de las cisternas para un periodo de 10 años.

$$Min = \sum_{i=1}^3 \sum_{k=1}^{10} \sum_{l=1}^5 (Costo_Tanq_i) * (Tanq_{ikl}) + \sum_{j=1}^3 \sum_{k=1}^{10} (Costo_Cist_j) * (Cist_{jk}) + \sum_{k=1}^{10} (Tracto_k) * (66,941)$$

3.6.4. Restricciones del modelo de PL

La compra de tanques y camiones cisterna criogénicos se basarán en la demanda, y su uso en el año k será el total acumulado hasta el año k .

$$Total_Tanq_{ikl} = 0 + Tanq_{ikl}; \forall i = 1..3; \forall k = 1; \forall l = 1..5$$

$$Total_Tanq_{ikl} = Total_Tanq_{i(k-1)l} + Tanq_{ikl}; \forall i = 1..3; \forall k \neq 1; \forall l = 1..5$$

$$Total_Cist_{jk} = 0 + Cist_{jk}; \forall j = 1..3; \forall k = 1$$

$$Total_Cist_{jk} = Total_Cist_{j(k-1)} + Cist_{jk}; \forall j = 1..3; \forall k \neq 1$$

El cálculo de reuso máximo de los tanques fijos en el año es un cálculo basado en el tiempo de operación y capacidad del tanque, este dato puede ser modificado de acuerdo con la eficiencia de cada estación de servicio.

$$\sum_{i=1}^3 Vol_Tanq_i * Reuso_Max_i * Total_Tanq_{ikl} \geq D_{lk}; \forall k = 1..10; \forall l = 1..5$$

Por seguridad energética se considera que a partir del año 3 las estaciones de servicio de GNL deberán contar como mínimo con un tanque distinto de 20 m³ de capacidad.

$$Total_Tanq_{ikl} \geq 1; \forall i \neq 1; \forall k \geq 3$$

A modo referencial se considera un total de 330 días de operación al año (7920 horas efectivas de operación anual), este dato puede ser modificado de acuerdo con la eficiencia de cada estación de servicio.

$$\sum_{l=1}^5 Num_Viaje_{jkl} * Tiempo_Viaje_{jl} \leq 7920 * Total_Cist_{jk}; \forall i = 1..3; \forall k = 1..10$$

$$\sum_{j=1}^3 Num_Viaje_{jkl} * Vol_Cist_j \geq D_{lk}; \forall l = 1..5; \forall k = 1..10$$

Considerando que los tractos tienen una vida útil de cinco años, significa que a partir del año 6 se adquiere un nuevo tracto para la red de abastecimiento de GNL. La cantidad de tracto se obtiene a partir de la cantidad total de cisternas criogénicas en el año k .

$$\sum_{j=1}^3 Cist_{jk} = Cist_Anual_k; \forall k = 1..10$$

$$Tracto_k = Cist_Anual_k; \forall k \leq 5$$

$$Tracto_k = Cist_Anual_k + Cist_Anual_{k-5}; \forall k \geq 6$$

$Tanq, Cist, Num_Viaje$: son variables enteras.

3.6.5. Descripción del modelo de PL

Para la simulación del modelo matemático de PL se utilizó el software Lingo, versión 21.0 de alcance comercial, lanzado al mercado el 29 de mayo del 2024, de la empresa LINDO Systems Inc., el cual permite simular de manera ilimitada el número de restricciones, variables enteras y no lineales, entre otros, considerando que el modelo planteado contiene 530 variables en total y 411 restricciones.

Otro punto importante para tener en cuenta es el *performance* de la computadora en la cual se hará la simulación, para la simulación del modelo de investigación se utilizó un servidor en Amazon Web Services (AWS) debido

a que los servidores AWS tienen mejor desempeño en comparación a las computadoras personales.

Los datos de entrada para el modelo de PL se muestran de manera detallada en el Anexo 9, el lenguaje de modelamiento matemático se muestra en el Anexo 10 y los resultados de la simulación con y sin el criterio de la restricción de seguridad energética se muestran en el Anexo 11 y 12, respectivamente.

3.6.6. Resultados del modelo de PL

El modelo propuesto de PL está planteado bajo dos escenarios: i) con restricción por seguridad energética y ii) sin la restricción por seguridad energética. Para la presente tesis se entenderá como seguridad energética al suministro ininterrumpido de GNL a las estaciones de servicio a lo largo de la costa peruana, para lo cual se ha generado una obligación de que a partir del año 3 se adquiera tanques de almacenamiento de capacidades distintas a 20 m³ (30 m³ y 60 m³), con la finalidad de contar con tanque de mayor capacidad en caso ocurriese alguna emergencia en el servicio de suministro.

Para el caso del escenario con restricción por seguridad energética el modelo propuesto de PL tiene una solución óptima de costos mínimos de USD 4 381 337, mientras que, para el escenario sin restricción, la solución óptima es de USD 3 903 435, un 12 % menos, para asegurar el buen funcionamiento de la red de abastecimiento de Gas Natural Licuado (GNL) a través de una cantidad adecuada de tanques de almacenamiento en las estaciones de servicio de GNL, cisternas criogénicas y tractos de GNL.

Considerando la restricción por seguridad energética, todas las estaciones de servicio optarían por comprar en el año 1 un tanque de 30 m³ y 60 m³. Esto significa que, de no existir la restricción de la seguridad energética, las estaciones de servicio optarían por comprar únicamente tanques de almacenamiento de 20 m³. En la Tabla 22 se muestra el número de tanques a comprar para abastecer la demanda de GNL.

Tabla 22 Tanques adquiridos hasta el año 2033

Estación de servicio	Con seguridad energética			Sin seguridad energética		
	20 m ³	30 m ³	60 m ³	20 m ³	30 m ³	60 m ³
E.S. Chiclayo	-	1	1	2	-	-
E.S. Trujillo	-	1	1	2	-	-
E.S. Lima	2	1	1	4	-	-
E.S. Nazca	-	1	1	1	-	-
E.S. Arequipa	-	1	1	2	-	-

Fuente: Modelo PL, Lingo 21.0
Elaboración propia

Respecto a la adquisición de cisternas criogénicas, para ambos escenarios el vehículo de mayor demanda corresponde a la cisterna de capacidad de 50 m³, tal como se muestra en la Tabla 23. Para el escenario con restricción por seguridad energética la cisterna de capacidad de 30 m³ no es relevante. Para ambos escenarios, el costo de adquisición de las cisternas criogénicas es de USD 1 959 183; sin embargo, varía en el año de la adquisición de las cisternas.

Tabla 23 Cisternas criogénicos adquiridos hasta el año 2033

Cisterna criogénica	Con seguridad energética	Sin seguridad energética
30 m ³	-	1
40 m ³	3	1
50 m ³	6	7

Fuente: Modelo PL, Lingo 21.0
Elaboración propia

Con relación a los tractos (vehículo que traslada la cisterna), durante el periodo de 10 años, se requiere la compra de 15 vehículos para ambos escenarios. Como se puede observar en la Tabla 24, la restricción de la seguridad energética no influye en la cantidad de adquisición de tractos; sin embargo, si tiene un impacto en el año de compra.

Tabla 24 Cisternas criogénicos adquiridos hasta el año 2033

Tracto	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Con seguridad energética	1	0	1	2	2	4	0	1	2	2
Sin seguridad energética	1	0	1	2	2	2	0	2	3	2

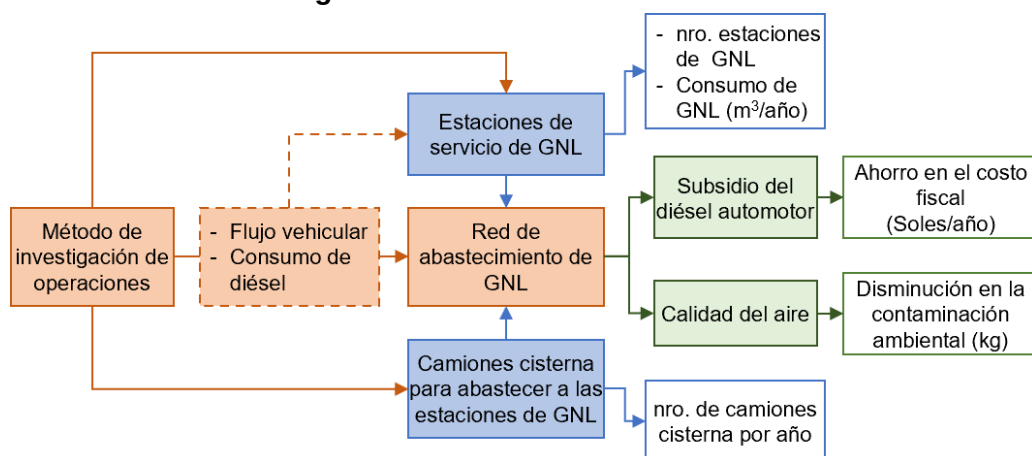
Fuente: Modelo PL, Lingo 21.0
Elaboración propia

CAPITULO IV

ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En el presente capítulo se tendrá en cuenta el constructo de variables identificadas para la investigación, explicadas en el Capítulo I. En la Figura 92 se muestra nuevamente la interrelación de variables para la red de abastecimiento de gas natural licuado (GNL), donde se puede ver que la determinación del número de estaciones de servicio de GNL y camiones cisterna para abastecer a las mismas, son componentes críticos para el desarrollo de una red integrada de abastecimiento de GNL a lo largo de la costa peruana. Asimismo, se observa que la referida red de abastecimiento tiene un impacto en el subsidio del diésel y la calidad del aire, lo cuales serán analizados en el presente capítulo.

Figura 92 Constructo de variables



Elaboración propia

4.1. RED DE ABASTECIMIENTO DE GNL

Se debe tener en cuenta que la determinación de las cinco estaciones mínimas para el funcionamiento óptimo de la red de abastecimiento de GNL en la costa peruana fue producto del análisis del flujo logístico del transporte de carga pesada y el flujo vehicular de transporte pesado de la costa, tal como se muestra con mayor detalle en la sección «3.5. Estaciones de suministro de GNL en la costa» del Capítulo III, estas estaciones fueron un *input* importante para el modelo de programación lineal (PL), debido a que aportó al modelo información como el número de estaciones, tiempo de viajes de los tractos para abastecer a la red de GNL, correlación de demanda de GNL entre las estaciones de servicio de GNL, entre otros.

En la sección de «3.6.6. Resultados del modelo de PL» del Capítulo III, se muestra los resultados obtenidos de la aplicación de la técnica de programación lineal (PL) para la obtención de la solución óptima global de la función objetivo al mínimo costo para obtener el modelo de red de abastecimiento de GNL, donde la aplicación de PL ha permitido calcular de manera integral el costo eficiente para la red de abastecimiento de GNL, para un horizonte de 10 años, de acuerdo con la demanda estimada. Cabe indicar que se ha simulado dos escenarios: i) con seguridad energética, que consiste en obligar al concesionario la adquisición de un tanque de almacenamiento distinto de la capacidad de 20 m³, con la finalidad de que opte por tanques de mayor capacidad en caso pueda surgir algún evento imprevisto que impida el repostaje de los tanques, dicha restricción se debe cumplir a partir del año 3. En los Anexos 9, 10, 11 y 12 se presenta los datos de entrada para el modelo de PL, la codificación y resultados del modelo con mayor detalle.

4.1.1. Tanques de almacenamiento de GNL

Para los diez años de estimación de la demanda de GNL de la red de abastecimiento de GNL, con la exigencia de seguridad energética se requiere un total de 12 tanques de almacenamiento (2 de 20 m³, 5 de 30 m³ y 5 de 60 m³) y sin la restricción se requiere únicamente 11 tanques de almacenamiento de 20 m³, debido al menor costo que representa la compra del tanque del tipo 20 m³ para el inversionista. El costo total en la compra de tanques es de USD 1 418 039 con la restricción de seguridad energética y USD 940 137 sin la restricción energética.

4.1.2. Cisternas criogénicas para abastecer a las estaciones de GNL

Para el caso de las cisternas, con la exigencia de la seguridad energética se requiere un total de 9 (3 de 40 m³ y 6 de 50 m³), donde el camión de capacidad de 30 m³ no es atractivo por el inversionista, es decir su costo no justifica la capacidad de transportar GNL, donde la inversión en las cisternas criogénicas es de USD 1 959 183. Por otro lado, sin la restricción de seguridad energética se requiere un total de 9 (1 de 30 m³, 1 de 40 m³ y 7 de 50 m³), cuyo costo de inversión es de USD 1 959 183. Se puede observar que ambos escenarios representan los mismos costos de inversión; sin embargo, en el escenario con seguridad energética la compra de cisternas criogénicas se realiza durante los primeros seis años, mientras que, en el escenario sin la restricción de seguridad energética la compra de cisternas criogénicas se realiza durante los diez años estimados de la demanda.

4.1.3. Tractos para trasladar las cisternas criogénicas

Considerando que el tracto es un vehículo que traslada las cisternas criogénicas, se usa un único modelo. Para el modelo de PL se toma como referencia el tracto de la marca Shacman que utiliza como combustible el GNL, que es una marca que viene siendo usada en Perú. Para ambos escenarios, con y sin restricción de la seguridad energética se requiere la adquisición de 15 tractos, cuyo costo de inversión es de USD 1,004,115.

El costo total mínimo de los componentes de la red de abastecimiento de GNL para el escenario con restricción de la seguridad energética es de USD 4 381 337, mientras que, para el escenario sin dicha restricción es de USD 3 903 435, es decir un 12 % menos. Para ambos escenarios el activo de más valor son las cisternas criogénicas, que representan un 45 % del total de la inversión para el caso del escenario con restricción de la seguridad energética y un 50 % para el caso escenario sin restricción.

El modelo de PL aplicado a la red de abastecimiento permite modificar las variables de entrada como la cantidad y capacidad de los tanques de almacenamiento y

cisternas criogénicas, el tiempo de uso relacionado al mantenimiento de los tanques de almacenamiento y cisternas criogénicas, tiempo de operación de los tractos, tiempo de repostaje de los tanques y cisternas, entre otros, a fin de fidelizar el modelo a la realidad.

Se debe tener en cuenta que las variables de entrada al modelo son teóricas, debido a las limitaciones señaladas en la sección «1.9. Alcances y limitaciones de la investigación» del Capítulo I, como el lento desarrollo de la red de abastecimiento en la costa peruana y la falta de información oficial; sin embargo, las variables del modelo generado con PL pueden ser ajustados fácilmente cuando la red de abastecimiento cubra la totalidad de la costa peruana y logre una mayor madurez para tener datos más robustos.

Por otro lado, el modelo de PL aplicado a la red de abastecimiento de GNL no solo es una herramienta para determinar la cantidad de componentes y costo de la red de abastecimiento, sino que podría ser una herramienta que brinde soporte en la toma de decisiones del Estado (Ministerio de Energía y Minas y Osinergmin) para determinar, por ejemplo, una tarifa única de consumo de GNL para vehículos pesados, lo cual viene siendo ampliamente discutido por distintos actores de la industria del gas natural.

4.2. SUBSIDIO DEL DIÉSEL AUTOMOTOR

Según el análisis realizado en la sección «El FEPC y su impacto económico» correspondiente al Capítulo III de la tesis de investigación, se puede advertir de los altos costos fiscales que viene generando el subsidio de los combustibles, los cuales se calculan en base del precio de paridad de importación (PPI), el volumen de la demanda de combustible y los factores de compensación y/o aportación. Para el cálculo del subsidio del diésel automotor en los próximos diez años se describirán cada una de las variables mencionadas.

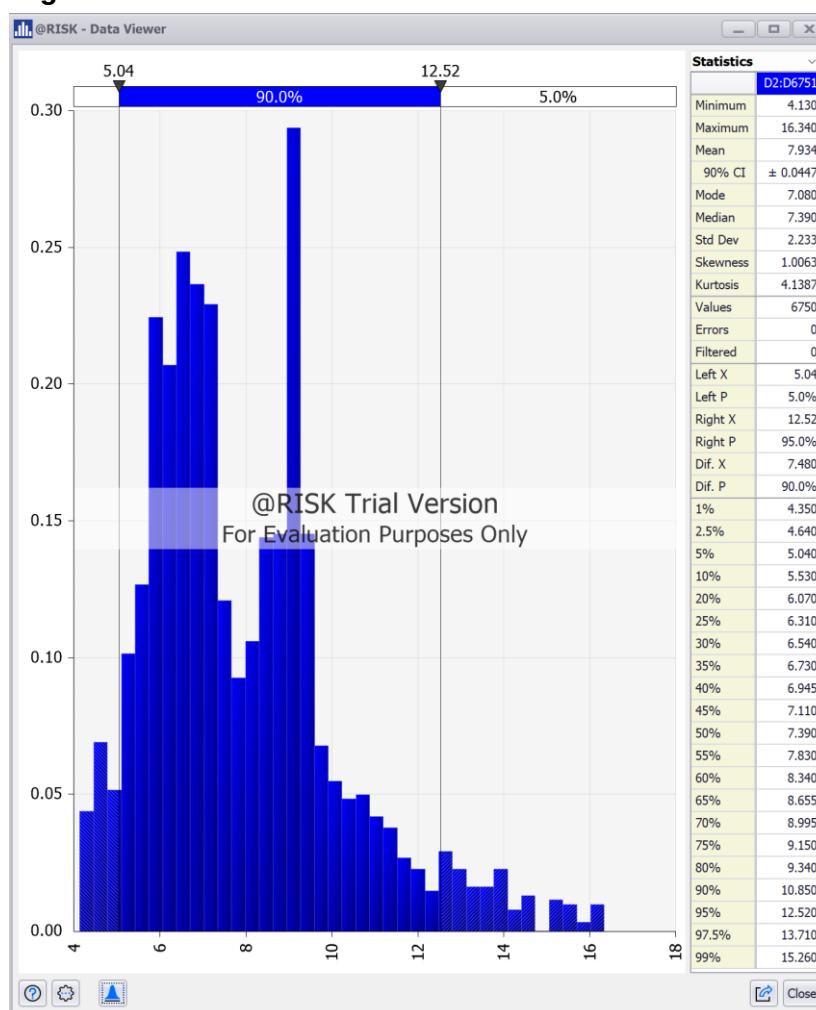
4.2.1. Precio de paridad de importación

Para el diésel automotor el precio de paridad de importación (PPI) es un precio referencial que el Osinergmin calcula de manera teórica y publica semanalmente, de acuerdo con la norma «Procedimiento para el Cálculo de

los Precios de Referencia de los Combustibles derivados del Petróleo» aprobada con Resolución del Consejo Directivo de Osinergmin Nos 174-2021-OS/CD y 127-2023-OS/CD, teniendo como referencia diversos factores como costos de eficiencia, costos de oportunidad en un mercado competitivo, donde *las actividades y los precios relacionados con petróleo crudo y los productos derivados, se rigen por la oferta y demanda*, de acuerdo a lo establecido en la Ley Orgánica de Hidrocarburos.

En la Figura 93 se muestra los datos de los PPI para el diésel desde el 14 de octubre de 2004 hasta el 16 de setiembre de 2024, analizados por densidad de probabilidad, donde se puede observar que el 90 % de los datos se encuentra entre los precios de 5.04 y 12.52 Soles/Galón.

Figura 93 Datos históricos del PPI del diésel - Soles/Galón



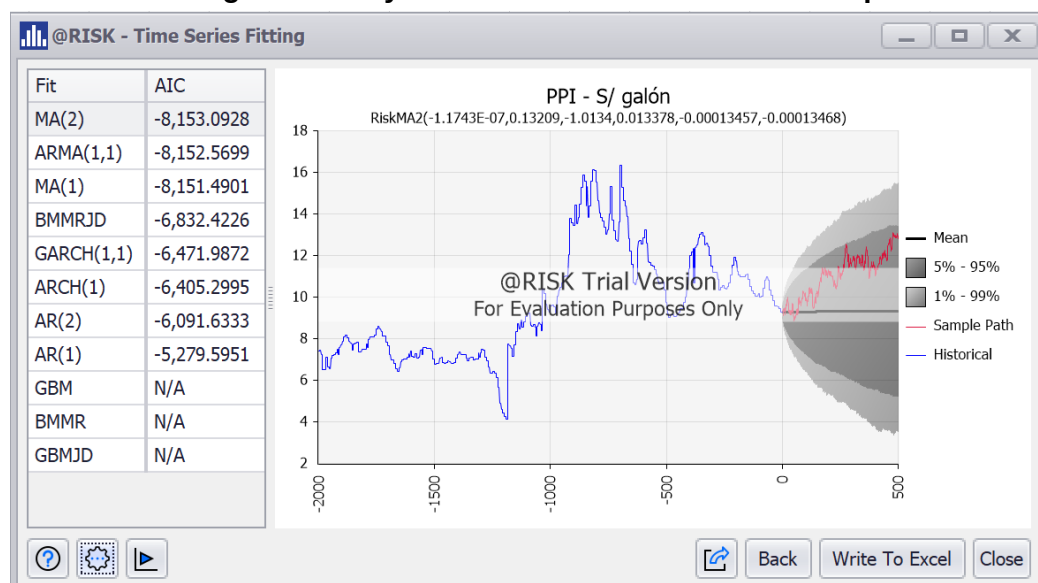
Fuente: Minem, factores de aportación/compensación. Análisis de datos en @RISK - Palisade
Elaboración propia

Se debe tener en cuenta que el cálculo para la proyección del PPI del diésel para los próximos diez años, a fin de determinar el subsidio en el que se incurriría en caso no se use el GNL como combustible, es algo complejo debido a que el diésel es un derivado del petróleo y éste presenta altas fluctuaciones en el precio, toda vez que está relacionado a las decisiones de la Organization of the Petroleum Exporting Countries (OPEC), regulaciones ambientales para disminuir los gases de efecto invernadero, a tensiones políticas y geopolíticas, lo cual dificulta proyectar datos con cierta robustez.

Cuando existe cierto grado de impredecibilidad, se puede hacer proyecciones basadas en probabilidades de ocurrencia. En la Figura 94 se puede observar que, para una proyección de 500 datos de los precios de referencia de diésel, con una probabilidad del 90 %, fluctúan aproximadamente entre 5.25 y 13.5 Soles/Galón.

Para el cálculo del subsidio del diésel se optará por los valores de fluctuación del 90 % de probabilidad comprendido entre el 5.04 y 12.52 Soles/Galón, correspondiente a los datos históricos, debido a que los valores de los datos proyectados se encuentran comprendidos entre los valores máximos y mínimos históricos.

Figura 94 Proyección del PPI con series de tiempo

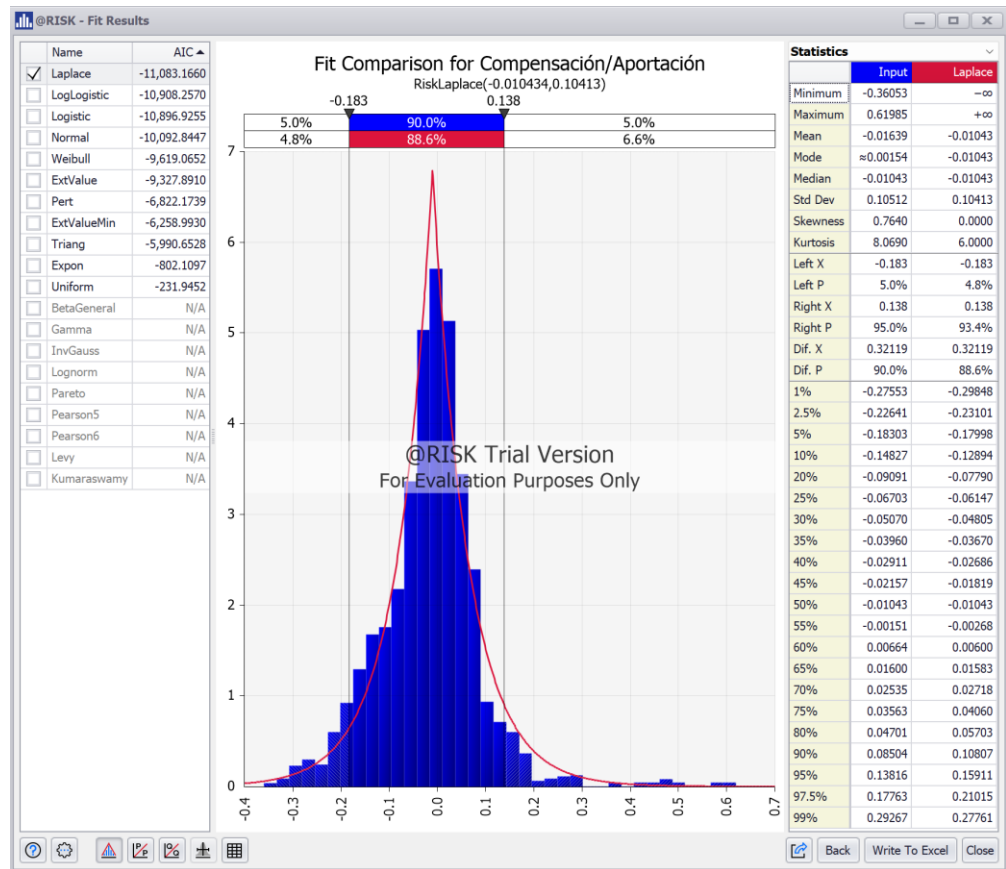


Fuente: Modelo elaborado en @RISK - Palisade
Elaboración propia

4.2.2. Factores de aportación / compensación

Para el caso de los factores de compensación y aportación que se aplica a los precios de referencia, se ha calculado el porcentaje que representa dichos factores respecto del PPI, desde el 14 de octubre de 2004 hasta el 16 de setiembre de 2024, considerando un valor negativo para las compensaciones y un valor positivo para las aportaciones al FEPC. Asimismo, para conocer cuál es la tendencia de dichos factores que se podría aplicar a los PPI en los próximos años, se ha analizado el comportamiento histórico de estos datos, los cuales obedecen a una distribución de Laplace, por lo que se infiere que los porcentajes de compensación y aportación obedecerían el mismo comportamiento de Laplace en un futuro. En la Figura 95 se observa que la distribución continua de Laplace tiene casi un calce perfecto con los datos históricos de los porcentajes de compensación y aportación, con una media de -0.01043 y una escala de 0.073631029.

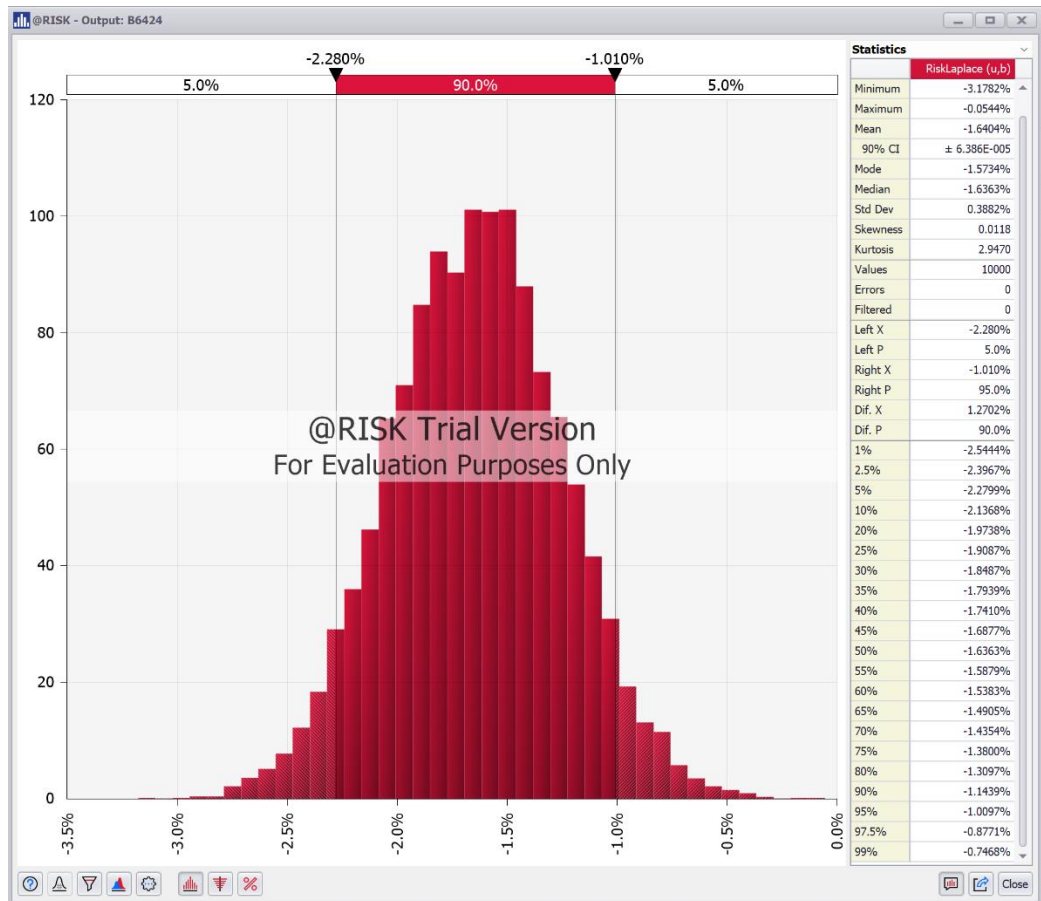
Figura 95 Distribución del factor de aportación/compensación en porcentaje



Fuente: Minem, factores de aportación/compensación. Modelo en @RISK - Palisade
Elaboración propia

Para el cálculo de los porcentajes de compensación y aportación futuros, se ha utilizado como herramienta la simulación Montecarlo, para la generación de datos aleatorios considerando como parámetros una media de -0.016394648 y escala de 0.074331065 aplicado a una distribución de Laplace, de diez mil iteraciones, tal como se muestra en la Figura 96, donde el 90 % de probabilidad de ocurrencia se encuentra entre los factores de -2.28 % y -1.01 %, lo que significa que es el factor de compensación que se aplicaría al FEPC, es decir teóricamente se generaría un gasto fiscal al Estado, debido a que se tendría que compensar a los productores e importadores de diésel.

Figura 96 Distribución de factores de aportación/compensación futuros en porcentaje



Fuente: Factores de aportación/compensación. Modelo en @RISK - Palisade
Elaboración propia

4.2.3. Demanda de diésel automotor

En la sección «Demanda base de GNL» del Capítulo IV de la presente tesis, se propuso una demanda para los próximos años. Sin embargo, para poder cuantificar la cantidad de diésel que se podría dejar de subsidiar por elegir el GNL como combustible, se ha realizado una conversión de energía según el poder calorífico⁷³, obteniendo que 1 galón de GNL es equivalente a 0.7 galón de diésel. Luego se realiza una conversión volumétrica de m³ a galones, debido a que el precio de referencia del diésel se encuentra en Soles/Galón. En la Tabla 25 se muestra el volumen de diésel equivalente en galones por año.

Tabla 25 Demanda base de GNL y diésel

Combustible	2024	2025	2026	2027	2028
GNL m ³	2,818	3,993	16,231	57,284	91,985
Diésel m ³	1,903	2,696	10,960	38,682	62,115
Diésel galón	502,698	712,304	2,895,420	10,218,793	16,409,044

Combustible	2029	2030	2031	2032	2033
GNL m ³	97,962	100,165	108,253	116,707	128,651
Diésel m ³	66,151	67,639	73,100	78,809	86,875
Diésel galón	17,475,271	17,868,260	19,311,065	20,819,159	22,949,828

Fuente: Minem y Sistema Internacional (SI)
Elaboración propia

Con las variables y valores definidos se procede a realizar el cálculo del subsidio, para lo cual se debe tener en cuenta que los valores del PPI del diésel y los porcentajes factores de aportación (FA) y compensación (FC) se fundamente a través de probabilidades de ocurrencia, y de acuerdo con la fórmula propuesta se realizará el análisis de sensibilidad del subsidio para el diésel automotor.

⁷³ Para el caso del diésel se utilizó el factor de conversión de 36,169 TJ/(10³ m³) del Balance de Energía del 2022 del Ministerio de Energía y Minas, asimismo, se considera que 1 TJ = 951.487 MMBTU, obteniendo un valor de 130.27 MBTU/Galón. Para el GNL se calculó a partir de la densidad del GNL, cuyo dato se obtuvo de las estadísticas de los embarques de GNL reportado por Perupetro, teniendo como valor promedio 0.043031m³/MMBTU, cuya equivalencia es igual a 87.97 MBTU/Galón.

$$[\text{Subsidio}_{\text{Soles}} \cong \text{Diésel}_{\text{Galón}}] * [\%FA + \%FC] * \left[\frac{\text{PPI}_{\text{Soles}}}{\text{Galón}} \right]$$

En la Figura 97 se muestra el modelo del análisis de sensibilidad del subsidio considerando un umbral de hasta el 90 % de la probabilidad de ocurrencia para el porcentaje de los factores de aportación y compensación que se encuentra entre los valores del -2.280% al -1.010% y para el PPI que oscila entre los precios de 5.04 y 12.5 Soles/Galón. Se puede observar que en el caso de los porcentajes de aportación y compensación se obtuvieron solo datos negativos, lo que significa que en los próximos años hay una alta probabilidad de compensación, es decir el Estado va a generar un gasto fiscal debido a que tendría que subsidiar el diésel para que los importadores no sobrepasen la banda de precios.

Aplicando el modelo de sensibilidad del subsidio para cada año da como resultado un valor que varía entre un monto máximo de compensación (% factor de compensación menor y un PPI mayor) y un monto mínimo de compensación (% factor de compensación mayor y un PPI menor). En la Tabla 26 se muestra los resultados del probable gasto fiscal en que incurriría el Estado en los próximos años, si seguimos dependiendo del diésel como combustible automotor.

Tabla 26 Subsidio del diésel en millones de soles

Compensación	2024	2025	2026	2027	2028
Baja	-0.026	-0.036	-0.147	-0.520	-0.835
Alta	-0.143	-0.203	-0.827	-2.917	-4.684

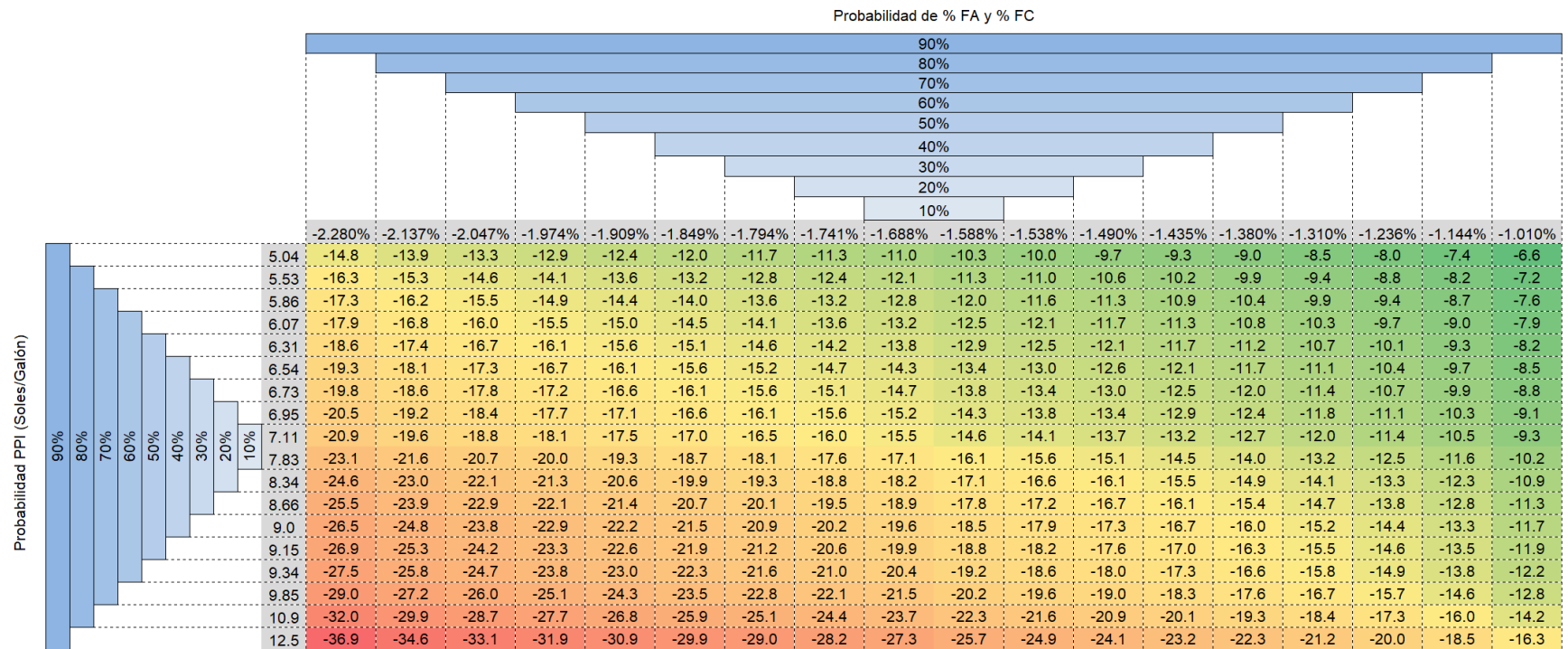
Compensación	2029	2030	2031	2032	2033
Baja	-0.890	-0.910	-0.983	-1.044	-1.168
Alta	-4.988	-5.101	-5.512	-5.946	-6.551

Elaboración propia

De acuerdo con el pronóstico de los datos para los próximos años, los resultados indican que se generaría una pérdida anual, es decir las compensaciones son mayores a las aportaciones en el año, y si este patrón se repite hay una probabilidad del 90 % de que el subsidio acumulado se

encuentre entre los valores de 6.6 y 36.9 millones de soles para la demanda estimada (GNL como diésel equivalente). En la Figura 96 se muestra el análisis de sensibilidad del subsidio acumulado para los próximos 10 años, donde el mejor escenario se muestra en color verde y el peor escenario en color rojo.

Figura 97 Análisis de sensibilidad de subsidio acumulado del diésel automotor en millones de soles



Elaboración propia

4.3. IMPACTO DEL DIÉSEL AUTOMOTOR Y GNL EN LA CALIDAD DEL AIRE

En esta sección se realizará una estimación en las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) como el metano (CH_4), dióxido de carbono (CO_2) y óxido nitroso (N_2O); emisiones de gases precursores del GEI como monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO_x) y compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM); y material particulado (MP), para lo cual se debe determinar los factores de emisión que serán aplicados al combustible proyectado para los próximos diez años.

De acuerdo con el Ministerio de Transportes y Comunicaciones el factor de emisión es un valor que relaciona la cantidad de un compuesto liberado a la atmósfera y una unidad de actividad del proceso⁷⁴, por ejemplo, una unidad de masa por unidad de energía o calor (kg/TJ) o unidad de masa por unidad de recorrido (g/km).

El *Intergovernmental Panel on Climate Change* o Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) utiliza el *Tier* o Nivel para categorizar los niveles de complejidad de la metodología para la estimación de emisiones, así tenemos que el *Tier 1* es el método básico, que usa valores predeterminados y datos específicos de cada país, normalmente se utiliza cuando el país carece de data propia; el *Tier 2* es similar al *Tier 1*, pero es más específico del país y considera mucho más variables como condiciones climáticas locales y propiedades del suelo y el *Tier 3* es el método más complejo, que suele usar modelos y sistemas de mediciones de inventario, requiere una data de actividad de alta resolución y desgloses subnacionales.⁷⁵

4.3.1. Emisiones de GEI

Para el cálculo de los factores de emisión de los GEI se utilizó la metodología publicada por el IPCC, denominada *2006 IPCC Guidelines for*

⁷⁴ «Guía para cuantificar las emisiones de GEI y Contaminantes Climáticos de Vida Corta (CCVC) en el sector: Cambio Climático, Calidad del Aire y Transporte» a cargo del Ministerio de Transportes y Comunicaciones.

⁷⁵ 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, elaborado por IPCC.

National Greenhouse Gas Inventories o «Directrices del IPCC de 2006 para los inventarios nacionales de gases de efecto invernadero», correspondiente al Volumen N° 2: Energía, referido al capítulo de combustión móvil, considerando los factores de emisión correspondiente al transporte en carretera, para camiones de servicio pesado y autobuses, cuyo código corresponde al 1 A 3 b iii y al capítulo de combustión estacionaria para el factor de emisión del biodiésel.

Así también se hará correcciones a los factores de emisión producidas por el diésel B5 (diésel y 5 % de biodiésel), de acuerdo con la metodología del Balance Nacional de Energía del 2022 del Ministerio de Energía y Minas.

4.3.1.1. Factor de emisión de CO₂

Para el caso del gas natural se aplicará la metodología de *American Petroleum Institute*, según el *Compendium of greenhouse gas emissions methodologies for the oil and natural gas industry* y utilizada por el Ministerio de Energía y Minas, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$FE_{CO_2} = \frac{1}{\text{Conversión del volumen molar}} \times MW_{GN} \times Wt\%C_{GN} \times \frac{44}{12}$$

Donde, la conversión del volumen molar tiene un valor de 23.685 m³/kgmol, para los valores del peso molecular del gas natural (MW_{GN}) y el contenido de carbono de gas natural en porcentaje de masa (Wt%_{C_{GN}}), se obtienen del Balance Nacional de Energía 2022, cuyos valores son 17.486 y 74.332 %; respectivamente, estos valores se basan en la información proporcionada por la empresa Pluspetrol Perú Corporation respecto a la composición molar del gas natural, poder calorífico (1,066.48 BTU/PC) y la densidad relativa del gas natural⁷⁶.

Reemplazando los valores en la formula se tiene:

⁷⁶ Balance Nacional de Energía 2022, sección «Factor de emisión de CO₂ - gas natural», elaborado por el Ministerio de Energía y Minas y sección «4.3 Fuel Combustion Emissions Estimated from Fuel Composition and Usage» elaborado por American Petroleum Institute.

$$FE_{CO_2} = \frac{1}{23.685} \times 17.486 \times 74.332\% \times \frac{44}{12} \quad \frac{kg}{m^3}$$

Para convertir a unidades de energía se convierte el poder calorífico 1,066.48 BTU/PC a 39,735,915.64 J/m³; pero se considera el 90 % de este valor para obtener el poder calorífico neto, según la *International Energy Agency*, obteniendo el valor de 56,265 kgCO₂/TJ.⁷⁷

$$FE_{CO_2} = \frac{2.012168443}{35,762,324.08} \times 10^{12} \quad \frac{kg}{TJ}$$

Para calcular el factor de emisión del diésel automotor o diésel B5, se corrige el factor de emisión del diésel considerando una mezcla del 5 % de biodiésel. Se toma los valores de los factores de emisión por defecto de la Guía del IPCC para el diésel y biodiésel de 74,100 kg/TJ y 70,800 kg/TJ, respectivamente, obteniendo un valor de 73,935 kg/TJ de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$FE_{CO_2} = (74100 \times 95\% + 70800 \times 5\%) \quad \frac{kg}{TJ}$$

4.3.1.2. Factores de emisión de CH₄ y N₂O

A diferencia de la estimación del CO₂, las emisiones de CH₄ y N₂O son más difíciles de estimar de acuerdo con el IPCC, debido a que dependen de la tecnología del vehículo referido al control de emisión del combustible y las condiciones de uso. Existen tres métodos alternativos para estimar las emisiones de CH₄ y N₂O de los vehículos terrestres i) kilómetros recorridos por el vehículo, ii) combustible vendido y iii) requiere datos específicos del país para generar factores de emisión que se basa en la actividad para las subcategorías de vehículos, y puede incluir modelos nacionales. Para el presente trabajo de investigación se utilizará el *Tier 1* o método básico que

⁷⁷ Para mayor detalle sobre el cálculo del factor de emisión revisar el documento en excel, libro «FE GN», correspondiente a «RAGEI 2019, Reporte anual de gases de efecto invernadero del sector energía 2019, Categoría: Combustión estacionaria y emisiones fugitivas».

utiliza factores de emisión basados en el combustible vendido, debido a que no se tiene información del consumo de combustible por tipo de vehículo.⁷⁸

Para determinar los factores de emisión del CH₄ y N₂O se utiliza los factores de emisión por defecto de la guía del IPCC, relacionado al Volumen N° 2: Energía, capítulo de combustión móvil ⁷⁹. Para el CH₄ se tienen los valores de 92 kg/TJ y 3.9 kg/TJ correspondiente el gas natural y diésel, respectivamente y para el N₂O se tienen los valores de 3 kg/TJ y 3.9 kg/TJ referido al gas natural y diésel, respectivamente.

Para el caso del biodiésel se usa los factores de emisión por defecto de la Guía del IPCC, relacionado al Volumen N° 2: Energía, capítulo de combustión estacionaria⁸⁰. Para el CH₄ y N₂O los factores son 3 kg/TJ y 3.9 kg/TJ. Con estos valores se corrige los factores de emisión del diésel para obtener el factor de emisión del diésel automotor o diésel B5. Para el CH₄ y N₂O se tiene los valores de 3.855 kg/TJ y 3.9 kg/TJ, respectivamente.

4.3.1.3. Aplicación de los factores de emisión del CO₂, CH₄ y N₂O

Para obtener la cantidad de emisión de los Gases de Efecto Invernadero (GEI) que se obtiene al quemar el GNL y compararlo con el diésel automotor, se debe calcular el volumen de diésel equivalente de GNL, para lo cual se requiere hallar las densidades energéticas par ambos combustibles. La densidad energética del GNL se calcula a partir de los datos de los embarques de exportación de GNL reportado por Perúpetro S.A., obteniendo un valor promedio de 0.000092814 TJ/galón. Para el diésel automotor se considera un valor de 0.00013743 TJ/galón, según el «Reporte sectorial de gases efecto invernadero 2019», del sector energía, correspondiente a la categoría de

⁷⁸ «2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories», Volume 2: Energy, Chapter: Mobile Combustion elaborado por IPCC.

⁷⁹ Los valores corresponden a la «Table 3.2.2: Road transport N₂O and CH₄ default emission factors and uncertainty ranges», de la guía del IPCC.

⁸⁰ Los valores corresponden a la «Table 2.2: Default emission factors for stationary combustion in the energy industries», de la guía del IPCC.

combustión móvil, publicado por el Ministerio del Ambiente. Como resultado se obtiene que 1.675 galones de GNL es equivalente a 1 galón de diésel.⁸¹

En la sección «3.6.1.1. Demanda base de GNL» de la presente tesis, se ha estimado el volumen de GNL que se puede consumir en los próximos años y que reemplazaría al diésel automotor. Para la aplicación de los factores de emisión de los GEI se considerará el consumo de combustible acumulado de los 10 años proyectados. En la Tabla 27 se tiene la demanda acumulada en volumen de GNL por un valor de 724,049 m³, este valor es convertido a energía en 17,565 TJ, debido a que las unidades de los factores de emisión están en kg/TJ. Para el caso del diésel automotor se aplica el volumen de diésel equivalente, obteniendo un volumen de 431,211 m³, el cual convertido a energía es igual a 15,596 TJ.⁸²

Tabla 27 Demanda acumulada proyectada en TJ

GNL m ³	GN TJ	Diésel B5 m ³	Diésel TJ
724,049	17,565	431,211	15,596

Fuente: API y Minem
Elaboración propia

En la Tabla 28 se muestra los factores de emisión para el cálculo de las emisiones de los GEI para el gas natural y el diésel automotor.

Tabla 28 Factores de emisión GEI (kg/TJ)

GEI	Diésel	Biodiésel B100	Diésel B5	GN
CO ₂	74,100	70,800	73,935	56,265
CH ₄	3.9	3	3.855	92
N ₂ O	3.9	3.9	3.9	3

Fuente: IPCC, API y Minem
Elaboración propia

⁸¹ La densidad energética promedio del GNL es de 23.24 MMBtu/m³. Para la conversión de unidades de utilizó lo siguiente: 1 MMBtu = 1.055056×10⁹ Joules (J) y 1m³ = 264.172 galones.

⁸² El volumen de GNL se transforma en gas natural (GN) multiplicando por el factor de compresión de 600, luego se aplica los factores de conversión para obtener el valor final en TJ: 35.31466247 PC/m³ 27.36322635 TEP/10⁶PC y 41.83995381*10³ TEP/TJ. Respecto al diésel, se transforma el volumen a barriles con el factor de conversión 0.1589873 m³/bbl, luego se transforma a energía a través de los siguientes factores de conversión: 137.430810281897 TEP/10³ bbl y 41.83995381*10³ TEP/TJ.

Para obtener la cantidad de emisiones de GEI se multiplica el factor de emisión por el volumen de diésel y gas natural, según la siguiente fórmula:

$$\text{Cantidad de emisión}_{\text{kg}} = \text{Factor de Emisión}_{\frac{\text{kg}}{\text{TJ}}} * \text{Diésel B5o GNL}_{\text{TJ}}$$

En la Figura 98 se muestra la cantidad de emisiones de GEI por combustión de GNL y diésel automotor equivalente del volumen de la demanda acumulada de la proyección de 10 años, donde se observa una gran diferencia entre la cantidad de emisión de CO₂ y CH₄ a diferencia del N₂O. Estos gases son considerados de larga vida al ser químicamente estables y persistir en la atmósfera por décadas o incluso hasta siglos, por lo que sus emisiones tienen un alto impacto en el clima en el largo plazo⁸³.

El tiempo de duración del CH₄ en la atmósfera es mucho más corta que el CO₂; sin embargo, el CH₄ es más eficaz que el CO₂ cuando de atrapar la radiación se trata. En términos de emisión, el CH₄ es 28 veces mayor que el CO₂ en un periodo de 100 años⁸⁴ y 84 veces mayor en un periodo de 20 años⁸⁵. El CH₄ presenta una vida media de 12 años frente al CO₂ que puede durar siglos⁸⁶.

Se debe tener en cuenta que el CH₄ tiene un alto impacto en el corto plazo a diferencia del CO₂, debido a su larga persistencia en la atmósfera. Para el caso del GNL, se puede observar que emite mayores cantidades de CH₄ en comparación al diésel, esto debido a que el gas natural está compuesto por casi un 90 % de metano, mientras que el diésel no posee dicha molécula. Por otro lado, el diésel emite mayor cantidad de CO₂ a diferencia del GNL, debido a que está compuesto por hidrocarburos más pesados y el GNL posee mayor proporción de hidrógeno en comparación al carbono.

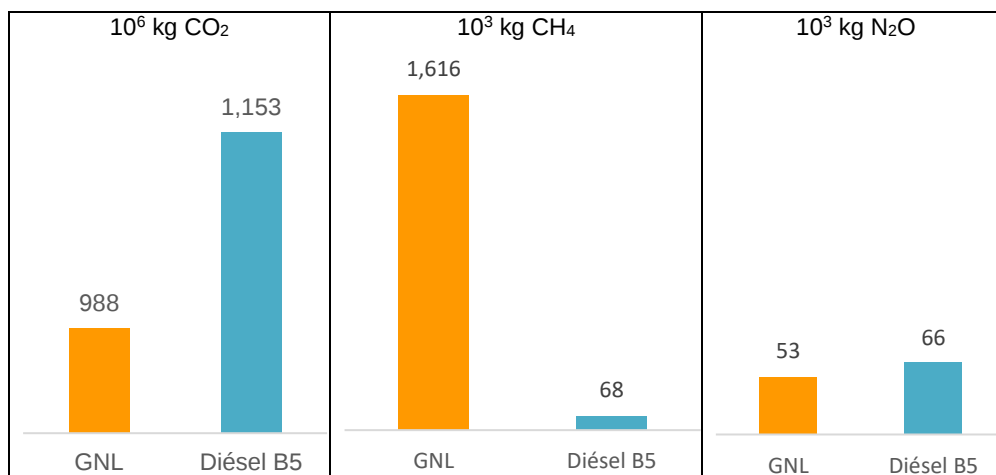
Figura 98 Emisiones de GEI para el GNL y diésel B5

⁸³ «Informe aceptado por el Grupo de Trabajo I del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre Cambio Climático pero no aprobado en detalles» del IPCC.

⁸⁴ «Overview of Greenhouse Gases» elaborado por U.S. Environmental Protection Agency, 26 de noviembre del 2024.

⁸⁵ «Carbon management and fossil fuels: Methane emissions» elaborado por European Commission: Energy, Climate change, Environment, noviembre del 2024.

⁸⁶ «Global Methane Tracker 2022: Methane and climate change», elaborado por The International Energy Agency (IEA).



Fuente: IPCC, API y Minem
Elaboración propia

4.3.2. Emisiones de gases precursores del GEI

De acuerdo con el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), el inventario de precursores incluye al óxido de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles diferentes del metano (COVDM) y emisiones de los compuestos de azufre (SO_x); sin embargo, con lo que respecta al transporte terrestre la fuente principal de emisiones corresponde al NO_x, CO y COVDM, por lo que serán motivo de estudio en el trabajo de investigación. Estos gases en presencia de luz solar contribuyen a la formación de ozono (O₃) en la tropósfera, por lo que se les denomina precursores del ozono. Asimismo, las emisiones del NO_x tiene un rol importante en el ciclo del nitrógeno de la tierra.⁸⁷

4.3.2.1. Factores de emisión de NO_x, CO y COVDM

Para el cálculo de los factores de emisión de los gases precursores del GEI se hará uso de la *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023*, elaborado por la *European Environment Agency*, de acuerdo con lo recomendado por el IPCC⁸⁸. Para comparar las emisiones entre el GNL y el diésel automotor en los vehículos de carga pesada, se ha elegido los factores

⁸⁷ «2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories», Volume 1: General Guidance and Reporting, Chapter 7: Precursors and Indirect Emissions.

⁸⁸ Ídem.

de emisión de la guía del EMEP/EEA correspondiente a los vehículos pesados⁸⁹.

El factor de emisión del diésel se corrige con el factor de emisión del biodiésel para obtener el factor de emisión del diésel automotor o diésel B5, para todos los gases precursores del GEI, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$FE_{NO_x,CO,COVDM} = (FE_{Diésel} \times 95\% + FE_{Biodiésel} \times 5\%) \frac{g}{kg}$$

De acuerdo con el análisis del transporte carretero peruano en el Capítulo III de la presente investigación, se ha determinado que el parque automotor de vehículos pesados está compuesto principalmente por vehículos del tipo Euro II y Euro III, por lo que se ha optado corregir el factor de emisión del diésel con el factor de emisión del biodiésel. Según el EMEP/EEA, los valores propuestos para el biodiesel 100 corresponden a una tecnología de vehículo/motor Euro III, para el caso del NOx se presume un aumento del 9 % en las emisiones de los vehículos pesados a diésel, mientras que, para el CO se produce una disminución del 20 %. Para el caso del COVDM se presume cierta disminución en las emisiones en la mezcla de diésel y biodiesel, en aquellos vehículos anteriores al tipo Euro III; sin embargo, no hay información específica que indique el valor o estimación en la mejora de las emisiones, por lo que se considera que el factor del diésel B5 es igual al factor del diésel, debido a que se usa solo un 5% de biodiesel en la mezcla, en el Anexo 11 se muestra el efecto de la mezcla del biodiésel en las emisiones de vehículos a diésel. En la Tabla 29 se muestra los valores de los factores de emisión para los gases precursores del GEI.

⁸⁹ Part B: Technical chapters; Energy; Combustion; 1.A.3.b.i-iv Road transport 2024; 1.A.3.b.iii Heavy-duty vehicles including buses; Table 3-5: Tier 1 emission factors for CO and NMVOCs; Table 3-6: Tier 1 emission factors for NOx and PM; Table 3-89: Effect of biodiesel blends on diesel vehicle emissions.

Tabla 29 Factores de emisión de gases precursores GEI (g/kg)

Gases precursores del GEI	Diésel	Biodiésel 100	Diésel B5	GN
NO _x	25.95	28.29	26.07	17.10
CO	6.10	4.88	6.04	3.98
COVDM	0.90	-	0.90	0.14

Fuente: EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023
Elaboración propia

4.3.2.2. Aplicación de los factores de emisión del NO_x, CO y COVDM

De manera similar al cálculo de las emisiones de los gases del GEI, se convierte el volumen (m³) de combustible de GNL y diésel automotor proyectado para los próximos años a kilogramos, a través de las densidades de dichos combustibles. Para el GNL se considera una densidad de 454.8 kg/m³ y para el diésel B5 una densidad de 860.3 kg/m³, obteniendo los valores de la Tabla 30.⁹⁰

Tabla 30 Demanda acumulada proyectada en kg

GNL m ³	GN kg	Diésel B5 m ³	Diésel kg
724,049	329,297,485	431,211	420,685,334

Fuente: API, Minam y EVA
Elaboración propia

Para obtener la cantidad de emisiones de los gases precursores del GEI se multiplica el factor de emisión de la Tabla 29 por el volumen de diésel y gas natural de la Tabla 30, según la fórmula siguiente:

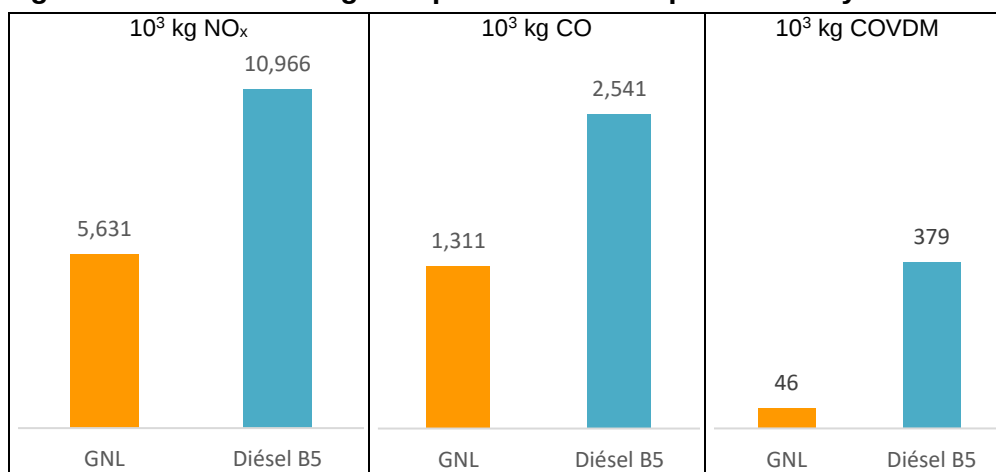
$$\text{Cantidad de emisión}_g = \text{Factor de Emisión}_{\frac{g}{kg}} * \text{Diésel B5 o GNL}_{kg}$$

En la Figura 99 se muestra la cantidad de emisiones de los gases precursores del GEI por combustión de GNL y diésel automotor equivalente

⁹⁰ El valor de la densidad del GNL se ha tomado de la hoja de datos de seguridad (MSDS) de GNL de la empresa Energía de Valor Ambiental (EVA) de fecha 10 de setiembre de 2024. Para el diésel B5 se ha considerado el valor consignado en el documento en excel, libro «Fact. con.», correspondiente a «RAGEI 2019, Reporte anual de gases de efecto invernadero del sector energía 2019, Categoría: Combustión móvil».

del volumen de la demanda acumulada de la proyección de 10 años, donde se observa que el impacto negativo de las emisiones del diésel B5 es significativamente mayor que el GNL, un 95 % más de NO_x, un 94 % de CO y un 721 % de COVDM.

Figura 99 Emisiones de gases precursores GEI para el GNL y diésel B5



Fuente: EMEP/EEA, API y Minam
Elaboración propia

4.3.3. Material particulado (MP)

De acuerdo con el Ministerio del Ambiente, a través del «Plan de Acción para el Mejoramiento de la Calidad del Aire de Lima y Callao 2021-2025», el 58 % de las emisiones del material particulado proviene del transporte urbano, además, señala que las fuentes móviles de MP_{2.5} están relacionadas con la combustión de diésel de vehículos pesados de una antigüedad de más de 13 años.

Según *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023*, la fracción gruesa MP_{2.5-10} es insignificante en los tubos de escape de los vehículos, por lo que se analizará el impacto del MP_{2.5} en la calidad del aire. Los factores de emisión másica de MP_{2.5} corresponden a las emisiones primarias del tráfico rodado y no a la formación de aerosoles secundarios a

partir de reacciones químicas en la atmósfera minutos después de la emisión.⁹¹

Para comparar la cantidad de emisiones de MP_{2.5} entre el GNL y el diésel automotor, se considera los factores de emisión de la guía del EMEP/EEA correspondiente a los vehículos pesados⁹². Para el caso del diésel automotor o diésel B5, se corrige con el factor de emisión del biodiésel⁹³ para obtener el factor de emisión del diésel automotor o diésel B5, de acuerdo con la siguiente fórmula:

$$FE_{MP_{2.5}} = (FE_{Diésel} \times 95\% + FE_{Biodiésel} \times 5\%) \quad \frac{g}{kg}$$

Según el EMEP/EEA, la mezcla de biodiesel 100 con diésel, disminuye un 47 % en la emisión de MP_{2.5} en vehículos pesados a diésel. En la Tabla 31 se muestra los factores de emisión de MP_{2.5} para el diésel B5 y GNL.

Tabla 31 Factor de emisión de MP_{2.5} (g/kg)

Partícula	Diésel	Biodiésel B100	Diésel B5	GN
MP _{2.5}	0.55	0.29	0.54	0.02

Fuente: EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023
Elaboración propia

En la Figura 100 se muestra que la cantidad de emisiones de MP_{2.5} por combustión de diésel B5 es significativamente mayor que el GNL, para el volumen de la demanda acumulada de la proyección de 10 años. Según *U.S. Environmental Protection Agency* (EPA), el MP tiene repercusiones en la salud debido a que puede penetrar los pulmones y afectar al corazón; respecto al daño ambiental, al ser muy ligeras son transportadas por el viento largas distancias que pueden depositarse en el suelo y agua, además de reducir la visibilidad en el ambiente (United States Environmental Protection Agency, 2024). En el Anexo 12 se muestra de manera detallada los factores de conversión utilizados para el cálculo de la combustión de GNL y diésel B5,

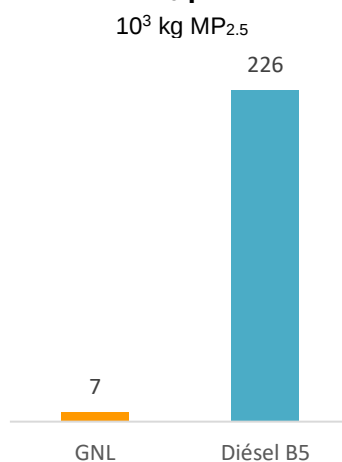
⁹¹ Part B: Technical chapters; Energy; Combustion; 1.A.3.b.i-iv Road transport 2024; 1.A.3.b.iii Heavy-duty vehicles including buses.

⁹² *Ídem*, Table 3-6: Tier 1 emission factors for NO_x and PM.

⁹³ *Ídem*, Table 3-89: Effect of biodiesel blends on diesel vehicle emissions.

así como, la conversión de volumen de GNL y diésel B5 a unidades de energía y masa.

Figura 100 Emisiones MP_{2.5} para el GNL y diésel B5



Fuente: EMEP/EEA, API
Elaboración propia

Se debe tener en cuenta que el GNL no puede usarse en un motor diésel sin modificaciones, debido a su alto octanaje (120 a 130), es decir, presenta resistencia a una preignición o detonación prematura durante la combustión de un motor; por el contrario, el diésel al presentar un alto índice de cetano (40 a 55) está diseñado para autoencenderse al someterse a una alta presión y temperatura en el tanque de combustible, a diferencia del bajo índice de cetano del GNL (0 a 15) al estar compuesto de alrededor de un 90 % de metano. Por lo que la mayoría de los sistemas comerciales utilizan una bujía para iniciar la combustión del gas natural (European Environment Agency, 2023).

Para que el GNL haga uso de motores diésel, se suele emplear motores de ciclo dual (conversión parcial), es decir, se utiliza una cantidad de diésel para iniciar la combustión, a causa de su alto índice de cetano; también se usa motores diseñados exclusivamente para el uso del GNL, como el motor de ciclo de Otto (conversión total), que funciona de manera similar al motor de gasolina que aprovecha su alto índice de octanaje. El motor de ciclo dual está concebido para funcionar simultáneamente diésel y un combustible gaseoso como el GNL, dosificándose ambos combustibles por separado, donde la variación de dichos combustibles está en función de la operación de vehículo. Requiere un nuevo sistema de inyección que

puede modificar significativamente el motor, y al funcionar con GNL requiere de un sistema criogénico (Barroso, y otros, 2013).

Según el Capítulo III de la presente investigación, referido al transporte por carretera, nuestro parque automotor de vehículos pesados correspondiente al 2022, se determinó que un 26 % de los vehículos de carga y un 43 % de los vehículos de transporte de pasajeros tenían una antigüedad de hasta 5 años y, los vehículos de más de 5 años de antigüedad en su mayoría pertenecían a un Euro II y Euro III. Esto significa que al tener un parque antiguo de vehículos pesados, la conversión de un motor diésel sería más complejo y costoso para su uso como ciclo dual a GNL, lo que implica que un operador de transporte pesado tendría que realizar una inversión adicional o adquirir un vehículo dedicado a GNL, que es más costoso que un vehículo a diésel, en caso quiera hacer uso del GNL como combustible.

Por otro lado, si bien el uso de GNL se sustenta en que emite menor cantidad de CO₂, para su masificación en la matriz energética, lo cual tendría un menor impacto en la emisión de GEI, no se debe perder de vista que también es un combustible que emite grandes cantidades de CH₄ que impactan en los GEI, tal como se observa en la Figura 97. También es importante considerar que existen en el mercado vehículos a diésel con un estándar del tipo Euro VI, es decir, cuentan con regulaciones más estrictas que reducen las emisiones GEI y partículas. En ese sentido, el uso del GNL como combustible dependerá más de la política energética del Gobierno que del operador de transporte en sí mismo; donde priorice los costos y beneficios para el país, considerando variables como el subsidio, afectación ambiental, producción e importación de combustible, entre otros.

4.4. CONTRASTACIÓN DE HIPÓTESIS

En esta sección se somete a prueba la hipótesis planteada en la presente tesis, a través de un diseño de investigación, recolectando información mediante instrumentos de medición y su respectiva interpretación. La hipótesis puede ser contrastada mediante dos vías generales de acuerdo a lo siguiente: *i)* Demostrando: El uso de argumentos lógicos, experienciales y bibliográficos que soporte la hipótesis, mediante la razón, datos, simulaciones, sentido crítico y académico que demuestre el por qué o cómo algo podría ocurrir o funcionar y *ii)* Verificando: Cuando se somete a una prueba empírica la argumentación, significa comprobar en la experiencia que

la propuesta o hipótesis funciona, para ello se testea y contrasta con la realidad (Horna, 2012).

Para la contrastación de hipótesis, según los cálculos aplicados a la red de abastecimiento de gas natural licuado (GNL) para vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana, se utilizará el medio de la demostración en lugar de la verificación; debido a que predomina el uso de herramientas lógicas como la programación lineal, análisis de datos, entre otros, y más aún, teniendo en cuenta que la red de abastecimiento de GNL en el Perú se encuentra en una etapa de desarrollo (existen dos puntos de repostaje de GNL en la costa, que aún no es suficiente para atender toda la demanda de vehículos pesados en el litoral de la costa peruana) y se prevé que tendrá un auge en un corto plazo, por lo que realizar una contrastación por el medio de verificación no es pertinente.

4.4.1. Contrastación de hipótesis general

Como hipótesis general se planteó «La aplicación de la programación lineal mejorará la red de abastecimiento de gas natural licuado en los vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana». Al respecto, se ha demostrado con los resultados del modelo de programación lineal (PL) en la sección de «3.6.6. Resultados del modelo de PL» del Capítulo III, que el modelo permite optimizar el costo de inversión, a través del uso eficiente de los componentes como los tanques de almacenamiento y camiones cisterna para abastecer la demanda de GNL, cuyo análisis además es de manera integral para las cinco estaciones de servicio ubicadas a lo largo de la costa peruana, por un horizonte de diez años, en ese sentido al tener un resultado consistente y razonable se acepta la hipótesis.

4.4.2. Contrastación de hipótesis específicas

Una de las hipótesis específicas fue «El análisis del flujo vehicular y el consumo de diésel determinará la ubicación estratégica de las estaciones de servicio de la red de abastecimiento de gas natural licuado en los vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana». Al respecto, con los resultados obtenidos en la sección «3.5. Estaciones de suministro de GNL en

la costa» del Capítulo III se puede observar que tanto el flujo vehicular de transporte pesado y la demanda de diésel fueron variables críticas para determinar la ubicación de las cinco estaciones de servicio de GNL a lo largo de la costa peruana, tal como se puede observar en la Figura 82, por lo que se acepta la hipótesis.

La otra hipótesis específica fue «La aplicación de la programación lineal determinará el número de camiones cisterna de la red de abastecimiento de gas natural licuado en los vehículos pesados de largo recorrido en la costa peruana». Al respecto, tal como se puede corroborar en la sección de «3.6.6. Resultados del modelo de PL» del Capítulo III, el modelo de PL determinó 26 camiones cisterna de capacidades de 34 m³ y 50 m³, para un horizonte de diez años de funcionamiento de la red de abastecimiento de GNL, además de determinar la cantidad de tanques de almacenamiento de distintas capacidades para las cinco estaciones de servicio. En ese sentido, se acepta la hipótesis.

CONCLUSIONES

1. Para asegurar que la red de abastecimiento de GNL en la costa peruana suministre de manera continua el GNL a los vehículos pesados, se requiere un mínimo de cinco estaciones de servicio de GNL, ubicadas en Chiclayo, Trujillo, Lima, Nazca y Arequipa (ver Figura 82), considerando para ello la demanda característica para cada región, las cuales, de acuerdo con el modelo de programación lineal (PL) aplicada a una demanda proyectada de diez años, bajo el escenario de restricción de seguridad energética, se requiere un total de 12 tanques de almacenamiento (2 de 20 m³, 5 de 30 m³ y 5 de 60 m³), 9 cisternas criogénicas (3 de 40 m³ y 6 de 50 m³) y 15 tractos, cuyo costo total de inversión es de USD 4 381 337, mientras que, para el escenario sin la aplicación de dicha restricción, se requiere un total de 11 tanques de almacenamiento 20 m³, 9 cisternas criogénicas (1 de 30 m³, 1 de 40 m³ y 7 de 50 m³) y 15 tractos, cuyo costo total de inversión es de USD 3 903 435.
2. De continuar con el comportamiento histórico que resulta de aplicar los factores de aporte y compensación al precio de referencia del diésel automotor, según el modelo de simulación de Montecarlo aplicado a la demanda proyectada de diez años para el diésel equivalente (1 galón de GNL $\leftrightarrow$ 0.7 galón de diésel), hay una probabilidad del 90 % de que el subsidio acumulado se encuentre entre los valores de 6.6 y 36.9 millones de soles acumulado. Lo que significa que el uso del diésel automotor en nuestro país seguiría generando un gasto fiscal para el Estado, en caso no se tenga en el mercado una alternativa de combustible para vehículos pesados que no requieran ser subsidiados.

3. Con relación al impacto ambiental que se genera como producto de la combustión del diésel automotor y GNL, para la demanda proyectada de diez años, se observa que el GNL supera ampliamente al diésel en la emisión de CH₄ (2270 %), esto se debe a que el GNL está compuesto casi por un 90 % de metano, respecto a los demás gases contaminantes y partículas, es el diésel quien supera significativamente al GNL según lo siguiente: CO₂ (32 %), N₂O (25 %), NO_x (95 %), CO (94 %), COVDM (721 %) y MP (3331 %). En el acumulado de emisiones contaminantes se tiene que el diésel emite un 33 % más que el GNL.
4. En aquellos países o regiones donde la industria del gas natural tiene un nivel de madurez, como Estados Unidos, China y la Unión Europea, se puede advertir que el uso del GNL está básicamente dirigido a los camiones de carga y tiene poca participación en el mercado automotor (2 - 10 %) a diferencia de combustibles como el diésel, biodiesel e incluso el GNC, debido a que dichos países vienen promoviendo políticas para incentivar el uso del hidrógeno como fuente sostenible de cero emisiones, lo que ha generado un desinterés en promover incentivos para el uso masivo del GNL.
5. El parque automotor de vehículos pesados en el Perú está compuesto aproximadamente por un 60 % de vehículos del tipo Euro II y III, lo cual es un problema para el ambiente, debido al uso tecnologías de más de una década de antigüedad, que no permiten un mayor control en las emisiones contaminantes, considerando que en la actualidad está disponible vehículos de tecnología Euro VII, que cumplen con normas regulatorias para la baja emisión. Asimismo, el 98 % de vehículos pesados usa diésel y el resto usa gas natural (GNC y GNL), lo cual significa que hay un daño en la calidad del aire a causa de la combustión del diésel.

RECOMENDACIONES

1. El país tiene seis concesiones de distribución de gas natural ubicadas a lo largo de la costa peruana, cada concesión opera de manera particular según el contrato firmado con el Estado, es decir, al tener condiciones contractuales distintas difieren en la tarifa final del consumidor (residencial, vehicular, industria, eléctrica y otros), lo cual genera un desincentivo para que las regiones distintas a Lima y Callao (tarifas más bajas) opten por el gas natural, por lo cual es importante que el Estado promueva, para el caso del uso del GNL como combustible vehicular, una tarifa única de GNL a fin de ser una opción atractiva para los operadores de transporte pesado.
2. Mejorar las políticas públicas en el país para incentivar la inversión privada y público-privada dirigida al desarrollo de grandes infraestructuras de redes de transporte y a la transición energética de combustibles fósiles hacia fuentes renovables, como es el caso la Unión Europea que viene desarrollando treinta proyectos de cero emisiones en el transporte carretero *Towards zero emission road transport (2Zero)*, en Asia se tiene el proyecto *More LNG Stations for Green China*, en Estados Unidos se viene promoviendo corredores que promueven el uso de combustibles alternativos a través del repostaje de vehículos eléctricos, hidrógeno y gas natural; es decir sin el apoyo del Gobierno será muy difícil generar nueva infraestructura que busca una transporte eficiente y sostenible.
3. Se recomienda utilizar modelos matemáticos como la programación lineal (PL) en sectores económicos clave como energía, minería e hidrocarburos, debido que permiten resolver problemas complejos, simulando una realidad a un bajo

costo, obteniendo resultados factibles que maximizan recursos y minimizan costos, como el caso de la red de abastecimiento de GNL.

4. Fomentar la investigación de la aplicación del hidrógeno en el transporte carretero peruano, como fuente de energía alternativa a los combustibles convencionales como la gasolina, diésel y gas natural, debido a que Estados Unidos, China y la Unión Europea, a modo de ejemplo, vienen adoptando políticas gubernamentales para el uso masivo de vehículos eléctricos que buscan la descarbonización y emisiones de contaminación cero.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Agility Fuel Systems. (2013). *Natural gas fuels: CNG and LNG*. Recuperado el 30 de Setiembre de 2013, de <http://www.agilityfuelsystems.com/why-natural-gas/lng-vs-cng.html>
- American Petroleum Institute. (2009). *Compendium of GHG Emissions Methodologies for Oil and Natural Gas Industry*. Austin, Texas.
- Applus IDIADA. (2018). LNG Blue Corridors: A summary of the main activities performed during the first four years of the project. *Proceedings of 7th Transport Research Arena TRA 2018* (pág. 9). Vienna: Vienna 2018 A digital era for transport.
- Asia Pacific Natural Gas Vehicles Association. (2023). *ANGVA*. Recuperado el 7 de Oct de 2015, de <http://www.angva.org/>
- Barroso, P., Ribas, X., Pita, M., Dominguez, J., De Seia, E., & García, J. (2013). Study of dual-fuel (diesel + natural gas) particle matter and CO2 emissions of a heavy-duty diesel engine during transient operation. Poland.
- BCRP. (2023). El Fondo para la Estabilización de Precios de Combustibles (FEPC) en el Perú. *Política Fiscal*, 11.
- Berrosapi, Colina, Holguín, & Zuñiga. (2021). *Propuesta de uso del GNL como combustible para transporte vehicular de carga pesada e interprovincial de pasajeros a lo largo del corredor vial costero en el Perú (Tesis de Maestría)*. Lima: Universidad ESAN.
- Chart Ferox. (2014). *LNG fuelling in Europe a growing opportunity for gas industry*. Prague.
- CHART, M. G. (2014). *LNG fuelling in Europe a growing opportunity for gas industry*. Prague.

- Chun Y., A. (2014). *Modelling the Global Prospects and Impacts of Heavy Duty Liquefied Natural Gas Vehicles in Comptable General Equilibrium (Tesis de Maestría)*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.
- Cornejo, Atoche, & Mejía. (2012). Optimización de una red de abastecimiento de gas natural licuado . *Latin American and Caribbean Conference*, 10.
- Cummins Westport. (2011). *Natural Gas for Refuse Applications*. Washington.
- D.M. Bajany, X. X. (2017). A MILP model for truck-shovel scheduling to minimize fuel consumption. *The 8th International Conference on Applied Energy - ICAE2016*.
- European Commission. (18 de octubre de 2023). *European Commission*. Obtenido de TRIMIS European Commission: <https://trimis.ec.europa.eu/project/lng-blue-corridors>
- European Environment Agency. (Noviembre de 2023). *EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2023*. Copenhagen, Dinamarca.
- Exxon Mobil. (2015). *Exxon Mobil, The Outlook for Energy: A View for 2040*. Texas: Exxon Mobil.
- Exxon Mobil. (2023). *Exxon Mobil Global Outlook: Our view to 2050*. Texas: Exxon Mobil.
- FC Gas Intelligence. (2014). *Natural Gas Vehicle Market Whitepaper USA 2013-2014*. London.
- Federal Highway Administration. (1 de Octubre de 2023). *Alternative Fuel Corridors*. Obtenido de Federal Highway Administration: https://www.fhwa.dot.gov/environment/alternative_fuel_corridors
- Gonzales, Loayza, More, & Simeon. (2019). *Propuesta de utilización del Gas Natural Licuefactado en los camiones mineros - Evaluación de beneficios (Tesis de Maestría)*. Lima: Universidad ESAN.
- Hamdy A., T. (2012). *Investigación de operaciones*. México: Pearson Educación.
- Hernández S., R., & Mendoza, C. P. (2018). *Metodología de la Investigación: Las rutas cuantitativa, cualitativa y mixta*. México: McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Hernández S., R., Fernández C., C., & Baptista L., M. d. (2014). *Metodología de la Investigación*. México: McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. DE C.V.

- Hillier, F. S., & Lieberman, G. J. (2010). *Introducción a la investigación de operaciones*. México: McGraw Hill Interamericana Editores, S.A. de C.V.
- Horna, D. A. (2012). *7 Pasos para una tesis exitosa*. Lima: Universidad de San Martín de Porres.
- IANGV. (04 de 01 de 2020). *The International Association for Natural Gas Vehicles – IANGV*. Obtenido de <https://www.iangv.org>
- Infogas. (enero de 2023). *Infogas*. Obtenido de Estadísticas: <http://www.infogas.com.pe>
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2006). 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Hayama, Japan.
- International Council On Clean Transportation. (2022). The evolution of heavy-duty vehicles in China: A retrospective evaluation of CO₂ and pollutant emissions from 2012 to 2021 . *International Council On Clean Transportation*, 26.
- International Energy Agency. (2023). *Italy 2023 Energy Policy Review*. París: International Energy Agency.
- International Monetary Fund. (2023). IMF Fossil Fuel Subsidies 2023. *International Monetary Fund*, 32.
- ITS-UC Davis. (2013). *Heavy-Duty Class 8 Trucks: Alternative Fuels and Economics*.
- Jarod M., P. (2010). *The Role of Natural Gas as a Vehicle Transportation Fuel (Tesis de Maestría)*. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology.
- Jefferies Group LLC. (2015). *Air Pollution in China: Behind the Clouds, the Sun is Shining*. New York.
- Jefferies Group LLC. (2015). *Natural Gas: Get Outta My Dreams, Get Into My Car*. New York. Obtenido de www.jefferies.com
- Kenworth. (2015). *Kenworth Truck Company Offers Advice on Spec'ing for Natural Gas Power*. Washington.
- Le Fevre, C. (2017). LNG as a transport fuel. *Oxford Energy Forum*, 14-16.
- Mikolajková-Alifov, M. (2019). A Set of Models for Optimization of Gas Distribution Networks. *Åbo Akademi University*.
- Ministerio de Energía y Minas. (2012). *Elaboración de la Nueva Matriz Energética Sostenible y Evaluación Ambiental Estratégica, como Instrumentos de Planificación*. Lima.

- Ministerio de Energía y Minas. (2016). Balance de Energía Útil 2013. *Balance de Energía Útil*, (pág. 60). Lima.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones. (17 de Setiembre de 2020). Guía para cuantificar las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) y Contaminantes Climático de Vida Corta (CCVC) en el sector transportes. 55. Lima, Perú.
- Ministerio del Ambiente. (27 de Julio de 2021). Plan de Acción para el Mejoramiento de la Calidad de Aire de Lima y Callao 2021-2025. Lima, Perú.
- Ministerio del Energía y Minas. (2023). Reporte Anual De Gases De Efecto Invernadero del Sector Energía 2019. Lima, Perú.
- National Renewable Energy Laboratory. (2023). *Clean Cities Coalitions 2021 Activity Report*. Colorado: National Renewable Energy Laboratory.
- NGV America . (2023). Annual Report 2022. *NGV America* , 20.
- NGV communications group. (2015). Vietnam speeds up adoption of natural gas powered buses. *Asian NGV Communications*, 28. Recuperado el 24 de 09 de 2015, de www.ngvjournal.com
- NGVA Europe. (2015). *EU Policy on Alternative/Renewable Fuels and GHG Emissions*. Recuperado el 8 de Oct de 2015, de www.ngvaeurope.eu
- Osinergrmin. (2009). *Los Precios de los Combustibles Líquidos y el Fondo de Estabilización de Precios*. Lima: Teps Group.
- Perupetro S.A. (Mayo de 2014). Aspectos que destacan a los 10 años del Proyecto Camisea: Reflexiones y Perspectiva para el Proyecto Histórico Peruano del Gas Natural y del Sector de Hidrocarburos del País. San Diego, California, Estados Unidos.
- Report Buyer. (05 de 2015). *China Natural Gas Fueling Station Equipment Industry Report, 2015-2018*. Recuperado el 16 de 09 de 2015
- Rojas, G. (2005). *Ingeniería de Yacimientos de Gas Condensado* (2da. Edición ed.). Puerto La Cruz, Venezuela: Editorial.
- Sedigas. (Julio de 2017). Especificaciones técnicas de SEDIGAS para conductores de cisternas que realizan descargas de GNL. Unidad 4 – Transporte en cisternas. Barcelona, España.

- Sedigas. (Febrero de 2019). Especificaciones técnicas de SEDIGAS para las actividades de Técnico de Plantas Satélite de GNL. Unidad 1 – Las Plantas Satélite y el GNL. Barcelona, España.
- Sedigas. (Febrero de 2019). Especificaciones técnicas de SEDIGAS para las actividades de Técnico de Plantas Satélite de GNL. Unidad 3 – Definiciones. Barcelona, España.
- Sedigas. (Febrero de 2019). Especificaciones técnicas de SEDIGAS para las actividades de Técnico de Plantas Satélite de GNL. Unidad 4 – Composición y funcionamiento de las Plantas Satélite. Barcelona, España.
- Sedigas. (Febrero de 2019). Especificaciones técnicas de SEDIGAS para las actividades de Técnico de Plantas Satélite de GNL. Unidad 7 – Operación de las Plantas Satélite. Barcelona, España.
- Shell. (2019). China - The move to LNG: Examining the Primary Drivers for Uptake of LNG as a Transport fuel in China. *19 th International Conference & Exhibition on Liquefied Natural Gas* (pág. 12). Shanghai: LNG 2019 Shanghai.
- United Nations. (2003). *Blue Corridor Project*. Switzerland.
- United States Environmental Protection Agency. (16 de Julio de 2024). *Health and Environmental Effects of Particulate Matter (PM)*. Obtenido de United States Environmental Protection Agency: <https://www.epa.gov/>
- Valderrama M., S. (2002). *Pasos para elaborar proyectos de investigación científica: Cuantitativa, cualitativa y mixta*. Lima: Editorial San Marcos E.I.R.L.
- Xin-Tong Wei, Q. L.-R.-T.-H. (Noviembre de 2021). MILP formulations for highway petrol station replenishment. *Petroleum Science*.

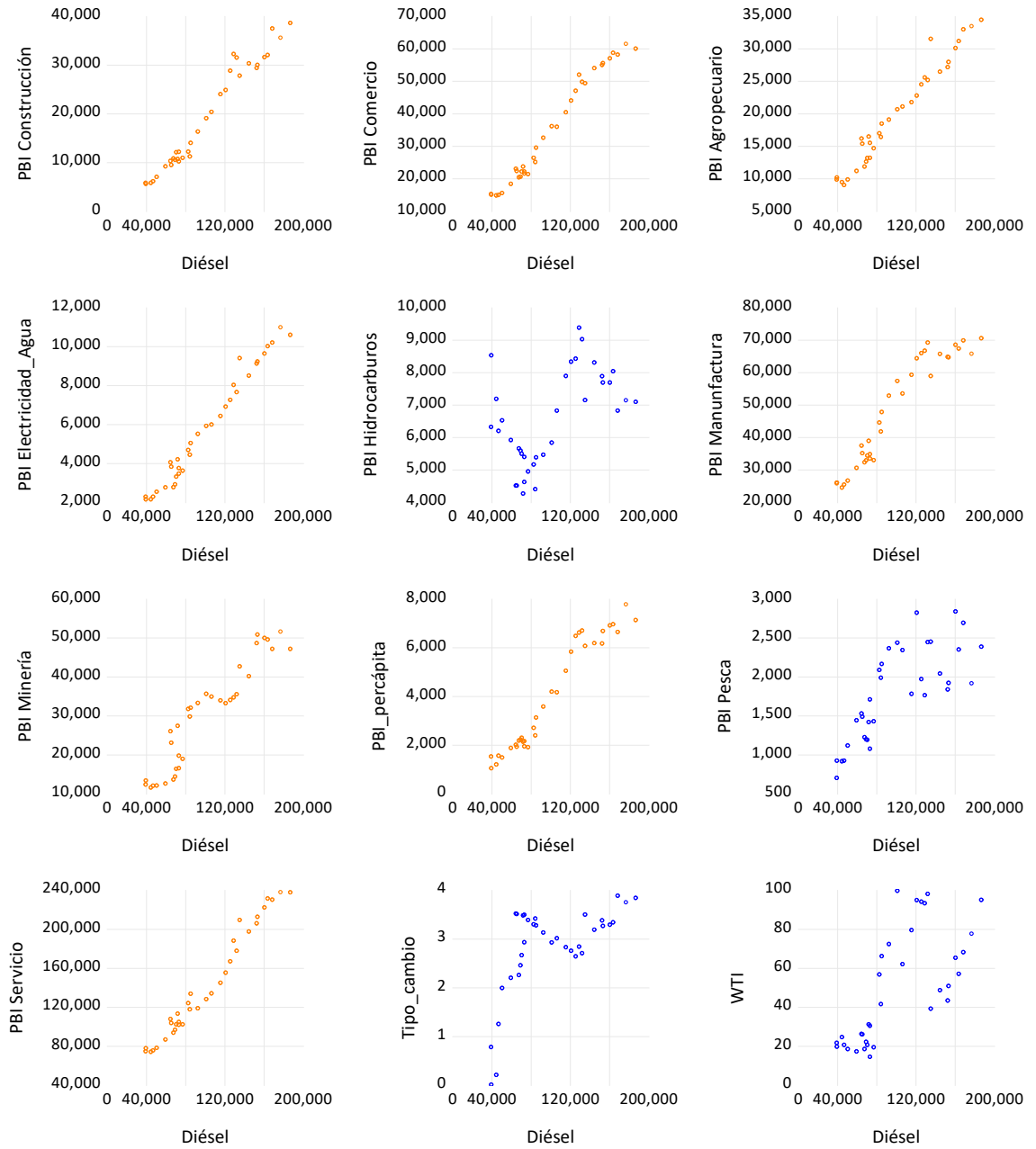
ANEXOS

Anexo 1: Fuentes de energía para el transporte carretero

Tipo	Ambito	Modo	Medio	FUENTES DE ENERGIA						TOTAL
				Gasolina Motor GM	Diesel Oil DO	Fuel Oil FO	Gasolina Aviación GA	Combustible Jet JET	Gas Licuado GLP	
PASAJEROS	Urbano Lima Callao	Carretero	Automóvil	7 796,6	199,0	0,0	0,0	0,0	17,3	8 012,9
			Station Wagon	1 190,8	458,7	0,0	0,0	0,0	1,0	1 650,4
			Taxi	20 120,2	4 188,6	0,0	0,0	0,0	185,2	24 493,9
			Omnibus	0,0	17 967,0	0,0	0,0	0,0	0,0	17 967,0
			Subtotal							
	Urbano Resto Pais	Carretero	Lima-Callao	29 107,5	22 813,3	0,0	0,0	0,0	203,5	52 124,4
			Automóvil	2 635,2	84,6	0,0	0,0	0,0	0,0	2 719,8
			Station Wagon	411,0	187,6	0,0	0,0	0,0	0,0	598,6
			Taxi	2 574,7	697,1	0,0	0,0	0,0	0,0	3 271,9
			Omnibus	124,4	8 351,8	0,0	0,0	0,0	0,0	8 476,2
	Urbano Total Pais	Carretero	Subtotal							
			Resto Pais	5 745,4	9 321,0	0,0	0,0	0,0	0,0	15 066,5
			Automóvil	10 431,8	283,6	0,0	0,0	0,0	17,3	10 732,7
			Station Wagon	1 601,8	646,2	0,0	0,0	0,0	1,0	2 249,0
			Taxi	22 694,9	4 885,7	0,0	0,0	0,0	185,2	27 765,8
CARGAS	Cargas Lima Callao	Carretero	Omnibus	124,4	26 318,8	0,0	0,0	0,0	0,0	26 443,3
			Subtotal							
			Total Pais	34 853,0	32 134,3	0,0	0,0	0,0	203,5	67 190,8
	Cargas Resto Pais	Carretero	Carr. < 2 Tn Pick-up	2 943,0	1 694,2	0,0	0,0	0,0	0,0	4 637,2
			Carr. < 2 Tn Camioneta Rural	1 466,1	2 410,3	0,0	0,0	0,0	0,0	3 876,4
			Carr. < 2 Tn Camioneta Panel	272,3	455,6	0,0	0,0	0,0	0,0	727,9
			Carr. > 2 Tn Camión	251,3	10 684,3	0,0	0,0	0,0	0,0	10 935,6
			Carr. > 2 Tn Remolcador	3,6	955,9	0,0	0,0	0,0	0,0	959,5
			Carr. > 2 Tn Semiremolcador	3,5	971,4	0,0	0,0	0,0	0,0	974,9
			Subtotal Carretero Lima Callao	4 939,8	17 171,7	0,0	0,0	0,0	0,0	22 111,5
	Cargas Total Pais	Carretero	Carr. < 2 Tn Pick-up	2 865,8	1 373,7	0,0	0,0	0,0	0,0	4 239,5
			Carr. < 2 Tn Camioneta Rural	808,4	1 106,6	0,0	0,0	0,0	0,0	1 915,0
			Carr. < 2 Tn Camioneta Panel	80,7	112,4	0,0	0,0	0,0	0,0	193,1
			Carr. > 2 Tn Camión	449,0	19 935,8	0,0	0,0	0,0	0,0	20 384,8
			Carr. > 2 Tn Remolcador	4,4	1 173,8	0,0	0,0	0,0	0,0	1 178,2
			Carr. > 2 Tn Semiremolcador	4,9	1 371,3	0,0	0,0	0,0	0,0	1 376,2
			Subtotal Carretero Resto Pais	4 213,2	25 073,5	0,0	0,0	0,0	0,0	29 286,7
			Subtotal Carretero Total Pais	9 153,0	42 245,2	0,0	0,0	0,0	0,0	51 398,3
TOTAL TRANSPORTE POR MODOS			Carr. < 2 Tn Pick-up	5 808,8	3 067,8	0,0	0,0	0,0	0,0	8 876,6
			Carr. < 2 Tn Camioneta Rural	2 274,5	3 516,9	0,0	0,0	0,0	0,0	5 791,5
			Carr. < 2 Tn Camioneta Panel	353,0	568,0	0,0	0,0	0,0	0,0	921,0
			Carr. > 2 Tn Camión	700,3	30 620,1	0,0	0,0	0,0	0,0	31 320,4
			Carr. > 2 Tn Remolcador	8,0	2 129,6	0,0	0,0	0,0	0,0	2 137,7
			Carr. > 2 Tn Semiremolcador	8,4	2 342,7	0,0	0,0	0,0	0,0	2 351,1
TOTAL TRANSPORTE POR MODOS			Subtotal Carretero Total Pais	9 153,1	42 245,2	0,0	0,0	0,0	0,0	51 398,3
			Carretero	44 006,0	74 379,5	0,0	0,0	0,0	203,5	118 589,1
			Ferrovial	3,2	760,9	13,2	0,0	0,0	0,0	777,3
			Acuático	1,6	373,1	1 713,8	0,0	0,0	0,0	2 088,5
			Aéreo	0,0	0,0	0,0	52,6	16 275,7	0,0	16 328,4
			Ductos	0,0	0,0	283,0	0,0	0,0	0,0	283,0
TOTAL TRANSPORTE POR MODOS			Total Transporte	44 010,9	75 513,5	2 010,1	52,6	16 275,7	203,5	138 066,3

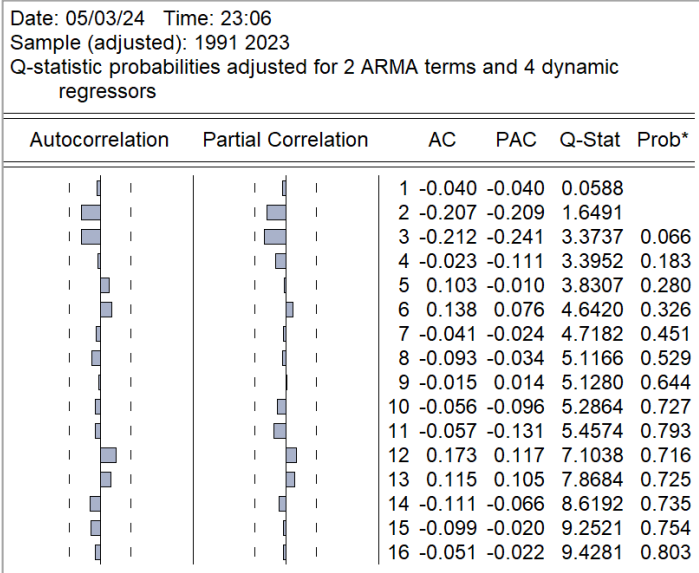
Elaboración: Oficina Técnica de Energía – Datos del BNEUTIL 1998

Anexo 2: Gráficos de dispersión de variables para el modelo de pronóstico

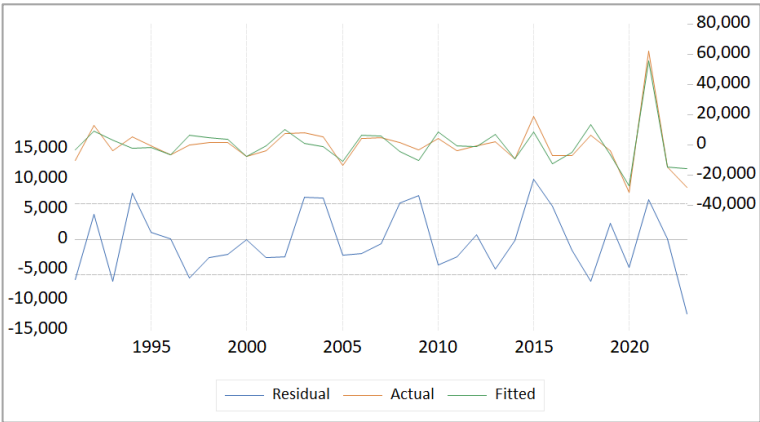


Anexo 3: Resultados de la proyección del modelo econométrico

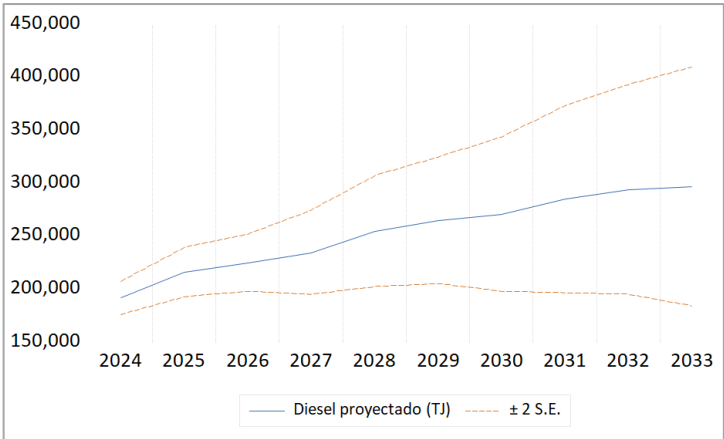
Correlograma del modelo



Ajuste de residuos del modelo



Estimación de la demanda de diésel



Anexo 4: Cuadro comparativo de las características técnicas de los vehículos de carga en Perú

Marca	Scania	Scania	Volvo	Freightliner	Freightliner	Mack Truck	Mack Truck
Modelo	DC13 107 410	DC13 106 460	FH 12	M2 112	CL 120	Vision CXU613E	Vision CXU613E
Combustible	Diésel	Diésel	Diésel	Diésel	diésel	diésel	diésel
Volumen barrido	12.7 litros	12.7 litros	12.8 litros	12.8 litros	12.7 litros	12.8 litros	12.8 litros
Cilindros	Inline 6	Inline 6	Inline 6	Inline 6	Inline 6	Inline 6	Inline 6
Cabezas de cilindro	6	6	6	6	6	6	6
Válvulas por cilindro	4	4	4	4	4	4	4
Diámetro x recorrido	130x160 mm	130x160 mm	131x158 mm	130x160 mm	130x160 mm	131x158 mm	131x158 mm
Ratio de compresión	18:1	18:1	18.1:1	18:1	18:1	18.1:1	18.1:1
Potencia máxima	410 hp	460 hp	400 hp / 460 hp	410 hp	370 hp / 430 hp	360 hp	440 hp
a rpm	1900	1900	1400-1800	2000	2100	1500-1950	1400-1800
Torque máximo	2000 Nm	2250 Nm	2000 Nm	1966 Nm	1966 Nm	1979	2251
a rpm	1000-1350	1000-1350	1050-1400	1100	1200	1200	1200
Capacidad de tanque	330+330 litros	330+330 litros	425+190,310,360	378+378 litros	454+454 litros	360 +360 litros	360 +360 litros
Capacidad de tanque	174 gal	174 gal	162 gal	200 gal	240 gal	190 gal	190 gal
Autonomía vehicular en km	1392	1392	1296	1600	1920	1520	1520
Emisiones	Euro 3	Euro 3	Euro 3	Euro 3	Euro 3	Euro 3	Euro 3

Anexo 5: Cuadro comparativo de las características técnicas de los vehículos pesados que usan GNL

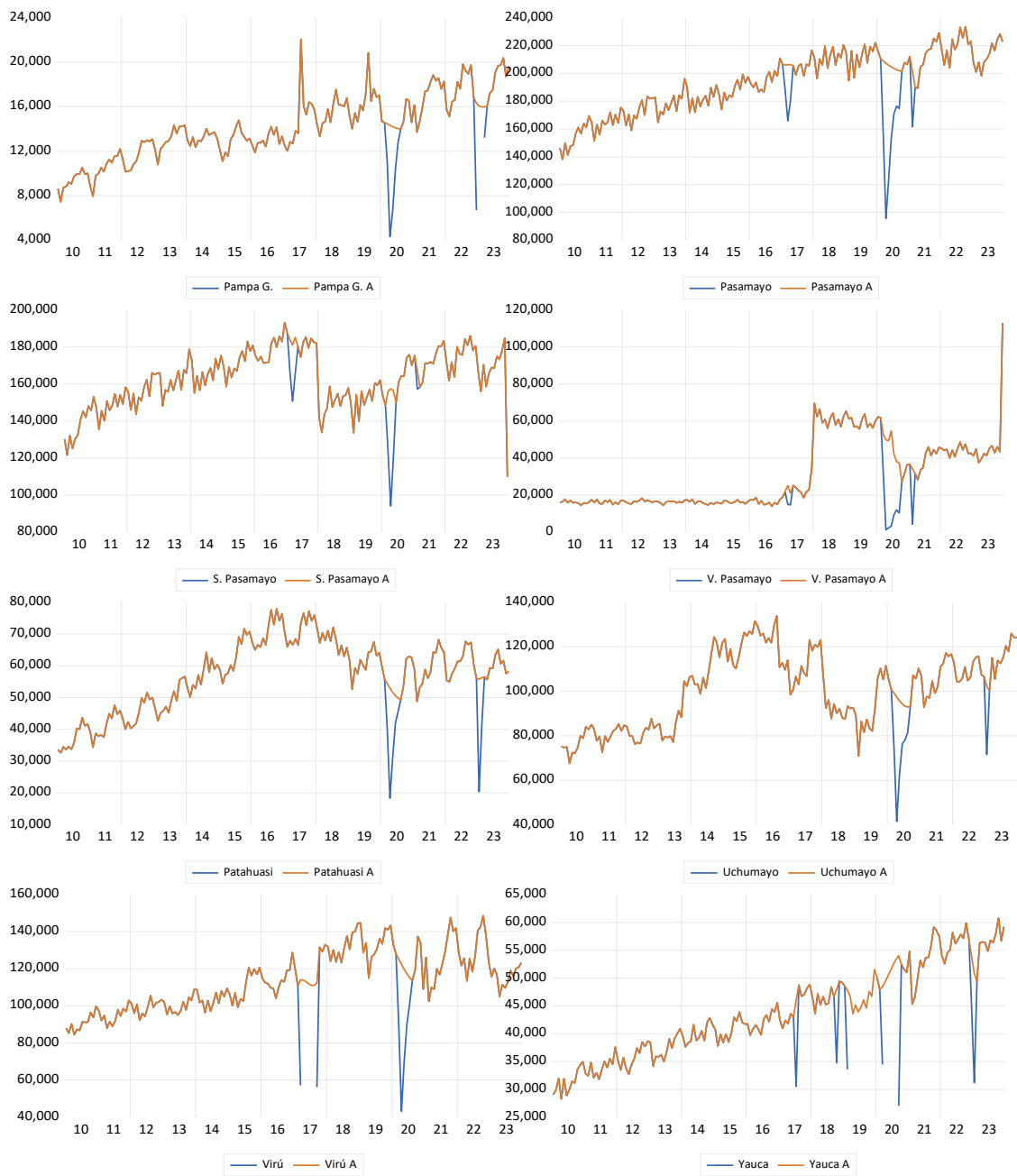
Marca	Capacity Trucks	Peterbilt	Volvo	Kenworth	Kenworth	Freightliner	Freightliner	C&C TRUCKS	SINOTRUK
Model	TJ9000 LNG	384	VNL 64T300	T440 Tractor	T800 Short Hood	M2 112	Cascadia 113 NG	Tractor	Howo
Combustible	LNG	LNG/CNG	LNG/CNG	LNG/CNG	LNG/CNG	LNG/CNG	LNG/CNG	LNG/CNG	LNG/CNG
Motor	ISL G 8.9L	ISL G 8.9L	ISX12 G	ISL G 8.9L	ISX12 G	ISL G 8.9L	ISX12 G	YC6K13N	
Volumen barrido	8.9 litros	8.9 litros	11.9 litros	8.9 litros	11.9 litros	8.9 litros	11.9 litros	12.9 litros	11.596 litros
Cilindros	Inline 6	Inline 6	Inline 6	Inline 6	Inline 6	Inline 6	Inline 6	Inline 6	Inline 6
Cabezas de cilindro	4	6	6	6	6	6	6	6	6
Válvulas por cilindro	2	4	4	4	4	4	4	4	4
Potencia máxima	250 hp	320 hp	400 hp	320 hp	400 hp	320 hp	400 hp	400 hp	400 hp
a rpm	2200	2000	2100	2000	2100	2000	2100	-	1820
Torque máximo	990 Nm	1356 Nm	1966 Nm	1356 Nm	1966 Nm	1356 Nm	1966 Nm	1750 Nm	-
a rpm	1300	1300	1200	1300	1200	1300	1200	1200 a 1500	-
Capacidad de tanque	100 galones de LNG	Dual 119 galones LNG Dual 45 - 90 DGE (CNG)	125 DGE (CNG/LNG)	Dual 45 - 90 DGE (CNG) Dual 119 galones LNG	Dual 75 - 150 galones LNG	Dual 45 -80 DGE (CNG) Dual 119 &150 galones LNG	Hasta 190 DGE (CNG) Hasta300 galones LNG (168 DGE)	Dual 132 galones LNG	Dual 119 galones LNG
Emisión	2010 EPA	2010 EPA	2010 EPA	2010 EPA	2010 EPA	2010 EPA	2010 EPA	Euro V	Euro IV

Anexo 6: Cuadro comparativo de las características técnicas de los vehículos pesados de pasajeros en Perú

Marca	Scania	Scania	Volvo	Freightliner	Freightliner	Mack Truck	Mack Truck
Modelo	DC13 107 410	DC13 106 460	FH 12	M2 112	CL 120	Vision CXU613E	Vision CXU613E
Combustible	Diésel	Diésel	Diésel	Diésel	diésel	diésel	diésel
Volumen barrido	12.7 litros	12.7 litros	12.8 litros	12.8 litros	12.7 litros	12.8 litros	12.8 litros
Cilindros	Inline 6	Inline 6	Inline 6	Inline 6	Inline 6	Inline 6	Inline 6
Cabezas de cilindro	6	6	6	6	6	6	6
Válvulas por cilindro	4	4	4	4	4	4	4
Diámetro x recorrido	130x160 mm	130x160 mm	131x158 mm	130x160 mm	130x160 mm	131x158 mm	131x158 mm
Ratio de compresión	18:1	18:1	18.1:1	18:1	18:1	18.1:1	18.1:1
Potencia máxima	410 hp	460 hp	400 hp / 460 hp	410 hp	370 hp / 430 hp	360 hp	440 hp
a rpm	1900	1900	1400-1800	2000	2100	1500-1950	1400-1800
Torque máximo	2000 Nm	2250 Nm	2000 Nm	1966 Nm	1966 Nm	1979	2251
a rpm	1000-1350	1000-1350	1050-1400	1100	1200	1200	1200
Capacidad de tanque	330+330 litros	330+330 litros	425+190,310,360	378+378 litros	454+454 litros	360 +360 litros	360 +360 litros
Capacidad de tanque	174 gal	174 gal	162 gal	200 gal	240 gal	190 gal	190 gal
Autonomía vehicular en km	1392	1392	1296	1600	1920	1520	1520
Emisiones	Euro 3	Euro 3	Euro 3	Euro 3	Euro 3	Euro 3	Euro 3

Anexo 7: Ajuste del flujo vehicular pesado 2010 - 2023, por unidad de peaje





Anexo 8: Costo de los componentes de la red de abastecimiento de GNL

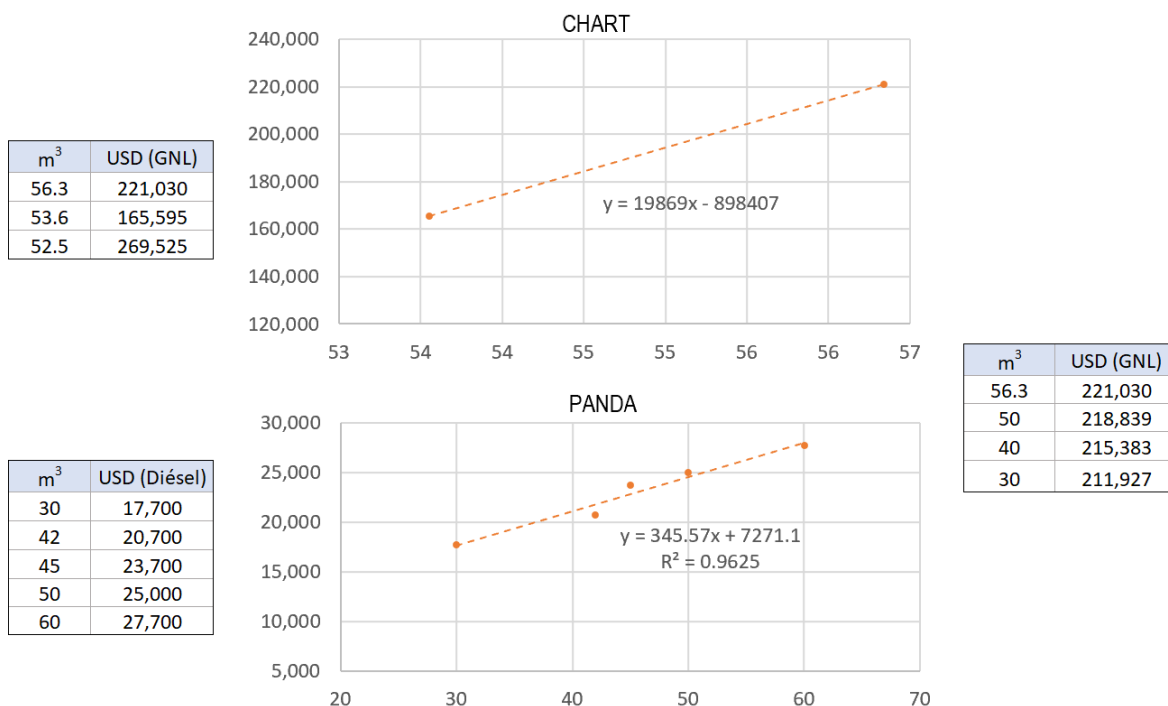
Para los tanques fijos de almacenamiento de GNL importados desde China se ha registrado a las marcas Jereh (200 m³ y 100 m³) y Cim Ceri (260 m³ y 97 m³), con dichos costos se ha extrapolado los costos para las capacidades de 20 m³, 30 m³ y 60 m³ para ambas marcas, y se ha considerado el costo promedio para el modelo de PL.



Para determinar el costo de los tractos, se ha identificado que las importaciones desde China corresponden a la marca Shacman, modelo SX42595X384TL, que utiliza el GNL como combustible, cuyo costo registrado para el año 2024 es de 66,941 USD.

Para las cisternas criogénicas de GNL importadas desde China se ha registrado solo la marca Chart, la cual presenta una anomalía en la proporción de costo y capacidad, así tenemos que para 56.3 m³ tiene un costo de 221,030 USD y para una capacidad menor como 52.5 m³ presenta un costo mayor de 269,525 USD, por lo que se considera como precios de referencia a las capacidades de 56.3 m³ y 53.6 m³. Sin embargo, para una mayor certeza en la proporcionalidad de capacidad y costo de las cisternas se ha considerado una fuente adicional publicada por la empresa China

Panda Mech⁹⁴. No obstante, se ha realizado un ajuste a la línea de tendencia de Panda para que se ajuste al costo de la cisterna de GNL, puesto que su costo corresponde a capacidades de cisternas diésel, posterior a ello se ha extrapolado los costos a las capacidades de 30 m³, 40 m³ y 50 m³.



⁹⁴ Empresa especializada en el diseño y fabricación de camiones, semirremolques, y otros vehículos comerciales. Cuenta con la aprobación del Ministerio de Industria y Tecnología de la Información de China. En el siguiente enlace se encuentra la capacidad de un remolque cisterna y su costo respectivo: <https://www.pandamech.com/es/informacion/cuanto-cuesta-un-remolque-cisterna/>.

Anexo 9: Datos de entrada para el modelo de PL

Datos operativos del tracto y cisterna:

Ida (lleno):	50 km/h
Vuelta (vacío):	60 km/h
Velocidad de carga y descarga	60 m ³ /h
Horas de operación por día	24 h
Días de operación por año	330 días
Total horas de operación al año	7,920 h/año
Repostaje al camión	0.5 h/m ³

Tracto del tipo N3:

Tracto	Costo US\$
Tracto 1	66,941

Tanque criogénico de almacenamiento y despacho:

Tanque	Capacidad m ³	Capacidad 90% m ³	Carga horas	Costo US\$	Reúso
Tanque 1	20	19	0.3	85,467	834
Tanque 2	30	28.5	0.5	101,164	556
Tanque 3	60	57	1.0	148,257	278

Cisterna criogénica:

Cisterna	Capacidad m ³	Capacidad 85% m ³	Carga horas	Costo US\$
Cisterna 1	30	25.5	0.4	211,927
Cisterna 2	40	34	0.6	215,383
Cisterna 3	50	42.5	0.7	218,839

Distancia desde el Cargadero GNL y tiempo de un viaje completo en horas a la estación por tipo de cisterna (incluye carga y descarga GNL de la cisterna):

Estación GNL	E.S. Chiclayo	E.S. Trujillo	E.S. Lima	E.S. Nazca	E.S. Arequipa
Cisterna 1	37	29	10	13	32
Cisterna 2	38	30	10	13	32
Cisterna 3	38	30	10	13	32
Distancia (km)	945	730	196	276	795

Demanda anual de GNL por estación (m³):

Estación GNL	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032	2033
E.S. Chiclayo	422	598	2,431	8,580	13,777	14,672	15,002	16,214	17,480	19,269
E.S. Trujillo	631	894	3,635	12,829	20,600	21,939	22,432	24,243	26,137	28,811
E.S. Lima	1,084	1,536	6,243	22,036	35,384	37,683	38,530	41,641	44,894	49,488
E.S. Nazca	315	446	1,814	6,401	10,279	10,947	11,193	12,097	13,042	14,377
E.S. Arequipa	366	519	2,108	7,439	11,945	12,721	13,007	14,057	15,155	16,706
Total	2,818	3,993	16,231	57,284	91,985	97,962	100,165	108,253	116,707	128,651

Anexo 10: Modelo de PL en el software Lingo 21.0

Extended Lingo/Win64
Release 21.0.33 (29 May 2024)
Copyright (c) 2011 - 2024

LINDO Systems Inc
1415 North Dayton Street
Chicago, IL 60642
312/988-7422
http://www.lindo.com

Limits for this Installation:

Constraints:	Unlimited
Variables:	Unlimited
Integer Variables:	Unlimited
Nonlinear Variables:	Unlimited
Global Variables:	Unlimited
Generator Memory (Mb):	32

License Expiration: 9 Jan 2025
License Usage: Educational

Licenses: 1
API Version: 15.0.6099.171

License Location: Indling21.lic

Config Location:

Additional License Information:
rvegat@uni.pe
Enabled Solvers:

OK

```
Lingo 21.0.33 - [Lingo Model - LingoGNL]
File Edit Solver Window Help

1 Sets:
2 Tanque/1,2,3/:Vol_Tanq,Costo_Tanq,Reuso_Max; !i;
3 Cisterna/1,2,3/:Vol_Cist,Costo_Cist; !j;
4 Periodo/1..10/:Cist_Anual,Tracto; !k;
5 Estacion/1..5/; !l;
6 EXP(Estacion,Periodo):D; !lk;
7 TXPXE(Tanque,Periodo,Estacion): Tanq>Total_Tanq; !ikl;
8 CXP(Cisterna,Periodo):Cist>Total_Cist; !jk;
9 CXPXE(Cisterna,Periodo,Estacion):Num_Viaje; !jkl;
10 CXE(Cisterna,Estacion):Tiempo_Viaje; !jl;
11 EndSets
12
13 Data:
14 Vol_Tanq = 19, 28.5, 57;
15 Costo_Tanq = 85467, 101164, 148257;
16
17 Vol_Cist = 25.5, 34, 42.5;
18 Costo_Cist = 211927, 215383, 218839;
19
20 D = 422, 598, 2431, 8580, 13777, 14672, 15002, 16214, 17480, 19269,
21 631, 894, 3635, 12829, 20600, 21939, 22432, 24243, 26137, 28811,
22 1084, 1536, 6243, 22036, 35384, 37683, 38530, 41641, 44894, 49488,
23 315, 446, 1814, 6401, 10279, 10947, 11193, 12097, 13042, 14377,
24 366, 519, 2108, 7439, 11945, 12721, 13007, 14057, 15155, 16706;
25
26 Tiempo_Viaje = 37, 29, 10, 12, 31,
27 37, 29, 10, 13, 32,
28 38, 30, 10, 13, 32;
29
30 Reuso_Max = 834, 556, 278;
31 EndData
32
33 Min = @Sum(TXPXE(i,k,l): Costo_Tanq(i)*Tanq(i,k,l)) + @Sum(CXP(j,k): Costo_Cist(j)*Cist(j,k))
34 +@Sum(Periodo(k):Tracto(k)*66941);
35
36 @For(TXPXE(i,k,l):Total_Tanq(i,k,l) = @If(k#EQ#1,Tanq(i,k,l),Total_Tanq(i,k-1,l) + Tanq(i,k,l)));
37 @For(TXPXE(i,k,l)|i#NE#1 #AND# k#GE#3 : Total_Tanq(i,k,l) >= 1);
38 @For(EXP(l,k):@Sum(Tanque(i): Vol_Tanq(i)*Reuso_Max(i)*Total_Tanq(i,k,l)) >= D(l,k));
39 @For(CXP(j,k):Total_Cist(j,k) = @If(k#EQ#1,0 + Cist(j,k),Total_Cist(j,k-1) + Cist(j,k)));
40 @For(CXP(j,k):@Sum(Estacion(l): Num_Viaje(j,k,l)*Tiempo_Viaje(j,l)) <= 7920*Total_Cist(j,k));
41 @For(EXP(l,k):@Sum(Cisterna(j): Num_Viaje(j,k,l)*Vol_Cist(j)) >= D(l,k));
42 @For(TXPXE(i,k,l):@Gin(Tanq(i,k,l)));
43 @For(CXP(j,k):@Gin(Cist(j,k)));
44 @For(CXPXE(j,k,l):@Gin(Num_Viaje(j,k,l)));
45 @for(Periodo(k):@Sum(Cisterna(j): Cist(j,k)) = Cist_Anual(k));
46 @for(Periodo(k):Tracto(k) = @If(k#LE#5, Cist_Anual(k), Cist_Anual(k) + Cist_Anual(k-5)));
47
48 End
```

Anexo 11: Resultados del modelo de PL con la restricción por la seguridad energética

Número de tanques					
Matriz (i,k,l)	Estación l=1 E.S. Chiclayo	Estación l=2 E.S. Trujillo	Estación l=3 E.S. Lima	Estación l=4 E.S. Nazca	Estación l=5 E.S. Arequipa
Tanque i=1 20 m ³	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	1	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
Tanque i=2 30 m ³	1	1	1	1	1
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
Tanque i=3 60 m ³	1	1	1	1	1
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0

Número de viajes					
Matriz (j,k,l)	Estación l=1 E.S. Chiclayo	Estación l=2 E.S. Trujillo	Estación l=3 E.S. Lima	Estación l=4 E.S. Nazca	Estación l=5 E.S. Arequipa
Cisterna j=1 30 m ³	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
Cisterna j=2 40 m ³	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0
	97	0	0	0	0
	0	0	507	0	89
	0	0	1225	356	0
	0	358	0	384	0
Cisterna j=3 50 m ³	3	769	2	3	4
	10	15	26	8	9
	15	22	37	11	13
	58	86	147	43	50
	202	302	519	151	176
	325	485	833	242	282
	268	517	887	258	300
	353	528	678	264	235
	382	571	0	0	331
	412	329	1057	0	357
	451	63	1163	336	390

Número de cisternas										
Matriz (j,k)	Periodo k=1 2024	Periodo k=2 2025	Periodo k=3 2026	Periodo k=4 2027	Periodo k=5 2028	Periodo k=6 2029	Periodo k=7 2030	Periodo k=8 2031	Periodo k=9 2032	Periodo k=10 2033
Cisterna j=1 30 m ³	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Cisterna j=2 40 m ³	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0
Cisterna j=3 50 m ³	1	0	1	2	2	0	0	0	0	0

Número de tractos										
Matriz (j,k)	Periodo k=1 2024	Periodo k=2 2025	Periodo k=3 2026	Periodo k=4 2027	Periodo k=5 2028	Periodo k=6 2029	Periodo k=7 2030	Periodo k=8 2031	Periodo k=9 2032	Periodo k=10 2033
Tracto	1	0	1	2	2	4	0	1	2	2

F.O.	Matriz (i,k,l) + Matriz (j,k) + Matriz (1,k)	4,381,337
------	--	-----------

Anexo 12: Resultados del modelo de PL sin la restricción por la seguridad energética

Matriz (i,k,l)		Número de tanques				
		Estación l=1 E.S. Chiclayo	Estación l=2 E.S. Trujillo	Estación l=3 E.S. Lima	Estación l=4 E.S. Nazca	Estación l=5 E.S. Arequipa
Tanque i=1 20 m ³	1	1	1	1	1	1
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	1	0	0	0
	0	1	1	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	1	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	1	0	1	1
Tanque i=2 30 m ³	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
Tanque i=3 60 m ³	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0

Matriz (j,k,l)		Número de viajes				
		Estación l=1 E.S. Chiclayo	Estación l=2 E.S. Trujillo	Estación l=3 E.S. Lima	Estación l=4 E.S. Nazca	Estación l=5 E.S. Arequipa
Cisterna j=1 30 m ³	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	1	3	0	30	0	0
	0	0	0	0	512	0
	0	0	0	0	564	2
	0	0	0	0	0	0
Cisterna j=2 40 m ³	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	0	0	0	0	0
	0	194	0	176	0	0
	8	251	32	0	0	0
Cisterna j=3 50 m ³	10	15	26	8	9	9
	15	22	37	11	13	13
	58	86	147	43	50	50
	202	302	519	151	176	176
	325	485	833	242	282	282
	346	517	887	258	300	300
	353	528	907	264	307	307
	381	569	980	267	331	331
	412	460	1057	306	357	357
	447	484	1139	0	392	392

Matriz (j,k)		Número de cisternas									
		Periodo k=1 2024	Periodo k=2 2025	Periodo k=3 2026	Periodo k=4 2027	Periodo k=5 2028	Periodo k=6 2029	Periodo k=7 2030	Periodo k=8 2031	Periodo k=9 2032	Periodo k=10 2033
Cisterna j=1 30 m ³	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Cisterna j=2 40 m ³	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Cisterna j=3 50 m ³	1	0	1	2	2	1	0	0	0	0	0

Matriz (j,k)		Número de tractos									
		Periodo k=1 2024	Periodo k=2 2025	Periodo k=3 2026	Periodo k=4 2027	Periodo k=5 2028	Periodo k=6 2029	Periodo k=7 2030	Periodo k=8 2031	Periodo k=9 2032	Periodo k=10 2033
Tracto	1	0	1	2	2	2	0	2	3	2	2

F.O. Matriz (i,k,l) + Matriz (j,k) + Matriz (1,k) 3,903,435

Anexo 13: Factores de emisión para el diésel y GNL

Pollutant	Vehicle type	B10	B20	B100
CO ₂	Passenger cars	-1.5 %	-2.0 %	
	Light commercial vehicles	-0.7 %	-1.5 %	
	Heavy-duty vehicles	0.2 %	0.0 %	0.1 %
NO _x	Passenger cars	0.4 %	1.0 %	
	Light commercial vehicles	1.7 %	2.0 %	
	Heavy-duty vehicles	3.0 %	3.5 %	9.0 %
PM	Passenger cars	-13.0 %	-20.0 %	
	Light commercial vehicles	-15.0 %	-20.0 %	
	Heavy-duty vehicles	-10.0 %	-15.0 %	-47.0 %
CO	Passenger cars	0.0 %	-5.0 %	
	Light commercial vehicles	0.0 %	-6.0 %	
	Heavy-duty vehicles	-5.0 %	-9.0 %	-20.0 %
HC	Passenger cars	0.0 %	-10.0 %	
	Light commercial vehicles	-10.0 %	-15.0 %	
	Heavy-duty vehicles	-10.0 %	-15.0 %	-17.0 %

Factores de emisión	Diésel	Biodiésel 100	Diésel B5	GNL
kg CO ₂ /TJ	74,100.00	70,800.00	73,935.00	56,265.04
kg CH ₄ /TJ	3.90	3.00	3.86	92.00
kg N ₂ O/TJ	3.90	0.60	3.74	3.00
g NO _x /kg	25.95	28.29	26.07	17.10
g CO/kg	6.10	4.88	6.04	3.98
g COVDM/kg	0.90	-	0.90	0.14
g MP/ kg fuel	0.55	0.29	0.54	0.02

Conversión de volumen a energía:

Combustible	Total
GNL m ³	724,049
GN m ³	434,429,400
GN MMPC	15,342
GN MTEP	420
GN TJ	17,565
GNL kg	329,297,485
Diésel m ³	488,981
Diésel galón	129,175,227
Diésel MBbl	3,076
Diésel MTEP	423
Diésel TJ	17,685
Diésel kg	420,685,334

Emisión de la proyección acumulada:

Unidad	GNL	Diésel B5
10 ⁶ Kg CO ₂	988	1,308
10 ³ Kg CH ₄	1,616	68
10 ³ Kg N ₂ O	53	66
10 ³ Kg NO _x	5,631	10,966
10 ³ Kg CO	1,311	2,541
10 ³ Kg COVDM	46	379
10 ³ Kg MP	7	226