

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
ESCUELA DE POSGRADO**



TESIS

**“MODELO PROSPECTIVO DE TRANSICIÓN
ENERGÉTICA PARA EL SECTOR TRANSPORTE
TERRESTRE URBANO DEL PERÚ”**

**PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR EN
CIENCIAS CON MENCIÓN EN ENERGÉTICA**

ELABORADO POR:

EDWARD SANTA MARÍA DÁVILA

ASESOR:

DR. ALAN FISCHER AYALA OBREGÓN

CO-ASESOR:

DR. ROLAND SCHMIDT

LIMA - PERÚ

2024

© 2024, Universidad Nacional de Ingeniería. Todos los derechos reservados

“El autor autoriza a la UNI a reproducir la tesis en su totalidad o en parte, con fines estrictamente académicos.”

Santa María Dávila, Edward

esantamariad@uni.edu.pe

*Dedicado a
Mis padres, mi esposa, mis hijos, mis hermanos, mi familia.*

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a las personas e instituciones que colaboraron con esta investigación. En particular a la UNI y a CARELEC por la oportunidad brindada al aceptarme en el programa de Doctorado de Energética.

Agradezco a la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI, por brindarme las recomendaciones para realizar la investigación, así como a los alumnos que han colaborado con el aporte y discusión de los datos, tanto a nivel de Pregrado como de Maestría.

Agradezco al Dr. Alan Ayala, quien me ha apoyado de forma incondicional y continua durante el proceso investigación durante algunos años, con paciencia y con muchas ideas para fortalecer la tesis y sobre todo, la amistad.

Agradezco al Dr. Roland Schmidt, quien es una persona referente en las energías renovables, por brindarme su apoyo y su opinión especialista en proyectos energéticos; además de su amistad y confianza.

Agradezco a los especialistas, Dr. Yeltsin Valero y Dr. Johnny Nahui por su apoyo en la revisión de la tesis, así como los comentarios que permitieron mejorar el documento.

Agradezco a mi familia, por acompañarme en todos mis caminos, con fidelidad, cariño y comprensión.

ÍNDICE

RESUMEN	VIII
ABSTRACT	IX
PRÓLOGO	X
LISTA DE TABLAS	XI
LISTA DE FIGURAS	XIV
LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS	XIX
CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN	1
1.1 GENERALIDADES	1
1.2 ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS	2
1.2.1 Matriz Energética de Países del Mundo	2
1.2.2 Eficiencia Energética	3
1.2.3 Demanda de Transporte	4
1.2.4 Electromovilidad	4
1.3 Descripción del Problema de Investigación	6
1.3.1 Perspectiva Histórica	6
1.3.2 Contexto de la Matriz Energética	8
1.3.3 Transición Energética en el Mundo	9
1.3.4 Cambio Climático y Mecanismos de Desarrollo Limpio	10
1.4 Formulación del Problema	11
1.4.1 Árbol de Problemas	11
1.5 Justificación e Importancia de la Investigación	16
1.6 Objetivos	18
1.6.1 Objetivo General	18
1.6.2 Objetivos Específicos	19
1.7 Hipótesis de la investigación	19
1.7.1 Hipótesis General	19
1.7.2 Hipótesis Específicas	19
1.8 Metodología	20
1.8.1 Variables	21
1.8.2 Indicadores	21

1.8.3	Tipo y Nivel de Investigación	22
1.8.4	Período de Análisis	22
1.8.5	Fuentes de Información	22
1.8.6	Instrumentos utilizados	22
1.8.7	Técnicas de Recolección y Procesamiento de Datos	23
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL		24
2.1	Marco Teórico	24
2.1.1	Prospectiva	24
2.1.2	Eficiencia Energética	24
2.1.3	Contenido energético e infraestructura de almacenamiento de energía	24
2.1.4	Infraestructura para combustibles nueva generación: el Hidrógeno (H_2)	24
2.1.5	Electromovilidad	26
2.1.6	Políticas de Desarrollo Energético y de Emisiones en Transporte	26
2.1.7	Análisis de ciclo de vida (ACV) de la energía en el transporte	28
2.1.8	Planeamiento del Transporte	29
2.1.9	Estudios de movilidad y desplazamiento	29
2.1.10	Interacción urbana y redes de transporte	31
2.1.11	Prospectiva y Estudio de Escenarios	33
2.2	Marco Conceptual	34
2.2.1	Demanda de movilidad	34
2.2.2	Eficiencia energética de los vehículos a combustión interna . .	34
2.2.3	Dependencia Energética	36
2.2.4	Matriz energética	37
2.2.5	Huella de carbono y energética del transporte	38
2.2.6	Estructuración de las matrices Origen – Destino (O-D)	39
2.2.7	Distribución modal de los viajes en entornos urbanos	39
2.2.8	Longitud de redes, capacidad vial y nivel de servicio	39
2.2.9	Composición vehicular del parque automotor	43
2.2.10	Consumo energético asociado a cada tipo de desplazamiento .	44
2.2.11	Externalidades del transporte	46
2.2.12	Políticas Energéticas y Prospectiva en el escenario peruano .	46
2.3	Variables e Indicadores	48
2.3.1	Variables	48
2.3.2	Indicadores	48

2.4	Marco Metodológico	49
2.4.1	Unidad de análisis	49
2.4.2	Tipo y nivel de investigación	50
2.4.3	Período de Análisis	50
2.4.4	Fuentes de información e instrumentos utilizados	50
2.4.5	Técnicas de recolección y procesamiento de datos	51
CAPÍTULO III: DIAGNÓSTICO		52
3.1	Modelamiento agregado de población y demanda	52
3.1.1	Evolución de la población urbana	52
3.1.2	Modelamiento agregado de la Demanda de Movilidad en centros urbanos	64
3.1.3	Modelamiento agregado de la Oferta del Transporte en centros urbanos	71
3.2	Infraestructura Vial y Parque Vehicular	72
3.2.1	Infraestructura vial urbana	72
3.2.2	Capacidad vial y nivel de servicio de Infraestructura de Transporte Terrestre Urbano	72
3.2.3	Diagnóstico del parque automotor terrestre	79
3.3	Externalidades del Transporte	81
3.3.1	Equilibrio económico y externalidades del Transporte Terrestre Urbano	81
3.3.2	Análisis del Ciclo de Vida de los recursos energéticos	86
3.3.3	Evaluación de Huella de Carbono – Parques Solares, etapa de construcción	89
3.3.4	Evaluación de Huella de Carbono – Parques eólicos, etapa de construcción	90
3.3.5	Evaluación de Huella de Carbono – Minicentrales hidroeléctricas, etapa de construcción	92
3.3.6	Evaluación de Huella de Carbono – Centrales térmicas, etapa de construcción	93
3.3.7	Evaluación de Huella de Carbono – Parques solares, etapa de operación	95
3.3.8	Evaluación de Huella de Carbono – Parques eólicos, etapa de operación	96
3.3.9	Evaluación de Huella de Carbono – Minicentrales hidroeléctricas, etapa de operación	97
3.3.10	Evaluación de Huella de Carbono – Centrales térmicas, etapa de operación	98

3.3.11	Evaluación de Impactos de Huella de Carbono – Resumen . .	100
3.3.12	Caso ACV – Gases de Efecto Invernadero, Electromovilidad .	101
3.4	Consumo Energético del Transporte	104
3.4.1	Consumo energético del Perú	104
3.4.2	Consumo energético del Transporte Terrestre Urbano	105
3.4.3	Cálculo energético	111
3.5	Economía de la Energía del Transporte	118
3.5.1	Demanda de los recursos energéticos	118
3.5.2	Oferta y mercado de los recursos energéticos	120
3.5.3	Infraestructura para el mercado actual	123
3.5.4	Mecanismos de financiamiento	125
3.6	Políticas de Energía en el Transporte Terrestre	128
3.6.1	Diagnóstico de las Políticas de Transporte y Urbanismo . . .	128
3.6.2	Diagnóstico de las Políticas de Transición Energética del Transporte	135
CAPÍTULO IV:ANÁLISIS PROSPECTIVO Y RESULTADOS		149
4.1	Análisis Prospectivo	149
4.1.1	Matriz Energética del Transporte	149
4.1.2	Inventario Energético del Transporte	153
4.1.3	Sistema de recarga	154
4.1.4	Escenarios prospectivos	155
4.2	Resultados de la Investigación	162
4.2.1	Resultados de la Evaluación Prospectiva	162
4.2.2	Políticas para la Transición Energética del Transporte Terrestre Urbano	167
4.3	Contrastación de la hipótesis	185
CONCLUSIONES		189
4.3.1	Comentarios Finales	189
4.3.2	Conclusiones de la Investigación	190
RECOMENDACIONES		194
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS		198
ANEXOS		204

RESUMEN

La energía utilizada para el transporte puede subdividirse según los objetivos de los desplazamientos, es decir, enfocado en las personas y en el traslado de los bienes. El transporte puede realizarse por vía terrestre, aérea o marítima, y en todas sus formas, el dominio de la energía primaria fósil es evidente, y reposa sobre una industria consolidada, tanto en la disponibilidad y madurez de las industrias de producción, como en las industrias consolidadas los vehículos de combustión interna (MCI). La energía en el Transporte es dominada casi exclusivamente por las tecnologías de combustibles de origen fósil (motor de combustión interna MCI), y debido a las externalidades producidas, se hace necesario el estudio e implementación de un proceso de transición hacia alternativas con menor impacto socio-ambiental.

La investigación desarrolla en una primera etapa un inventario energético del sector, según la partición modal y según los patrones de desplazamientos de personas y de bienes. Luego, se complementa con el análisis económico de la oferta y la demanda del transporte. El análisis se centra en el estudio de escenarios prospectivos del desarrollo del transporte terrestre urbano, asociados a escenarios de desarrollo de ciudades mayores y tomando en cuenta su impacto en la capacidad productiva del país.

En esta investigación se presentarán diversos escenarios posibles de desarrollo energético futuro del Sector Transporte que posibilite la transición energética, considerando los acuerdos internacionales para el desarrollo de energía limpia y los objetivos y estándares de calidad ambiental para la reducción de la contaminación atmosférica y externalidades producidas por el actual parque automotor.

Del análisis obtenido, finalmente se proponen políticas de transición energética en el sector transporte, que corresponden a diferentes escenarios de desarrollo del mercado de vehículos, del comportamiento de la demanda, y de las condicionantes económicas y productivas del país. Se plantea un horizonte de tiempo con referencia al 2050.

ABSTRACT

The energy used for transport can be subdivided according to the objectives of the displacements, that is, focused on persons and on the movement of goods. Transport can be carried out by land, air or sea, and in all its forms, the dominance of primary fossil energy is evident, and rests on a consolidated industry, both in the availability and maturity of the production industries, as well as in the consolidated industries internal combustion vehicles (MCI). Energy in Transportation is dominated almost exclusively by fossil fuel technologies (ICM internal combustion engine), and due to the externalities produced, it is necessary to study and implement alternatives with less socio-environmental impact. The research develops in a first stage an energy inventory of the sector, according to the modal partition and according to the patterns of movement of people and goods. Then, it is complemented with the economic analysis of transport supply and demand. The analysis focuses on the study of prospective transport development scenarios, associated with urban and productive development scenarios in the country. In this research, various possible scenarios of future energy development of the Transport Sector will be presented that make the energy transition possible, considering the international agreements for the development of clean energy and the objectives and standards of environmental quality for the reduction of atmospheric pollution and externalities produced by the current fleet. From the analysis obtained, energy transition policies are finally proposed in the transport sector, which correspond to different scenarios of development of the vehicle market, the behavior of demand, and the economic and productive conditions of the country. A time horizon is proposed with reference to 2050.

PRÓLOGO

El problema de investigación parte de la necesidad de anticipar las condiciones para propiciar la transición energética del transporte terrestre urbano, planteando escenarios futuros al 2050. Para lo cual, se requiere revisar los diferentes planes urbanos, para modelar de forma agregada la movilidad, desplazamientos, usos de suelo, crecimiento poblacional, entre otras variables, y poderlas proyectar algunas décadas por delante.

La transición energética del transporte afecta al conjunto de la sociedad peruana en diferentes aspectos. No existe un camino claro para la transición energética del transporte urbano, y eso, puede tener grandes costos de oportunidad en el futuro, e inevitablemente, generará más externalidades en las ciudades peruanas a medida que se incremente el parque automotor y la propiedad de vehículos particulares.

Al mismo tiempo, los países desarrollados han tomado medidas frontales para acelerar la transición energética. En el mismo sentido, los países vecinos (latinoamericanos) también han iniciado con planes prospectivos para la transición energética, lo cual mejorará su competitividad urbana frente a las ciudades peruanas.

El problema de la descarbonización de la matriz energética es una preocupación central en las diferentes políticas de desarrollo de largo plazo, debido a los efectos en el cambio climático. Por lo que se han generado diversos acuerdos globales para mitigar sus efectos y promover la transición energética hacia el uso de recursos energéticos renovables. Algunas de las medidas incluyen la creación de mercados de bonos e incentivos para reducir las emisiones de carbono. Incluso, los países menos industrializados participan de los mecanismos de desarrollo limpio (MDL) que son voluntarios. Evidentemente, el sector transporte es el que suscita mayor interés debido a su relevancia dentro del inventario de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

De otro lado, las emisiones atmosféricas de los vehículos de motor a combustión interna (MCI) han puesto sobre la mesa preocupaciones sobre la salud pública, al incrementarse los casos de enfermedades respiratorias en los centros urbanos más densos.

Otros aspectos como la íntima correlación entre la planificación urbana y aquella de redes de transporte, nos llevan a la reflexión de aspectos vinculados como el transporte público, el transporte de carga, la ciudad inteligente y el desarrollo futuro.

LISTA DE TABLAS

Tabla N° 1.1	Plan de transición y de eficiencia energética de diferentes países revisados	3
Tabla N° 1.2	Artículos científicos sobre Transición Energética del Transporte, (Smokers y Kampman, 2006), (Faberi, Paolucci, Lapillonne, y Pollier, 2015), (Kutani, Sudo, et al., 2016), (Song, Wu, y Wu, 2014), (Joller y Varblane, 2016), (García-Olivares, Solé, y Osychenko, 2018), (Haas, 2021), (Hagos y Ahlgren, 2020), (Shafiei, Davidsdottir, Leaver, Stefansson, y Asgeirsson, 2015), (Wentland, 2016)	5
Tabla N° 1.3	Tesis Doctorales sobre Transición Energética del Transporte, (Ochoa Bique, 2019), (Hofer, 2014), (Nordin, 2011), (Cullen y Allwood, 2009), (Cox, 2018), (Farreny Gaya, 2011), (Kennedy, 2018), (Daly, 2015), (Dato, 2016), (Taibi, 2020)	6
Tabla N° 1.4	Cambios de las características de la energía del siglo XX y XXI a nivel mundial. Fuente: elaboración propia	9
Tabla N° 1.5	Matriz de Consistencia según Plan de Tesis Doctoral	16
Tabla N° 1.6	Retos de la evolución sostenible del transporte y de la transición energética del transporte con un horizonte al 2050	18
Tabla N° 2.1	Clasificación de Personas según sus preferencias de modos de vida	31
Tabla N° 2.2	Descripción de la Capacidad Vehicular de la Av. Javier Prado durante jornada regular	41
Tabla N° 2.3	Tipología Vehicular del Parque Automotor	43
Tabla N° 2.4	Características de vehículos, según consumo y tipo de energía	44
Tabla N° 3.1	Clasificación de ciudades peruanas según su población	59
Tabla N° 3.2	Clasificación de ciudades peruanas según su densidad poblacional y radio equivalente de superficie	60
Tabla N° 3.3	Nivel de desarrollo, implementación y extensión de los Sistemas de Transporte Público y Servicios de Transporte de las ciudades peruanas	61
Tabla N° 3.4	Generación y Atracción de Viajes por Zonas Integradas en 2004 y 2025 (Yachiyo Engineering, 2005)	66
Tabla N° 3.5	Localización de Centroides de las 14 zonas de Generación y Atracción de Viajes del Área Metropolitana de Lima y Callao	67
Tabla N° 3.6	Ciudad de 15 minutos, radio (km) según modo de transporte	72
Tabla N° 3.7	Estimación de la Capacidad Transportada (Millón Pas-km diarios) en el año 2023	75

Tabla N° 3.8	Escenario 2050(1): Estimación de la Capacidad Transportada (Millón Pas-km diarios) en el año 2050, en condición tendencial según el nivel de implementación de los proyectos de Transporte Público Masivo	75
Tabla N° 3.9	Escenario 2050(2): Estimación de los Capacidad Transportada (Millón Pas-km diarios) en el año 2050, en condición optimista según el nivel de implementación de los proyectos de Transporte Público Masivo	75
Tabla N° 3.10	Escenarios de distancia recorrida y pasajeros transportados, 2023 y 2050 para Lima y Callao	76
Tabla N° 3.11	Distribución de los pasajeros transportados según modo . .	76
Tabla N° 3.12	Recorrido de vehículos, en millones de km por día (M km/- día) en diversos escenarios	77
Tabla N° 3.13	Escenarios de Consumo de Combustibles	77
Tabla N° 3.14	Consumo de Energía en Diferentes Escenarios	78
Tabla N° 3.15	Escenarios de Consumo de Electricidad	78
Tabla N° 3.16	Costos de Inversión en Generación RER, según subastas realizadas en el Perú, datos analizados a partir de: (Schmerler, Velarde, Rodríguez, y Solís, 2019)	79
Tabla N° 3.17	Tipos de vehículos para la transición energética del Transporte	81
Tabla N° 3.18	Años de reserva de Gas Natural + LGN y Petróleo Crudo .	105
Tabla N° 3.19	Capacidad Calorífica de Combustibles Fósiles. Fuente: DHC - MINEM	111
Tabla N° 3.20	Valores del coeficiente de rodadura, citado en (Guillcatanda Tacuri y Zambrano Zambrano, 2019)	113
Tabla N° 3.21	Resumen de consumo energético urbano y en carretera (según distancia entre paradas)	116
Tabla N° 3.22	Eficiencia del Motor (potencia en cc o equivalente) por tipo de combustible	117
Tabla N° 3.23	Eficiencia del motor (potencia en cc o equivalente) según su consumo energético unitario, MJ/und	117
Tabla N° 3.24	Costo unitario de recorrido según tipo de motor (potencia en cc o equivalente) y combustible	117
Tabla N° 3.25	Proyectos Fotovoltaicos	127
Tabla N° 3.26	Descripción de Ciudades con PMUS	131
Tabla N° 3.27	Nivel de desarrollo de temas en los Planes de Movilidad Urbana Sostenible de ciudades peruanas	135
Tabla N° 3.28	Evaluación de Políticas de Transición Energética del Transporte en el Perú	147

Tabla N° 4.1	Capacidad de producción eléctrica de los países, según fuente de energía (Fuente: México - CONACYT Energía, Argentina - Informe Gobierno a IEA, Chile - Generadoras.cl, Perú - COES, SEIN	151
Tabla N° 4.2	Generación eléctrica de los países, según fuente de energía, en la última línea se obtienen los factores de planta globales de los países, (Fuente: México - CONACYT Energía, Argentina - Informe Gobierno a IEA, Chile - Generadoras.cl, Perú - COES, SEIN	152
Tabla N° 4.3	Factor de Planta de la generación eléctrica de los países, según fuente de energía, (Fuente: México - CONACYT Energía, Argentina - Informe Gobierno a IEA, Chile - Generadoras.cl, Perú - COES, SEIN	152

LISTA DE FIGURAS

Figura N° 1.1	Árbol de Problemas	12
Figura N° 1.2	Esquema prospectivo de la transición energética del Transporte	16
Figura N° 2.1	Pirámide de necesidades, según la teoría de la motivación humana de A. Maslow	29
Figura N° 2.2	Correlación entre la velocidad media y flujo de una vía urbana	40
Figura N° 2.3	Capacidad del sistema e incremento progresivo de vehículos y material rodante, y proyección de la demanda	42
Figura N° 2.4	Rendimiento energético (km/kWh) por tipo de vehículo .	44
Figura N° 2.5	Consumo Energético por Tipo de Vehículo y Numero de Pasajeros	45
Figura N° 2.6	Precio de Compra vs Potencia del Vehículo (USD/W) . .	46
Figura N° 2.7	Proyección del Consumo Final de Energía del Perú, Período 2014 – 2025.Ministerio de Energía y Minas del Perú (2013)	46
Figura N° 2.8	Proyección del Consumo Final de Energía del Perú, Período 2014 – 2025.Ministerio de Energía y Minas del Perú (2013)	47
Figura N° 2.9	Cambio de la composición energética del Perú, entre el 2013 y el 2025.Ministerio de Energía y Minas del Perú (2013) .	47
Figura N° 3.1	Población Total y Tasas de Crecimiento Interanual, composición gráfica basada en INEI, Instituto Nacional de Estadística e Informática (2018)	53
Figura N° 3.2	Tendencias de la distribución poblacional por regiones, composición gráfica basada en INEI, Instituto Nacional de Estadística e Informática (2018)	54
Figura N° 3.3	Tendencias del crecimiento poblacional por regiones, composición gráfica basada en INEI, Instituto Nacional de Estadística e Informática (2018)	55
Figura N° 3.4	Crecimiento poblacional (%) Amazonas a Cajamarca, año base 1961	56
Figura N° 3.5	Crecimiento poblacional (%) Callao a Junín	56
Figura N° 3.6	Crecimiento poblacional (%) La Libertad a Moquegua . .	57
Figura N° 3.7	Crecimiento poblacional (%) Pasco a Moquegua	57
Figura N° 3.8	Crecimiento poblacional (%) Lima y región de Lima . . .	58
Figura N° 3.9	Relación de ciudades y su radio equivalente en km. Rojo: baja densidad. Amarillo: densidad intermedia. Verde: alta densidad	62

Figura N° 3.10 Relación de ciudades y su radio equivalente en km. Rojo: ciudad extensa, $r > 6$ km. Amarillo: ciudad intermedia, r de 4-6 km. Verde: ciudad compacta, $r < 4$ km	63
Figura N° 3.11 Matriz de Generación y Atracción de Viajes por Zonas . . .	67
Figura N° 3.12 Distancia interzonal, medido a partir de centroides	68
Figura N° 3.13 Velocidad de vías interzonal	68
Figura N° 3.14 Tiempo de viaje Interzonal	69
Figura N° 3.15 Beneficios de viajes interzonales, expresados en minutos .	69
Figura N° 3.16 Suma de beneficios y costos de los viajes Interzonales . . .	70
Figura N° 3.17 Cálculo del costo interzonal ; Costo $c_{ij} = \exp(-\beta * tiempo_{ij})$; $\beta = 0.05$	70
Figura N° 3.18 Matriz O-D balanceada, incluyendo los viajes interzonales	70
Figura N° 3.19 Matriz de viajes y distancias recorridas, se obtiene la distancia promedio de viaje en km	71
Figura N° 3.20 Matriz de viajes y tiempo, se obtiene el tiempo promedio de viaje en horas	71
Figura N° 3.21 Variación de pasajeros transportados en una jornada laboral, (Autoridad de Transporte Urbano para Lima y Callao (ATU), 2021)	72
Figura N° 3.22 Modelamiento de la capacidad de la vía	73
Figura N° 3.23 Subutilización del primer carril como zona de estacionamiento, y la segunda vía como parada de vehículos de carga y pasajeros	73
Figura N° 3.24 Tránsito sobre la vía Panamericana Norte. Se observan las maniobras y el tránsito sobre la señalización intermedia de dos vías, lo que reduce la capacidad vial	74
Figura N° 3.25 Comparación general de los vehículos	82
Figura N° 3.26 Comparación del costo total de propiedad (TCO) de los vehículos en USD	83
Figura N° 3.27 Comparación emisiones de gases de efecto invernadero en un período de 5 años de diferentes tipos de vehículos . . .	84
Figura N° 3.28 Proyección hacia el año 2050 de los precios de los recursos energéticos peruanos	84
Figura N° 3.29 Comportamiento de los permisos de emisiones de carbono de la Comunidad Europea	85
Figura N° 3.30 Variación de los costos totales de propiedad (TCO) proyectados al 2050	85
Figura N° 3.31 Límites del análisis del sistema ACV para generación eléctrica	86
Figura N° 3.32 Hipótesis básicas de las centrales de generación eléctrica analizadas	86

Figura N° 3.33 Límites del Análisis de Ciclo de Vida total	87
Figura N° 3.34 Límites del Análisis de Ciclo de Vida en la etapa de construcción	87
Figura N° 3.35 Factores de conversión de Gases de Efecto Invernadero para materiales	88
Figura N° 3.36 Impacto del reciclaje en la huella de carbono de los materiales de construcción	88
Figura N° 3.37 Huella de Carbono Parque Solar con suelos de pastos . . .	89
Figura N° 3.38 Huella de Carbono Parque Solar con suelos boscosos . . .	89
Figura N° 3.39 Huella de Carbono de Parque Fotovoltaico durante la Construcción	90
Figura N° 3.40 Huella de Carbono de Energía de Parque Fotovoltaico, Construcción	90
Figura N° 3.41 Huella de Carbono Parque Eólico con suelos de pastos . .	90
Figura N° 3.42 Huella de Carbono Parque Eólico con suelos boscosos . . .	91
Figura N° 3.43 Huella de Carbono de Parque Eólico durante la Construcción	91
Figura N° 3.44 Huella de Carbono de Energía de Parque Eólico, Construcción	91
Figura N° 3.45 Huella de Carbono Minicentrales Hidroeléctricas, suelos de pastos	92
Figura N° 3.46 Huella de Carbono Minicentrales Hidroeléctricas, suelos boscosos	92
Figura N° 3.47 Huella de Carbono de Minicentral hidroeléctrica durante la Construcción	93
Figura N° 3.48 Huella de Carbono de Energía de Minicentral Hidroeléctrica, Construcción	93
Figura N° 3.49 Huella de Carbono Minicentral Térmica, suelos de pastos .	94
Figura N° 3.50 Huella de Carbono Minicentral Térmica, suelos boscosos .	94
Figura N° 3.51 Huella de Carbono de Minicentral Térmica durante la Construcción	94
Figura N° 3.52 Huella de Carbono de Energía de Minicentral Térmica, Construcción	95
Figura N° 3.53 Huella de Carbono Parque Solar en Fase de Operación . .	95
Figura N° 3.54 Huella de Carbono Parque Solar (tCO_{2eq})	96
Figura N° 3.55 Huella de Carbono de Energía de Parque Solar, Operación	96
Figura N° 3.56 Huella de Carbono Parque Eólico en Fase de Operación .	96
Figura N° 3.57 Huella de Carbono Parque Eólico (tCO_{2eq})	97
Figura N° 3.58 Huella de Carbono de Energía de Parque Eólico, Operación	97
Figura N° 3.59 Huella de Carbono Minicentral Hidroeléctrica en Fase de Operación	97
Figura N° 3.60 Huella de Carbono Minicentral Hidroeléctrica (tCO_{2eq}) . .	98

Figura N° 3.61 Huella de Carbono de Energía de Minicentral Hidroeléctrica, Operación	98
Figura N° 3.62 Huella de Carbono Minicentral Térmica en Fase de Operación	99
Figura N° 3.63 Huella de Carbono Minicentral Térmica (tCO_{2eq})	99
Figura N° 3.64 Huella de Carbono de Energía de Minicentral Térmica, Operación	99
Figura N° 3.65 Emisiones de Energía en construcción (suelos con pastos) .	100
Figura N° 3.66 Emisiones de Energía en construcción (suelos boscosos) . .	100
Figura N° 3.67 Emisiones Totales de Producción de Energía (Construcción y Operación)	101
Figura N° 3.68 Cálculo de emisiones de vehículos convencionales y eléctricos	102
Figura N° 3.69 Emisiones de vehículos según recursos energéticos y tipo de electricidad (1 pasajero)	102
Figura N° 3.70 Emisiones de vehículos según recursos energéticos y tipo de electricidad (4 pasajeros)	103
Figura N° 3.71 Emisiones de vehículos, comparativo de recursos y según ocupación	103
Figura N° 3.72 Variación de las reservas energéticas no renovables	104
Figura N° 3.73 Condición de flujo libre y flujo real de vehículos a lo largo de un eje urbano	107
Figura N° 3.74 Velocidad representativa durante el período de congestión (simplificación de cálculo)	109
Figura N° 3.75 Variación de velocidad de un vehículo flotante en un eje urbano	110
Figura N° 3.76 Variación de la velocidad, aceleración y giros vehiculares con instrumentación en avenidas del área urbana de Lima	114
Figura N° 3.77 Variación de la velocidad en función del recorrido en un entorno urbano, simulación para 1 km	114
Figura N° 3.78 Variación de la velocidad en función del recorrido en un entorno de carretera o autopista, simulación para 1 km . .	115
Figura N° 3.79 Resumen de consumo energético según tipo de infraestructura vial	116
Figura N° 3.80 Evaluación de las Políticas de Transición Energética del Transporte según criterios cualitativos	148
Figura N° 4.1 Proceso de evaluación prospectiva, determinación de escenarios	162
Figura N° 4.2 Clasificación y jerarquización de variables	162
Figura N° 4.3 Análisis Estructural, gráfico de posicionamiento de variables	163
Figura N° 4.4 Clasificación y Jerarquización de Actores	164
Figura N° 4.5 Mapa de Posicionamiento de Actores, Método MACTOR .	164

Figura N° 4.6	Políticas y elementos para la Transición Energética del Transporte Urbano	169
Figura N° 4.7	Elementos de la Política de Descarbonización y Neutralidad Carbono	172
Figura N° 4.8	Elementos de la Política de Parque Automotor y Electromovilidad	175
Figura N° 4.9	Elementos de la Política de Planes de Movilidad Urbana Sostenible (PMUS)	177
Figura N° 4.10	Elementos de la Política de Partición Modal y Cambio Modal Progresivo	179
Figura N° 4.11	Elementos de la Política de Gestión de la Demanda de Movilidad	180
Figura N° 4.12	Elementos de la Política de Infraestructura para la Competitividad	181
Figura N° 4.13	Elementos de la Política de Infraestructura para la Competitividad	182

LISTA DE SÍMBOLOS Y SIGLAS

SÍMBOLOS

$grCO_2eq/km$	:	gramos de CO_2 equivalente por km recorrido
km	:	Kilómetros
$pas - km$	:	Pasajeros transportados en un km recorrido, unidad funcional
NO_x	:	Óxidos de Nitrógeno
SO_x	:	Óxidos de Azufre

SIGLAS

ACV	: Análisis de Ciclo de Vida
AP	: Auto Particular
APP	: Asociación Público Privada
ATU	: Autoridad Única del Transporte (Área Metropolitana de Lima y Callao)
BRT	: Bus Rapid Transit, o servicio de buses expreso en corredores segregados de alta capacidad (COSAC)
GEI	: Gases de Efecto Invernadero
GNC	: Gas Natural Comprimido
H2v	: Hidrógeno verde (producido a partir de energías renovables)
MaaS	: Mobility as a Service
MBDC	: Miles de barriles diarios calendarios (de petróleo crudo)
MCI	: Motor a Combustión Interna
MDL	: Mecanismos de Desarrollo Limpio
MINEM	: Ministerio de Energía y Minas del Perú
MTC	: Ministerio de Transporte y Comunicaciones del Perú
MINAM	: Ministerio del Ambiente del Perú
NOx	: Óxidos de Nitrógeno
OxI	: Obras por Impuestos
PM	: Material particulado
PMUS	: Plan de Movilidad Urbana Sostenible
PROMOVILIDAD	: Programa Nacional de Transporte Urbano Sostenible, adscrito al MTC
RER	: Recursos Energéticos Renovables
SINCEP	: Sistema Nacional de Centros Poblados
STPM	: Sistema de Transporte Público Masivo
TCFD	: Task Force on Climate-related Financial Disclosures
TNFD	: Taskforce on Nature-related Financial Disclosures
TP	: Transporte Público
VE	: Vehículos Eléctricos

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1 GENERALIDADES

El transporte es el sector que ha contribuido más al cambio climático en el Perú. En 2016, el transporte representó el 10% de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) del país, como segunda fuente por detrás del cambio de uso de tierras forestales y de cultivo. A su vez, el transporte representa el 40% de las emisiones GEI relacionadas a la Energía (Ministerio del Ambiente del Perú, 2021). Para tal efecto, se requiere favorecer la transición energética como proceso para reducir la dependencia de los combustibles fósiles y aumentar el uso de recursos energéticos renovables (RER) en este sector. El desafío consiste en la electrificación, y en una matriz eléctrica basada principalmente en las RER.

La transición energética del transporte afecta al conjunto de la sociedad peruana en diferentes aspectos. No existe un camino claro para la transición energética del transporte urbano, y eso, puede tener grandes costos de oportunidad en el futuro, e inevitablemente, generará más externalidades en las ciudades peruanas a medida que se incremente el parque automotor y la penetración de vehículos particulares. Es cierto que los nuevos Planes de Movilidad Urbana Sostenible (PMUS), promovidas por la agencia pública PROMOVILIDAD, generan expectativas de una planificación de largo plazo; sin embargo, aún no se puede hacer seguimiento de la implementación de dichos PMUS en las principales ciudades del país.

Al mismo tiempo, los países desarrollados han tomado medidas frontales para acelerar la transición energética, debido a sus compromisos ambientales y para intentar diversificar las fuentes energéticas en búsqueda de la ansiada independencia energética. En el mismo sentido, los países vecinos (latinoamericanos) también han iniciado sus planes prospectivos para la transición energética, lo cual mejorará su competitividad urbana frente a las ciudades peruanas.

El problema de la descarbonización de la matriz energética es una preocupación central en las diferentes políticas de desarrollo de largo plazo, debido a los efectos en el cambio climático y la contaminación atmosférica. Por lo que se han generado diversos acuerdos globales para mitigar sus efectos y promover la transición energética hacia el uso de recursos energéticos renovables y relativamente limpios. Algunas de las medidas incluyen la creación de mercados de bonos de carbono e incentivos para reducir las emisiones GEI. Incluso, los países menos industrializados participan de los mecanismos de desarrollo limpio (MDL) que son voluntarios. Evidentemente,

el sector transporte es el que suscita mayor interés debido a su relevancia dentro del inventario de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).

De otro lado, las emisiones atmosféricas de los vehículos de motor a combustión interna (MCI) han puesto sobre la mesa preocupaciones sobre la salud pública, al incrementarse los casos de enfermedades respiratorias en los centros urbanos más densos. De acuerdo a (MOVE, DG, 2014) existen diferentes enfermedades producidas por la mala combustión de los combustibles fósiles en el transporte, los cuales pueden ser respiratorias, cardíacas, cerebrovasculares, cancerígenas. Por ejemplo, el material particulado PM_{10} y $PM_{2.5}$ pueden generar asma y otitis en los niños, y provocar enfermedades respiratorias en los adultos. Otros componentes que afectan a la salud son el Dióxido de Nitrógeno NO_2 y Óxidos de Nitrógeno (NO_x), el Dióxido de Azufre SO_2 y Óxidos de Azufre (SO_x), Monóxido de Carbono, cadenas hidrocarbonadas, metales pesados, ozono, nitratos, sulfatos, entre otros. (MOVE, DG, 2014)

Otros aspectos como la íntima correlación entre la planificación urbana y aquella de redes de transporte que requieren grandes inversiones de infraestructura y regulaciones para su organización y eficiencia, nos llevan a la reflexión de aspectos vinculados como el transporte público, el transporte de carga, la ciudad inteligente y el desarrollo futuro en una sociedad que tendrá nuevos retos (incremento de la población, calidad de vida, seguridad alimentaria y energética, entre otros).

El problema de investigación parte de la necesidad de anticipar las condiciones para propiciar la transición energética del transporte terrestre urbano, planteando escenarios futuros al 2050. Para lo cual, se requiere revisar los diferentes planes urbanos, para modelar de forma agregada la movilidad, desplazamientos, usos de suelo, crecimiento poblacional, entre otras variables, y poderlas proyectar algunas décadas por delante.

1.2 ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

1.2.1 Matriz Energética de Países del Mundo

Algunas entidades públicas del Perú e investigadores han propuesto algunas políticas para la transición y el cambio de la matriz energética. Dentro de este universo, es necesario también actualizar la matriz energética del sector transporte. A nivel internacional, diferentes países han ido planteando los problemas particulares de la transición energética dentro de un marco de globalización y compromisos según los

Acuerdos Internacionales para disminuir los efectos del Cambio Climático y evitar el embalamiento del fenómeno global.

País	Planes
Perú	Plan Energético Nacional 2014-2025 (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2013)
Colombia	Plan Energético Nacional Colombia: Ideario Energético 2050 (UPME, Unidad de Planeación Minero Energética, Colombia, 2015)
Panamá	Plan Energético Nacional 2015-2050 (SNE, Secretaría Nacional de Energía Gobierno de Panamá, 2016)
Chile	Energía 2050, Política Energética de Chile (DPPE, División de Prospectiva y Política Energética Ministerio de Energía de Chile, 2016)
Argentina	Escenarios Energéticos 2030 (SPE, Subsecretaría de Planeamiento Energético, 2019)
China	China 2050 High Renewable Energy Penetration Scenario and Roadmap Study (Energy Research Institute (ERI), 2015)
Japón	The Fifth Strategic Energy Plan (ANRE, Japan - Agency for Natural Resources & Energy, 2018)
Unión Europea	Energy roadmap 2050 (European Commission, 2012)

TABLA N° 1.1: Plan de transición y de eficiencia energética de diferentes países revisados

1.2.2 Eficiencia Energética

En los escenarios de desarrollo se presentan diversas tendencias con una mayor predominancia de los combustibles de origen fósil (Smokers y Kampman, 2006), respaldados por la madurez del mercado del automóvil. El análisis se debe complementar con el análisis del impacto de los combustibles fósiles en los mercados de los países en vías de desarrollo.

La efectividad de las políticas de eficiencia y de transición energética puede tener componentes culturales, incluso en países con historia común como la Comunidad Europea (Faber et al., 2015). Los análisis de la transición energética europea deben ser comparados con otros países de diferente nivel de desarrollo y con una historia e infraestructura productivas diversas.

Algunas experiencias de los países del Este Asiático pueden replicarse en América Latina, debido a niveles similares de desarrollo económico. (Kutani et al., 2016)

presenta algunos ejemplos de políticas de eficiencia energética del transporte en Vietnam, basados en la coordinación de actores y entidades públicas, análisis de datos masivos (big data) del tráfico, educación y recursos financieros disponibles. Los ejes de esta política están basados en tres acciones: planeamiento, construcción y mejora de infraestructura de transporte; mejora de la organización y manejo del tráfico; e introducción de nuevas tecnologías y recursos energéticos en el sector transporte. En el caso de Tailandia, se proponen diez objetivos dentro del Plan de Desarrollo de Eficiencia Energética (EE) del Transporte 2015-2036 (Kutani et al., 2016), para lo cual el objetivo EE7 Medidas de Ahorro Energético en el Sector Transporte aporta 30,213 ktep¹ de las reducciones esperadas (58% del total), y a su vez, dentro de esta medida, se espera que la estructura impositiva y etiquetas de ahorro energético a los vehículos pueda aportar 13,731 ktep, y que las medidas para la mejora del transporte público aporten un ahorro de 4,823 ktep.

1.2.3 Demanda de Transporte

La evolución del transporte se puede medir a través de la tendencia en varias décadas. A partir de la observación de la demanda de movilidad, se pueden analizar las variaciones del consumo energético y se infieren las tendencias de eficiencia energética en las ciudades más desarrolladas de China (Song et al., 2014). Las tendencias del movimiento de pasajeros y carga en Shanghai (China) muestran un aumento de la eficiencia energética, y un alto crecimiento del movimiento, tanto de pasajeros como de carga.

Existen otros comportamientos que necesitan ser modelados, como la incorporación de nueva tecnología en los vehículos, el internet de las cosas, las plataformas de servicio de transporte a demanda, las plataformas MaaS (Mobility as a Service), el transporte sensible a la demanda (Demand Responsive Transport, DRT), los vehículos autónomos, entre otras tendencias. El comportamiento y la elección modal presentan cambios en los usuarios, a partir de la mejora del PBI per cápita, aparecen más variables de decisión, como la preocupación por el cambio climático, la modificación del paisaje, la accesibilidad, entre otros factores socio-ambientales.

1.2.4 Electromovilidad

La electromovilidad es una de las tendencias más prometedoras para la transición energética, que implica el cambio del proceso de los motores de vehículos, de la combustión interna por el almacenamiento y generación de electricidad a través de baterías o de pilas de combustible (hidrógeno). Debido a la madurez del mercado de los automóviles a combustión interna, algunos países de desarrollo medio están

¹tep: tonelada de petróleo equivalente, ktep: miles de toneladas de petróleo equivalente.

activando políticas para la promoción de la electromovilidad, como en el caso de Estonia donde se han creado esquemas de financiamiento para incentivar la Demanda, así como las inversiones públicas previstas en la infraestructura de recarga de los automóviles eléctricos (Joller y Varblane, 2016). En el mismo grupo de mecanismos, se incluyen algunas acciones de fomento a la innovación con recursos públicos.

El aspecto de mayor cuidado para la transición hacia la electromovilidad es el almacenamiento de energía eléctrica, que hoy en día está limitado a las baterías. Diferentes investigadores e institutos de investigación de energía alternativa están enfocados en la alternativa del hidrógeno como elemento de las pilas de combustible vehículos eléctricos (Ochoa Bique, 2019), la problemática se enfoca en el proceso de diseño de una cadena de abastecimiento de hidrógeno, su almacenamiento (debido a las altas presiones a conservar, la alta corrosividad y fugas potenciales), así como otras alternativas como el hidrógeno líquido. También pueden considerarse el embarque de almacenamiento de hidrógeno como reservas de combustible para vehículos y también para sistemas de transporte de mayor envergadura (como transporte de carga y sistemas ferroviarios). Por supuesto, se parte de la hipótesis de que el hidrógeno sea verde, es decir, generado a partir de energías renovables.

A continuación, se presentan los artículos científicos y tesis doctorales revisados:

Artículos Científicos	(Smokers y Kampman, 2006)	(Faberi et al., 2015)	(Kutani et al., 2016)	(Song et al., 2014)	(Joller y Varblane, 2016)	(García Olivares et al., 2018)	(Haas, 2021)	(Hagos y Ahlgren, 2020)	(Shafiei et al., 2015)	(Wentland, 2016)
Eficiencia energética	X		X	X				X		X
Impactos socioambientales	X		X				X	X		X
Políticas de ahorro energético		X					X	X		X
Políticas de emisiones		X					X	X	X	X
Consumo energético		X		X		X		X		
Electromovilidad					X	X	X	X	X	
Infraestructura de transporte					X	X		X		
Tendencias y escenarios	X	X		X		X	X	X	X	X
Demanda de transporte			X			X		X	X	X
Hidrógeno								X	X	

TABLA N° 1.2: Artículos científicos sobre Transición Energética del Transporte, (Smokers y Kampman, 2006), (Faberi et al., 2015), (Kutani et al., 2016), (Song et al., 2014), (Joller y Varblane, 2016), (García-Olivares et al., 2018), (Haas, 2021), (Hagos y Ahlgren, 2020), (Shafiei et al., 2015), (Wentland, 2016)

Tesis doctorales	(Ochoa Bique, 2019)	(Hofer, 2014)	(Nordin, 2011)	(Cullen and Allwood, 2009)	(Cox, 2018)	(Farreny, 2011)	(Kennedy, 2018)	(Daly, 2015)	(Dato, 2016)	(Taibi, 2020)
Eficiencia energética	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
Impactos socioambientales			X	X		X	X		X	X
Políticas de ahorro energético		X	X	X	X	X	X	X	X	X
Políticas de emisiones	X	X		X	X	X	X		X	X
Consumo energético		X	X	X	X	X		X	X	
Electromovilidad	X	X			X			X	X	X
Infraestructura de transporte	X		X		X	X	X	X		X
Tendencias y escenarios	X				X	X	X	X	X	X
Demanda de transporte	X				X	X	X	X		X
Hidrógeno	X									X

TABLA N° 1.3: Tesis Doctorales sobre Transición Energética del Transporte, (Ochoa Bique, 2019), (Hofer, 2014), (Nordin, 2011), (Cullen y Allwood, 2009), (Cox, 2018), (Farreny Gaya, 2011), (Kennedy, 2018), (Daly, 2015), (Dato, 2016), (Taibi, 2020)

1.3 Descripción del Problema de Investigación

1.3.1 Perspectiva Histórica

El Perú ha tenido diferentes cambios en sus políticas de transporte para la movilidad urbana y para el transporte de carga. En cuanto al desarrollo urbano, se fueron articulando siguiendo una política errática:

- En la primera mitad del siglo XX, en Lima y Callao se construyeron algunos ejes de tranvías, que fueron complementados con las primeras líneas de buses.
- En la década de 1960, se desmontan los tranvías, se realizan los primeros planes para la construcción del metro de Lima, se implementa el primer corredor de buses de transporte público masivo (corredor de buses de la Empresa Nacional de Transporte Urbano (ENATRU) en la Vía Expresa). En las ciudades intermedias, se establecen las primeras líneas de transporte público.
- En la década de 1990, Se “liberaliza” el servicio de transporte público, lo que permite importar vehículos de segundo uso. Se suprime la empresa de transporte público ENATRU. Se atomiza la oferta de transporte y aparecen las microunidades de transporte (combis y mototaxis).
- A finales de la década del 2010, inician operación comercial las primeras líneas de Transporte Público Masivo: Buses de Alta Capacidad BRT, Metropolitano (una línea extendida superpuesta sobre el corredor extinto de ENATRU) y la Línea 1 del Metro. Años después se inicia la construcción de la Línea 2 y un ramal de la Línea 4, y se comienzan a estudiar la red del Metro en su conjunto.

En diferentes ciudades se ejecutan vías rápidas, vías de evitamiento, pavimentación de vías en nuevas habilitaciones urbanas. El parque automotor envejece y se expande, el fenómeno de congestión se hace común, y en las ciudades intermedias aparecen soluciones de transporte público como el taxi colectivo, y servicios de transporte a demanda como las mototaxis y las motocicletas, y los aplicativos de movilidad (Uber, Cabify, Didi, In Drive, etc.).

De otro lado, el sistema de transporte ha utilizado la energía disponible en función de los vehículos. Así, se pasó de una fugaz etapa eléctrica hacia un claro dominio de los combustibles de origen fósil.

En una primera etapa, se tuvo una breve vida de los tranvías y de algunas líneas de trolebuses con matriz eléctrica. Al mismo tiempo y en proporción del desarrollo urbano e industrial, el sistema de transporte estuvo basado en combustibles derivados, líquidos de origen fósil. El crecimiento urbano conllevó a la aparición de diferentes sistemas de transporte, y el aumento de la capacidad adquisitiva y del PBI per cápita, tuvo efecto en el incremento del parque automotor.

A partir del año 2005, se publica el Reglamento de la Ley de Promoción del Mercado de Biocombustibles. Los combustibles líquidos tienen una base agraria para reemplazar porcentualmente a los combustibles de origen fósil.

A partir de los años 2010, se inicia la promoción del Gas Natural como alternativa de reemplazo a los combustibles líquidos derivados del petróleo, es decir, el cambio progresivo de energía fósil por otra del mismo origen, con una dualidad en cuanto al impacto en el cambio climático, el gas natural tiene ligeramente menores emisiones GEI por contenido energético, sin embargo, el potencial del metano liberado puede ser superior en 80 veces al dióxido de carbono en un período de 20 años ([Página web UN Environment Programme, consultado en ago.23](#)).

En el año 2011 se inicia la operación comercial de la Línea 1 del Metro de Lima (pese a que tuvo una operación restringida desde la década de 1980), lo que constituye el retorno hacia la electricidad como base motora del transporte público masivo. En el año 2014 se firma el contrato para la construcción de la Línea 2 y un ramal de la Línea 4 para unir al aeropuerto internacional Jorge Chávez. La energía motriz de esta línea también es eléctrica.

En el año 2020, se publica Decreto Supremo 022-2020-EM sobre la Infraestructura de carga y abastecimiento de energía eléctrica para la movilidad eléctrica, con lo que

se incentiva tímidamente al cambio de la matriz energética del motor de combustión interna hacia los motores de par eléctrico.

1.3.2 Contexto de la Matriz Energética

La matriz energética del Perú está constituida por diversas fuentes, en función de la evolución de la sociedad. En los primeros albores de la sociedad peruana, la matriz energética estaba basada principalmente en la biomasa, y luego se han ido incorporando la fuerza hidráulica y los recursos fósiles, que a través de motores de combustión y de electricidad, han constituido la nueva matriz energética. Con el paso del tiempo, se ha ido construyendo infraestructura de generación y distribución eléctrica, que tiene un mercado anual de 56 084 GWh y una capacidad instalada de 13.2 GW en el 2022 ([Página Web Estadísticas COES, consultado en ago.23](#)), es decir, un factor de planta global promedio de 49%).

En el sector Transporte, la matriz energética ha sido principalmente dominada por los combustibles fósiles. Recientemente, se han elaborado propuestas para fortalecer aspectos como la electromovilidad y el cambio de la matriz energética para los Sistemas de Transporte Público Masivo. La electricidad se ha incorporado como energía final en el transporte, aunque su impacto es marginal (sólo se cuenta con el caso significativo de la Red de Metro, Línea 1 con un consumo de 75GWh ((Línea-1, 2019)) de un total de consumo eléctrico de 57,371 GWh (según MINEM 2021), 0.13%, y la futura Línea 2). También existen algunos casos marginales, como el sistema de buses eléctricos gratuitos dispuestos por la Municipalidad de San Isidro. Según la página especializada [Electric Buses in Latin America, consultado en ago.23](#), en el Perú sólo se cuentan con 04 buses eléctricos en servicio en el transporte público, frente a los 4178 registrados en América Latina, es decir, 1/1,000; las marcas más representativas de buses eléctricos en América Latina son: BYD (China, 52%), Foton (China, 15%), Yutong (China, 10%), Eletra (Brasil, 7%), lo cual muestra el claro dominio de la industria china, sin embargo, también la posibilidad de desarrollar industria propia en América Latina. No se cuentan con planes para cambiar las fuentes energéticas de los buses de los corredores segregados, preferentes o vehículos de transporte público en general.

La matriz energética se compone de diferente forma según los sectores de actividad productiva, como la industria, residencial y transporte. Se pueden realizar dos agrupaciones básicas de la energía según su sistema de distribución, Traslado de la energía en estado potencial (combustible) y Traslado de la energía como electricidad (transmisión).

Las condiciones de la sociedad, muestra algunos cambios y tendencias en el uso de la energía primaria y energía final:

Energía Siglo XX	Energía Siglo XXI
Basada en la biomasa, carbón, petróleo y otros recursos fósiles. Complementariamente, la hidroelectricidad.	Surgen las energías renovables (RER): fotovoltaico, eólico, microhídrico + otras alternativas (mareomotriz, geotérmica) + biogás. Las energías convencionales estabilizan el sistema por su inercia.
Producción centralizada de energía (grandes productores de energía, grandes centrales de generación eléctrica, centrales hidroeléctricas, térmicas, nuclear)	Se promueve la generación distribuida, incluyendo la autogeneración. Los sistemas de distribución empiezan a trabajar en función de la demanda (Smart Grid).
Energía para una economía productiva lineal, es decir, basado en la extracción, procesamiento, consumo y disposición final.	Energía para una economía productiva circular, es decir, enfocado en el reuso, reciclaje y la eficiencia energética (aumento del rendimiento, disminución de pérdidas).
Huella ambiental significativa (polución atmosférica, Gases de Efecto Invernadero (GEI), ruido)	Enfoque en la reducción de externalidades ambientales (polución atmosférica, GEI, ruido).
Alineamiento de la producción con la demanda. La energía centralizada posee gran flexibilidad según los hábitos de consumo.	La mayor parte de los recursos energéticos renovables no están disponibles al mismo tiempo que la demanda.
Alta densidad energética, los recursos fósiles se encuentran almacenados de forma natural. Los depósitos de combustible procesado forman parte del almacenamiento energético.	Baja densidad energética, las formas de almacenamiento son complejas y muy costosas aún. La tecnología de almacenamiento aún está en desarrollo.

TABLA N° 1.4: Cambios de las características de la energía del siglo XX y XXI a nivel mundial. Fuente: elaboración propia

1.3.3 Transición Energética en el Mundo

A principios del siglo XX, el transporte urbano estaba dominado por la tracción animal, y constituía un problema de salud pública y de espacio en ciudades que se iban densificando al ritmo de la revolución industrial. El automóvil surgió como una alternativa para el desplazamiento, y en pocos años, reemplazó totalmente los antiguos modos de transporte, con mayor eficiencia energética y del uso del espacio. Al mismo tiempo, se construían los primeros ejes de infraestructura para el desarrollo territorial, basados en la construcción de carreteras y autopistas para los automóviles, y las líneas ferroviarias orientados principalmente al transporte de carga y al desplazamiento de largas distancias.

En una primera etapa, la industria del automóvil competía con modelos de combustión interna y eléctricos con recarga de baterías. El abaratamiento de la producción del petróleo y algunas condiciones particulares de los mercados, permitieron el despegue de los vehículos de combustión interna. Rápidamente, se construyeron refinerías en distintas zonas del orbe para el destilado del petróleo (principalmente, gasolina, diésel y gas licuado de petróleo), y para el abastecimiento continuo del sistema de transporte.

El crecimiento continuo del parque automotor en todos los países del mundo, ha generado que se observen nuevos fenómenos como la congestión y los picos de contaminación atmosférica, y que se estudien también el efecto invernadero que producen a escala global. En la década del 2000, resurge la industria de los automóviles eléctricos como una alternativa para el reemplazo de las unidades de combustión interna, generando un mercado de rápido crecimiento, y que, sin embargo, requiere de condiciones mínimas para desarrollo sostenido.

1.3.4 Cambio Climático y Mecanismos de Desarrollo Limpio

El cambio climático se ha acelerado por la emisión de gases de efecto invernadero, con diverso grado de potencial de conservación de energía térmica. De otro lado, parte de los gases de combustión también generan otros efectos de contaminación atmosférica que han tenido notorios efectos en la salud pública. El crecimiento de las zonas urbanas y la mayor densificación, el crecimiento de la riqueza mundial (PBI per cápita), la industrialización de la producción del automóvil, han generado el incremento del uso de vehículos, con las consecuentes externalidades en las diferentes actividades económicas.

El proceso de cambio climático se manifiesta por la elevación media de la temperatura global, por lo que se tiene como objetivo limitar este incremento medio global a un límite máximo 2°C, preferentemente menor a 1.5°C (teniendo como referencia los niveles preindustriales, y se toma como referencia las temperaturas medias entre 1850 y 1900) (UNFCCC). En 1997, se firmó un acuerdo global de lucha contra el cambio climático denominado el Protocolo de Kioto, en el que se proponía un modelo de mercado de créditos de carbono enfocado en la eficiencia energética y en la disminución de las emisiones. La mayor parte de los países industrializados han tomado parte activa en sus compromisos, con la excepción notable de EEUU. En estos acuerdos, no se tenía previsto el impacto del desarrollo rápido de los países emergentes (principalmente el bloque conocido como BRIC, Brasil, Rusia, India y China) y de otros países en vías de desarrollo, principalmente por el crecimiento de la riqueza y de los hábitos de la sociedad de consumo.

Como resultado de estas políticas, a nivel global se ha generado un mercado de bonos de carbono para disminuir los efectos de la emisión de gases de efecto invernadero (GEI), y que están relacionados directamente con el desarrollo económico-productivo y el consumo energético de los países. Los compromisos dividieron al mundo en dos

tipos de estados:

1. Países desarrollados o industrializados, con compromisos de reducción de emisiones contaminantes, y de gases de efecto invernadero. Estos compromisos tienen diversas etapas, teniendo como meta una limitación del incremento medio de la temperatura global hacia el año 2050, el escenario optimista es de 1°C, el escenario pesimista 2°C, y el escenario fuera de control superior a 2°C. Según la página web de UNFCCC ([ONU, Marco de la Convención para el Cambio Climático](#)), entre 2022 y 2026 se superarán las temperaturas récord de 2016 con una probabilidad de 93%, y que las temperaturas oscilarán entre 1.1°C y 1.7°C con respecto a la época preindustrial, es decir, el escenario optimista de un cambio climático promedio de 1°C es improbable.
2. Países en vías de desarrollo, sin compromiso explícito, pero que podrían colaborar en la futura reducción de emisiones bajo el formato de Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) o Mercados Voluntarios. Los mercados se forman a partir de los permisos de emisión de diferentes bloques de países, en particular de la Unión Europea (EUA), los derechos de emisión de carbono de estados de EEUU, como California (CCA) y la iniciativa regional sobre gases de efecto invernadero - Connecticut, Delaware, Maine, Maryland, Massachusetts, Nuevo Hampshire, Nueva Jersey, Nueva York, Rhode Island, Vermont, Virginia, (RGGI). También se han creado mercados de carbono en otros países, como China, Australia, Corea del Sur, entre otros.

Los modelos prospectivos de desarrollo energético constituyen aún un campo del conocimiento relativamente nuevo, y es necesario generar una propuesta de escenarios para el desarrollo y reorientación del uso de la energía final en el sector Transporte. En los países en desarrollo como el Perú, la matriz energética está aún en fase inicial de crecimiento, por lo que es muy oportuno crear sendas que transiten directamente hacia modelos de eficiencia energética y la generación a partir de energías renovables; este camino debe incorporar, complementariamente, las nuevas tendencias de movilidad como servicio (MaaS, por sus siglas en inglés), compuesto por un ecosistema de alternativas modales, vehículos, infraestructura y servicios, y de otro lado por la independencia energética y la reducción del impacto geopolítico de la posesión y concentración de materia prima.

1.4 Formulación del Problema

1.4.1 Árbol de Problemas

La proyección actual de la matriz energética del Perú Ministerio de Energía y Minas del Perú (2013) está enfocada en el desarrollo económico y productivo, y sustentada

principalmente en el progreso de la explotación y distribución del gas natural, como recurso energético de base y suponiendo su abundancia.

De otro lado, hoy en día la matriz energética del transporte es fundamentalmente de origen fósil (gasolina y diésel), y según el plan de desarrollo energético, sólo habrá un cambio de matriz fósil, dándole mayor relevancia al uso del Gas Natural. Sobre el uso de recursos energéticos renovables (RER) en el transporte, sólo se ha tomado en cuenta los agrocombustibles, considerando una fracción de mezcla en los combustibles, lo cual permite que se mantenga la misma tecnología de motores a combustión interna (MCI). Entre tanto, la opción del uso de la electricidad como energía final de los vehículos no ha sido considerado en el Plan Energético Nacional 2014-2025 Ministerio de Energía y Minas del Perú (2013); esta alternativa contiene una fuente primaria con mayor participación de energías renovables; tampoco se ha previsto el desarrollo de infraestructura de recarga para vehículos eléctricos ni políticas tangibles de cambios del parque automotor.

A partir de la situación actual (el año base puede considerarse como 2022, aunque gran parte de la data corresponde al año 2019 y 2020 (no hay bases de datos oficiales actualizadas de forma uniforme). Dada la pandemia, los consumos energéticos y de transporte que se recuperaron hacen más o menos equivalente el año 2022 y 2023) se construye el árbol de problemas, donde se describen los principales aspectos de la situación problemática, para diferenciar el problema central, las causas y los efectos visibles.

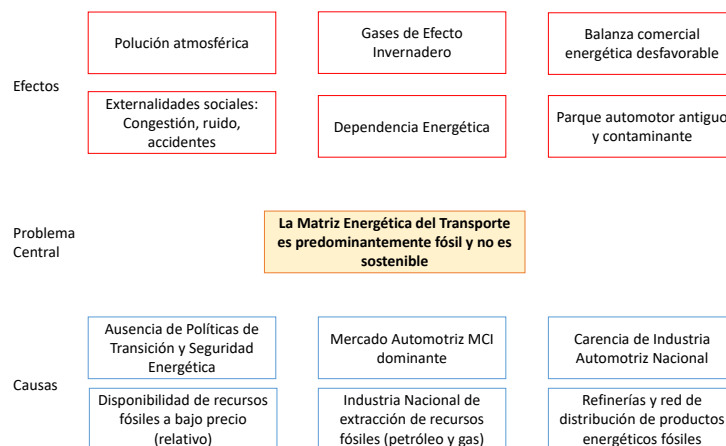


FIGURA N° 1.1: Árbol de Problemas

Problema central La Matriz Energética del Transporte es predominantemente fósil y no es sostenible: que se explica por la prevalencia de la explotación del petróleo y del gas, así como de sus derivados.

1.4.1.1 Causas

Ausencia de políticas de transición y seguridad energética De acuerdo con el Plan Energético Nacional (Ministerio de Energía y Minas, 2013), los principales cambios en la matriz energética entre el 2014 y el 2025 provendrá del aporte del gas natural. No se considera el incremento de las energías renovables en el reparto del mix energético.

De otro lado, en octubre del 2020, se publicó el DS-022-2020-EM Decreto Supremo (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2020a) que aprueba disposiciones sobre la infraestructura de carga y abastecimiento de energía eléctrica para la movilidad eléctrica, que define dichas especificaciones básicas, sin mayor detalle de un programa o estrategia para hacer eficaz la transición energética hacia energías más limpias, y tímidamente sugiere que “las entidades públicas cuando requieran sustituir su flota vehicular de acuerdo a sus fines, metas y objetivos, la realizan por tecnología energéticamente más eficiente que considere a la movilidad eléctrica”.

Disponibilidad de recursos energéticos fósiles a bajo precio Los derivados de los recursos fósiles tienen bajo precio relativo al contenido energético debido a la madurez de este mercado, al desarrollo de agentes comerciales, a la estructura existente tanto de almacenamiento como de distribución. En algunos casos también se puede observar que existe subvención del Estado a algunos derivados de combustibles fósiles, esto puede ser de forma indirecta como en el caso de inversión en infraestructura de refinerías con recursos públicos, o, puede ser directa subvencionando la tarifa como en el caso del gas natural o la subvención a derivados del Petróleo (Fondo de Estabilización de Precios del Combustible).

Mercado automotriz de motor a combustión interna (MCI) dominante Lleva más de 100 años como proceso industrial a nivel mundial, mejorando sus eficiencias de manera progresiva; tiene una cadena de comercialización y de distribución extendidas; además tienen menores precios frente al conjunto vehículo eléctrico y batería. El sistema logístico de abastecimiento de combustible le otorga una gran ventaja frente a los nuevos productos de vehículos eléctricos, que tienen que crear una infraestructura de recarga que tenga el mismo nivel de distribución, además de una autonomía equivalente. Debido a la densidad energética importante (alrededor de 130 MJ/gal), los combustibles líquidos puede brindar autonomía suficiente para recorridos largos, por lo que su reemplazo en carga pesada y de larga distancia puede ser complicado sin un energético equivalente.

Rol de la industria nacional de extracción de recursos fósiles (petróleo y gas) En las últimas décadas se han desarrollado diferentes proyectos de extracción de recursos fósiles, particularmente en la Selva Peruana, en la Costa Norte y el dominio marino frente a la franja costera del Norte. Estas explotaciones requieren de grandes inversiones, y que esperan estabilidad jurídica y social para garantizar la rentabilidad, así como la renovación de los procesos de exploración.

Rol de las refinerías y de la red de distribución de productos energéticos fósiles Similar al caso de la extracción, también se ha realizado infraestructura para la refinación de los productos derivados del petróleo y del gas natural, lo cual constituye un *lobby* natural para que se mantenga el statu quo. En el caso peruano, las inversiones han sido significativas en la Refinería de Talara (con una reciente ampliación de capacidad), Refinería La Pampilla, Refinería Pucallpa, entre otras.

Carencia de industria automotriz nacional No existe industria nacional relativa a la fabricación de automóviles por lo que no existe interés económico ni social particular para incentivar los automóviles VEB (vehículo eléctrico a batería). Sin embargo, existe una red de comercialización y de mantenimiento de los autos MCI que está bien desarrollada. En el futuro, el desarrollo de una red de mantenimiento de vehículos eléctricos podría ser un impulso para la creación de nuevos puestos de trabajo, y constituirse como un actor de referencia para la incorporación de políticas de promoción para la electrificación del transporte.

1.4.1.2 Efectos

Externalidades sociales Que se pueden describir como congestión, ruido y accidentes. Congestión: determinado por el mayor tiempo que consumen los usuarios del sistema de transporte. Otros efectos colaterales es el mayor consumo de combustible en estado de ralentí. Ruido: los motores de combustión interna (MCI) tienen alto impacto en la generación de ruido, sobre todo en las zonas de baja velocidad de circulación. Accidentes: Producto del desorden y parque automotor descontrolado, con un proceso de auditoría o de revisión técnica que tiene un proceso deficiente de control. Enfermedades respiratorias: Debido a la presencia del material particulado producto de la combustión defectuosa, y que se manifiesta como una afectación a la Salud Pública, en razón del incremento de enfermedades crónicas como el asma.

Polución atmosférica Es un efecto local a nivel de ciudades, y se manifiesta por el incremento de las enfermedades respiratorias, producto de gases producto de la combustión (NO_x , sulfuros, monóxido de carbono) y por una combustión defectuosa

que genera partículas volantes. Emisión de gases de efecto invernadero (GEI): la combustión de carburantes fósiles genera CO_2 y vapor de agua como parte de la descomposición de las moléculas de hidrocarburos. También existen otros gases de efecto invernadero, como el metano liberado por pérdidas (gas natural), que puede tener un potencial de efecto invernadero muy superior al dióxido de carbono.

Dependencia Energética En el Perú, la materia prima de los combustibles fósiles, asociados al petróleo, es mayoritariamente importada. La producción local (alrededor de 40 mil barriles diarios de petróleo) no cubre las necesidades del mercado nacional, que es cinco veces superior. Los cortes en las cadenas de suministros y las alteraciones de las condiciones geopolíticas pondrían en riesgo la seguridad energética del país.

Balanza comercial energética desfavorable Debido al tamaño del mercado energético peruano, su nivel de influencia en los precios en el mercado internacional es mínimo. El resultado de la balanza comercial es ampliamente negativo. Esto hace que el mercado energético peruano sea susceptible a la variabilidad internacional de precios del petróleo y del gas natural y del GLP.

Parque automotor antiguo y contaminante El Parque automotor peruano ha ido acumulando vehículos a lo largo de diferentes décadas sin mayor renovación ni mejora, por lo que las tecnologías existentes tienen un gran componente de fabricaciones de varias décadas atrás. Adicionalmente, existe un mercado muy desarrollado de repuestos y centros de mantenimiento de vehículos

Se presenta la evolución de la situación actual de la matriz energética del transporte hacia una situación deseada:

¿Cuáles son los factores de sostenibilidad para la futura matriz energética del transporte en el Perú? ¿Cuáles son los escenarios viables de la transición energética del transporte en el Perú?

Problemas Específicos ¿Cuáles son las previsiones del planeamiento urbano que permitan cambiar el uso y consumo de energía en el sector transporte? ¿Cuáles serán las condiciones de las futuras ciudades inteligentes para mejorar la eficiencia energética del transporte? ¿Cuáles son los cambios en los modelos de negocio y operación del transporte público? ¿Cuáles son las condiciones de cambio en eficiencia energética para el transporte de carga?

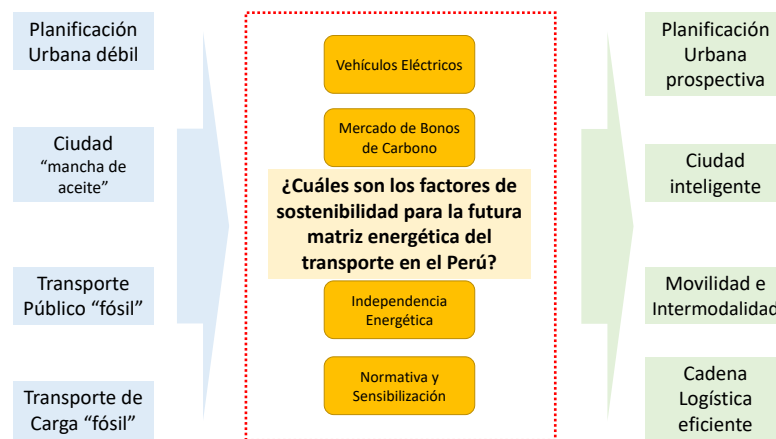


FIGURA N° 1.2: Esquema prospectivo de la transición energética del Transporte

A continuación, se detalla la matriz de consistencia:

Problema	Objetivos	Hipótesis	Variables e Indicadores			Metodología
Problema General	Objetivo General	Hipótesis General	Indicadores			
			Variables	definición	medida	fuentes de información
¿Cuáles son los factores de sostenibilidad para la futura matriz energética del transporte en el Perú? ¿Cuáles son los escenarios viables de la transición energética del transporte en el Perú?	Realizar un modelo prospectivo para identificar mecanismos básicos para la descarbonización progresiva de la matriz energética del transporte en el Perú, así como lineamientos para la transición hacia un desempeño sostenible en un horizonte al 2050.	La descarbonización de la matriz energética del transporte se basa en la transición hacia la energía eléctrica como fuerza motriz de los vehículos, la que puede ser implementada a partir de políticas públicas para el desarrollo limpio del país. La matriz del sistema eléctrico debe aumentar su componente renovable y es necesario modernizar el parque automotor, construyendo infraestructura de recarga. La eficiencia energética complementa las reducciones de emisiones atmosféricas y de gases de efecto invernadero.	Variable Independiente V1	Población urbana	N° hab	INEI, equiv. Países
			Demanda agregada de movilidad	PBI per cápita	S./hab, USD/hab	INEI, equiv. Países
			Partición modal, agregada	Precios de recursos energéticos del transporte	S./l	IEA, Petro Perú, COES
			Parque automotor, agregado	Contenido energético por	J/m3	IEA
			Demanda de energía	Emisiones atmosféricas	grCO2eq/J	IEA, IPCC
			Costo de la energía	Participación modal	%	MTC, INEI
			Sistema de Transporte Público y Transporte Público Masivo	Consumo energético según tipos de vehículos	J/kg	IEA
			Cadenas logísticas y Sistema de Transporte de Carga			
			Infraestructura de Transporte			
			Infraestructura de Abastecimiento y Recarga.			
			Variable Dependiente V2			
			Escenarios futuros			

TABLA N° 1.5: Matriz de Consistencia según Plan de Tesis Doctoral

1.5 Justificación e Importancia de la Investigación

Los efectos del Cambio Climático en el Perú han sido muy intensos, con efectos visibles en la mayor frecuencia del Fenómeno del Niño o en la Disminución de la Superficie de Glaciares. Desde el punto de vista ambiental, la explotación de los recursos fósiles ha creado gran debate sobre los impactos ambientales y sociales. Entre otros aspectos, también se discuten los impactos de las perforaciones en la estructura geológica de los reservorios naturales de combustibles fósiles, y su impacto en la contaminación de las aguas subterráneas; también existe preocupación por la

deforestación, en el caso de explotaciones en zonas boscosas (caso de la Amazonía Peruana).

Desde el punto de vista del mix energético, se ha creado una gran dependencia de los recursos fósiles, debido a que las mayores reservas y las grandes industrias de refinación se encuentran concentrados en pocos países. En el Perú, se ha gestionado la construcción y actualización de equipos de la nueva refinería de Talara, que procesa combustibles fósiles para el consumo nacional. El mercado automotor ha emergido como consecuencia de un mercado económico en expansión, por el crecimiento de las ciudades, por la ausencia de reglas para la implementación ordenada de un transporte público y vehicular. En consecuencia, ante el abandono de la planificación urbana y del control del desarrollo territorial, es necesario reconcentrar los esfuerzos en anticipar los escenarios futuros, determinar los objetivos alcanzables, y trazar estrategias discutidas por los diferentes actores.

También existe una vinculación evidente de la matriz fósil sobre las externalidades del sector transporte terrestre urbano. Por ejemplo, se observan efectos de contaminación atmosférica local en las grandes ciudades debido al parque automotor antiguo y en mal estado de conservación, así como el deterioro de la calidad ambiental del aire. En el caso del área metropolitana de Lima, hay zonas que no cumplen con los estándares mínimos calidad del aire, tal y como se puede observar en la céntrica Av. Abancay. Las implicancias en la salud pública son altas, entre otros casos, por la mayor recurrencia de enfermedades crónicas como el asma. Según la OMS, los niveles de material particulado $PM_{2.5}$ en Lima tienen un valor promedio anual de $48 \mu g/m^3$ y con una consecuencia de 4,239 muertes atribuibles a la contaminación del aire (Hernández-Vásquez y Díaz-Seijas, 2017), y en el 2016 se realizaron mediciones en la Embajada de Estados Unidos en el distrito de Surco, Lima, con un valor promedio a $38 \mu g/m^3$, superior al límite permisible de $25 \mu g/m^3$ (Hernández-Vásquez y Díaz-Seijas, 2017).

Otro punto de discusión es la baja eficiencia energética de los motores de combustión interna de los vehículos de transporte, que según diversos estudios están entre 15 y 30%, es decir, en promedio, el 80% de la energía se pierde en la generación de calor y las pérdidas por fricción (Albatayneh, Assaf, Alterman, y Jaradat, 2020). Los motores eléctricos tienen una mayor eficiencia porque desarrollan el par de fuerza directamente (entre 50 y 80%), debido a que no tienen cámaras de compresión (MCI), lo que les permite desarrollar el movimiento del vehículo directamente; sin embargo, su autonomía de recorrido y el proceso de recarga constituyen aún barreras para su desarrollo. Sin embargo, la eficiencia global del vehículo eléctrico "del

pozo a la rueda” dependerá notablemente de la fuente de generación eléctrica, si la fuente es fotovoltaica o eólica, la eficiencia global bordeará 70%. Sin embargo, si la fuente de energía eléctrica proviene del gas o del carbón, la eficiencia energética es equivalente a un motor de combustible (Albatayneh et al., 2020).

A partir de esta situación, el desarrollo del sector transporte terrestre urbano propone retos diversos que aseguren un futuro sostenible, enfocado en el aumento de la movilidad, la accesibilidad a los servicios públicos, en la reducción de las externalidades del conjunto de desplazamientos y en el aumento del rendimiento energético. ¿Cuáles son los retos del cambio de la matriz energética del sector transporte a largo plazo, con un horizonte al 2050? ¿La incorporación de vehículos eléctricos o híbridos puede disminuir la huella ambiental del Sector Transporte? Es una pregunta que contiene muchos factores, los cuales se esbozan preliminarmente a continuación considerando la incorporación de vehículos eléctricos al parque automotor:

Planificación Urbana	Ciudad Inteligente	Transporte Público	Transporte de Carga	General
Infraestructura de recarga para vehículos eléctricos (VE)	Datos para monitorear congestión (persona/ vehículo infraest.)	Horizonte de conversión a VE para toda la flota 2050	Autonomía para distancias largas	Incentivos para la compra VE / mantenimiento
Infraestructura de carga en las vías	Administración del espacio público (maximizar el uso suelo)	Reducción de las emisiones atmosféricas / ruido	Preferencia para logística local	EETT para VE (norma nacional)
Nuevos modelos de negocios basados en la recarga (comercios)	Básculas en tiempo real / control de carga pesada (disminuir deterioro en vías)	Costos de operación (combustible / energía final, electricidad)	Vehículos a bajas emisiones: Preferencia peajes / estacionamientos	Mercado de Bonos de Carbono
Administración de Residuos Eléctricos (Economía Circular)	Infraestr. recarga distribuida en estacionamientos (viviendas/comercios)	Vehículos sin conductor / guiado óptico (sin rieles)	Monitoreo operacional y energético	Sensibilización

TABLA N° 1.6: Retos de la evolución sostenible del transporte y de la transición energética del transporte con un horizonte al 2050

1.6 Objetivos

1.6.1 Objetivo General

Realizar un modelo prospectivo para identificar mecanismos básicos para la descarbonización progresiva de la matriz energética del transporte en el Perú, así como lineamientos para la transición hacia un desempeño sostenible en un horizonte al 2050.

1.6.2 Objetivos Específicos

1. Proponer un modelo prospectivo de infraestructura energética para el sector Transporte en las principales ciudades del país.
2. Establecer esquemas de condiciones mínimas que anticipen la evolución de la transición energética del transporte en ciudades inteligentes.
3. Plantear alternativas y lineamientos de modelos de negocio y de operación de transporte público masivo, como políticas complementarias de transporte.
4. Simular escenarios alternativos de transporte de carga en la diversificación de modos y de transición energética.

1.7 Hipótesis de la investigación

1.7.1 Hipótesis General

La descarbonización de la matriz energética del transporte se basa en la transición hacia la energía eléctrica como fuerza motriz de los vehículos, la que puede ser implementada a partir de políticas públicas para el desarrollo limpio del país. La matriz del sistema eléctrico debe aumentar su componente renovable y es necesario modernizar el parque automotor, construyendo infraestructura de recarga. La eficiencia energética complementa las reducciones de emisiones atmosféricas y de gases de efecto invernadero.

1.7.2 Hipótesis Específicas

1. Los vehículos eléctricos contribuyen a la disminución de externalidades del parque automotor, aunque hoy en día aún tienen restricciones en su autonomía de recorrido. El desarrollo de la infraestructura de recarga en domicilios, comercios y centros de abastecimiento permitirá incrementar la flota de vehículos eléctricos, renovando el parque automotor y diversificando la matriz energética del transporte.
2. Las redes de información de datos masivos (*big data*) provenientes de los sistemas de transporte permitirán anticipar la formación de congestión y la administración eficiente del espacio público.
3. La reducción de externalidades del transporte (congestión, contaminación atmosférica, ruido, entre otros) y la competitividad de fuentes de energía alternativas, permitirá reducir los costos de inversión y explotación de los sistemas de transporte público masivo en las principales ciudades del Perú.

4. La inversión en infraestructura de mayor capacidad de transporte (ferrocarril) y las políticas de incentivo / desincentivo de fuentes de energía permitirá generar un cambio al horizonte del 2050.

1.8 Metodología

Para conseguir el objetivo general se estudiará el inventario energético del transporte terrestre según partición modal. El inventario desarrollado constará de modelos agregados, y las proyecciones de crecimiento de las diferentes variables. El análisis muestral tomará el estado del parque automotor en Lima, y en algunas ciudades principales del país.

Los análisis que se plantean serán realizados a nivel agregado, es decir, sin hacer grandes distinciones entre los grupos poblacionales ni los otros factores sociales, económicos o políticos, sino que se trabajarán como parámetros agrupados para poder evaluar las respectivas tendencias. Estos análisis se basan en hipótesis de análisis que se justificarán a partir de algunos análisis desagregados o de referencias bibliográficas. Se presenta la secuencia de trabajo:

- Sustento de la base estadística de la matriz energética del transporte (individual, público, carga) según partición modal: Se realizarán muestreos aleatorios para confirmar la asignación porcentual.
- Estudio e inventario energético de la infraestructura de transporte, estimación en las fases de construcción y estimación.
- Estudio de la Oferta de la Energía Fósil: Productores (Tarificación e impacto en el modelo económico del transporte) y Oferta del Mercado de Energía Eléctrica. Estudio de la Demanda de la Energía: Según modos de transporte.
- Estudio del consumo energético del transporte. Los estudios se realizan mediante encuestas y modelos agregados para calcular los efectos de la congestión. Se utilizaron bases de datos abiertas de tráfico para generar información modelada de consumo de combustible, y calibrar los modelos con estudio de movimientos con instrumentos embarcados o con registros de aplicaciones de celular.
- Identificación de factores críticos: Tecnológicos, de Infraestructura, Socioculturales, Económicos (externalidades, tarifa, equilibrio económico-financiero). Propuestas de Mecanismos de control económico y estrategias para la descarbonización de la matriz energética y la migración hacia una matriz mayoritariamente eléctrica.

- Modelo prospectivo de la transición energética del sector Transporte.
- Presentación de instrumentos de políticas públicas para el desarrollo de energías renovables en el transporte y la transición energética, entre ellas, regulatorias, financieras, de estandarización e informativas.

1.8.1 Variables

- Demanda agregada de movilidad de las principales ciudades, descrita en matrices origen – destino.
- Partición modal, agregada, clasificada por ciudades.
- Parque automotor, agregado, clasificada por ciudades y por antigüedad.
- Demanda de energía.
- Costo de la energía, según tipo de recurso y según eficiencia de la tecnología.
- Costos del transporte, tarificación y las externalidades traducidas como costos sociales y ambientales. En cuanto a los costos sociales, se refiere al estudio del Valor Social del Tiempo (VST), existen otros costos como, la accidentabilidad, la polución atmosférica, entre otros.
- Huella de carbono y energética del transporte terrestre urbano.
- Sistema de Transporte Público y Transporte Público Masivo.
- Cadenas logísticas y Sistema de Transporte de Carga.
- Infraestructura de Transporte e Infraestructura de Abastecimiento y Recarga.

1.8.2 Indicadores

- Población urbana.
- PBI per cápita, nacional y por ciudades.
- Precios de recursos energéticos del transporte.
- Contenido energético por peso y volumen, disponibles en el mercado.
- Emisiones atmosféricas (GEI ² y contaminantes).
- Participación modal.
- Consumo energético según tipos de vehículos, vinculado al parque automotor.

²GEI: Gases de Efecto Invernadero

1.8.3 Tipo y Nivel de Investigación

La investigación se enmarca en un carácter exploratorio, descriptivo y explicativo, utilizando técnicas de estudio de escenarios para la planificación de la transición energética del transporte. Se enmarca en las siguientes líneas de investigación: Energías Renovables, Eficiencia Energética, Desarrollo Sostenible y Electromovilidad.

1.8.4 Período de Análisis

El análisis contiene las siguientes fases temporales:

- Análisis histórico, siglo XX, 2000 – 2015.
- Análisis contemporáneo: 2015 – 2020.
- Análisis de tendencia de corto plazo: 2020-2025 (incluye el período de la tesis, 2020 – 2023).
- Prospectiva 2025 – 2050.

1.8.5 Fuentes de Información

Las fuentes primarias serán:

- Encuestas directas. Toma de datos en campo, para identificación de parque automotor, vía videos y conteo.
- Adquisición automatizada de datos a través de sensores: GPS, acelerómetros y giroscopios. Algunas mediciones de comprobación serán tomadas con celulares vía el aplicativo Andro Sensor.
- Talleres de prospectiva. Entrevistas con diferentes actores del sector transporte, electromovilidad y el sector energético.

Las fuentes secundarias:

- Tesis doctorales y artículos de investigación.

1.8.6 Instrumentos utilizados

- Modelación agregada de movilidad.
- Tratamiento estadístico con programas especializados.
- Procesamiento prospectivo con programas especializados, Micmac, Mactor.
- Encuestas diseñadas y calibradas.

1.8.7 Técnicas de Recolección y Procesamiento de Datos

- Diagnóstico de factores económicos de Oferta y Demanda relacionados a la matriz energética: Revisar la importancia económica del tipo de combustible según el parque automotor (considerar transporte particular, transporte público, transporte de carga, servicios terrestres, aéreos, fluviales y marítimos). Proyectar el tamaño del mercado, los principales agentes (compradores y vendedores), los mecanismos económicos, entre otros. Propuestas de Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) aplicados al transporte: Basados en el Protocolo de Kyoto, proponer MDL y acciones en el Mercado Voluntario. Propuestas de incentivos para la disminución del consumo de energía de fuente fósil: Basados en las Políticas de Desarrollo Energético y Ambiental proponer políticas complementarias para descarbonizar la matriz energética del sector Transporte e incremento de la Capacidad del Sistema Eléctrico.
- Propuestas de incentivos para el incremento del parque automotor de vehículos eléctricos.
- Propuestas de desarrollo de alternativas energéticas con matriz de energía primaria renovable.
- Plan de desarrollo de la matriz eléctrica en el sector Transporte, que incluyen lineamientos que garanticen el desarrollo sostenible.

CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO Y CONCEPTUAL

Se presentan los aspectos del marco teórico y conceptual asociados a la Transición Energética del Transporte Terrestre Urbano.

2.1 Marco Teórico

2.1.1 Prospectiva

Anticipación para realizar las acciones presentes bajo el estudio de futuros posibles y deseables, de forma preactiva y proactiva (Godet, 2007). Los estudios de prospectiva pretenden anticipar los escenarios del futuro, definir los objetivos deseables, y elegir el camino o proceso estratégico de largo plazo.

2.1.2 Eficiencia Energética

En el escenario actual, utilizar la energía de forma más eficiente es esencial para la reducción de las emisiones de carbono, Cullen y Allwood (2009). La eficiencia energética es la medida de mayor impacto y menor costo incluso comparando con la implementación de nuevos recursos energéticos renovables y nucleares, o con la captura y almacenamiento de carbono. Por lo que esta variable de actuación debe ser considerada dentro del análisis de las acciones necesarias para la transición energética.

2.1.3 Contenido energético e infraestructura de almacenamiento de energía

El contenido energético de los diferentes combustibles permite comparar la efectividad y los impactos ambientales de los diferentes recursos energéticos a lo largo del ciclo de vida, como energía primaria, energía secundaria y energía final. El contenido energético puede expresarse en Joules (J, MJ, TJ, PJ) y puede evaluarse de forma asociada con el peso (gravimétrico), el volumen (volumétrico) o las emisiones de carbono equivalente (CO_{2eq}), Cullen y Allwood (2009). Existen diversas referencias bibliográficas que permiten comparar los valores de estas variables.

2.1.4 Infraestructura para combustibles nueva generación: el Hidrógeno (H_2)

El hidrógeno es el elemento químico más abundante, sin embargo, no se encuentra en su forma libre. Uno de los métodos de obtención para el hidrógeno se denomina la electrólisis del agua (aplicación de una fuente de corriente eléctrica para la división molecular de Hidrógeno y Oxígeno), y por un proceso inverso, puede generar electricidad y agua; esta transformación no aporta al efecto invernadero en esta etapa, sin embargo, queda por analizar su ciclo de vida para evaluar su huella ambiental.

Desde el punto de vista del proceso industrial, el hidrógeno puede ser obtenido a partir del procesamiento de metano (hidrógeno azul), de la gasificación del carbón mineral (hidrógeno negro), de combustibles fósiles (gris), de la electrólisis del agua con electricidad de recursos renovables (hidrógeno verde) o energía nuclear (rosado), y se agregan algunos otros colores según su origen (Página web [The Color Palette of the Colorless Hydrogen](#)); cada uno de los procesos industriales tienen diferentes costos de producción, por ejemplo, para centros industriales de producción de 960 t diarias de H_2 , se obtiene que la producción de hidrógeno a partir de metano, carbón o biomasa está comprendido entre 2.45 - 3.03 USD\$ /kg para hidrógeno líquido y entre 2.45, 3.03 USD\$ /kg para el hidrógeno comprimido, frente a valores de 5.80 y 4.68 USD\$ /kg respectivamente con producción a partir de electrólisis, Ochoa Bique (2019), es decir, más del doble del costo del hidrógeno industrial a partir de recursos energéticos fósiles. Adicionalmente, el hidrógeno debe almacenarse a alta presión (entre 350 y 700 bares), o en reservorios criogénicos de hidrógeno líquido a $-253\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Esto, por el momento, limita el desarrollo del hidrógeno verde, a la espera de un mayor desarrollo de la tecnología. Diferentes proyectos de investigación y de desarrollo tecnológico están enfocados en reducir esta brecha, así como implementaciones de módulos electrolíticos en las granjas solares y de viento para la producción de hidrógeno verde, aunque el aporte aún es marginal.

Las industrias potenciales para la incorporación del Hidrógeno verde en el Perú deben tener altos consumos de energía, en particular, grandes hornos o un proceso de procesamiento de alta intensidad de calor (por ejemplo, superior a 500°C). Se pueden considerar los siguientes sectores:

- Almacenamiento de energía eléctrica (en complemento con plantas de generación renovable).
- Minería (orientado a procesos internos y al transporte).
- Metalurgia (hornos de altas temperaturas).
- Cemento (hornos de altas temperaturas).
- Acero (hornos de altas temperaturas).
- Transporte de carga pesada (camiones con autonomía de 1,000 km y reemplazo de trenes Diésel).
- Automóviles eléctricos (con pila a combustible).

- Amoniaco verde (utilizado en las voladuras, en los fertilizantes y como vector energético similar al hidrógeno verde).

El Amoníaco (NH_3) puede surgir también como una opción interesante para incrementar el valor energético y comercial del hidrógeno, debido a su contenido molecular de 3 átomos de hidrógeno, a su estado líquido con una temperatura abordable a $-33^\circ C$, a una infraestructura de almacenamiento existente, lo mismo que una experiencia comprobada de la cadena logística. El Amoníaco muestra una densidad energética 5 veces superior a las baterías de ion-litio. Sin embargo, es necesario controlar la reacción de Nitrógeno en la pila de combustible con membrana alcalina (AMFC: Alkaline Membrane Fuel Cell), la cual puede generar Óxidos de Nitrógeno (NO_x) y en particular el protóxido de Nitrógeno (N_2O) que tiene un potencial de calentamiento global 25 veces superior al metano y 300 veces mayor que el Dióxido de Carbono. Sin embargo, ya es posible controlar los Óxidos de Nitrógeno con convertidores catalíticos que ya se usan en algunos motores térmicos, y que podrían resultar eficaces en producciones centralizadas de Amoníaco Verde.

2.1.5 Electromovilidad

La creación de un mercado de vehículos eléctricos viene siendo promovida por políticas públicas de diferentes países con diferentes niveles de desarrollo. Las políticas buscan disminuir los efectos de la polución atmosférica y de la generación de gases de efecto invernadero, y al mismo tiempo, disminuir su dependencia energética del petróleo. El mercado de los automóviles eléctricos ha ido creciendo significativamente, y se espera que en el 2025 uno de cada diez autos nuevos sea eléctrico (Joller y Varblane, 2016). Los grandes países (China, Japón, Alemania, Estados Unidos, Francia, etc.) lideran las ventas anuales de autos eléctricos; sin embargo, un puñado de países con menores poblaciones ha podido desarrollar significativamente este mercado, como en el caso de Holanda, Noruega y Estonia, (Joller y Varblane, 2016). El éxito de la penetración del nuevo mercado en estos países se debe a mecanismos de promoción del cambio liderado por el poder central (a través de Políticas de Estado), basados en incentivos de diferente naturaleza, en la construcción de la infraestructura de recarga y en la apropiación cultural de las medidas. Sin embargo, es útil indicar que la electromovilidad tendrá impacto cuando la energía provenga de fuentes renovables.

2.1.6 Políticas de Desarrollo Energético y de Emisiones en Transporte

Se presenta la revisión de políticas energéticas de algunos países, así como el enfoque previsto para la transición energética como política nacional. Se observa una tendencia general para la planificación a largo plazo, y en particular, en cuanto a

los escenarios previstos para el 2050.

Argentina Se puede observar que la generación eléctrica actual es dominada fuertemente por el componente térmico, con más del 64% de un total de 137 TWh. En el año 2030 se prevé un notable incremento del 65% para llegar hasta 227 TWh de producción eléctrica, considerando básicamente el crecimiento de producción eléctrica con central nuclear, y de fuentes renovables (sin considerar la hidráulica). El componente térmico mantiene su influencia por la preponderancia del gas natural, aunque no crece como producción (SPE, Subsecretaría de Planeamiento Energético, 2019).

Chile De acuerdo a la perspectiva de evolución de la matriz energética de Chile, entre el 2015 y el 2050 se prevé en la generación eléctrica pase de 75,000 GWh hasta 210,000 GWh en el 2050, es decir, triplicar la capacidad de generación. El mayor crecimiento se puede observar en la generación hidráulica convencional, en los proyectos mini hidroeléctricos, en la energía solar, en la energía eólica y en algunos proyectos de geotermia. En contraposición, el gas natural y el carbón pierden posición en este mix energético (DPPE, División de Prospectiva y Política Energética Ministerio de Energía de Chile, 2016). La Estrategia Nacional de Electromovilidad de Chile (2021) tiene como objetivo acelerar el desarrollo de la electromovilidad en el país. La estrategia contempla una serie de principios y medidas que favorecen el mercado de vehículos eléctricos, con el objetivo de vender solo automóviles con cero emisiones de aquí al año 2035. Entre las medidas propuestas se encuentran la promoción del uso de vehículos eléctricos y la creación de infraestructuras para su carga, la implementación de incentivos fiscales y financieros para la adquisición de vehículos eléctricos y la promoción del transporte público eléctrico. En cuanto a los incentivos fiscales y financieros, la estrategia contempla una serie de medidas que buscan fomentar la adquisición de vehículos eléctricos. Entre ellas se encuentran:

- Promoción del impuesto "verde" que aplica a los vehículos de combustión; los fondos ayudan al fomento del parque de los vehículos eléctricos.
- Eliminación del IVA (Impuesto al Valor Agregado, equivalente al IGV) para la compra de vehículos eléctricos.
- Implementación de un sistema de incentivos financieros para la adquisición de vehículos eléctricos.

Las metas son ambiciosas en cuanto al nivel de ventas de vehículos electrificados, que, según los tipos, se venderán en su totalidad electrificados entre los años 2035 y 2045. (Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, 2021)

China El caso de China es bastante especial, es uno de los países que ha tenido mayor crecimiento económico y productivo en las últimas décadas, y parte de este desarrollo ha sido sustentado en la explotación del carbón como fuente de energía primaria para poder soportar su alta evolución industrial. Sin embargo, esto ha generado fuertes críticas a nivel internacional, sobre todo por el alto contenido de emisiones de gases de efecto invernadero que supone quemar el carbón como fuente de energía eléctrica, y a nivel interno, el elevado nivel de contaminación atmosférica de sus ciudades industriales.

De otro lado, China ha diseñado una estrategia para mejorar su posicionamiento en la producción de energía eléctrica, debido a que cuenta con grandes reservas de tierras raras, lo cual le da un singular liderazgo en el mercado electrónico y de paneles solares en el mercado fotovoltaico. Al mismo tiempo, se ha propuesto aumentar la eficiencia energética al 2050; en este escenario, su dependencia energética se reduce notablemente, al pasar de una matriz dominada por el petróleo, el carbón y el gas (alrededor del 90% en el 2010) hacia una matriz completamente variada de muy diversas fuentes proyectado al 2050, donde cada una de los recursos energéticos tiene una participación equilibrada, y disminuyendo la participación de los recursos fósiles por debajo del 15% en su conjunto. De otro lado, también es notorio el enfoque en la eficiencia energética, debido a que proyectan utilizar el mismo nivel de energía en el 2050 que la que se utilizó en el 2015. (Energy Research Institute (ERI), 2015).

2.1.7 Análisis de ciclo de vida (ACV) de la energía en el transporte

El transporte es una actividad que genera diversos efectos en el entorno en diferentes fases. Para un mejor análisis, es necesario observar todas las etapas, que inicia con la extracción de materia prima para la fabricación de vehículos, el proceso de fabricación de los diferentes tipos de combustibles, el proceso de fabricación y comercialización, la infraestructura de transporte, los repuestos y la disposición final de los vehículos (chatarreo). Cuando se toman decisiones sobre la factibilidad de la infraestructura del transporte, o sobre el desarrollo de políticas para fomentar algunos de los modos de transporte, se toman en cuenta vectores económicos y sociales. El análisis ambiental suele estar relegado debido a la complejidad de los métodos para valorizar los impactos. Sobre el análisis económico, el enfoque se centra en la rentabilidad del sistema, y en el retorno de las inversiones. También se considera el impacto para el desarrollo productivo, para mejorar el tiempo de desplazamiento o para reducir la congestión de vías. Desde el punto de vista del análisis socioambiental, se considera que la actividad humana genera alteración en el medio social y ambiental de forma permanente e ininterrumpida. La tecnología, la mecanización y el consumismo han ido aumentando la presión para la obtención de recursos na-

turales, generando efectos de deforestación, erosión de suelos, efecto barrera en los ecosistemas, eutrofización, entre otros en el medio natural. También se generan efectos en las áreas con intensa actividad humana, colonización, modificación de áreas y reservas naturales, entre otros.

Para la cuantificación de los efectos ambientales, se considera que son diversos según el ciclo de vida (etapa de diseño, de construcción, de fabricación, de operación y mantenimiento, de disposición final). Los efectos ambientales del transporte pueden medirse analizando los vehículos y la infraestructura, aunque una visión más global tomaría en cuenta los efectos del planeamiento urbano, como la ocupación del espacio urbano y el planeamiento de los centros emisores y receptores de desplazamientos.

2.1.8 Planeamiento del Transporte

2.1.9 Estudios de movilidad y desplazamiento

Las personas necesitan movilizarse para acceder a diferentes tipos de servicios, desde acceso a servicios básicos (alimentación, salud, educación), a actividades productivas (empleo, producción) o a actividades complementarias y recreativas. El conjunto de actividades refleja en el nivel de vida y en el confort de una aglomeración urbana, es decir, a mayor accesibilidad, las personas tienen mayor opción de satisfacer sus necesidades básicas y acceder a otras, siguiendo la lógica de la pirámide de Maslow (Maslow, 1974) y de los conceptos que propone sobre la motivación humana.

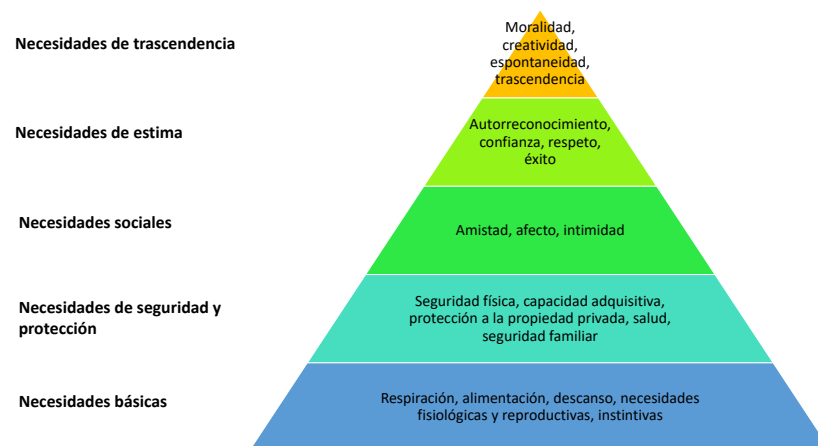


FIGURA N° 2.1: Pirámide de necesidades, según la teoría de la motivación humana de A. Maslow

Nota: A. Maslow propone que las motivaciones humanas tienden a seguir un orden de satisfacción, desde las más elementales hacia las superiores. Pese al orden que se propone, no significa rigidez, sino una tendencia para la mayor parte de los grupos

observados en sus investigaciones.

Al mismo tiempo que se van satisfaciendo las necesidades, es necesario evaluar los efectos que estas movilizaciones (desplazamientos) van surtiendo en su entorno, tanto en la modificación del espacio geográfico, natural social, agotamiento de recursos energéticos y materiales, desarrollo de actividades económicas y productivas, entre otros. Nótese que la movilidad surge como respuesta a la necesidad de satisfacer necesidades básicas, para lo cual se requiere acceder a los servicios que brinda la ciudad. La accesibilidad, que es un factor complementario, está en función de otros parámetros como la proximidad y la conectividad. Si los servicios básicos o mínimos que garanticen la calidad de vida de las personas se encuentran en un entorno accesible, la movilidad estará orientada a motivaciones humanas de otra índole.

Los desplazamientos producen diferentes externalidades, de las cuales, podemos resaltar: Congestión, Ruido, Polución atmosférica, Emisión de gases de efecto invernadero, Agotamiento de recursos energéticos, Uso del espacio urbano, Efecto barrera. Al mismo tiempo, se interpreta que la movilidad no es directamente proporcional a la infraestructura de transporte o a la fabricación de más vehículos, sino que se trata de un fenómeno social que puede interpretarse bajo diferentes reglas o enfoques. Conforme las ciudades han venido creciendo y existe una dependencia creciente hacia el automóvil y a los vehículos motorizados, es indiscutible que el sistema de transporte constituye también parte de los modos de vida, ergo, impacta en la calidad de vida. Según Kauffman (*La transformation des modes de vie*), los modos de vida pueden verse a través de tres dimensiones: funcional, sensible y social. Estas dimensiones teóricas que explican las preferencias por los diferentes modos de transporte y accesibilidad se explican a continuación (Thomas, Adly, Pattaroni, Kaufmann, y Galloux, 2011):

- Dimensión funcional (utilizar): expresado por aspectos pragmáticos cotidianos, que está asociado al producto del desplazamiento, principalmente por las variables fundamentales que se relacionan con el flujo y el tráfico: distancia, tiempo, velocidad, intensidad de flujo, densidad, capacidad, frecuencia. Esta dimensión mide además la accesibilidad a la red de transporte y su conectividad en los pares Origen – Destino, el ingreso, el nivel socioeconómico, las preferencias modales en general y la proximidad de las actividades.
- Dimensión sensible (habitar, vivir): que está asociado al bienestar de cada persona, el encuentro de particularidades que le producen bienestar, y se trata de una evaluación y preferencia individuales. Se caracteriza por la morfología (naturaleza: espacios verdes, espacios libres; infraestructura: densidad de edificios,

antigüedad, armonía, condición de las vías), y se expresa según la sensibilidad y preferencias estéticas de cada quien.

- **Dimensión social (relacionarse):** que está asociado a los factores que favorecen las relaciones sociales, la integración urbana, las relaciones entre los diferentes espacios, la construcción de un espacio público, a favorecer la accesibilidad a la red de transporte, la interacción con los espacios públicos y privados, al fortalecimiento de la vida asociativa diversa, composición social (diversidad u homogeneidad).

Las dimensiones abren nuevos caminos de evaluación de los medios de transporte, que se alejan del concepto frío de una infraestructura inerte y se convierte en los lazos sanguíneos de una ciudad que crece, se entreteje y se fortalece con los espacios comunes. Las dimensiones permiten entender mejor las características de la calidad de vida, que no es homogénea entre todos los grupos sociales debido a sus condiciones actuales y a sus diferentes aspiraciones de desarrollo. Esto puede observarse cuando poblaciones de similares ingresos optan por diferentes configuraciones urbanas y de transporte, y asumen diferentes elecciones modales de transporte. Las personas pueden ser agrupadas de acuerdo a sus preferencias o descripciones de las dimensiones de los modos de vida (Thomas et al., 2011):

Preferencias	Funcional	Sensible	Social
Racionalista	Accesibilidad al auto, proximidad al trabajo	(sin preferencia)	(sin preferencia)
Tradicional	Proximidad de las escuelas, del transporte público	Amigos, Seguridad, Seguridad Vial, reputación de colegios, cerca a la familia	Barrios cercanos a los centros de la ciudad, ciudad multifuncional
Elitistas	Accesibilidad en auto, impuestos o tasas urbanas	Sensación de seguridad, reputación de los barrios	Calma, naturaleza, encanto urbano, barrios residenciales, barrios exclusivos
Tranquilos, calmados	(sin preferencia)	(sin preferencia)	Calma, naturaleza, encanto, casas de campo, barrios residenciales exclusivos
Urbanos	Transportes públicos, proximidad al centro urbano (trabajo), comercios	Vida cultural, vida social, diversidad social	Edificios antiguos, tradicionales, céntricos, edificios multifamiliares
Amistosos	Proximidad a los colegios, transporte público, estaciones, comercios	Vida social, reputación de los colegios, diversidad social	Edificios multifamiliares con espacios comunes, cerca al centro urbano
Indiferentes	(sin preferencia)	(sin preferencia)	(sin preferencia)

TABLA N° 2.1: Clasificación de Personas según sus preferencias de modos de vida

2.1.10 Interacción urbana y redes de transporte

¿Cuál ha sido la influencia de la red de transporte (infraestructura + transporte público) en el desarrollo urbano de una ciudad a lo largo de su historia? Durante el

crecimiento urbano ha surgido la cuestión dicotómica de la prevalencia en la expansión urbana, ¿se han formado las urbes consolidando los asentamientos preexistentes y fortaleciendo sus redes de transporte?, o ¿los asentamientos humanos han seguido el trazo de los caminos que unían diferentes asentamientos?

Muchas de las vías han sido construidas en los inicios de las ciudades, sobre todo aquellas que fueron planificadas por los españoles al inicio del Virreinato, o en posteriores períodos de la República. Algunas ciudades más antiguas conservan los caminos principales que conectaban el antiguo imperio inca, cuya configuración eminentemente rural estaba enfocada en fortalecer el sistema de comunicación terrestre. Las configuraciones republicanas, sobre todo en época reciente, han surgido como respuesta al rápido crecimiento poblacional y a las invasiones prediales producto de la migración desordenada del campo hacia la ciudad.

Ambas tendencias (primero redes de transporte y luego asentamiento urbano, o, primero asentamiento urbano y luego redes de transporte) pueden ser observadas luego de un análisis histórico del crecimiento de las ciudades, y es posible observar patrones, aunque no una única respuesta para la incesante transformación y transfiguración de las nuevas ciudades. Si observamos el estado inicial de la ciudad, es posible determinar la naturaleza básica de las funciones iniciales. Los fenómenos de urbanización de la posguerra y la rápida industrialización, generaron una migración sostenida del campo a la ciudad, que no se ha detenido aún, despoblando las zonas rurales y sobrepoblando las urbes, y en algunos casos, desbordando el territorio original. De acuerdo a la condición de planificación y el manejo de los territorios, algunos países han podido ordenar el crecimiento en suburbios que han crecido alrededor de la ciudad principal. Otros países no han podido controlar la ola migratoria, y los asentamientos humanos se fueron formando como manchas de aceite, extendiendo la ciudad caóticamente.

En el Perú, los fenómenos migratorios siguen una naturaleza similar que en el resto de los países, incrementando la velocidad de la urbanización a partir de la violencia rural provocada por el movimiento terrorista hacia fines de la década de 1970. Las ciudades emergen como centro de nuevas oportunidades para el empleo, la salud y la educación. Los servicios básicos urbanos son mucho más adelantados que los rurales, lo cual incrementa su atractividad. Sin embargo, la ola migratoria suponía el crecimiento acelerado de la población sin el crecimiento en la misma magnitud de la infraestructura urbana, es decir, cuando al cabo de unos años se duplicaba la población, la infraestructura apenas había crecido.

La gestión deficiente de los terrenos eriazos fue propiciando la ocupación progresiva de espacios abandonados históricamente por condiciones vulnerables o áridas para el establecimiento de poblaciones urbanas, principalmente en las quebradas y las estribaciones andinas. El fenómeno se sucede en casi todas las ciudades peruanas, una vez producido el crecimiento del espacio urbano, se requiere en consecuencia una red de comunicación terrestre para vincular las nuevas ciudades dormitorio con los centros atractores que conservan los puestos de trabajo y los principales servicios de la ciudad. Los centros urbanos de una ciudad se desarrollan a partir de puntos importantes de atracción, que pueden ser: Centros financieros, Centros industriales, Centros comerciales, Centros educativos, universidades y polos tecnológicos, Centros administrativos, Centros de salud, Zonas recreativas, Zonas de vivienda.

2.1.11 Prospectiva y Estudio de Escenarios

Los gobernantes y planificadores han tratado de ver el futuro desde que la sociedad empezó a organizarse, y, sin embargo, continúa siendo una tarea compleja y normalmente guarda una gran dosis de resultados inesperados. Los escenarios futuros se componen de diversas combinaciones y se crean para determinar la gama de posibilidades de acuerdo a los parámetros de análisis. Se utilizan algunas herramientas de modelamiento a nivel agregado (es decir, comportamientos globales), y se proyectan las tendencias de mayor convicción y probabilidades de ocurrencia, que sirven como punto de partida para las discusiones con diferentes actores e interesados.

Elegidos los escenarios deseados, se propone determinar objetivos y diversas estrategias plausibles que se tienen que implementar para que se conviertan progresivamente en realidad. Lamentablemente, los estudios prospectivos han tenido limitada importancia en el país, los plazos de planificación son cortos, y rara vez superan los diez años, lo que no permite anticipar las necesidades de un mercado globalizado que cambia rápidamente. De ahí la relevancia de discutir en un marco de 30 años hacia el futuro (visión al 2050), e incluso, proponiendo caminos hacia el 2100. Para la base teórica, se utilizan los conceptos relacionados a la eficiencia energética, modelamiento del transporte, herramientas de prospectiva y las leyes del estudio del futuro (Voros, 2001):

- Primera Ley: El futuro no está predeterminado.
- Segunda Ley: El futuro no es predecible.
- Tercera Ley: El futuro puede ser influenciado por nuestras elecciones de hoy.

2.2 Marco Conceptual

2.2.1 Demanda de movilidad

El transporte es una demanda derivada de las necesidades de movilidad. En la Hoja de Ruta para la Movilidad en Lima al 2025 (Fundación Transitemos, 2013) se plantean 5 ejes: 1. Movilidad sostenible, segura e inclusiva. 2. Ordenamiento territorial inclusivo (personas, seguridad vial y cambio climático). 3. Fortalecimiento institucional y de gobierno. 4. Gestión ambiental. 5. Educación y fortalecimiento de capacidades.

El documento se expone en tres bloques:

- Conceptos: Espacio Público, Uso mixto del suelo, Ciudad policéntrica, Ciudad compacta.
- Metas: Ciudad de cortesía, Ciudad activa, Ciudad como Espacio Público, Ciudad Vivible, Ciudad que evoluciona
- Plazos: 2013-2014 Planificación, 2013-2018 Ciudad de cortesía, activa y como Espacio Público, 2015-2018 Ciudad vivible, 2015-2025 Ciudad que evoluciona

Entre las ideas centrales encontramos:

- Definición de la movilidad deseada y su enlace con la planificación y desarrollo urbano, para una mayor accesibilidad a los servicios urbanos y con necesidad de menores desplazamientos.
- Policentricidad y uso mixto del suelo en el desarrollo urbano.
- Autoridad Técnica Unificada para la metrópoli.
- Planes de desplazamiento de empresas, que tiene como objetivo insertar en la problemática a los empleadores y a los trabajadores, para mejorar los trayectos y aumentar la productividad.
- Pirámide estratégica y uso racional de la energía basado en RID (Reducir, Intercambiar, Descarbonizar).

2.2.2 Eficiencia energética de los vehículos a combustión interna

El transporte es el sector que domina la balanza del consumo energético del Perú (alrededor del 40% del consumo final de energía (DGEE-MINEM, 2021)), y éste es alimentado por combustibles obtenidos a partir de los recursos fósiles y de sus derivados. Recientemente, una pequeña proporción (4.3% de las importaciones de

hidrocarburos y biocombustibles, son biocombustibles propiamente dichos, (DGEE-MINEM, 2021)) proviene de los agrocombustibles que tienen a su vez, reparos por la competencia con los recursos alimentarios y según la zona geográfica, también podría estar vinculada a la deforestación.

El motor de combustión interna (MCI) tiene una baja eficiencia debido que se generan pérdidas durante los procesos de calor y expansión de gases, y a la fricción de los diferentes mecanismos. Según (Reitz, 2013) el motor de combustión sólo usa el 12% para el movimiento de las ruedas del vehículo, en términos de ACV, el transporte del petróleo desde el pozo hasta la estación de servicio requiere aproximadamente del 20% de la energía equivalente a la contenida en el combustible. Ya en el tanque de gasolina del vehículo, las pérdidas se dividen en varias fases: el típico motor de combustión interna usa el encendido por chispa (Spark Ignition) que entrega aproximadamente el 18% de esta energía a su tren de transmisión. Las pérdidas que ocurren en el motor y el escape representan alrededor del 62% de las pérdidas, y alrededor de 20% adicionales se consumen en el funcionamiento de los accesorios y en el modo de espera inactivo. La eficiencia de los motores de combustión interna puede variar según varios factores, incluido el tipo de motor, el combustible utilizado y las condiciones de funcionamiento. Cada uno de los combustibles de origen fósil tendrá un rendimiento asociado al tipo de motor, así como a factores de conducción, peso del vehículo, antigüedad, mantenimiento, entre otros aspectos.

- Motores de gasolina: Según (Albatayneh et al., 2020) los motores de gasolina suelen tener una eficiencia energética ACV que oscila entre el 11% y el 27%. En algunos estudios de laboratorio o en condiciones controladas, esta eficiencia puede ser ligeramente mayor. (Llanes-Cedeño, Carguachi-Caizatoa, y Rocha-Hoyos, 2018) describe la medición de eficiencia en un autódromo, donde se evalúa un motor de gasolina de 1.6 l de un auto que recorre a velocidades constantes de 50 kph y 90 kph, obteniendo un rendimiento energético promedio de 28%, sin embargo estas condiciones no se repiten en condiciones reales, donde el número de paradas, el tráfico, el arranque del motor, el tiempo en ralentí, pueden reducir de forma importante la eficiencia de dichos motores.
- Motores diésel: Según (Albatayneh et al., 2020) los motores diésel son generalmente más eficientes que los motores de gasolina, con eficiencias térmicas que van del 25% al 37%. Esta eficiencia es mayor en motores más grandes. Pese a su alta eficiencia, los motores Diésel han sido objeto de restricciones debido a la mayor cantidad de contaminantes atmosféricos frente a otros derivados del petróleo.
- Motores de gas natural comprimido, sea natural o licuados de petróleo (GNC):

Según (Albatayneh et al., 2020) los motores de GNC tienen eficiencias energéticas que van del 12% al 22% en condiciones reales. Esta eficiencia puede ser mayor en condiciones de laboratorio.

Estas estimaciones se basan en condiciones de laboratorio y es posible que no reflejen la eficiencia del mundo real, que puede verse afectada por factores como las condiciones de manejo, el mantenimiento y el comportamiento del conductor. Además, la eficiencia del motor puede verse afectada por el diseño específico y las condiciones de funcionamiento del motor.

2.2.3 Dependencia Energética

La dependencia energética del Perú es notable, debido a la cantidad limitada de pozos petroleros, localizados mayoritariamente en la Amazonía Peruana y que en muchos casos han sido muy cuestionados por las diferentes comunidades nativas, y también en el Norte Geográfico y el Zócalo Continental del Norte. La relativa abundancia del recurso en los mercados internacionales influye y limita las exploraciones de nuevos yacimientos que tienen altos costos de inversión inicial. La balanza comercial energética ha ido disminuyendo sensiblemente desde hacia varias décadas, según (Banco Interamericano de Desarrollo, 2012) en el período 1980-1989 la balanza comercial energética era favorable con un superávit promedio de 400 millones USD, en el período 1990-1999 se redujo y se obtuvo un déficit de 300 millones USD, en el período 2000-2005 el déficit registrado fue de 700 millones USD en promedio, en tanto que en el período 2006-2011 el déficit promedio fue de 1200 millones USD. Hacia el año 2013 la balanza comercial era negativa y alrededor de 3,000 millones USD (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2013)

Entre los años 2000 y 2013 ha crecido la importación de hidrocarburos, de una línea base de 61 mil barriles diarios de petróleo crudo (mBDC) hasta 85 mBDC, en un lapso de 13 años, es decir, una progresión del 40%; incluso con un pico de 110 mBDC en el año 2007. La mayor parte de las importaciones se concentran en el petróleo crudo que, luego alimentará a las refinerías que se encuentran instaladas en el país. Otro grupo de grandes importaciones son los productos refinados del petróleo, principalmente los combustibles para vehículos de gran tracción, como el diésel o el MGO, también se importan gasolinas. Esta condición es una de las justificaciones para la realización del proyecto Ampliación de la Refinería de Talara. La balanza comercial hidrocarburos es notoriamente negativa para el país con un saldo negativo de 1300 millones de dólares (OSINERGMIN (2014)). De acuerdo al Balance Nacional de Energía 2018 (DGEE-MINEM (2019)), la balanza comercial de hidrocarburos continúa siendo negativa, con un nivel de importaciones de 247 823

TJ, y exportando tan solo 32 241 TJ, dejando un saldo final negativo de 215 582 TJ.

2.2.4 Matriz energética

En el último siglo se ha observado crecimiento rápido del consumo energético a nivel global y, en la misma proporción un crecimiento de las emisiones de CO_2 equivalente, lo cual revela que el crecimiento energético está muy asociado al consumo de energías fósiles, que liberan moléculas de dióxido de carbono a la atmósfera, generando efectos duraderos. Tanto las emisiones como el consumo energético se han multiplicado por nueve (9) en tan sólo 50 años a nivel mundial (Gattie (2020)). Desde hace 50 años la progresión del consumo de energía primaria ha sido constante. En la década de 1960 se aceleraba el consumo del petróleo, aunque luego adquirió otra pendiente de crecimiento a partir del shock petrolero a fines de los años 1970.

En el caso del carbón, su crecimiento también ha sido constante, a partir de los años 2000 ha tenido un fuerte impulso en el crecimiento industrial de China y del Este asiático. Aunque en los últimos años este crecimiento ya ha sido limitado notablemente, en parte, por los acuerdos internacionales para limitar las emisiones de gases de efecto invernadero, y de otro lado, por la estrategia de China de posicionarse como el principal referente de las energías renovables. Sin embargo, el carbón es el recurso energético fósil más abundante en el mundo y con los menores costos de extracción, por lo que seguirá siendo un punto de referencia en las matrices energéticas de diferentes países.

En el caso del gas natural, se observa que el crecimiento ha sido constante, debido al descubrimiento de nuevas reservas, repartidas geográficamente, así como al impulso del gas de esquisto (*shale gas*) y del hidrofracturamiento, técnicas desarrolladas en los Estados Unidos, con los que se aprovecha todo el potencial de hidrocarburos de las capas geológicas.

En el caso de la energía nuclear, ha habido un impulso notable entre los años 1970 en 1990, principalmente en Europa y en el bloque soviético. Hoy en día, el desarrollo de la infraestructura se ha visto limitada por razones de seguridad (casos de fallas en los reactores nucleares en Estados Unidos, la Unión Soviética, y recientemente en el Japón) y de disposición de los residuos nucleares.

En cuanto a las energías renovables, la hidroelectricidad es la más antigua, su crecimiento ha sido constante. En el caso de las energías renovables no hidráulicas,

comienzan a tener una notoria participación a partir de los años 2000, se espera que generarán un nuevo estado de la composición de la matriz energética a escala mundial.

2.2.5 Huella de carbono y energética del transporte

Vehículos Para el análisis de ciclo de vida, se exploran todos los impactos que se producen desde la extracción de materia prima, la producción, el transporte, la comercialización, el uso, y la disposición final / reciclado. Las fases iniciales del análisis están referidas a la explotación de los metales necesarios para la fabricación de la carrocería, de las baterías y de todos los instrumentos y aditamentos. Durante la fase de operación, los efectos más notables provendrán de la utilización de los combustibles, y esto, naturalmente está asociado al tipo de motor (motor de combustión interna, motor eléctrico, a pila de combustible, híbrido, etc.). La forma de la disposición final de los vehículos puede reducir la huella ambiental de los mismos, sobre todo, si se reutilizan los diferentes elementos como parte de un proceso de economía productiva circular.

Infraestructura En las fases tempranas, la explotación de canteras tiene un gran impacto por la extracción de materia prima y la modificación de paisaje. Durante la construcción, se incrementan las emisiones de gases de efecto invernadero y de consumo de energía primaria que proviene del uso extendido del cemento y del asfalto, materiales con una importante huella ambiental. Durante la fase de operación, se considera que las renovaciones de infraestructura pueden tener una huella importante, sobre todo si se realiza la remoción completa de las carpetas estructurales. El asfalto reciclado bajo sus diferentes tecnologías puede ayudar a disminuir la huella ambiental de energía primaria y de efecto invernadero.

Análisis de Ciclo de Vida (ACV, o LCA por sus siglas en inglés) Es el análisis comparativo de los impactos ambientales de diferentes productos o servicios, dentro de un mismo sistema, tomando en cuenta todos las entradas, procesos, salidas y potenciales impactos ambientales. El sistema de análisis puede tomar en cuenta un ciclo de vida completo (por ejemplo, de la cuna a la tumba, del pozo a la rueda Wtw) o estados intermedios (por ejemplo, del pozo al tanque WtT, del tanque a la rueda Ttw). El análisis de ciclo de vida sigue reglas preestablecidas en diferentes documentos académicos, uno de ellos es la norma ISO 14040. Para el análisis del ciclo de vida, se definen las siguientes fases: 1. Definición de objetivos y alcances. 2. Análisis de inventario. 3. Evaluación de impactos. 4. Interpretación. El análisis de ciclo de vida se utiliza con diferentes propósitos, por ejemplo, el desarrollo y mejora de productos, planeamiento estratégico, políticas públicas, publicidad de marcas,

entre otros.

2.2.6 Estructuración de las matrices Origen – Destino (O-D)

La investigación parte por el modelamiento agregado (simplificado) de las condiciones de movilidad en las ciudades peruanas, que permitan evaluar los patrones de consumo energético del parque automotor. La dificultad para realizar la investigación radica en la agregación de los comportamientos de viajes en modelos que representen la realidad. Debido a la complejidad de todos los entornos urbanos en el Perú, se trabajan modelos de matrices Origen-Destino que pueda abstraer los grandes patrones de desplazamiento. Los resultados de las matrices permiten estudiar los diferentes escenarios futuros, basados en las hipótesis de variación tendencial (en inglés, Business as usual, Bau), y en otros tipos de escenarios basados en el cumplimiento de nuevas políticas (escenarios optimistas), en la dificultad de emplear nuevas políticas o ralentización de la economía (escenarios pesimistas).

2.2.7 Distribución modal de los viajes en entornos urbanos

En base a los movimientos agregados a nivel urbano, también se pueden hacer calibraciones de desplazamientos globales, lo cual permitirá estimar la composición de la matriz energética del transporte. Esto se calibra con los datos de consumos de combustibles publicados por la Dirección General de Eficiencia Energética del MINEM.

2.2.8 Longitud de redes, capacidad vial y nivel de servicio

La calidad de servicio de las diferentes infraestructuras y servicios de transporte propiamente dichos requieren medidas cuantitativas para caracterizar las condiciones operacionales (Transportation Research Board, 2000). El Nivel de Servicio (NdS, o LOS, Level of Service) es una medida que describe las condiciones operacionales del flujo representadas por la velocidad, el tiempo de recorrido, libertad para maniobrar, interrupciones en el tráfico, confort y la idoneidad de la operación, formación de colas, entre otros. Normalmente se reconocen seis (06) niveles de servicio, siendo la categoría A como el mejor nivel de servicio, y la categoría F el peor nivel de servicio. Pese a que HCM 2000 (Transportation Research Board) no considera a la seguridad como indicador, es evidente que las condiciones de la infraestructura de transporte que puedan provocar accidentes debe considerarse como una disminución del nivel de servicio. En todos los casos, el usuario tiene una influencia importante en la determinación cuantitativa del nivel de servicio, porque se trata de una representación indirecta de su grado de confort.

Nivel de Servicio en Avenidas y Vías Urbanas Está asociado principalmente a los flujos vehiculares (intensidad y velocidad) que cruzan en una sección determinada, y que está afectada por diferentes factores, como la composición vehicular, la geometría de la vía, el entorno, entre otros. El tráfico o flujo en una vía urbana forma parte de la asignación de rutas dentro de los modelos de planeamiento de sistemas de transporte; la resultante del tráfico tendrá otras variables como la gestión del tráfico y el uso de las vías según las reglas de tránsito.

El nivel de servicio de una vía urbana mide se correlaciona con la congestión, es decir, con el tiempo que uno pasa en la vía, y esto está relacionado con la velocidad media. Cuando la avenida se encuentra desierta, se dice que el conductor se encuentra en una condición de flujo libre, y las restricciones a su movimiento sólo está delimitada por las reglas de tránsito. Conforme se agregan los vehículos al flujo, aumenta la fricción entre ellos y la velocidad va disminuyendo, y el número de vehículos se va incrementando en una variación decreciente no lineal, hasta llegar a la máxima capacidad de la vía. Superada la máxima capacidad, se forma la congestión y la velocidad se reduce rápidamente y la vía va reduciendo su capacidad de flujo de forma progresiva. Las condiciones de congestión propician el consumo de combustible sin desplazamiento, principalmente en los vehículos a combustión interna, en tanto que los vehículos eléctricos no tienen esta afectación.

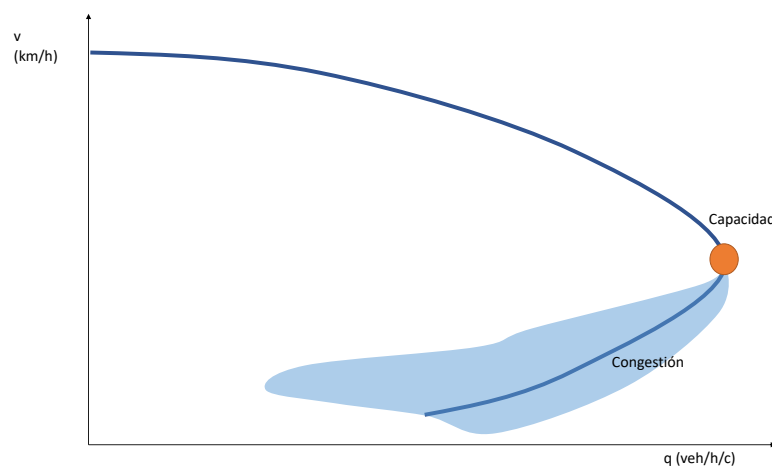


FIGURA N° 2.2: Correlación entre la velocidad media y flujo de una vía urbana

Nota: La velocidad se reduce de forma no lineal al incrementarse el flujo en la avenida. Una vez alcanzada la máxima capacidad, cualquier intento de incrementar el flujo iniciará el fenómeno de congestión

El comportamiento en condiciones de flujo libre y hasta alcanzar la máxima ca-

pacidad, tiene un comportamiento regularmente predecible, en tanto que una vez formada la congestión, la capacidad se reduce rápidamente y de forma impredecible. La formación de colas también evidencia la saturación, debido a que se generan tiempos de espera adicionales al tiempo propio del recorrido. Las colas tienen dos elementos principales, la llegada y la atención. En los sistemas viales, la llegada aleatoria es significativamente más intensa durante las horas pico, la atención se define como el tiempo de tránsito para el recorrido de una longitud o elemento preestablecido, para lo cual, se deben definir los límites del sistema de análisis. Los elementos de análisis son entonces:

- Llegada: Número de vehículos que llegan y tiempo de llegada entre vehículos.
- Atención: Número de vehículos que salen del sistema (atendidos) y tiempo de salida entre vehículos.
- Luego del estudio de ambas variables, se puede determinar el tiempo de atención promedio de la cola, así como el número de vehículos en cola.

De acuerdo a mediciones realizadas en las Av. Javier Prado, se pudo medir la máxima capacidad horaria de vías de alta capacidad (Flores González, Leonardo and Santa María Dávila, Edward and Valero Camarena, Yeltsin Luis and Montenegro Sono, Walter Jesús, 2018), a partir de las cuales se describe que la congestión reduce sensiblemente la capacidad de las vías (en promedio 60% de su máxima capacidad), y que la velocidad se reduce durante los horarios en congestión (en promedio, 40% de la velocidad en flujo libre).

Horario	Máx. Capacidad	Intensidad del flujo	Capacidad en Congestión	Reducción velocidad
7:00 h - 22:00 h	Jornada: 800 - 2000 veh/h/carril	60 % (Congestión)	40 % (8:00 h congestión vs 5:00 h, flujo libre)	

TABLA N° 2.2: Descripción de la Capacidad Vehicular de la Av. Javier Prado durante jornada regular

Esta constatación supone una pérdida importante de energía en las vías, y en los vehículos privados y en los buses de transporte público que circulan por esa arteria. Una situación similar se observa en otros ejes principales en la ciudad de Lima, por lo que el planeamiento de un sistema de transporte público eficiente debe buscar elevar ambos indicadores mediante carriles exclusivos y control de intersecciones.

Nivel de Servicio de Transporte Público El nivel de servicio (Level of Service, LOS) es un concepto introducido por diferentes normativas relativas al comportamiento del tráfico y de las condiciones de desempeño de los sistemas de transporte, entre otros,

el HCM (Highway Capacity Manual) (Transportation Research Board, 2000). De acuerdo a esta referencia, el Nivel de Servicio se define como una medida de calidad que describe las condiciones operacionales dentro de un flujo de tráfico, y que se mide bajo diferentes indicadores, como la velocidad y el tiempo de transporte, la libertad para maniobrar, las interrupciones de tráfico, la capacidad de transporte, el confort y la conveniencia del sistema de transporte Transportation Research Board (2000). Cada nivel de servicio representa un rango de condiciones operativas que están relacionadas con la percepción del conductor o del usuario del sistema de transporte. Debido a la longitud y a la interacción con el espacio urbano, es necesario que la infraestructura de transporte esté georreferenciada para la identificación de los activos críticos, desde el punto de vista de seguridad, operacional, mantenimiento preventivo, conectividad, cumplimiento de requisitos normativos, entre otros. La capacidad de transporte está asociada a diferentes factores, entre otros:

- Vehículos, capacidad por superficie, que se expresa en número de pasajeros por metro cuadrado.
- Vehículos, número de asientos y reservas para movilidad reducida.
- Velocidad comercial. Número de paradas. Frecuencia de operación.
- Seguridad durante el trayecto. Comodidad durante el viaje.

El Nivel de Servicio tiende a degradarse con el tiempo, debido a que la capacidad de transporte es un valor constante (bajo ciertas características de operación), por lo que, al crecer la demanda, la capacidad tenderá a saturarse.

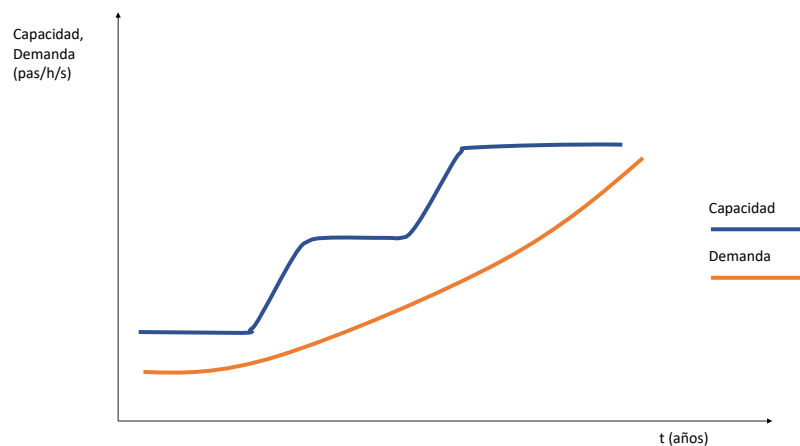


FIGURA N° 2.3: Capacidad del sistema e incremento progresivo de vehículos y material rodante, y proyección de la demanda

Nota: Si no se considera la ampliación de la capacidad en función del crecimiento

de la demanda, el sistema llegará rápidamente a la saturación y se generará un bajo nivel de servicio y una demanda insatisfecha

Nivel de Servicio en Estaciones de Transporte Público Las estaciones de transporte público pueden ser divididos en Paraderos y Estaciones propiamente dichas. El servicio de una estación está vinculado al servicio de buses, y también a la conectividad con la malla urbana que puede ofrecer esta infraestructura, que sirve como un nodo de intercambio modal. El Nivel de Servicio de este tipo de infraestructura está asociado a la accesibilidad de la estación, al nivel de seguridad, al confort, a la capacidad de atención de pasajeros, a la frecuencia de espera de buses, a la confiabilidad, a la tarificación, entre otros aspectos.

2.2.9 Composición vehicular del parque automotor

Se pueden distinguir como modos suaves (aquellos que sólo requieren del impulso del conductor, como la bicicleta o la patineta), y los que llevan motorización. El Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú (MTC) ha propuesto una clasificación para los vehículos motorizados, a los que se añaden los sistemas de transporte guiados por rieles (trenes):

Suaves	Ligeros	Transporte	Carga	Rieles
Patineta	L1, motocicleta	M1, autos	N1, Camioneta	Tranvía
Bicicleta	L2, trimoto	M1, SUV	N2, Rígido	Tren ligero (metro)
	L3, motocicleta	M2, Van	N3, Articulado	Tren pesado (metro)
	L4, trimoto	M2, Combi		
	L5, trimoto	M3, Microbús		
		M3, Bus		
		M3, Bus articulado		

TABLA N° 2.3: Tipología Vehicular del Parque Automotor

El consumo energético está vinculado al peso de los vehículos, a la carga transportada, al tipo de combustible, y sobre todo, al tipo de conducción (paradas, aceleraciones, velocidad de trayecto). A continuación se presenta un resumen referencial de las tipologías vehiculares y su respectivo consumo y rendimiento energético:

Descripción	Unidad	Auto gasolina	Auto eléctrico	Moto Gasolina	Patineta	Bicicleta eléctrica	Moto eléctrica 1	Moto eléctrica 2	Moto eléctrica b-plomo
Precio adquisición	USD	20,000	23,000	1,500	290	440	660	2,200	1,200
Peso	kg	1,200	2,068	125	13	18	155	86	232
Energía embarcada	kWh	337.9	40.0	151.2	0.2	0.5	1.8	4.0	3.0
Vector energético	Combustible	Gasolina	Electricidad	Gasolina	Batería	Batería	Batería	Batería	Bat. Plomo
Potencia	W	85,318	108,119	8,501	300	350	500	1,900	1,200
Autonom. recorrido	km	450.0	239.7	626.3	25.0	40.0	62.5	104.5	65.0
Rendimiento	km/kWh	1.3	6.0	4.1	133.7	80.0	35.7	26.1	21.7
Velocidad	km/h	120.0	120.0	100.0	25.0	24.0	40.0	80.0	50.0
Consumo (1 pas)	Wh/km	751.0	166.8	241.4	7.5	12.5	28.0	38.3	46.2
Consumo (2 pas)	Wh/km	375.5	83.4	120.7	7.5	12.5	14.0	19.1	23.1
Consumo (4 pas)	Wh/km	187.7	41.7	120.7	7.5	12.5	14.0	19.1	23.1
Precio / autonomía	USD/km	44.4	95.9	2.4	11.6	11.0	10.6	21.1	18.5
Precio / Potencia	USD/W	0.2	0.2	0.2	1.0	1.3	1.3	1.2	1.0

TABLA N° 2.4: Características de vehículos, según consumo y tipo de energía

Los datos se han tomado de páginas web de los productos. En el caso de las motocicletas, se han consultado las hojas técnicas de la motocicleta a gasolina Mavila, de las motocicletas eléctricas JCH, YADEA T9 y SUPERSOCO.

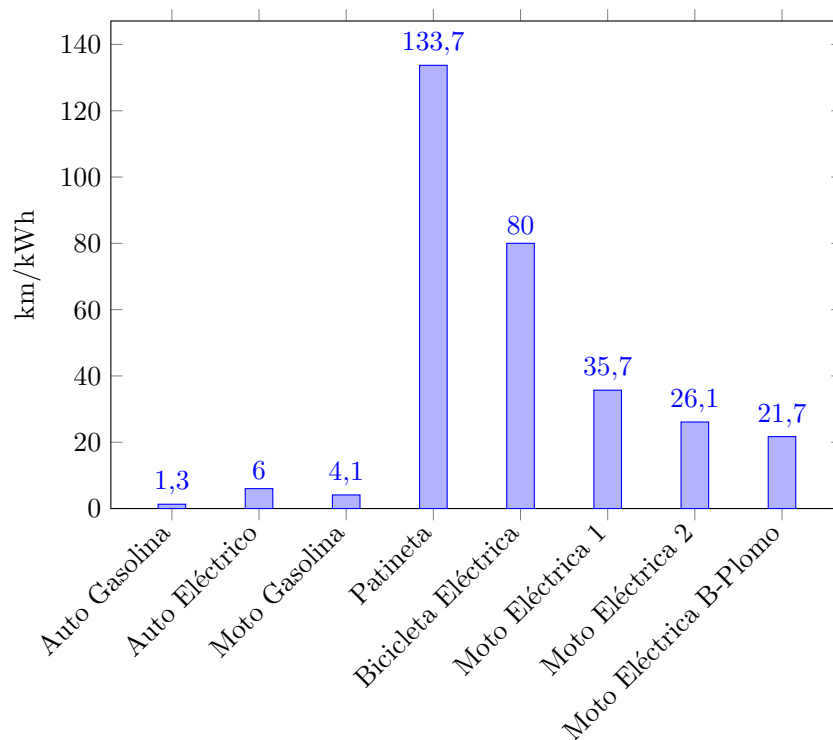


FIGURA N° 2.4: Rendimiento energético (km/kWh) por tipo de vehículo

2.2.10 Consumo energético asociado a cada tipo de desplazamiento

Los desplazamientos de vehículos deben vencer diversos tipos de resistencia, que se pueden expresar como sigue:

- Resistencia a la fricción: relacionada con la superficie de rodadura y la velocidad del desplazamiento.
- Resistencia del aire: relacionada con la dirección del movimiento, el área de contacto, y la velocidad del desplazamiento.
- Frenado: relacionado con la velocidad de desplazamiento y la distancia de frenado. En los vehículos eléctricos se puede contar con un motor de regeneración de frenado, que aprovecha esta magnitud para crear una reserva de impulsión, que servirá para mover nuevamente el vehículo.

El consumo energético total se puede inferir a partir de la referencia de consumo que cada vehículo propone en sus especificaciones técnicas. Se presentan a continuación las comparaciones de diferentes tipos de consumo de energía según distancia recorrida (Wh/km) y según diferentes capacidades de transporte, para el presente caso, entre 1 y 4 pasajeros.

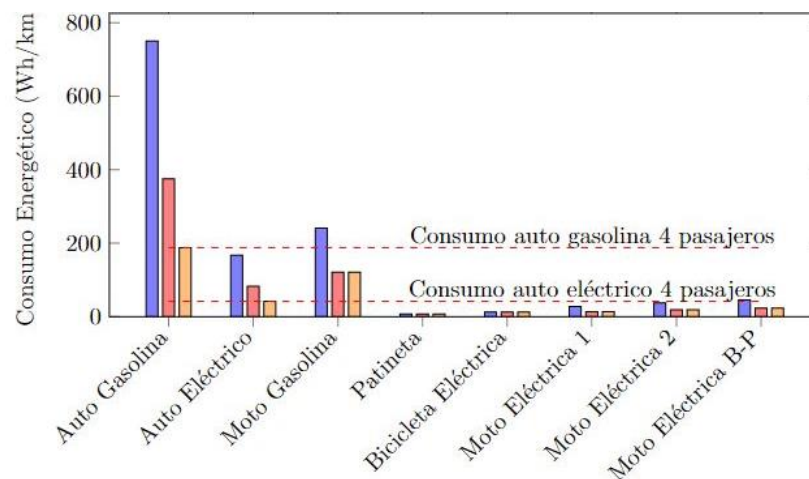


FIGURA N° 2.5: Consumo Energético por Tipo de Vehículo y Numero de Pasajeros

En la imagen se observa que el mayor consumo de transporte individual es el auto a gasolina (cercano a 800 Wh/km), sin embargo, si el auto a gasolina transporta a plena capacidad (4 personas), equivale al auto eléctrico con 1 pasajero y de menor consumo que la moto a gasolina con 1 pasajero. En el caso del auto eléctrico que transporta a plena capacidad (4 pasajeros), su consumo energético es mucho mejor que el de la motocicleta a gasolina, y equivalente a motos eléctricas con un solo pasajero. De otro lado, una de las principales barreras para la compra de vehículos eléctricos es el precio inicial. En el siguiente gráfico se compara el precio de compra vs la potencia del motor del vehículo, donde destaca que el auto eléctrico, el auto y la moto a gasolina, tienen un precio equivalente por potencia, en tanto que las motos eléctricas y patineta tienen un precio 5 veces mayor en relación con la potencia del

vehículo, tal como se observa en la figura 2.6:

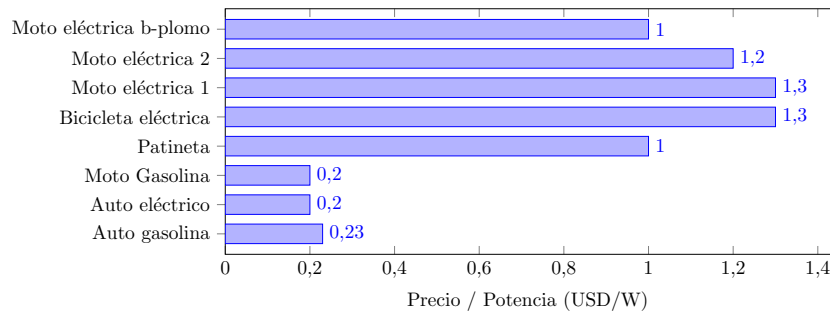


FIGURA N° 2.6: Precio de Compra vs Potencia del Vehículo (USD/W)

2.2.11 Externalidades del transporte

2.2.12 Políticas Energéticas y Prospectiva en el escenario peruano

La matriz energética del Perú está fuertemente influenciada por los recursos fósiles, con el descubrimiento y explotación de las reservas de Camisea a partir del 2004, se pretende pasar de la dependencia energética del petróleo y de sus derivados hacia un desarrollo de la industria del gas natural, aprovechando la suficiencia del recurso, y aunque su huella de gases de efecto invernadero puede ser ligeramente menor, su impacto como pérdidas de metano puede ser mucho más importante en el Efecto Invernadero. De otro lado, el gas natural cuenta con menores emisiones de polución atmosférica. Dentro de los documentos de planeamiento estratégico en las diferentes entidades ministeriales peruanas, el crecimiento energético reposa sobre la explotación del gas natural, no se ha declarado desarrollar de manera importante los recursos renovables como la energía solar y eólica.

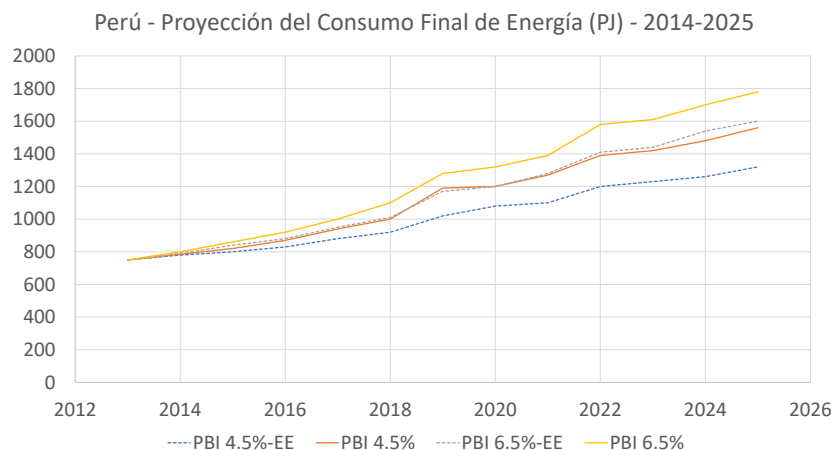


FIGURA N° 2.7: Proyección del Consumo Final de Energía del Perú, Período 2014 – 2025. Ministerio de Energía y Minas del Perú (2013)

De acuerdo a las proyecciones realizadas por el ente rector (Ministerio de Energía y Minas, 2013) se prevé una evolución del consumo final de energía entre los años 2013 y 2025, pasando de un consumo de aproximadamente 750 PJ, hasta escenarios que varían cerca al doble.

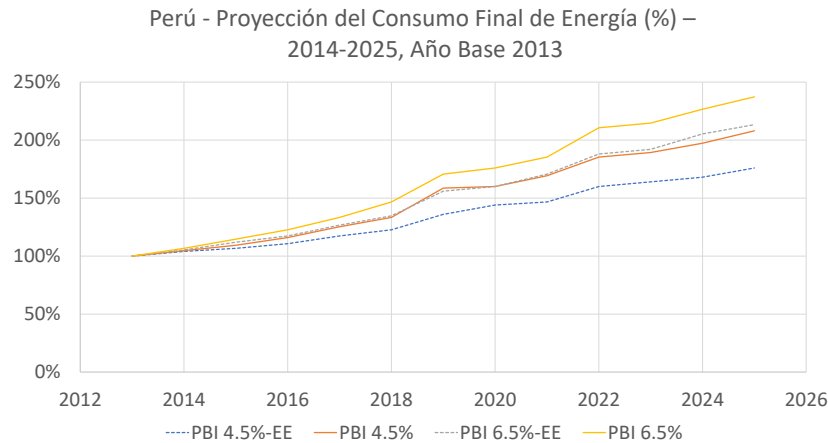


FIGURA N° 2.8: Proyección del Consumo Final de Energía del Perú, Período 2014 – 2025. Ministerio de Energía y Minas del Perú (2013)

De acuerdo con la composición prevista por el MINEM, en el año 2025, el escenario pesimista prevé un incremento del 190% del consumo energético, y en un escenario optimista, 240% con respecto al año base, 2013.

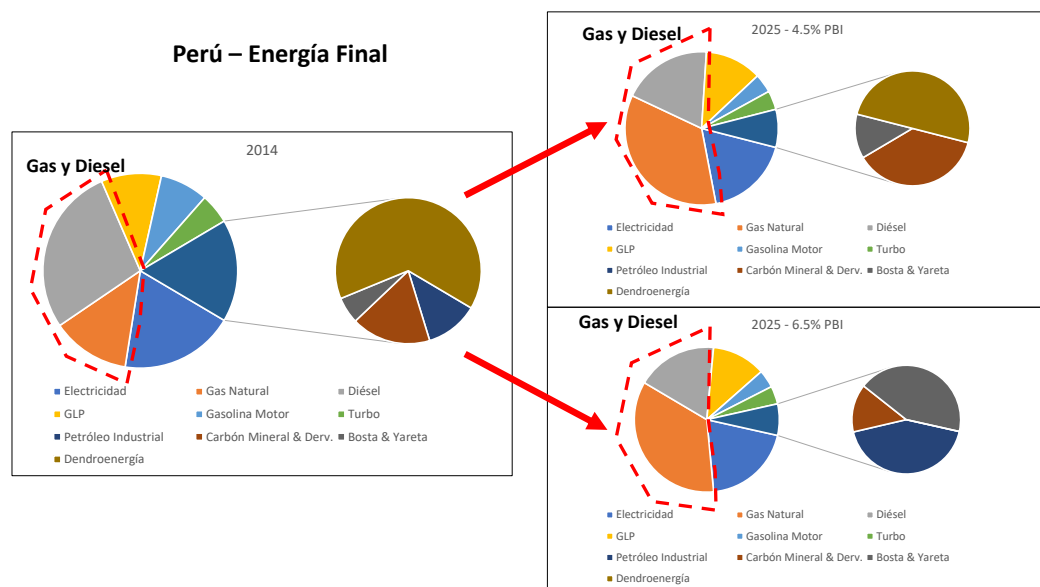


FIGURA N° 2.9: Cambio de la composición energética del Perú, entre el 2013 y el 2025. Ministerio de Energía y Minas del Perú (2013)

La composición de la matriz energética del Gas, el Diésel y los derivados de combustibles fósiles varían de 69% en el 2013 hasta una composición de 77% en el escenario 2025 con un crecimiento de 4.5%, y el mismo porcentaje en el caso del crecimiento de 6.5%. Es decir, en el Perú se proyecta realizar una transición en el entorno de Petróleo hacia el Gas, desde una matriz de composición fósil hacia una matriz con mayor contenido energético fósil para el 2025, reduciendo la participación de la electricidad en el mix energético final. En este documento, no se observa ningún proceso de transición hacia energías de bajas emisiones de carbono, al menos no en las proyecciones de escenarios futuros.

2.3 Variables e Indicadores

2.3.1 Variables

- Demanda agregada de movilidad de las principales ciudades, descrita en matrices orígenes – destino.
- Partición modal, agregada, clasificada por ciudades. Parque automotor, agregado, clasificada por ciudades y por antigüedad.
- Demanda de energía. Costo de la energía, según tipo de recurso y según eficiencia de la tecnología.
- Costos del transporte, tarificación y las externalidades traducidas como costos sociales y ambientales. En cuanto a los costos sociales, se refiere al estudio del Valor Social del Tiempo (VST), existen otros costos como, la accidentabilidad, la polución atmosférica, entre otros.
- Huella de carbono y energética del transporte terrestre urbano.
- Sistema de Transporte Público y Transporte Público Masivo. Cadenas logísticas y Sistema de Transporte de Carga.
- Infraestructura de Transporte e Infraestructura de Abastecimiento y Recarga.

2.3.2 Indicadores

- Población urbana. PBI per cápita, nacional y por ciudades. Precios de recursos energéticos del transporte.
- Contenido energético por peso, volumen, disponibles en el mercado. Consumo energético según tipos de vehículos, vinculado al parque automotor.
- Emisiones atmosféricas (GEI y contaminantes).
- Participación modal.

2.4 Marco Metodológico

2.4.1 Unidad de análisis

Para conseguir el objetivo general se estudia el inventario energético del transporte terrestre según partición modal. El inventario desarrollado constará de modelos agregados, y las proyecciones de crecimiento de las diferentes variables. El análisis muestral tomará el estado del parque automotor en Lima, y en algunas ciudades principales del país. Los análisis que se plantean serán realizados a nivel agregado, es decir, sin hacer grandes distinciones entre los grupos poblacionales ni los otros factores sociales, económicos o políticos, sino que se trabajarán como parámetros agrupados para poder evaluar las respectivas tendencias. Estos análisis se basan en hipótesis de análisis que se justificarán a partir de algunos análisis desagregados o de referencias bibliográficas. Se presenta la secuencia de trabajo:

- Sustento de la base estadística de la matriz energética del transporte (individual, público, carga) según partición modal: Se realizarán muestreos aleatorios para confirmar la asignación porcentual.
- Estudio e inventario energético de la infraestructura de transporte, estimación en las fases de construcción y estimación.
- Estudio de la Oferta de la Energía Fósil: Productores (Tarificación e impacto en el modelo económico del transporte) y Oferta del Mercado de Energía Eléctrica.
- Estudio de la Demanda de la Energía: Según modos de transporte, y del consumo energético del transporte. Los estudios se realizan mediante encuestas y modelos agregados. Se pretende utilizar bases de datos abiertas de tráfico para generar información modelada de consumo de combustible.
- Identificación de factores críticos: Tecnológicos, de Infraestructura, Socioculturales, Económicos (externalidades, tarifa, equilibrio económico-financiero).
- Evaluación de Propuestas de Mecanismos de control económico y estrategias para la descarbonización de la matriz energética y la migración hacia una matriz mayoritariamente eléctrica.
- Modelo prospectivo de la transición energética del sector Transporte.
- Presentación de instrumentos de políticas públicas para el desarrollo de energías renovables en el transporte y la transición energética, entre ellas, regulatorias, financieras, de estandarización e informativas.

2.4.2 Tipo y nivel de investigación

La investigación se enmarca en un carácter exploratorio, descriptivo y explicativo, utilizando técnicas de estudio de escenarios para la planificación de la transición energética del transporte. Se enmarca en las siguientes líneas de investigación: Energías Renovables, Eficiencia Energética, Desarrollo Sostenible y Electromovilidad.

2.4.3 Período de Análisis

El análisis contiene las siguientes fases temporales: 1. Análisis histórico, siglo XX, 2000 – 2015. 2. Análisis contemporáneo: 2015 – 2020. 3. Análisis de tendencia de corto plazo: 2020-2025 (incluye el período de la tesis, 2020 – 2023). 4. Prospectiva 2025 – 2050.

2.4.4 Fuentes de información e instrumentos utilizados

Las fuentes primarias son:

- Encuestas directas, diseñadas en pequeños grupos y con grados de confiabilidad entre 85 y 90 %, debido a su naturaleza exploratoria.
- Toma de datos en campo, para identificación de parque automotor, vía videos y conteo.
- Adquisición automatizada de datos a través de sensores: GPS, acelerómetros y giroscopios. Algunas mediciones de comprobación serán tomadas con celulares vía el aplicativo Andro Sensor.
- Talleres de prospectiva. Entrevistas con diferentes actores del sector transporte, electromovilidad y el sector energético.

Las fuentes secundarias:

- Tesis doctorales y artículos de investigación.
- Estudios de Movilidad y de Planeamiento Urbano Sostenible (PMUS), Plan Maestro de Lima y Callao, Políticas y documentos de Planeamiento, entre otros documentos oficiales.

Los instrumentos:

- Encuestas diseñadas y calibradas, complementando con modelación agregada de movilidad.
- Tratamiento estadístico con programas o funciones especializadas.
- Procesamiento prospectivo.

2.4.5 Técnicas de recolección y procesamiento de datos

- Diagnóstico de factores económicos de Oferta y Demanda relacionados a la matriz energética: Revisar la importancia económica del tipo de combustible según el parque automotor (considerar transporte particular, transporte público, transporte de carga, servicios terrestres, aéreos, fluviales y marítimos). Proyectar el tamaño del mercado, los principales agentes (compradores y vendedores), los mecanismos económicos, entre otros. Propuestas de Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) aplicados al transporte: Basados en el Protocolo de Kyoto, proponer MDL y acciones en el Mercado Voluntario. Propuestas de incentivos para la disminución del consumo de energía de fuente fósil: Basados en las Políticas de Desarrollo Energético y Ambiental proponer políticas complementarias para descarbonizar la matriz energética del sector Transporte e incremento de la Capacidad del Sistema Eléctrico.
- Propuestas de incentivos para el incremento del parque automotor de vehículos eléctricos y Propuestas de desarrollo de alternativas energéticas con matriz de energía primaria renovable.
- Plan de desarrollo de la matriz eléctrica en el sector Transporte, que incluyen lineamientos que garanticen el desarrollo sostenible.

CAPÍTULO III: DIAGNÓSTICO

En este capítulo se presentan los aspectos desarrollados durante la investigación, con el propósito de obtener una línea base del estado actual del transporte terrestre urbano y sus factores relacionados con el uso de los recursos energéticos (casi exclusivamente de origen fósil).

3.1 Modelamiento agregado de población y demanda

La población es la base de la demanda de movilidad. Durante una jornada, las personas requieren desplazamientos para cubrir necesidades básicas. Algunos de estos desplazamientos pueden realizarse a muy corta distancia (inferior a 100 m) si se cuentan con todos los servicios básicos en este radio; sin embargo, en una situación real, estos servicios se encuentran en un rango mayor y ubicados dentro de toda el área urbana. Algunas ciudades tienen centros concentrados de alta especialización para estos servicios básicos (alimentación, educación, salud, comercio, entretenimiento), y esto genera grandes flujos de movimientos. Una mejor distribución y mezcla uniforme de servicios en toda el área urbana podría cumplir el criterio de reducir los desplazamientos y mejorar la accesibilidad de las personas. El movimiento de las personas constituye la base de la Demanda de Servicios de Transporte y de Movilidad.

3.1.1 Evolución de la población urbana

A nivel global, se ha observado una tendencia al estancamiento del crecimiento poblacional, sobre todo en los países industrializados o en aquellos que iniciaron políticas agresivas para el control de natalidad y que hoy en día sufren descensos en su población, como el caso de China que en el 2022 tuvo una contracción poblacional, siguiendo la tendencia de países como Japón o algunos países europeos. En el Perú se han observado cambios en la composición poblacional en las últimas décadas, que tienen marcadas tendencias desde 1940 en cuanto a:

- Tasa de natalidad y expectativa de vida en ascenso, las cuales tienen diferentes tendencias por décadas. Crecimiento poblacional con tasas significativas en la segunda mitad del siglo XX y ralentizado en el siglo XXI, incluso con tasas de decrecimiento en regiones geográficas.
- En las últimas décadas, se observa una concentración progresiva de la población en las ciudades costeras, y en el otro sentido, un marcado decrecimiento en los Andes.
- En los últimos años, existe un crecimiento importante de la población en las

ciudades de la Selva, probablemente debido al incremento de infraestructura vial (como las Carreteras Interoceánicas) y del desarrollo de nuevas actividades económicas en estas regiones, incluso actividades informales o proscritas, como el narcotráfico y la minería informal.

Estas tendencias pueden progresar de forma diferente por factores diversos, como la migración interna y externa, la evolución de la riqueza, los cambios tecnológicos, los cambios geopolíticos, el cambio climático, etc. El trazo de las diferentes variables permite plantear los escenarios probables. Desde los años 40 del siglo XX se vio una aceleración del crecimiento poblacional, debido al inicio de la urbanización y a un proceso de mejoras de las condiciones de salud, lo cual tuvo un gran impacto en el incremento de las tasas de fecundidad y de reducción de la mortalidad. Entre los años 40 y 60 se crecía a un ritmo interanual medio de 1.9%, en tanto que en la década de 1960 se llegó a una tasa de crecimiento interanual máxima de 2.8%, a partir de la cual, se ha ido reduciendo hasta una media de 1% en la década entre el 2007 y el 2017, a partir de información disponible en INEI (INEI, Instituto Nacional de Estadística e Informática, 2018). Si la tendencia continúa, en las siguientes décadas se debería observar un menor crecimiento, e incluso, es probable que exista un proceso de disminución de la población. El fenómeno no es extraño en el mundo, y responde a los cambios sociales, culturales, tecnológicos, económicos, entre otros, producto de la globalización. En algunos países industrializados se observa una dramática caída de la tasa de natalidad. A partir de esta situación, es probable que en las próximas 3 décadas se pueda observar un crecimiento de la natalidad inferior a 1%, e incluso, tasas negativas que conlleven al decrecimiento de la población.

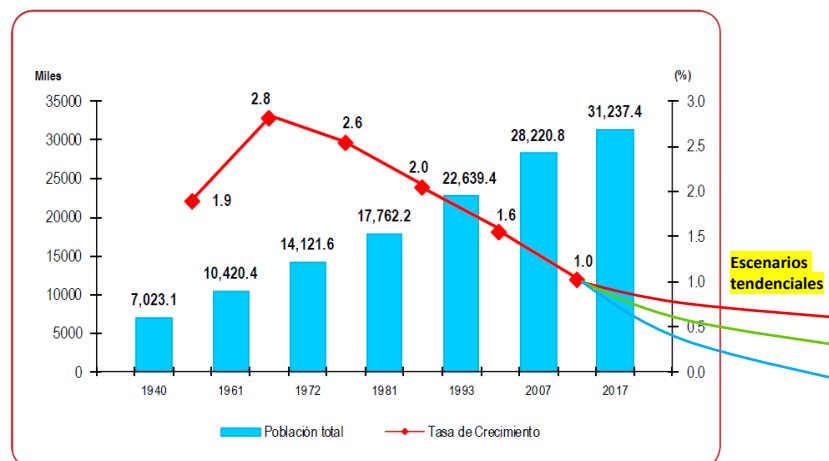


FIGURA N° 3.1: Población Total y Tasas de Crecimiento Interanual, composición gráfica basada en INEI, Instituto Nacional de Estadística e Informática (2018)

Además de los cambios poblacionales intergeneracionales, se aprecian cambios im-

portantes en la composición geográfica de la población, se observa una concentración progresiva en la zona costera (tendencia desde 28 % (1940) hacia una composición cercana al 60 % actualmente), una reducción de la población en los Andes (tendencia varía de 65 % (1940) hacia el 25 % en los años recientes), y una duplicación de la población en la Selva (tendencia hacia el 15 % en los próximos años). Esta situación tiene un gran impacto sobre las ciudades costeras, siendo los principales puntos de concentración urbana, en particular, las áreas metropolitanas de Lima y Callao, Trujillo, Chiclayo, Piura, Chimbote e Ica. Otras ciudades con gran crecimiento demográfico a causa de un proceso de migración rural a las ciudades son Arequipa, Cusco, Huancayo, Pucallpa.

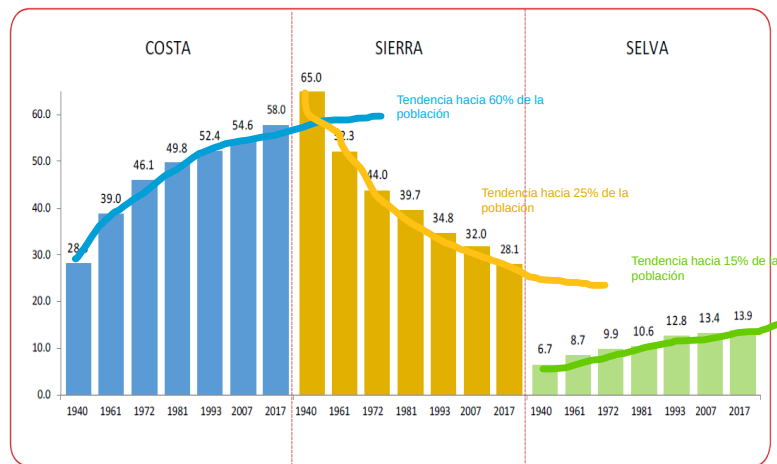


FIGURA N° 3.2: Tendencias de la distribución poblacional por regiones, composición gráfica basada en INEI, Instituto Nacional de Estadística e Informática (2018)

Cuando se observan las tasas interanuales por regiones, se identifica que existe una tendencia similar a la reducción del crecimiento, e incluso, al decrecimiento poblacional en la zona andina. Este fenómeno podría explicarse por la baja general de la tasa de natalidad y la migración interna en el país, desde los Andes hacia las regiones costeras y hacia las Amazonía peruana. La región Costa ha crecido a tasas superiores a 3 % entre 1940 y 1980, en tanto que la región Sierra ha mantenido un crecimiento alrededor de 1 % todo el siglo XX, y en la última década una contracción de -0.6 %. La tasa de crecimiento en la Selva se ha mantenido por niveles superiores a 3 % hasta la década del 90, lo cual podría generar una presión poblacional importante sobre los territorios de la Amazonía, y fortalecer las economías productivas ligadas a la tala ilegal, la minería informal del oro y el narcotráfico.

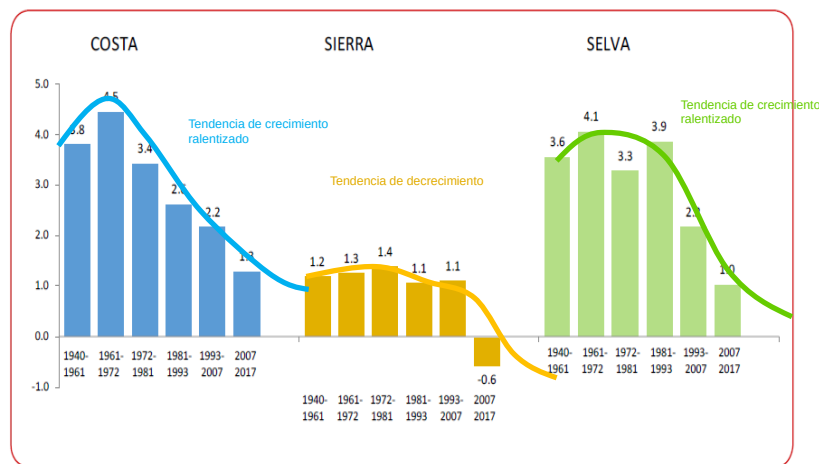


FIGURA N° 3.3: Tendencias del crecimiento poblacional por regiones, composición gráfica basada en INEI, Instituto Nacional de Estadística e Informática (2018)

De acuerdo con el Sistema Nacional de Centros Poblados (SINCEP) (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento - VIVIENDA, 2016) los centros poblados tienen nueve rangos urbanos y dos categorías adicionales (pueblo y caserío). La clasificación utilizada en esta investigación se concentra en los cuatro primeros rangos:

1. Primer Rango: Metrópoli Nacional, equivalente al Área Metropolitana de Lima y Callao, que es la aglomeración peruana más poblada.
2. Segundo Rango: Metrópolis Regionales, ciudades con poblaciones superiores a 400 mil habitantes, y que se conforman como áreas urbanas dentro de macrosistemas, Macrosistema Norte (Piura, Chiclayo, Trujillo, Iquitos), Macrosistema Centro (Huancayo y Pucallpa), Macrosistema Centro Sur (Cusco), Macrosistema Sur (Arequipa).
3. Tercer rango (mayores a 250 mil habitantes): Chiclayo, Ica, Tacna, Juliaca y Ayacucho.
4. Cuarto rango (mayores a 100 mil habitantes): Cajamarca, Huánuco, Sullana, Chinchá Alta, Huacho, Tarapoto, Puno, Huaraz, Paita, Puerto Maldonado, Tumbes, Talara.

Se presenta a continuación las tendencias de crecimiento de las regiones peruanas en función de las estadísticas de los diferentes censos llevados a cabo por el INEI durante varias décadas:

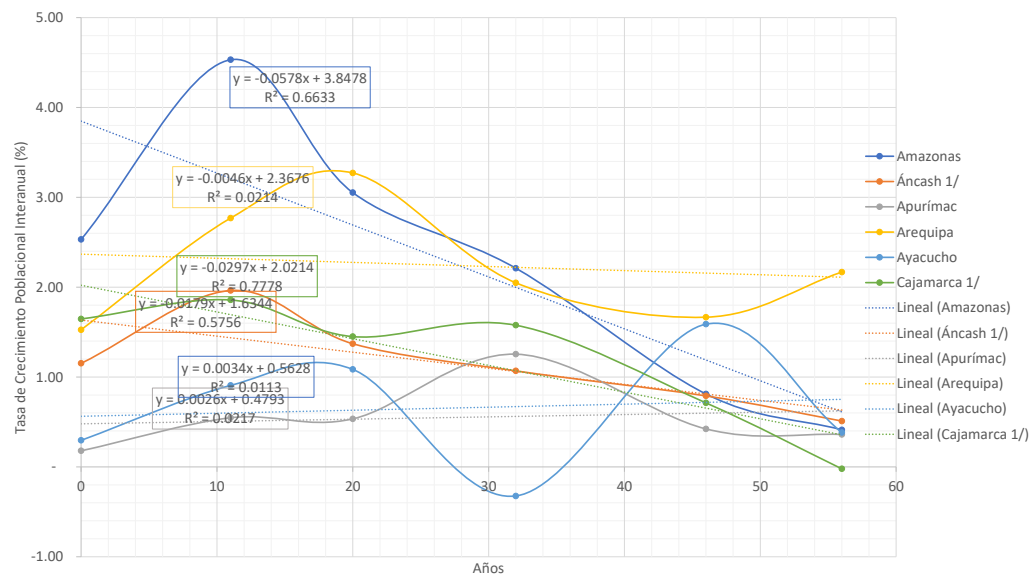


FIGURA N° 3.4: Crecimiento poblacional (%) Amazonas a Cajamarca, año base 1961

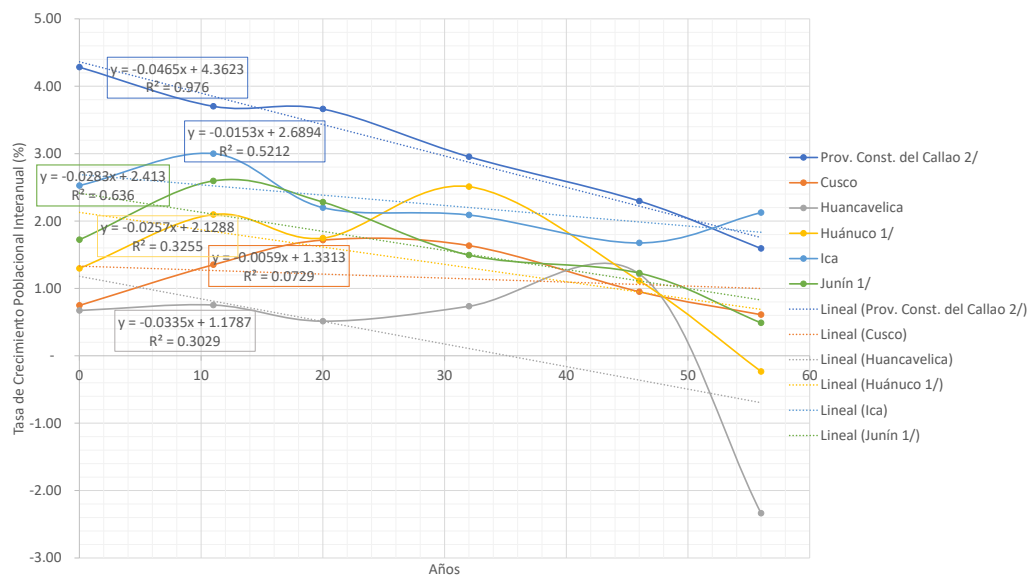


FIGURA N° 3.5: Crecimiento poblacional (%) Callao a Junín

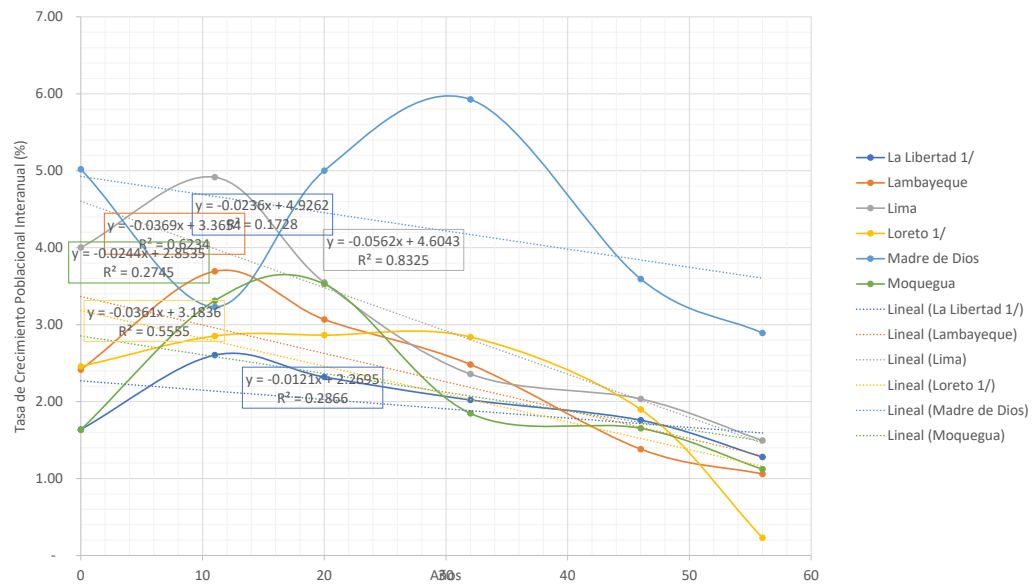


FIGURA N° 3.6: Crecimiento poblacional (%) La Libertad a Moquegua

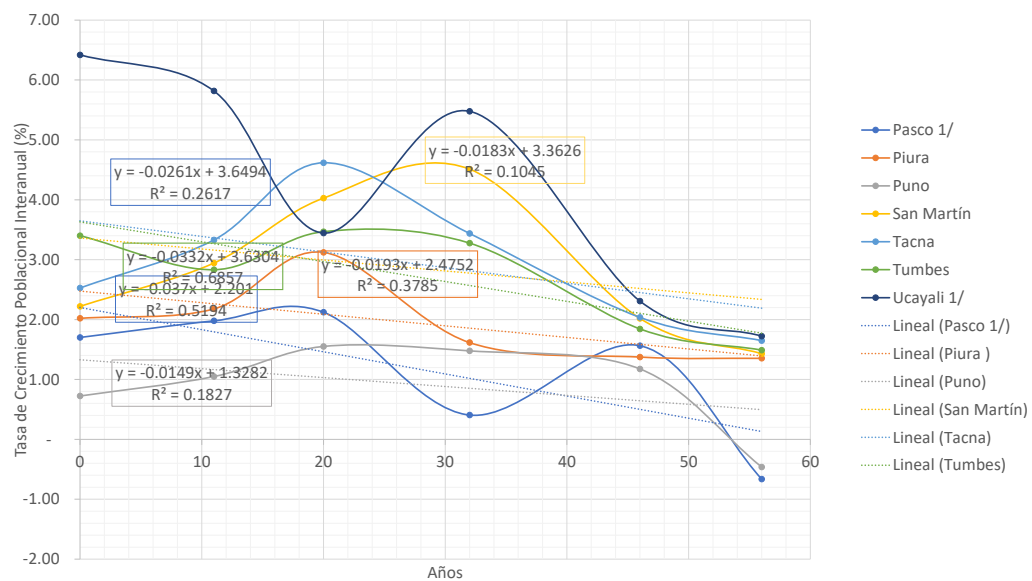


FIGURA N° 3.7: Crecimiento poblacional (%) Pasco a Moquegua

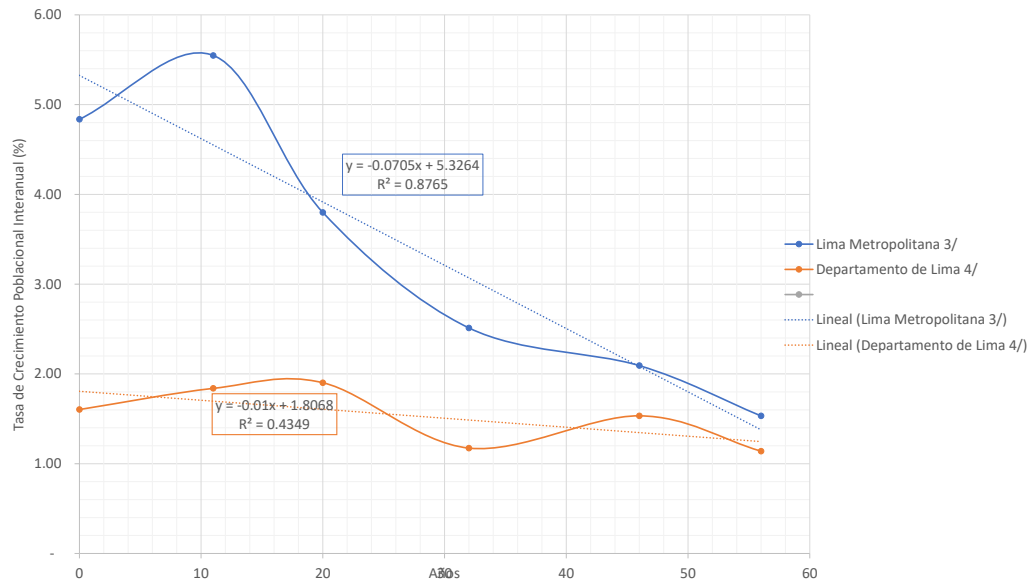


FIGURA N° 3.8: Crecimiento poblacional (%) Lima y región de Lima

Se observa en todos los casos el decrecimiento significativo de la tasa interanual de la población, en general por debajo del 2%. En algunos casos, se observa tasas por debajo de 1% o negativas, como: Amazonas, Ancash, Apurímac, Ayacucho, Cajamarca, Cusco, Huancavelica, Huánuco, Junín, Loreto, Pasco y Puno. Las regiones que mantienen un crecimiento por encima de 1% son: Arequipa, Callao, Ica, La Libertad, Lambayeque, Lima, Madre de Dios, Moquegua, Piura, San Martín, Tacna, Tumbes y Ucayali. Se presentan a continuación la clasificación de las ciudades, bajo el estándar SINCEP:

Ítem	Ciudades	Departamento	Población 2021	Tipo de ciudad
1	Lima	Lima	9,786,800	Metrópolis Nacional
2	Callao	Callao	1,136,000	Metrópolis Nacional
3	Arequipa	Arequipa	1,121,500	Metrópolis Regional
4	Trujillo	La Libertad	1,088,300	Metrópolis Regional
5	Chiclayo	Lambayeque	605,300	Metrópolis Regional
6	Piura	Piura	549,700	Metrópolis Regional
7	Huancayo	Junín	538,100	Metrópolis Regional
8	Cuzco	Cusco	512,500	Metrópolis Regional
9	Iquitos	Loreto	446,900	Metrópolis Regional
10	Pucallpa	Ucayali	401,400	Metrópolis Regional
11	Chimbote	Áncash	398,100	Ciudad Mayor Principal
12	Ica	Ica	340,600	Ciudad Mayor Principal
13	Tacna	Tacna	331,200	Ciudad Mayor Principal
14	Juliacca	Puno	321,800	Ciudad Mayor Principal
15	Ayacucho	Ayacucho	261,000	Ciudad Mayor Principal
16	Cajamarca	Cajamarca	239,000	Ciudad Mayor
17	Huánuco	Huánuco	228,900	Ciudad Mayor
18	Sullana	Piura	204,400	Ciudad Mayor
19	Chincha Alta	Ica	211,000	Ciudad Mayor
20	Huacho	Lima	181,600	Ciudad Mayor
21	Tarapoto	San Martín	168,000	Ciudad Mayor
22	Puno	Puno	142,100	Ciudad Mayor
23	Huaraz	Áncash	137,400	Ciudad Mayor
24	Paita	Piura	123,456	Ciudad Mayor
25	Puerto Maldonado	Madre de Dios	112,000	Ciudad Mayor
26	Tumbes	Tumbes	107,400	Ciudad Mayor
27	Talara	Piura	101,400	Ciudad Mayor

TABLA N° 3.1: Clasificación de ciudades peruanas según su población

Se presenta a continuación el análisis de la superficie ocupada de las ciudades (km^2), la densidad (hab/km^2 y hab/ha) y el radio equivalente considerando un área circular (km). El radio equivalente es particularmente importante, debido a que puede servir como referencia para la opción del desarrollo de modos suaves, como bicicletas, patinetas, y vehículos de menor huella energética y de carbono. Como se aprecia, más del 80% de las ciudades peruanas tienen radios equivalentes inferiores a 4 km, por lo que potencialmente podría desarrollarse el transporte por bicicleta, considerando los aspectos de clima e infraestructura necesaria para incentivar este modo de baja huella energética y de carbono.

Item	Ciudades	Área (km ²)	Densidad (hab/km ²)	Densidad (hab/ha)	Radio Equiv. (km)
1	Lima	749	13,066	131	15.44
2	Callao	147	7,728	77	6.84
3	Arequipa	118	9,504	95	6.13
4	Trujillo	98	11,105	111	5.59
5	Chiclayo	56	10,809	108	4.22
6	Piura	61	9,011	90	4.41
7	Huancayo	51	10,551	106	4.03
8	Cuzco	55	9,318	93	4.18
9	Iquitos	37	12,078	121	3.43
10	Pucallpa	86	4,667	47	5.23
11	Chimbote	46	8,654	87	3.83
12	Ica	48	7,096	71	3.91
13	Tacna	66	5,018	50	4.58
14	Juliac	59	5,454	55	4.33
15	Ayacucho	24	10,875	109	2.76
16	Cajamarca	20	11,950	120	2.52
17	Huánuco	24	9,538	95	2.76
18	Sullana	19	10,758	108	2.46
19	Chincha Alta	27	7,815	78	2.93
20	Huacho	23	7,896	79	2.71
21	Tarapoto	30	5,600	56	3.09
22	Puno	19	7,479	75	2.46
23	Huaraz	11	12,491	125	1.87
24	Paita	18	6,859	69	2.39
25	Puerto Maldonado	28	4,000	40	2.99
26	Tumbes	13	8,262	83	2.03
27	Talara	9	11,267	113	1.69

TABLA N° 3.2: Clasificación de ciudades peruanas según su densidad poblacional y radio equivalente de superficie

A continuación se presentan los sistemas de transporte público y servicios de transporte presentes en las diferentes ciudades peruanas, en función de su desarrollo actual, nivel de implementación y extensión. Se ha tomado la siguiente valoración cualitativa (+, significa que existe pero poco o muy poco, la valoración más alta es +++++ que indica que el sistema es predominante y extendido en toda el área urbana) :

Ciudades	STPM	CoBUS	BUS	MICRE	COMB	VANS	COLEC	TAXI	APLIC	MOTA	MOTO	BICI	PATIN	BOTES
Lima	++	+++	++++	++++	+++++	+++	++++	+++++	++++	++	+	+	+	
Callao			++++	++++	+++++	+++	++++	+++++	++++	++	+			+
Arequipa			++++	+++	+++++		++++	+++++		++				
Trujillo			+++	++	++++		+++++	+++++		++				
Chiclayo			++	++	++++		+++++	+++++		+++				
Piura			++	++	+++		+++++	+++		++++	++			
Huancayo			++	++	+++		+++++	+++		++++				
Cuzco			++	++	++	++	+++++	+++++		+++				
Iquitos			++	++	++		++++	+++		+++++				++
Pucallpa			+	++	+		++++	+++		+++++				+
Chimbote				+	+		+++	++		+++				
Ica				+	+		+++	++		+++				
Tacna				+	+		+++	++		+++				
Juliaca				+	+		+++	++		++++				
Ayacucho				+	+		+++	++		+++	+			
Cajamarca				+	+		++	+		+++++				
Huánuco				+	+		++			+++++				
Sullana				+	+		++			+++++				
Chincha Alta							++			+++++				
Huacho							++			+++++				
Tarapoto							++			+++++				+
Puno							++			+++++				+
Huaraz							++			+++++				
Paíta							++			+++++				
Puerto Maldonado							++			+++++				+
Tumbes							++			+++++				
Talara							++			+++++				

TABLA N° 3.3: Nivel de desarrollo, implementación y extensión de los Sistemas de Transporte Público y Servicios de Transporte de las ciudades peruanas

Llama la atención que sólo el Área Metropolitana de Lima y Callao cuenten con Sistema de Transporte Público Masivo (Metro Línea 1 y BRT) con 69 km en operación, con potenciales extensiones a partir de las próximas inauguraciones del tramo parcial del Metro Línea 2 y de la Ampliación Norte del Metropolitano. De otro lado, las metrópolis regionales aún no han implementado ningún servicio de transporte público de alta capacidad. Se presenta la correlación entre el radio equivalente de la ciudad y la densidad poblacional.

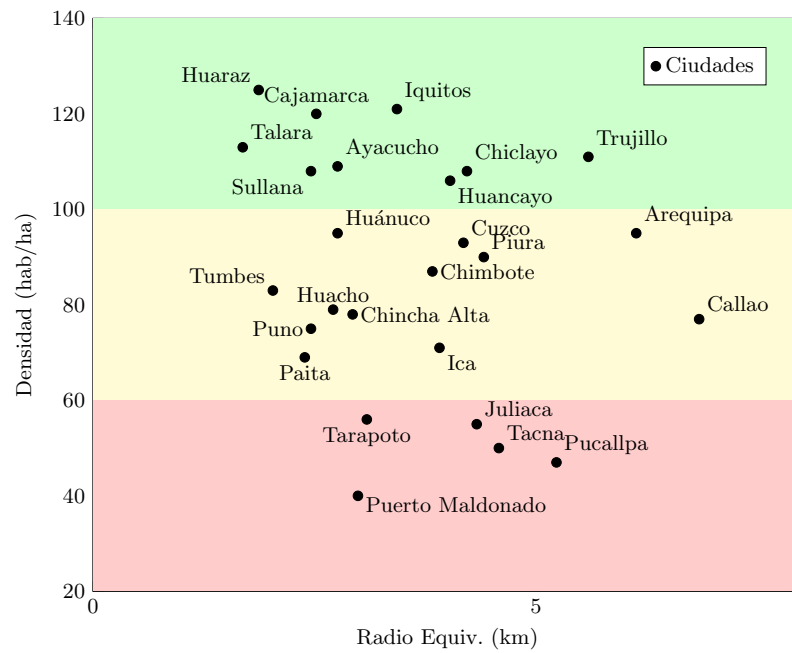


FIGURA N° 3.9: Relación de ciudades y su radio equivalente en km. Rojo: baja densidad. Amarillo: densidad intermedia. Verde: alta densidad

En esta figura se toma que la densidad apropiada es mayor que 100 hab/ha (en (Marín Cots, 2012) se recomienda que el rango deseable de densidad sea superior a 120 hab/ha), la densidad intermedia entre 60 hab/ha y 100 hab/ha, y de baja densidad por debajo de 60 hab/ha. Las ciudades de densidades mayores pueden justificar la implementación de sistemas de transporte público con mediana a alta capacidad, en función de la población y de la extensión urbana que justifique la demanda.

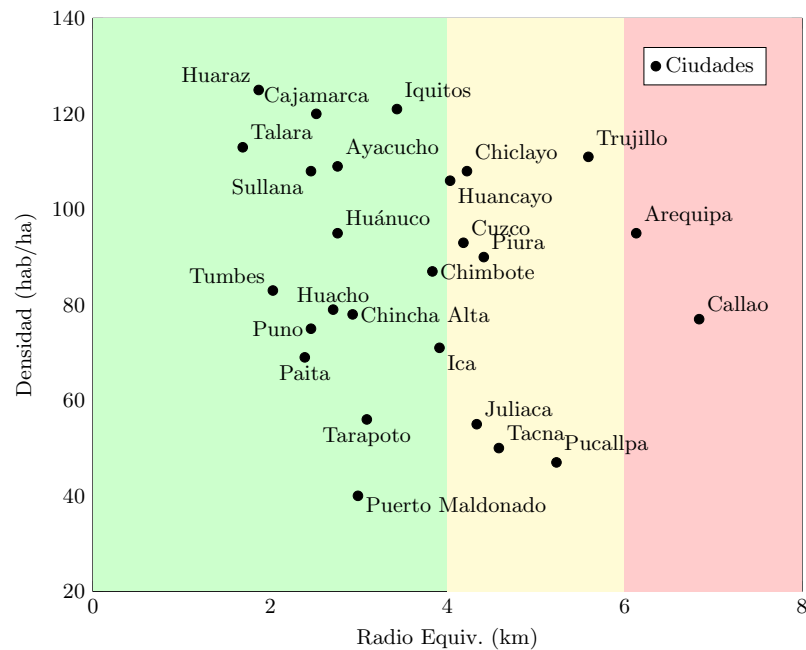


FIGURA N° 3.10: Relación de ciudades y su radio equivalente en km. Rojo: ciudad extensa, $r > 6\text{km}$. Amarillo: ciudad intermedia, r de 4-6 km. Verde: ciudad compacta, $r < 4\text{ km}$

En esta figura se presenta una clasificación de las ciudades según su radio equivalente en km (el radio que corresponde a la ciudad si fuese un círculo perfecto), y se distinguen en función de su extensión:

- Ciudad extensa, $r > 6\text{km}$, su extensión permite la existencia de rutas de sistemas de transporte de mediana a alta capacidad, lo cual deberá diseñarse en función de la demanda existente. Las ciudades que presentan esta condición son Lima Metropolitana, Arequipa, y potencialmente Trujillo.
- Ciudad intermedia, $4 < r < 6\text{km}$, dada su extensión, se recomiendan sistemas de transporte de mediana capacidad. Las ciudades que presentan esta condición son: Chiclayo, Huancayo, Cusco, Piura, Juliaca, Tacna y Pucallpa, y potencialmente Chimbote e Ica.
- Ciudad pequeña: $r < 4\text{km}$, dada su extensión, se recomiendan sistemas de transporte de baja y mediana capacidad, y la promoción de modos suaves como bicicletas y patinetas, además de la creación de senderos para favorecer la caminata. Gran parte de las ciudades mayores principales y ciudades mayores cumplen con esta condición.

3.1.2 Modelamiento agregado de la Demanda de Movilidad en centros urbanos

En grandes ciudades, las zonas podrían agruparse entre 10 y 15 sectores, en tanto que en ciudades intermedias se espera lograr una representación básica con 7 a 12 sectores. La calibración se realiza con la comparación con planes de movilidades de las diferentes ciudades. Debido a la complejidad de la información y la variabilidad y validez de los datos en el tiempo, se ha tomado en cuenta resultados de matrices de desplazamiento de estudios publicados y que han sido calibrados en la presente investigación bajo el enfoque del Modelo Gravitacional del Transporte, es decir, que la cantidad de viajes que se realizan entre dos puntos está dominado por el costo del viaje (distancia y tiempo), así como por el nivel de interés de los viajes entre un determinado par Origen-Destino; es importante considerar que la atracción de un viaje no sólo supone un costo, sino un beneficio al final del trayecto, como la localización del trabajo, el acceso a servicios de salud, educación, productos de consumo, e incluso entretenimiento; por lo que la matriz de costos debe ser deducida por una variable de beneficios.

Para la calibración se ha realizado un proceso iterativo para obtener los factores de las matrices. A partir de la matriz aproximada, se puede obtener una estimación de las distancias realizadas en los diferentes viajes, y calcular los efectos en la energía consumida. Al mismo tiempo, se puede proponer una base de cálculo de la energía consumida debido al transporte terrestre, así como las emisiones de gases de efecto invernadero. Para el balance de la matriz de desplazamiento, se ha tomado en cuenta el equilibrio en los viajes de Origen (O_i) así como los trayectos contabilizados como Destino (D_j), bajo las siguientes restricciones:

$$O_i - \sum_j T_{ij} = 0 \quad (3.1)$$

$$D_j - \sum_i T_{ij} = 0 \quad (3.2)$$

$$T_{ij} = A_i O_i B_j D_j \exp(-\beta c_{ij}) \quad (3.3)$$

La ecuación de trayectos realizados considera que el efecto del costo del viaje en los factores β (de calibración) y c_{ij} relativo a los costos de viaje entre el origen i y el destino j , que pueden ser valorados a partir de la tarifa y el valor social del tiempo (VST) que se relaciona con la duración del viaje. Las matrices A_i y B_j permiten calibrar las respectivas matrices de Origen y Destino.

3.1.2.1 Lima

El área metropolitana de Lima y Callao concentra la mayor área urbana del Perú. Su extensión está enmarcada en las dos provincias del mismo nombre, aunque su área de influencia puede ser notoria en las provincias próximas de Cañete, Huarochirí, Canta y Huaura. Para el modelamiento de los desplazamientos en el Área Metropolitana de Lima y Callao se ha tomado como referencia al estudio realizado por JICA (Yachiyo Engineering, 2005), a partir de las matrices de Generación y Atracción de Viajes. Sin embargo, no se cuenta con el detalle suficiente para modelar la cantidad de viajes que se realizan en la ciudad, ni los ejes de tránsito entre ellos que permita dimensionar la variable distancia recorrida.

Para hacer un cálculo estimado de esta variable, se realizó una matriz sintetizada de los desplazamientos que no consideran como destino el Hogar (es equivalente a los viajes que inician en la mañana), con las siguientes consideraciones:

- Se toma como referencia fija la cantidad de viajes atraídos y generados. Se considera un centro de gravedad por cada una de las 14 zonas agregadas de la matriz de generación y atracción de viajes.
- Se genera una matriz de distancias entre las diferentes zonas urbanas. Para tal efecto, se considera que todos los viajes producidos se realizan entre los diferentes centroides de las zonas definidas previamente. Esto naturalmente implica una simplificación de los viajes, pero permite analizar globalmente los viajes interzonales.
- Se genera una matriz de velocidades, para este supuesto, se ha realizado una consulta de las velocidades promedio que se observan en las vías según las diferentes bases de datos geográficas (como Google Maps). Se observan que las velocidades son diferentes según la jerarquía vial, con mayor intensidad en las autopistas (Av. Javier Prado, Vía Expresa, Carretera Panamericana), y menor a medida que disminuye el ancho de vía y la congestión vehicular.
- A partir de las respectivas matrices de distancias y velocidades, se proyecta una matriz de tiempos de recorrido entre las matrices Origen y Destino. Se crea una matriz aproximada de beneficios, que justifica la atracción de los viajes hacia algunas de las zonas urbanas definidas, sin esta compensación, los viajes tenderían a realizarse hacia los lugares más próximos. Para lograr la misma dimensión funcional, los beneficios se expresan en minutos. Para la primera iteración, se ha considerado que los centroides de Lima y Miraflores tienen un beneficio equivalente a 30 minutos, el Callao equivalente a 20 minutos, La Molina 10 minutos, y el resto de centroides 5 minutos.

- Se inicia el proceso de iteración para lograr la matriz de desplazamientos. La matriz se verifica globalmente con el gráfico que se observa en el Estudio de JICA (Yachiyo Engineering, 2005).

Para el estudio de los desplazamientos excluyendo el propósito "Hogar", se consideró los siguientes valores de Origen y Destino, para lo que se tomó en cuenta 14 zonas (no se tomó en cuenta la zona 15 debido a los valores reducidos).

Ítem	Zona	año 2004 (miles)		año 2025 (miles)	
		Generación	Atracción	Generación	Atracción
1	Lima	1,043	2,127	1,520	2,534
2	Callao	429	425	618	592
3	Los Olivos	933	645	1,160	814
4	Miraflores	920	1,285	1,532	1,712
5	La Molina	158	168	353	201
6	Chorrillos	207	155	314	241
7	VES	734	423	918	730
8	Ancón	287	164	541	528
9	Carabaylo	478	261	626	489
10	SJL	591	308	690	431
11	Lurigancho	622	462	1,033	1,073
12	Cieneguilla	11	7	41	7
13	Lurín	44	34	141	176
14	San Bartolo	14	7	66	25
Total		6,471	6,471	9,553	9,553

TABLA N° 3.4: Generación y Atracción de Viajes por Zonas Integradas en 2004 y 2025 (Yachiyo Engineering, 2005)

Para el cálculo de las distancias de recorrido entre diferentes zonas, se ubicaron los centroides aproximadamente. Estos puntos representan todo el movimiento promedio de la zona, tanto desde el punto de vista de Generación como de Atracción. Los centroides se pueden ubicar en un mapa bajo las siguientes nominaciones:

Zona	Centroide
Lima	Plaza 2 de Mayo
Callao	Óvalo Centenario
Los Olivos	Av. Próceres / Av. Central
Miraflores	Parque Kennedy
La Molina	Av. La Molina / Av. 7
Chorrillos	La Curva
VES	Av. Micaela Bastidas / Av. César Vallejo
Ancón	Av. Huallaga / Av. Bolívar
Carabaylo	Hospital Sergio Bernales
SJL	Estación Santa Rosa
Lurigancho	Av. Las Torres / Av. Cajamarquilla
Cieneguilla	Av. Nueva Toledo / Av. Manco Cápac
Lurín	Av. Manuel Valle / Antigua Panamericana Sur
San Bartolo	Jr. San Bartolo / Jr. Las Almendras

TABLA N° 3.5: Localización de Centroides de las 14 zonas de Generación y Atracción de Viajes del Área Metropolitana de Lima y Callao

A partir de estas condiciones geométricas y de desplazamientos, se generan las matrices de Origen-Destino que son verificadas en magnitud a partir de los gráficos de la referencia del Plan Maestro de Lima del año 2004 (Yachiyo Engineering, 2005).

Matriz O-D Tij 2004															
Oi/Dj	Lima	Callao	Los Olivos	Miraflores	La Molina	Chorrillos	VES	Ancón	Carabaylo	SJL	Lurigancho	Cieneguilla	Lurín	San Bartolo	Suma(Tij,Oi)
Lima															1,043
Callao															429
Los Olivos															933
Miraflores															920
La Molina															158
Chorrillos															207
VES															734
Ancón															287
Carabaylo															478
SJL															591
Lurigancho															622
Cieneguilla															11
Lurín															44
San Bartolo															14
Suma(Tij,Dj)	2,127	425	645	1,285	168	155	423	164	261	308	462	7	34	7	6,471

FIGURA N° 3.11: Matriz de Generación y Atracción de Viajes por Zonas

La distancia interzonal es la medida de una determinada ruta, lo cual es una simplificación para hallar una distancia promedio. Naturalmente las distancias finales pueden ser mayores o menores, e incluso los trayectos complementarios en diferentes modos pueden afectar el resultado, sin embargo, se parte de una simplificación para contar con una estimación.

d (km)	Lima	Callao	Los Olivos	Miraflores	La Molina	Chorrillos	VES	Ancón	Carabaylo	SJL	Lurigancho	Cieneguilla	Lurín	San Bartolo
Lima	5	12	13	13	20	28	32	41.30	18	14	18	36	42	59
Callao	12	5	14	19	28	28	42	41	23	24	28	44	40	69
Los Olivos	13	14	5	22	30	31	41	31	10	24	28	45	52	69
Miraflores	13	19	22	5	16	9	17	52	29	22	26	37	27	45
La Molina	20	28	30	16	5	22	24	57	34	20	22	15	35	53
Chorrillos	28	28	31	9	22	5	12	58	37	28	32	38	17	35
VES	32	42	41	17	24	12	5	71	47	33	35	26	10	33
Ancón	41	41	31	52	57	58	71	5	32	33	57	74	81	98
Carabaylo	18	23	10	29	34	37	47	32	5	30	34	53	58	75
SJL	14	24	24	22	20	28	33	33	30	5	20	36	44	62
Lurigancho	18	28	28	26	22	32	35	57	34	20	5	28	46	63
Cieneguilla	36	44	45	37	15	38	26	74	53	36	28	5	21	42
Lurín	42	40	52	27	35	17	10	81	58	44	46	21	5	21
San Bartolo	59	69	69	45	53	35	33	98	75	62	63	42	21	5

FIGURA N° 3.12: Distancia interzonal, medido a partir de centroides

La velocidad interzonal ha sido tomada en las horas de mayor tráfico, donde se observa que existe congestión en las vías. De otro lado, las vías con mayor capacidad (2 o 3 carriles por sentido), tienen mayor velocidad de tránsito. La velocidad de un trayecto es promedio, es decir, pueden haber sectores de mayor o menor velocidad producto de la sección geométrica o de la condición del tráfico. La velocidad interzonal considera el movimiento de un vehículo particular, es lógico pensar que la velocidad comercial del transporte público convencional puede ser 30 o 40% inferior a la del auto, debido a que no cuenta con carriles exclusivos y que comparten las mismas vías.

v(km/h)	Lima	Callao	Los Olivos	Miraflores	La Molina	Chorrillos	VES	Ancón	Carabaylo	SJL	Lurigancho	Cieneguilla	Lurín	San Bartolo
Lima	20	22	27	20	25	25	25	25.00	20	18	20	24	39	47
Callao	22	20	26	22	25	27	25	25	25	25	20	20	34	55
Los Olivos	27	26	20	25	20	20	25	20	21	24	20	22	39	51
Miraflores	20	22	25	20	20	22	23	20	24	23	20	22	29	45
La Molina	25	25	20	20	20	20	20	20	20	24	20	22	40	58
Chorrillos	25	27	20	22	20	20	20	20	20	22	20	22	29	47
VES	25	25	20	23	20	20	20	20	21	22	20	22	29	47
Ancón	25	25	20	20	20	20	20	20	20	22	20	22	29	45
Carabaylo	20	25	21	24	20	20	21	20	20	18	20	22	29	45
SJL	18	25	24	23	24	22	22	22	18	20	20	22	29	45
Lurigancho	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	20	22	29	45
Cieneguilla	24	20	22	22	22	22	22	22	22	22	22	20	29	45
Lurín	39	34	39	29	40	29	29	29	29	29	29	20	20	60
San Bartolo	47	55	51	45	58	47	47	45	45	45	45	45	60	20

FIGURA N° 3.13: Velocidad de vías interzonal

Para obtener el tiempo de viaje interzonal, se relaciona la distancia y las velocidades descritas. El tiempo de desplazamiento no toma en cuenta los desplazamientos iniciales o finales en el caso de los viajes intermodales (caminata hacia el paradero, tiempo de espera para tomar el vehículo, caminata hacia el destino, tiempo de transferencia modal, entre otros).

t (min)	Lima	Callao	Los Olivos	Miraflores	La Molina	Chorrillos	VES	Ancón	Carabaylo	SJL	Lurigancho	Cieneguilla	Lurín	San Bartolo
Lima	15	32	28	39	47	67	76	99	54	47	54	90	64	75
Callao	32	15	32	52	67	62	101	98	55	58	84	132	71	75
Los Olivos	28	32	15	53	90	93	98	93	29	60	84	123	80	81
Miraflores	39	52	53	15	48	25	44	156	73	57	78	101	56	60
La Molina	47	67	90	48	15	66	72	171	102	50	66	41	53	55
Chorrillos	67	62	93	25	66	15	36	174	111	76	96	104	35	45
VES	76	101	123	44	72	36	15	213	134	90	105	71	21	42
Ancón	99	98	93	156	171	174	213	15	96	90	171	202	168	131
Carabaylo	54	55	29	73	102	111	134	96	15	100	102	145	120	100
SJL	47	58	60	57	50	76	90	90	100	15	60	98	91	83
Lurigancho	54	84	84	78	66	96	105	171	102	60	15	76	95	84
Cieneguilla	90	132	123	101	41	104	71	202	145	98	76	15	43	56
Lurín	64	71	80	56	53	35	21	168	120	91	95	43	15	21
San Bartolo	75	75	81	60	55	45	42	131	100	83	84	56	21	15

FIGURA N° 3.14: Tiempo de viaje Interzonal

Para la matriz de beneficios, se considera que existe una concentración de servicios urbanos en las zonas de la ciudad. No es posible calibrar directamente este parámetro, por lo que se parte por una estimación con la finalidad de lograr una matriz equivalente. Para un efecto compensado, las zonas urbanas en el área central cuentan con mayor atractividad, la cual se expresa en minutos para contrarrestar el efecto del costo de los viajes en minutos. Si no se considera este efecto, los viajes se concentrarían en las zonas más próximas (en distancia y en tiempo de viaje), lo cual no refleja la condición de desplazamientos. Esta variable permite que los resultados se aproximen a las gráficas de desplazamiento que se observan en las matrices de O-D del Plan Maestro de Lima propuesto por JICA (Yachiyo Engineering, 2005)

Benef. (min)	Lima	Callao	Los Olivos	Miraflores	La Molina	Chorrillos	VES	Ancón	Carabaylo	SJL	Lurigancho	Cieneguilla	Lurín	San Bartolo
Lima	10	20	5	30	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Callao	30	10	5	30	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Los Olivos	30	20	5	30	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Miraflores	30	20	5	5	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5
La Molina	30	20	5	30	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Chorrillos	30	20	5	30	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5
VES	30	20	5	30	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Ancón	30	20	5	30	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Carabaylo	30	20	5	30	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5
SJL	30	20	5	30	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Lurigancho	30	20	5	30	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Cieneguilla	30	20	5	30	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5
Lurín	30	20	5	30	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5
San Bartolo	30	20	5	30	10	5	5	5	5	5	5	5	5	5

FIGURA N° 3.15: Beneficios de viajes interzonales, expresados en minutos

La matriz resultante de la suma de los beneficios y de los costos se considera como la matriz de atracción de cada zona, y que será balanceada a partir de los viajes totales de Generación y Atracción por cada zona.

Benf.-Costo (min)	Lima	Callao	Los Olivos	Miraflores	La Molina	Chorrillos	VES	Ancón	Carabayllo	SIL	Lurigancho	Cieneguilla	Lurín	San Bartolo	
Lima	-	5	12	23	9	37	62	71	94	49	42	49	85	59	70
Callao	-	2	5	27	22	57	57	96	93	50	53	79	127	66	70
Los Olivos	-	2	12	10	23	80	88	93	88	24	55	79	118	75	76
Miraflores	-	9	32	48	10	38	20	39	151	68	52	73	96	51	55
La Molina	-	17	47	85	18	5	61	67	166	97	45	61	36	48	50
Chorrillos	-	37	42	88	5	56	10	31	169	106	71	91	99	30	40
VES	-	46	81	118	14	62	31	10	208	129	85	100	66	16	37
Ancón	-	69	78	88	126	161	169	208	10	91	85	166	197	163	126
Carabayllo	-	24	35	24	43	92	106	129	91	10	95	97	140	115	95
SIL	-	17	38	55	27	40	71	85	85	95	10	55	93	86	78
Lurigancho	-	24	64	79	48	56	91	100	166	97	55	10	71	90	79
Cieneguilla	-	60	112	118	71	31	99	66	197	140	93	71	10	38	51
Lurín	-	34	51	75	26	43	30	16	163	115	86	90	38	10	16
San Bartolo	-	45	55	76	30	45	40	37	126	95	78	79	51	16	10

FIGURA N° 3.16: Suma de beneficios y costos de los viajes Interzonales

Se proyecta el costo interzonal, a partir del cálculo de una función para el valor de beneficios y costos.

cj	Lima	Callao	Los Olivos	Miraflores	La Molina	Chorrillos	VES	Ancón	Carabayllo	SIL	Lurigancho	Cieneguilla	Lurín	San Bartolo	Suma(Tij,Oi)
Lima	-	1.8	3.1	1.5	6.4	22.4	34.1	110.6	11.8	8.3	11.6	69.2	19.1	33.6	333.8
Callao	1.1	-	3.9	3.0	17.5	17.5	120.3	106.7	12.3	13.9	51.9	572.5	26.6	33.6	980.7
Los Olivos	0.9	1.9	-	3.1	54.6	81.5	106.7	81.5	3.2	15.6	51.9	360.1	42.5	45.1	848.6
Miraflores	1.6	4.9	10.9	-	6.7	2.7	7.2	1,900.7	29.2	13.7	38.5	121.0	12.7	15.6	2,165.4
La Molina	2.4	10.6	70.1	2.5	-	21.1	28.5	4,023.9	127.7	9.5	21.1	6.0	10.8	12.1	4,346.2
Chorrillos	6.4	8.3	81.5	0.8	16.4	-	4.7	4,675.1	200.3	35.5	94.6	138.6	4.5	7.3	5,274.0
VES	9.8	56.8	365.0	2.0	22.2	4.7	-	32,859.6	641.8	70.1	148.4	27.0	2.2	6.4	34,216.1
Ancón	31.7	50.4	81.5	544.6	3,133.8	4,675.1	32,859.6	-	94.6	70.1	4,023.9	18,786.8	3,392.5	535.6	68,280.0
Carabayllo	3.4	5.8	3.2	8.4	99.5	200.3	641.8	94.6	-	115.6	127.7	1,072.0	314.2	115.6	2,802.2
SIL	2.4	6.6	15.6	3.9	7.4	35.5	70.1	115.6	115.6	-	15.6	105.5	73.8	48.6	570.7
Lurigancho	3.3	24.5	51.9	11.0	16.4	94.6	148.4	4,023.9	127.7	15.6	-	35.5	90.8	51.9	4,695.7
Cieneguilla	19.8	270.4	360.1	34.7	4.7	138.6	27.0	18,786.8	1,072.0	105.5	35.5	-	6.8	12.8	20,874.7
Lurín	5.5	12.5	42.5	3.6	8.4	4.5	2.2	3,392.5	314.2	73.8	90.8	6.8	-	2.2	3,959.6
San Bartolo	9.6	15.9	45.1	4.5	9.4	7.3	6.4	535.6	115.6	48.6	51.9	12.8	2.2	-	864.9
Suma(Tij,Dj)	97.8	470.4	1,134.5	623.6	3,403.4	5,305.8	34,057.0	70,661.5	2,866.1	595.9	4,763.5	21,313.8	3,998.7	920.4	150,212.6

FIGURA N° 3.17: Cálculo del costo interzonal ; Costo $c_{ij} = \exp(-\beta * tiempo_{ij})$; $\beta = 0.05$

Para el proceso iterativo, se considera que los viajes entre todos los orígenes y destinos consisten en un factor unitario, para lo cual, se multiplica alternadamente las filas y columnas de Orígenes y Destinos, el proceso iterativo se repite hasta que haya una clara convergencia.

Balanceando Oi	Lima	Callao	Los Olivos	Miraflores	La Molina	Chorrillos	VES	Ancón	Carabayllo	SIL	Lurigancho	Cieneguilla	Lurín	San Bartolo	Suma(Tij,Oi)	Ratio Oi (i+1)/Oi (0)
O/D	Lima	Callao	Los Olivos	Miraflores	La Molina	Chorrillos	VES	Ancón	Carabayllo	SIL	Lurigancho	Cieneguilla	Lurín	San Bartolo	Suma(Tij,Oi)	Ratio Oi (i+1)/Oi (0)
Lima	-	99.29	89.27	420.79	30.87	49.70	94.90	9.95	48.39	95.83	89.52	1.36	9.71	3.42	1,043.00	1.00
Callao	165.95	-	14.60	104.15	10.90	5.05	43.63	1.25	6.60	20.88	52.31	1.47	1.76	0.44	429.00	1.00
Los Olivos	288.32	28.21	-	233.67	72.79	50.28	82.65	2.04	3.72	50.28	111.75	1.98	6.02	1.28	933.00	1.00
Miraflores	519.98	77.01	89.40	-	9.17	1.69	5.70	49.01	34.45	45.41	85.18	0.68	1.85	0.46	920.00	1.00
La Molina	59.56	12.58	43.48	14.32	-	1.02	1.72	7.86	11.40	2.38	3.54	0.00	0.12	0.03	158.00	1.00
Chorrillos	119.26	7.25	37.36	3.28	1.26	-	0.21	6.75	13.23	6.57	11.73	0.04	0.04	0.01	207.00	1.00
VES	250.99	69.04	231.54	12.20	2.36	0.23	-	65.61	58.59	17.96	25.44	0.01	0.02	0.01	734.00	1.00
Ancón	31.03	2.34	1.97	123.69	12.70	8.77	77.36	-	0.33	0.68	26.31	0.31	1.46	0.05	287.00	1.00
Carabayllo	158.16	12.91	3.77	91.13	19.32	18.01	72.41	0.35	-	54.11	40.03	0.86	6.47	0.48	478.00	1.00
SIL	292.03	38.07	47.44	112.00	3.75	8.34	20.69	0.67	50.45	-	12.82	0.22	3.98	0.52	591.00	1.00
Lurigancho	208.69	72.97	80.66	160.71	4.28	11.40	22.43	19.67	28.55	9.81	-	0.04	2.51	0.29	622.00	1.00
Cieneguilla	3.86	2.49	1.73	1.57	0.00	0.05	0.01	0.28	0.74	0.21	0.05	-	0.00	0.00	11.00	1.00
Lurín	22.43	2.43	4.31	3.46	0.14	0.04	0.02	1.08	4.58	3.02	2.48	0.00	-	0.00	44.00	1.00
San Bartolo	9.71	0.76	1.12	1.05	0.04	0.01	0.02	0.04	0.41	0.49	0.35	0.00	0.00	-	14.00	1.00
Suma(Tij,Dj)	2,129.98	425.35	646.66	1,282.03	167.59	154.59	421.75	164.56	261.44	307.62	461.52	6.99	33.93	6.98	6,471.00	
Ratio Dj (i+1)/Dj	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00		

FIGURA N° 3.18: Matriz O-D balanceada, incluyendo los viajes interzonales

A partir de la matriz de viajes, se verifica que exista una correlación con los gráficos presentados en el Plan Maestro de JICA (Yachiyo Engineering, 2005), y se utiliza las distancias de los centroides para obtener la matriz de desplazamientos interzonales. La suma de estos desplazamientos representa un valor global para los desplazamientos sin considerar el hogar, y a partir de los cuales se puede estimar una distancia promedio para estos viajes, que se estiman en 25 km como distancia promedio.

Viajes (kPas-km)	Lima	Callao	Los Olivos	Miraflores	La Molina	Chorrillos	VES	Ancón	Carabaylo	SIL	Lurigancho	Cieneguilla	Lurín	San Bartolo	Suma(kPas-km)	Dist. Media (km)
Lima	-	1,162	1,116	5,470	608	1,391	2,989	411	876	1,361	1,611	49	404	202	17,650.37	16.92
Callao	1,942	-	204	1,979	305	141	1,832	51	152	501	1,465	65	70	31	8,738.69	20.37
Los Olivos	3,604	395	-	5,141	2,184	1,559	3,389	63	37	1,207	3,129	89	313	88	21,197.22	22.72
Miraflores	6,760	1,463	1,967	-	147	15	97	2,549	999	999	2,215	25	50	21	17,305.93	18.81
La Molina	1,173	352	1,304	229	-	22	41	448	388	48	78	0	4	1	4,089.24	25.88
Chorrillos	3,339	203	1,158	30	28	-	3	392	489	184	375	2	1	0	6,203.44	29.97
VES	7,906	2,899	9,493	207	57	3	-	4,658	2,754	593	891	0	0	0	29,461.35	40.14
Ancón	1,282	96	61	6,432	724	509	5,493	-	11	23	1,500	23	118	5	16,274.12	56.70
Carabaylo	2,863	297	38	2,643	657	666	3,403	11	-	1,623	1,361	45	376	36	14,018.65	29.33
SIL	4,147	914	1,139	2,464	75	233	683	22	1,514	-	256	8	175	32	11,662.21	19.73
Lurigancho	3,756	2,043	2,258	4,178	94	365	785	1,121	971	196	-	1	115	18	15,902.99	25.57
Cieneguilla	139	110	78	58	0	2	0	21	39	7	1	-	0	0	455.66	41.42
Lurín	933	97	224	94	5	1	0	88	266	133	114	0	-	0	1,954.05	44.41
San Bartolo	573	52	77	47	2	0	1	4	31	30	22	0	0	0	940.23	60.02
Suma(kPas-km)	38,417	10,063	19,118	28,972	4,885	4,909	18,716	9,839	8,525	6,904	13,018	308	1,626	434	165,754.15	
Dist. Media (km)	18.04	23.71	29.56	22.60	29.15	31.75	44.38	59.79	32.61	22.44	28.21	44.05	47.92	62.17		
Distancia media de todos los viajes (km)																25.61

FIGURA N° 3.19: Matriz de viajes y distancias recorridas, se obtiene la distancia promedio de viaje en km

Bajo la misma premisa anterior, es posible calcular el tiempo total de todos los viajes en el área metropolitana de Lima, y calcular el tiempo promedio de los viajes, sin considerar el retorno al hogar (motivo "hogar"), bajo esta premisa, existe un tiempo de viaje promedio en toda el área metropolitana de 78 minutos. Este tiempo promedio considera velocidades en horarios de mayor congestión por lo que podría disminuir en 30% si se consideran las velocidades en hora valle.

Viajes (kPas-h)	Lima	Callao	Los Olivos	Miraflores	La Molina	Chorrillos	VES	Ancón	Carabaylo	SIL	Lurigancho	Cieneguilla	Lurín	San Bartolo	Suma(kPas-h)	Ratio Oi (i+1)/Oi (0)
Lima	-	53	41	274	24	56	120	16	44	76	81	2	10	4	800.29	0.77
Callao	88	-	8	90	12	5	73	2	6	20	73	3	2	1	384.08	0.90
Los Olivos	133	15	-	206	109	78	136	3	2	50	156	4	8	2	902.44	0.97
Miraflores	338	67	79	-	7	1	4	127	42	43	111	1	2	0	821.97	0.89
La Molina	47	14	65	11	-	1	2	22	19	2	4	0	0	0	188.66	1.19
Chorrillos	134	8	58	1	1	-	0	20	24	8	19	0	0	0	273.15	1.32
VES	316	116	475	9	3	0	-	233	131	27	45	0	0	0	1,354.39	1.85
Ancón	51	4	3	322	36	25	275	-	1	1	75	1	4	0	797.77	2.78
Carabaylo	143	12	2	110	33	33	162	1	-	90	68	2	13	1	669.74	1.40
SIL	230	37	47	107	3	11	31	1	84	-	13	0	6	1	571.32	0.97
Lurigancho	188	102	113	209	5	18	39	56	49	10	-	0	4	0	792.85	1.27
Cieneguilla	6	5	4	3	0	0	0	1	2	0	0	0	0	0	20.68	1.88
Lurín	24	3	6	3	0	0	0	3	9	5	4	0	-	0	56.61	1.29
San Bartolo	12	1	2	1	0	0	0	0	1	1	0	0	0	-	17.71	1.26
Suma(kPas-h)	1,711	436	902	1,346	234	229	842	486	413	333	649	14	49	9	7,651.66	
tiempo prom (h)	0.80	1.02	1.39	1.05	1.40	1.48	2.00	2.95	1.58	1.08	1.41	2.02	1.45	1.30		1.18
Tiempo promedio de todos los viajes (h)																1.18

FIGURA N° 3.20: Matriz de viajes y tiempo, se obtiene el tiempo promedio de viaje en horas

3.1.3 Modelamiento agregado de la Oferta del Transporte en centros urbanos

Las condiciones del transporte varían de ciudad en ciudad, y de acuerdo al tipo de transporte. Es posible observar que los sistemas de transporte de mayor capacidad muestran horas pico de la mañana y al final de la jornada laboral, y horas valle a partir en el resto de la jornada. El transporte de pasajeros muestra menor fluctuación, sin embargo también es notorio que existen horas de congestión que coinciden con el inicio y final de la jornada laboral. El pico de la mañana es más pronunciado que el de la tarde, debido a que los horarios de ingreso coinciden, y que el comportamiento es inelástico.

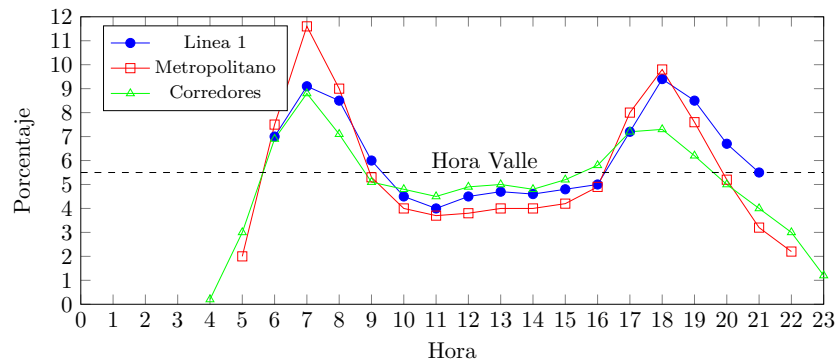


FIGURA N° 3.21: Variación de pasajeros transportados en una jornada laboral, (Autoridad de Transporte Urbano para Lima y Callao (ATU), 2021)

3.2 Infraestructura Vial y Parque Vehicular

3.2.1 Infraestructura vial urbana

La infraestructura de transporte está diseñada considerando las distancias y las velocidades de los diferentes modos de transporte. Una ciudad accesible podrá contar con cualquier servicio básico en un tiempo de trayecto de 15 minutos, por lo que, en función de la velocidad, se puede trazar una huella geográfica de la ciudad en función de los modos de transporte.

Tiempo (min)	Velocidad (km/h)	Distancia (km)
15	3.6 (caminata)	0.90 (900 m)
15	10 (bicicleta)	2.50
15	25 (motocicleta)	6.25
15	12 (combi, velocidad comercial)	3.00
15	25 (Metropolitano, velocidad comercial)	6.25
15	40 (taxi, autopista sin congestión)	10.0
15	40 (auto particular, autopista sin congestión)	10.0
15	30 (Metro, velocidad comercial)	7.50

TABLA N° 3.6: Ciudad de 15 minutos, radio (km) según modo de transporte

3.2.2 Capacidad vial y nivel de servicio de Infraestructura de Transporte Terrestre Urbano

La capacidad de las vías está relacionada con la geometría, las condiciones de tráfico, y el comportamiento humano (peatón y conductores). Esta capacidad puede ser simulada, además, a partir de las observaciones directas en campo, y se pueden realizar aproximaciones matemáticas y numéricas para predecir el comportamiento. Existen diferentes variables que se interrelacionan (geometría, vehículos) y otras que son observables (velocidad media, densidad, flujo), y entre éstas se relacionan e impactan en la capacidad total de flujo vehicular.

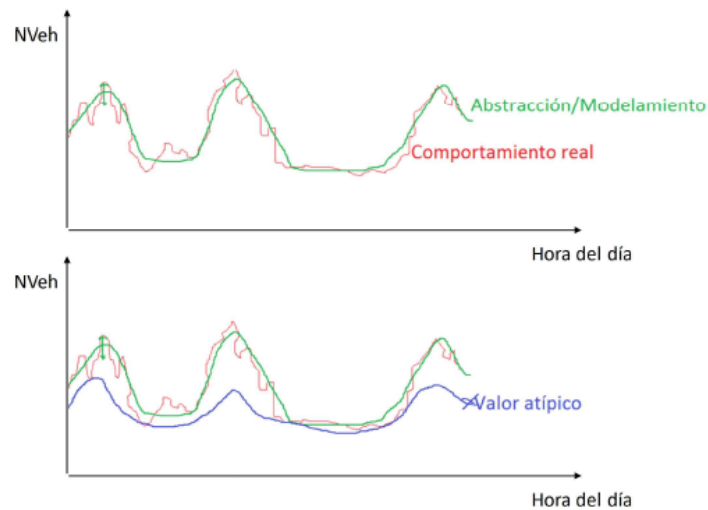


FIGURA N° 3.22: Modelamiento de la capacidad de la vía

La capacidad de las vías puede afectarse por comportamientos inapropiados debido a la falta de control de vías. Uno de los aspectos que tienen mayor impacto es la subutilización de las vías como aparcamiento libre. A través de vuelos no tripulados (drones) se pueden observar algunas condiciones de tráfico y la falta de fiscalización sobre malas prácticas en el uso de la infraestructura vial.

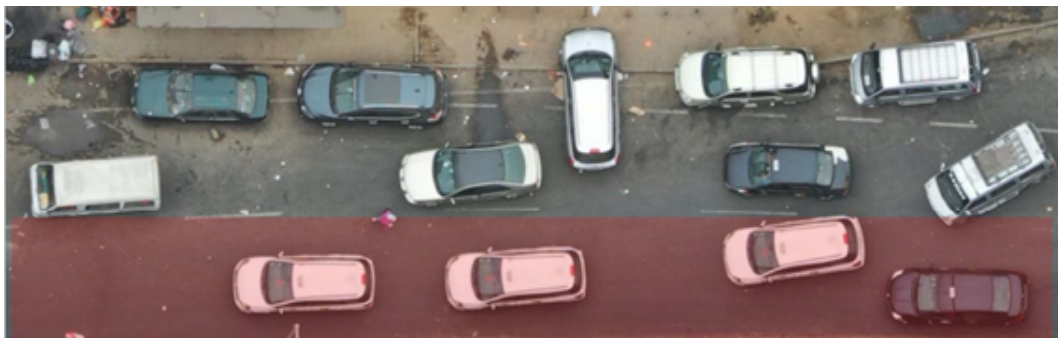


FIGURA N° 3.23: Subutilización del primer carril como zona de estacionamiento, y la segunda vía como parada de vehículos de carga y pasajeros

De otro lado, las maniobras que realizan los conductores pueden generar una reducción de la capacidad vial. Las maniobras pueden alterar la velocidad media, y reducir la densidad vehicular. En las imágenes se pueden observar el tránsito de vehículos entre dos carriles, lo cual disminuye la capacidad total de la vía.

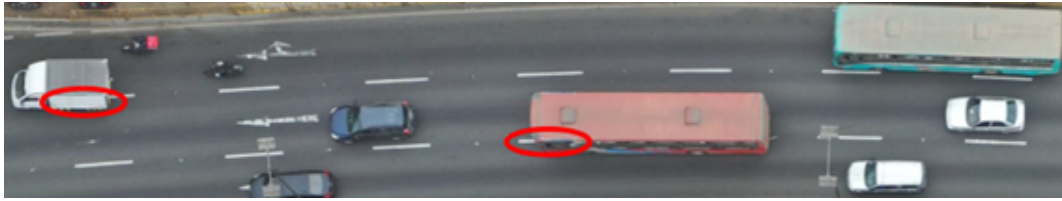


FIGURA N° 3.24: Tránsito sobre la vía Panamericana Norte. Se observan las maniobras y el tránsito sobre la señalización intermedia de dos vías, lo que reduce la capacidad vial

Las acciones que se recomiendan incorporar en las políticas públicas de tránsito, asignadas a las municipalidades y al ente de políticas (MTC), son:

- Monitorear y fiscalizar las condiciones de estacionamiento de vehículos, así como los puntos de carga/descarga de mercancía, así como la subida y bajada de pasajeros de transporte público.
- Monitorear y fiscalizar la conducción y las maniobras en vías de alta capacidad, debido al impacto de las maniobras en la reducción de la capacidad y flujo de vehículos.

3.2.2.1 Consumo Energético del Sistema de Transporte Público

Se ha realizado la evaluación de escenarios en el área metropolitana de Lima y Callao. En Lima existen dos sistemas de transporte público masivo en operación, Metro (Línea 1) y buses segregados o carriles preferenciales (Metropolitano en vía exclusiva, y Corredores, en vías compartidas y segregadas por tramos. Para la evaluación de los consumos energéticos, se ha realizado la estimación de los siguientes escenarios para el Transporte Público Masivo en Lima, considerando capacidades horarias máximas por sentido (pas/hora/sentido):

- Escenario 2023, línea base según los reportes de capacidad de los diferentes sistemas de transporte.
- Escenario 2050 (1), se proyecta considerando un ritmo de implementación según lo ocurrido recientemente, es decir, que para el año 2050 se cuenta con el incremento de capacidad de L1 (1 M Pas diarios), operación de L2, operación de L3, duplicación de capacidad de corredores.
- Escenario 2050 (2), se proyecta un ritmo de implementación optimista, es decir, que para el año 2050 se cuenta con el incremento de capacidad de L1 (1 M Pas diarios), operación de L2, operación de L3, operación de L4. operador de la segunda línea del Metropolitano (COSAC 2) y triplicación de capacidad de corredores.

Tipo de Sistema de Transporte Público Masivo	Capacidad horaria	Pas. Diarios	Dist. Prom. Km	Escenario 2023 MPas-km
Línea 1	24,000	600,000	15	9
Línea 2	48,000	-	-	-
Línea 3	-	-	-	-
Línea 4	-	-	-	-
Metropolitano COSAC 1	24,000	600,000	15	9
Metropolitano COSAC 2	-	-	-	-
Corredores	5,000	200,000	10	2
MPas-km transportados				20

TABLA N° 3.7: Estimación de la Capacidad Transportada (Millón Pas-km diarios) en el año 2023

Tipo de Sistema de Transporte Público Masivo	Capacidad horaria	Pas. Diarios	Dist. Prom. Km	Escenario 2050 (1) MPas-km
Línea 1	24,000	1,000,000	15	15
Línea 2	48,000	1,000,000	15	15
Línea 3	48,000	1,200,000	15	18
Línea 4	-	-	-	-
Metropolitano COSAC 1	24,000	600,000	15	9
Metropolitano COSAC 2	-	-	-	-
Corredores	5,000	400,000	10	4
MPas-km transportados				61

TABLA N° 3.8: Escenario 2050(1): Estimación de la Capacidad Transportada (Millón Pas-km diarios) en el año 2050, en condición tendencial según el nivel de implementación de los proyectos de Transporte Público Masivo

Tipo de Sistema de Transporte Público Masivo	Capacidad horaria	Pas. Diarios	Dist. Prom. Km	Escenario 2050 (2) MPas-km
Línea 1	24,000	1,000,000	15	15
Línea 2	48,000	1,000,000	15	15
Línea 3	48,000	1,200,000	15	18
Línea 4	48,000	750,000	15	11
Metropolitano COSAC 1	24,000	600,000	15	9
Metropolitano COSAC 2	24,000	600,000	15	9
Corredores	5,000	600,000	10	6
MPas-km transportados				83

TABLA N° 3.9: Escenario 2050(2): Estimación de los Capacidad Transportada (Millón Pas-km diarios) en el año 2050, en condición optimista según el nivel de implementación de los proyectos de Transporte Público Masivo

En los escenarios presentados, los sistemas de transporte público masivo incrementarían su capacidad de pasajeros transportados (pas-km) entre 3 y 4 veces hacia el año 2050 con respecto al año 2023, siempre y cuando se cumplan las hipótesis mínimas de construcción de nueva infraestructura y ampliación de capacidad de los sistemas de transporte público existente. Para el cálculo de la energía proyectada al año 2050, se tomará en cuenta la tasa de movilidad en el 2023 (aproximadamente 2.5 viajes/día-persona, tomando en cuenta que en el año 2017 AATE proyectaba una tasa de movilidad de 2.3 viajes/día-persona (Flores, 2018)). Se considera que la movilidad en el año 2050 se incrementará a 3.5 viajes/día-persona como consecuen-

cia de la evolución de la economía y del desarrollo de la accesibilidad a los servicios urbanos.

Escenarios	Población	Movilidad	Viajes	Dist. Media	Pas-km	% STPM
Lima y Callao (2023)	11.0	2.5	28	25	688	3%
Lima y Callao (2050) tendencia	13.5	3.0	41	25	1,013	6%
Lima y Callao (2050) optimista	13.5	3.5	47	25	1,181	7%

TABLA N° 3.10: Escenarios de distancia recorrida y pasajeros transportados, 2023 y 2050 para Lima y Callao

Pese a la importancia del sistema de transporte público masivo en la mejora de la movilidad y de las externalidades del transporte (congestión, polución, consumo energético), el impacto actual de la partición modal es marginal (3%) y en el año 2050 sería todavía marginal (6%) en el escenario tendencial e incluso en el escenario optimista (7%). Para la distribución de los pasajeros transportados en el año 2050, se asume que en el escenario tendencial, el 35 % de los desplazamientos se realicen en auto debido al incremento de la riqueza individual y a la disminución de las barreras de acceso para la compra de automóviles. En tanto, que en el escenario optimista, se asume que el 30 % de los desplazamientos se realizan en modo Auto.

Descripción	Modos de Transporte				Pas. transportados M km-pas			
	Autos	Micrb	MI+Co	Metro	Autos	Micrb	MI+Co	Metro
Lima (2023)	23 %	74 %	2 %	1 %	158.1	509.4	14.0	6.0
Lima (2050) tendencia	35 %	59 %	2 %	4 %	354.4	597.1	18.3	42.7
Lima (2050) optimista	30 %	64 %	3 %	4 %	354.4	760.3	33.3	50.0

TABLA N° 3.11: Distribución de los pasajeros transportados según modo

Nota: Micrb= Microbús, MI+Co (Metropolitano + Corredor).

Para evaluar el efecto de los pasajeros transportados sobre el consumo energético, se realizan algunas hipótesis sobre el nivel de ocupación de los vehículos:

- Auto: 2.5 pasajeros en promedio por vehículo.
- Microbús: 15 pasajeros en promedio por vehículo.
- Metropolitano y Corredores: 50 pasajeros en promedio por vehículo.
- Metro: 450 pasajeros en promedio por tren.

A partir de estas suposiciones, que además coinciden con los reportes de pasajeros transportados y recorrido de la Línea 1, se presentan los siguientes escenarios de recorrido en km según tipo de vehículo:

Escenarios	Autos	Microbuses	Metropol+ Corr	Metro
Lima y Callao (2023)	63	34	0.3	0.013
Lima y Callao (2050) tendencia	142	40	0.4	0.095
Lima y Callao (2050) optimista	142	50	0.7	0.111

TABLA N° 3.12: Recorrido de vehículos, en millones de km por día (M km/día) en diversos escenarios

Para hallar la correspondencia estimada con el consumo energético se han realizado alguna hipótesis:

- Uso vehicular de la gasolina (gasohol), que tienen un consumo promedio de 30 km/gal. También se estima que el 60% de los recorridos se realizan en este tipo de vehículos.
- Uso vehicular del GLP, que se estima con un consumo promedio de 24 km/gal, como proporción de su contenido energético por galón. Se ha considerado que el 20% de los autos usan este combustible.
- Uso vehicular del GNV, que se estima con un consumo promedio de 10 km/m^3 estándar, como proporción de su contenido energético. Se ha considerado que los buses del Metropolitano tienen este recurso energético. Se ha considerado que el 20% de los autos usan este combustible.
- Uso vehicular del Diésel (D2), que se estima con un consumo promedio de 15 km/gal, debido a que se utiliza para motores más grandes, como combis, microbuses y buses.
- Consumo energético de electricidad por el Metro Línea 1 de Lima. De acuerdo al reporte (Línea-1, 2019), el consumo es de 15 kWh/km.

A partir de las hipótesis descritas se propone el cálculo del consumo energético según tipología vehicular, tanto para la condición actual como para los escenarios prospectivos del año 2050:

Escenario	Gasohol (10 ³ bbl)	GLP (10 ³ bbl)	GNV (10 ⁶ m ³ std)	D2 (10 ³ bbl)	Electricidad (GWh)
Lima (2023)	25.10	10.46	1.18	53.90	0.20
Lima (2050) tendencia	67.50	28.13	3.16	63.19	1.42
Lima (2050) optimista	67.50	28.13	3.16	78.69	1.67

TABLA N° 3.13: Escenarios de Consumo de Combustibles

Estas cantidades de energía son equivalentes al 50% del consumo energético según el Balance Nacional de Energía (DGEE-MINEM, 2021), lo que corresponde al 50%

del parque automotor que se concentra en Lima, lo cual corrobora que la hipótesis estimada es creíble o válida. Con el consumo vehicular descrito, se puede calcular el equivalente de Energía en GWh, lo cual permitirá tener una referencia de la generación de energía requerida para compensar una electrificación del parque automotor:

Escenario	Gasohol eq. GWh	GLP eq. GWh	GNV eq. GWh	D2 eq. GWh	Electr. GWh	GWh/día
Lima (2023)	35.8	12.3	13.0	85.8	0.2	147
Lima (2050) tendencia	96.3	33.1	35.0	100.6	1.4	266
Lima (2050) optimista	96.3	33.1	35.1	125.3	1.7	291

TABLA N° 3.14: Consumo de Energía en Diferentes Escenarios

Bajo esta hipótesis se observa que un cambio hipotético del actual consumo energético por una matriz eléctrica, requeriría un consumo diario de 147 GWh sólo para Lima, o el doble para el Perú (alrededor de 300 GWh), lo que supera largamente la energía producida diariamente por la matriz eléctrica peruana actualmente, que se sitúa sobre 180 GWh, por lo que una electrificación repentina y completa del parque automotor requeriría triplicar la actual capacidad de generación eléctrica. Uno de los aspectos claves de la electrificación del transporte es la capacidad de generar electricidad a partir de fuentes renovables. En el siguiente cuadro se plantea la capacidad de nuevas plantas de generación renovable tomando en cuenta un Factor de Planta (F.P.) de 0.30, y que no toma en cuenta los requerimientos de almacenamiento temporal de electricidad que se requiere por la variabilidad de la fuente:

Escenario	GWh/día	F.P. renov.	Potencia GW
Lima (2023)	147	0.30	20
Lima (2050) tendencia	266	0.30	37
Lima (2050) optimista	291	0.30	40

TABLA N° 3.15: Escenarios de Consumo de Electricidad

Los requerimientos de potencia instalada para la transición energética hacia la electromovilidad requiere un parque energético renovable que tendría mayor capacidad que el actual, y con la proyección de consumo energético hacia el año 2050, se requeriría aún el doble. Estas consideraciones toman como hipótesis el actual consumo energético con el parque automotor existente, es posible que los valores se ajusten en función de la eficiencia energética, y de otro lado, se requiera mayor infraestructura de baterías o sistemas de respaldo para equilibrar la futura red eléctrica dedicada al transporte. En todos los casos, se requeriría casi duplicar la producción energética si se requiere electrificar el parque automotor actual (2023, 147 GWh diarios), y en el 2050, se requeriría triplicar la producción energética de electricidad (entre 266 GWh y 291 GWh diarios). Estos escenarios demuestran que la necesidad de inversión en

la electrificación es importante. En las subastas RER organizadas por el Estado Peruano, se ha observado una tendencia interesante hacia la reducción de los costos de inversión por potencia instalada, en la cuarta subasta se observa que la energía eólica bordea 1.4 M USD/MW y que la energía fotovoltaica bordea 1.2 M USD/MW (Schmerler et al., 2019).

Subasta	Descripción	Año firma	Año POC	Pot. Instala- da (MW)	Monto inver- sión (M USD)	M USD / MW
1	Central de Cogeneración Paramonga	2010	2010	23	31	1.35
1	Central Hidroeléctrica Shima	2010	2019	5	20.9	4.18
2	Central Eólica Tres Hermanas	2011	2016	97.15	185	1.90
2	Central Hidroeléctrica Huatziroki	2011	2021	19.2	23.2	1.21
3	Central Hidroeléctrica Hydrika 1	2014	2018	6.6	22.4	3.39
3	Central Hidroeléctrica Hydrika 2	2014	2018	4	8.2	2.05
3	Central Hidroeléctrica Hydrika 3	2014	2018	10	30.62	3.06
3	Central Hidroeléctrica Hydrika 4	2014	2018	8	18.61	2.33
3	Central Hidroeléctrica Hydrika 5	2014	2018	10	21.89	2.19
4	Central Solar Rubí	2016	2018	144.48	165	1.14
4	Parques Eólicos Huambos	2016	2020	18.4	25.9	1.41
4	Parques Eólicos Duna	2016	2020	18.4	26.1	1.42

TABLA N° 3.16: Costos de Inversión en Generación RER, según subastas realizadas en el Perú, datos analizados a partir de: (Schmerler et al., 2019)

Tomando en cuenta la tendencia de disminución de costos de inversión en capacidad instalada de energía solar y eólica, se considera el costo de 1 M USD/ MW de capacidad instalada, entonces, se requieren inversiones del orden de 40 mil millones USD hasta el año 2050, a un ritmo de 2 mil millones USD anuales, sólo con el propósito de una transición energética para el transporte.

3.2.3 Diagnóstico del parque automotor terrestre

3.2.3.1 Tipos de Vehículos

Automóviles MCI (Motor de Combustión Interna): Estos son automóviles que funcionan con gasolina, diésel, gas licuado o gas natural, y combustibles sintéticos. Tienen un motor que quema combustible internamente para generar energía a partir de la expansión de los gases, que luego se transmite a las ruedas para propulsar el vehículo. Las pérdidas para generar el movimiento son altas.

Automóviles BEV (Vehículo eléctrico a batería): Los BEV son automóviles comple-

tamente eléctricos que funcionan únicamente con un motor eléctrico y dependen de un gran paquete de baterías para el almacenamiento de energía, las cuales están dispuestas en un arreglo adherido a la carrocería. No tienen motor de combustión interna y producen cero emisiones del tubo de escape. Los BEV deben recargarse enchufándolos a una estación de carga o a un tomacorriente residencial.

Automóviles PHEV (Vehículo eléctrico híbrido enchufable): Los PHEV combinan un motor de combustión interna con un motor eléctrico y una batería más grande. Se pueden cargar enchufándolos a una estación de carga o tomacorriente residencial, y además cuentan con un depósito de combustible que les permite funcionar con gasolina o diésel. Los PHEV pueden funcionar con energía eléctrica para distancias más cortas antes de cambiar al motor de combustión interna. El motor de combustión alimenta de electricidad a la batería, lo que incrementa su independencia antes de una nueva recarga

Automóviles HEV (Vehículo Eléctrico Híbrido): Los HEV utilizan un motor de combustión interna y un motor eléctrico para impulsar el vehículo. El motor eléctrico asiste al motor y ayuda a mejorar la eficiencia del combustible al capturar y utilizar la energía durante el frenado o la desaceleración. Sin embargo, a diferencia de los PHEV, los HEV no se pueden enchufar para recargar la batería; la batería se carga a través del motor de combustión interna y el frenado regenerativo.

Automóviles FCEV (vehículo Eléctrico con Celda de Combustible): utiliza una celda de combustible para generar electricidad a bordo. La celda de combustible en un FCEV combina hidrógeno de una fuente de combustible (almacenada en tanques de alta presión) con oxígeno del aire para producir electricidad a través de una reacción electroquímica. El oxígeno lo toma del aire circundante, previo tratamiento con filtros. Esta electricidad se utiliza luego para alimentar un motor eléctrico que propulsa el vehículo. El único subproducto de este proceso es el vapor de agua, lo que convierte a los FCEV en una opción de transporte limpia y respetuosa con el medio ambiente; sin embargo, es necesario tomar en cuenta efectos previos, y otras externalidades propias de todo vehículo eléctrico. Ofrecen los beneficios de los vehículos eléctricos, como cero emisiones del tubo de escape y un funcionamiento silencioso, al tiempo que brindan rangos de conducción más largos en comparación con los vehículos eléctricos de batería.

A continuación, se presenta los tipos de vehículos asociados a la transición energética:

Tipo de auto	Descripción	Fuente de Energía	Tipo de recarga
Auto ICE (MCI)	Automóvil tradicional con motor de combustión interna	Gasolina, Diésel, GLP o GNV, o combustibles sintéticos	Estaciones de servicio tradicionales
Auto BEV (VEB)	Automóvil totalmente eléctrico sin motor de combustión interna	Batería	Estación de carga (electrolinera) o tomacorriente residencial
Auto PHEV	Automóvil híbrido con motor eléctrico y motor de combustión interna	Batería y gasolina/diésel	Estación de carga (electrolinera) o enchufe, estación de carga tradicional
Auto HEV	Automóvil híbrido con motor eléctrico y motor de combustión interna	Batería (motor y freno regenerativo), gasolina/diésel	Estaciones de servicio tradicionales
Auto FCEV	Automóvil eléctrico propulsado por una pila de combustible hidrógeno	Hidrógeno	Recarga en estaciones de servicio (hidrogeneras)

TABLA N° 3.17: Tipos de vehículos para la transición energética del Transporte

3.3 Externalidades del Transporte

3.3.1 Equilibrio económico y externalidades del Transporte Terrestre Urbano

3.3.1.1 Valor Social del Tiempo (VST)

$$g = p + vst \times t + \theta \quad (3.4)$$

Donde: g: Precio o gasto generalizado del viaje. p: Tarifa o costo monetario del viaje, como costos de combustible, mantenimiento, etc. θ : Valoración cualitativa del viaje.

De los estudios realizados (Córdova-Chavez y Santa-María-Dávila, 2021) en encuestas de tres (03) líneas de autobuses, los valores sociales del tiempo oscilan entre S/. 6.85 (USD 2.01, NSE E) y S/. 21.1 (USD 6.19, NSE B).

3.3.1.2 Costo total del propietario (CTP o TCO)

También conocido como TCO por las siglas en inglés (Total Cost Ownership), que contempla la comparación de todos los tipos de costos asociados a un vehículo, desde la adquisición, los costos operativos (combustible, repuestos, mantenimiento, seguros, etc.), así como la opción de reventa al final de la vida. Para tal efecto, se tomaron datos disponibles para poder comparar los vehículos eléctricos frente a los vehículos MCI, y se realizaron las siguientes preguntas:

1. ¿Cuál es el valor actual neto del costo total del propietario (TCO) de todas las opciones? ¿Cuál es el costo por km recorrido? ¿Cuál debería ser el costo de la electricidad para que el vehículo eléctrico tenga el mejor desempeño económico?
2. ¿Qué políticas son recomendables para realizar la transición energética hacia la electromovilidad?

Se tomaron algunas hipótesis, y se procedió a comparar las siguientes opciones:

1. Auto con motor de combustión interna (MCI), combustible gasolina.
2. Auto con motor de combustión interna (MCI), combustible gas (GLP).
3. Auto eléctrico con baterías (VBE).
4. Auto híbrido, gasolina y motor eléctrico.
5. Auto híbrido, enchufable (plug in).

Las hipótesis generales fueron: Tipo de cambio (Soles/USD): 3.9. Inflación 3%. Tasa de descuento 8%.

Vehículo de comparación	Veh. MCI	Alt. Gas	Alt. VE	Alt. Híbrido	Alt. Híbrido Plug-in
Marca	COROLLA 1.8 CVT	COROLLA 1.6 XLI MT	NISSAN LEAF 150PS N-CONNECTA 40KWH	COROLLA 1.8 SEG HV	Prius PLUG IN - Híbrido
Tipo de motor	LE 4dr Sedan (1.8L 4cyl CVT)	1ZR-FAE - 4 Cilindros	2.ZERO - 2 MOTORES	2ZR-FXE - 4 cilindros en línea	CILINDRO 1.8 L - con batería Litio-ion
Potencia (HP)	139	130	150	120.7	122
Eficiencia (MJ/MJ primario)	25%	25%	80%	40%	40%
Peso (kg)	1,637	1,690	1,490	1,825	1,855
Independencia (km)	600	676	172	945	550
Tiempo de recarga (min)	4	6	30	30	30
Representante local	Toyota	Toyota	NISSAN	Toyota	Toyota
Talleres de mantenimiento (#)	20	20	1	2	2
Tiempo de posesión, evaluación (años)	5	5	5	5	5

FIGURA N° 3.25: Comparación general de los vehículos

Se eligió la tipología de automóviles que tengan la mayor coincidencia en cuanto a usos, tamaño, para que los resultados puedan tener coherencia y puedan ser comparables entre ellos.

Vehículo de comparación	Veh. MCI	Alt. Gas	Alt. VE	Alt. Híbrido	Alt. Híbrido Plug-in
Marca	COROLLA 1.8 CVT	COROLLA 1.6 XLI MT	NISSAN LEAF 150PS N-CONNECTA 40KWH	COROLLA 1.8 SEG HV	Prius PLUG IN - Híbrido
Tiempo de posesión, evaluación (años)	5	5	5	5	5
Costo de mantenimiento (USD/km)	0.0338	0.0338	0.0176	0.0248	0.0248
Costo de mantenimiento (USD)	1115	1115	582	820	820
Costo 1° año Mantenimiento	1115	1115	582	820	820
Costo 2° año Mantenimiento	1148	1148	600	844	844
Costo 3° año Mantenimiento	1183	1183	618	870	870
Costo 4° año Mantenimiento	1218	1218	636	896	896
Costo 5° año Mantenimiento	1255	1255	655	923	923
VNA Mantenimiento	5082	5082	2653	3737	3737
Costo de seguros	1781	1781	1864	1873	1873
Costo 1° año Seguros	1781	1781	1864	1873	1873
Costo 2° año Seguros	1834	1834	1920	1929	1929
Costo 3° año Seguros	1889	1889	1978	1987	1987
Costo 4° año Seguros	1946	1946	2037	2047	2047
Costo 5° año Seguros	2005	2005	2098	2108	2108
VNA Seguros	8118	8118	8496	8537	8537
Grifos / Electrolinerías (#)	100	100	0	100	100
Costo Tanque Lleno	160	116	16.74	160	160
Costo Combustible / km	0.27	0.17	0.10	0.17	0.18
Costo de sist. recarga en domicilio (USD)	N.A.	N.A.	4000	N.A.	5500
Costo de compra (USD)	20,308	21,350	31,670	29,600	37,245
Valor de reventa 100 mil km (USD)	5,077	5,338	7,918	7,400	9,311
Costo de inversión inicial (USD)	20,308	21,350	35,670	29,600	42,745
Costo de combustible (USD/1000km)	68	44	25	43	47
Recorrido Anual (km)	33,000	33,000	33,000	33,000	33,000
Costo 1° año	2,256	1,458	824	1,433	1,538
Costo 2° año	2,324	1,502	848	1,476	1,585
Costo 3° año	2,394	1,547	874	1,520	1,632
Costo 4° año	2,466	1,593	900	1,565	1,681
Costo 5° año	2,540	1,641	927	1,612	1,732
VNA Combustible	10,285	6,645	3,754	6,530	7,012
VNA (total) TCO	40,337	37,563	41,185	43,368	50,194

FIGURA N° 3.26: Comparación del costo total de propiedad (TCO) de los vehículos en USD

De acuerdo a la evaluación preliminar, la opción más atrayente a nivel de TCO es la del automóvil a gas (GLP), debido a los bajos precios del combustible. El vehículo eléctrico tiene un buen desempeño en cuanto a costos totales debido al precio de la electricidad (para el presente estudio, se ha considerado un valor de S/. 0.75/kWh, consumo residencial) y de la eficiencia del motor (85 a 90%), muy superior a la eficiencia del motor MCI (15 a 30%). Sin embargo, el costo inicial del VBE puede impactar, debido a que los usuarios están muy influenciados por el precio de compra. La comparación puede tornarse en favor de los vehículos eléctricos, si se toma en cuenta el aporte de los gases de efecto invernadero. Para lo cual, se ha asignado un parámetro de conversión en función de los kilómetros recorridos:

Vehículo de comparación	Veh. MCI	Alt. Gas	Alt. VE	Alt. Híbrido	Alt. Híbrido Plug-in
Marca	COROLLA 1.8 CVT	COROLLA 1.6 XLI MT	NISSAN LEAF 150PS N-CONNECTA 40KWH	COROLLA 1.8 SEG HV	Prius PLUG IN - Híbrido
Tiempo de posesión, evaluación (años)	5	5	5	5	5
Recorrido Anual (km)	33,000	33,000	33,000	33,000	33,000
VNA (total) TCO	40,337	37,563	41,185	43,368	50,194
Emisiones de CO2 (g/km)	187	179	55	110	59
Emisiones de CO2 (t)	31	30	9	18	10
Diferencia de emisiones período 5 años, VEB - MCI (tCO2eq) =====>			22		

FIGURA N° 3.27: Comparación emisiones de gases de efecto invernadero en un período de 5 años de diferentes tipos de vehículos

Para una comparación proyectada al 2050, se evaluó el comportamiento de los precios de los recursos energéticos en el Perú. Se puede evidenciar que, en los últimos 11 años, el único recurso energético con crecimiento constante es la electricidad. Los recursos energéticos de origen fósil tienen un comportamiento aleatorio, pero estable en el ciclo de varios años, e incluso, el gas tiene un comportamiento ligeramente en descenso. Esta condición no posibilitaría una transición energética eficaz en el sector transporte urbano terrestre.

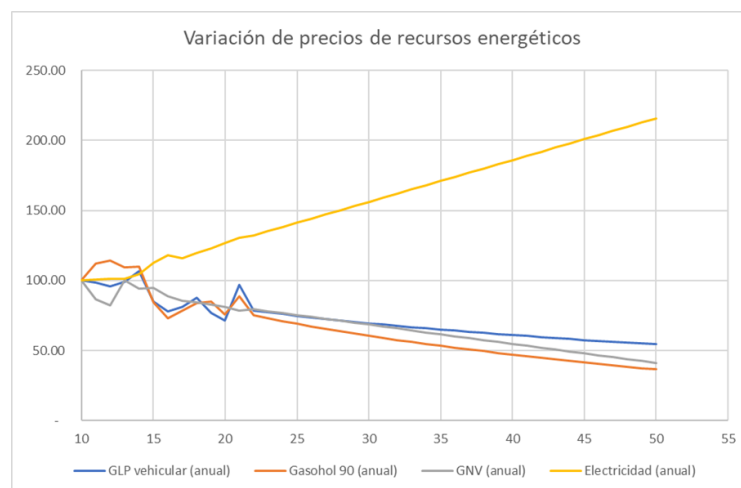


FIGURA N° 3.28: Proyección hacia el año 2050 de los precios de los recursos energéticos peruanos

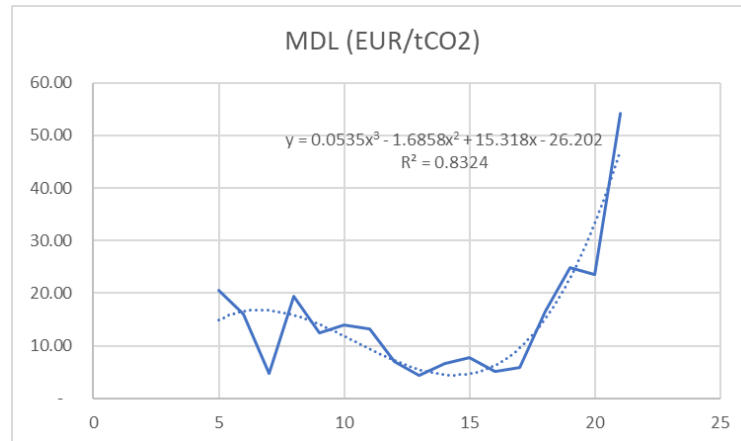


FIGURA N° 3.29: Comportamiento de los permisos de emisiones de carbono de la Comunidad Europea

El comportamiento del mercado de emisiones, puede brindar algunas luces optimistas sobre el crecimiento del precio del carbono. Diversos estudios citan que el costo que permitirá lograr la transición energética varía entre 150 y 200 Euros / tCO_{2eq} . El comportamiento de los últimos 15 años del mercado del carbono, permite esperar que el precio crezca significativamente en las décadas venideras.

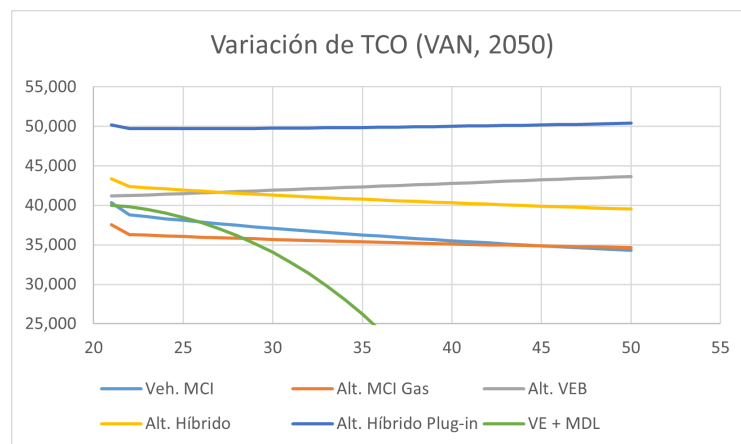


FIGURA N° 3.30: Variación de los costos totales de propiedad (TCO) proyectados al 2050

Si se cuenta con la proyección exponencial actual de los permisos de emisiones, es probable que, en el año 2030, el costo total de propiedad de los vehículos eléctricos tengan el menor TCO, y en el año 2035, sean significativamente competitivos frente a otro tipo de vehículos. Sin embargo, este escenario requiere una política clara para el control de las emisiones, lo cual todavía no se ha planteado ni diseñado en el Perú; adicionalmente, requerirían políticas impositivas o restrictivas por cuotas para valorizar el costo de las emisiones de Gases de Efecto Invernadero.

3.3.2 Análisis del Ciclo de Vida de los recursos energéticos

Se ha realizado una exploración del nivel de emisiones de CO₂eq por la generación eléctrica, se han estudiado casos como la generación solar, eólica, térmica e hídrica. También se ha estudiado las alternativas de aporte de gases de efecto invernadero (GEI) de acuerdo a las distancias recorridas, según la unidad funcional pasajero – kilómetro (pas-km).

Tipo de Generación	Alcance	Unidad funcional 1 (potencia)	Unidad funcional 2 (energía)	Diseño	Construcción	Operación	Fin de Vida
Centrales Eólicas	Generación eléctrica	MW-cap	MWh-gen				
Centrales Solares	Generación eléctrica	MW-cap	MWh-gen				
Centrales Hidroeléctricas	Generación eléctrica	MW-cap	MWh-gen				
Centrales Térmicas Diesel	Generación eléctrica	MW-cap	MWh-gen				
Centrales Geotérmicas	Generación eléctrica	MW-cap	MWh-gen				
Centrales Térmicas Gas	Generación eléctrica	MW-cap	MWh-gen				
Líneas de Transmisión	Transporte de energía	kV-km					

FIGURA N° 3.31: Límites del análisis del sistema ACV para generación eléctrica

Se propone el estudio de diferentes sistemas de generación. En la imagen se señalan los sistemas que serán estudiados en color verde, principalmente en las fases de construcción y operación, bajo la hipótesis de que son las fases que generan mayores emisiones de Gases de Efecto Invernadero.

Tipo de Generación	Potencia	Fase 1	Fase 2
Solar (suelo con pastos interandinos)	20 MW	Construcción	Operación 30 años, f.p. 0.3
Solar (suelo con bosques de baja densidad interandinos)	20 MW	Construcción	Operación 30 años, f.p. 0.3
Eólica (suelo con pastos interandinos)	6 MW	Construcción	Operación 30 años, f.p. 0.5
Eólica (suelo con bosques de baja densidad interandinos)	6 MW	Construcción	Operación 30 años, f.p. 0.5
Mini Hidro (suelo con pastos interandinos)	600 KW	Construcción	Operación 30 años, f.p. 0.7
Mini Hidro (suelo con bosques de baja densidad interandinos)	600 KW	Construcción	Operación 30 años, f.p. 0.7
Térmica (suelo con pastos interandinos)	500 KW	Construcción	Operación 30 años, f.p. 0.9
Térmica (suelo con bosques de baja densidad interandinos)	500 KW	Construcción	Operación 30 años, f.p. 0.9

FIGURA N° 3.32: Hipótesis básicas de las centrales de generación eléctrica analizadas

Para el análisis, se han tomado como referencia algunos expedientes técnicos referenciales de centrales de generación, con diferente potencia. El parque solar se ha tomado como referencia una infraestructura de 20 MW, con un factor de planta de 0.3. El parque eólico cuenta con 6 MW de capacidad, con un factor de planta de 0.5. La mini central hidroeléctrica de 600 kW de capacidad y un factor de planta referencial de 0.7. Para la central térmica, se tomará en cuenta un generador de 500 kW con un factor de planta de 0.9. Se ha supuesto que las centrales de generación se conectan a 5 km de distancia a la red interconectada. No se ha incluido el cierre de proyecto o fin de vida, ni el diseño. Esto puede generar mayores GEI, o si se hace una buena disposición final, podría generarse créditos.

Entradas	Proceso	Salidas
	Construcción de Parque Solar	
Materiales Cemento Acero de refuerzo Agua Aditivos Acero estructural Combustible Conductores MT, FO, tierra Estructuras de soporte	Campamentos Construcción de Oficinas Construcción de Almacenes Cercado perimetral Instalación de casetas de guardiana Instalaciones provisionales Obra Civil Destroce Caminos de acceso Excavación y cimentaciones Plataformados Obras de concreto Montaje Electromecánico Montaje de módulos fotovoltaicos Sistema de baterías e inversores de corriente Tendido de conductores MT, FO y Tierra Puesta a Tierra Instalación de transformadores Patio de llaves Línea de Transmisión Cimentaciones Torres de transmisión Tendido de conductores Pruebas Energización	Producto o infraestructura (inc. Unidad Funcional) MWh-gen Parque solar Transformadores y Patio de Llaves Línea de Transmisión Residuos Material excedente del corte Residuos de construcción (acero, concreto, madera) Residuos domésticos Bolsas de cemento Partículas de asfalto Herramientas abandonadas en mal estado Aguas grises Restos de bitumen Emisiones Atmosféricas CO₂eq o GEI NOx SOx PM2.5 PM10 VOCs O3 Contaminación y otros impactos Contaminación sonora Polvo en suspensión Contaminación del suelo Contaminación del agua superficial Contaminación del agua subterránea Efecto barrera Uso de espacio urbano y territorio interurbano Contaminación visual Consumo de Energía
Equipos Módulos fotovoltaicos Baterías Inversores de corriente Sistema de Puesta a Tierra		

FIGURA N° 3.33: Límites del Análisis de Ciclo de Vida total

Para analizar el sistema, se presentan las entradas al sistema evaluado en la fase de construcción. Las entradas se clasifican en materiales y equipos, los cuales se han presentado de manera referencial. Luego se presenta el proceso principal, en este caso, la construcción del proyecto, tomando en cuenta los inventarios de campamentos, obra civil, montaje electromecánico, y la línea de transmisión para conectar la generación con la red.

Entradas	Proceso	Salidas
	Construcción de Parque Eólico	
Materiales Cemento Acero de refuerzo Agua Aditivos Acero estructural Combustible Conductores MT, FO, tierra	Campamentos Construcción de Oficinas Construcción de Almacenes Cercado perimetral Instalación de casetas de guardiana Instalaciones provisionales Obra Civil Destroce Caminos de acceso Excavación y cimentaciones Plataformados Obras de concreto Montaje Electromecánico Montaje de aerogeneradores Tendido de conductores MT, FO y Tierra Puesta a Tierra Trabajos finales Instalación de transformadores Patio de llaves Línea de Transmisión Cimentaciones Torres de transmisión Tendido de conductores Pruebas Energización	Producto o infraestructura (inc. Unidad Funcional) MWh-gen Unidades de Aerogeneración Transformadores y Patio de Llaves Línea de Transmisión Residuos Material excedente del corte Residuos de construcción (acero, concreto, madera) Residuos domésticos Bolsas de cemento Partículas de asfalto Herramientas abandonadas en mal estado Aguas grises Restos de bitumen Emisiones Atmosféricas CO₂eq o GEI NOx SOx PM2.5 PM10 VOCs O3 Contaminación y otros impactos Contaminación sonora Polvo en suspensión Contaminación del suelo Contaminación del agua superficial Contaminación del agua subterránea Efecto barrera Uso de espacio urbano y territorio interurbano Contaminación visual Consumo de Energía
Equipos Cargador Frontal Camiones Volquetes Retroexcavadora Aerogeneradores Sistema de Puesta a Tierra		

FIGURA N° 3.34: Límites del Análisis de Ciclo de Vida en la etapa de construcción

Para el análisis de la huella de carbono para la construcción del Parque Eólico, se consideran las entradas de materiales y equipos correspondientes al tipo de infraestructura. En el proceso, también se consideran de forma general los campamentos, la obra civil, el montaje electromecánico y la línea de transmisión para conectar a la red. Se tomaron las mismas consideraciones para las centrales hidroeléctricas y térmicas.

Gases / Procesos	kg CO ₂ eq/kg	Fuente
Dióxido de Carbono	1.000	Universal, (IPCC 2007)
Óxido de Nitrógeno	298.000	Universal, (IPCC 2007)
Metano	25.000	Universal, (IPCC 2007)
Transporte, auto compacto (km)	0.133	US Federal Register, Vol. 74, N°186, 2009
Transporte, camioneta grande (1000 km)	0.222	US Federal Register, Vol. 74, N°186, 2009
Muro de ladrillo m2 (artesanal)	38.800	PUCP, 2012
Muro de ladrillo m2 (mecanizado)	30.800	PUCP, 2012
Muro de ladrillo m2 (bloquetas concreto)	18.070	PUCP, ACV de Ladrillos y Bloquetas Cusco
Actividad de una persona (día-Perú)	8.219	Aproximadamente
Materiales	kg CO ₂ eq/kg	Fuente
Cemento	0.629	INACEM, 2019
Agregados	0.010	Aprox. Sjunnsson (2005)
Mezclado del Concreto 35 MPa	0.112	PCA (Marceau et al, 2007)
Mezclado del Concreto 21 MPa	0.098	PCA (Marceau et al, 2007)
Acero Estructural	1.001	Ochsendorf et al, 2011
Acero Estructural (primer uso)	2.483	Ochsendorf et al, 2011
Acero Estructural (final del ciclo)	-1.482	Ochsendorf et al, 2011
Acero de Refuerzo	0.992	Ochsendorf et al, 2011
Acero de Refuerzo (primer uso)	1.950	Perfil Ambiental del Acero - Harold Michel Torres, 2012
Acero de Refuerzo (final del ciclo)	-1.058	Ochsendorf et al, 2011
Madera	0.262	Valor más alto, Ochsendorf et al, 2011
Gasolina (kg CO ₂ / gal)	9.008	Guía Práctica para el Cálculo de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), Cataluña - España, Oficina Catalana del Cambio Climático (OCCC), 2013
Diésel (kg CO ₂ / gal)	9.879	Guía Práctica para el Cálculo de Emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), Cataluña - España, Oficina Catalana del Cambio Climático (OCCC), 2013
Asfalto, bitumen (material)	0.428	Kalouosh et al, 2010
Colocación de asfalto	0.066	Kalouosh et al, 2010
Aluminio	1.600	International Aluminium Institute (2006) - The Aluminium Sector Greenhouse Gas Protocol.
Equipos motorizados	5.844	Chester - ITS - LCA Inventory of Passenger Transportation in USA
Pintura látex	3.540	CEPE (2018) - Product Environmental Footprint Category Rules - Decorative Paints. Tabla 57/84
Panel fotovoltaico 320 Wp	459.400	Talebian (2020) - Life cycle assessment of polycrystalline solar panel production in Iran
Cobre	6.330	Liberman (2003)
Equipos	kg CO ₂ eq/kW	Fuente
Aerogenerador	0.000623	Cortés L., P. 2019, Análisis comparativo de la Huella de Carbono de Un Parque Eólico en Tenerife- España.
Turbina Pelton	9.448	Beltrán et al, 2021. Emisiones de CO ₂ de una turbina Pelton en laboratorio para condiciones de caudal entre 0.1 l/s y 0.2 l/s
Grupo Eléctrico	1041.431	García Q. M. 2016, Análisis de la Huella de Carbono de una industria de concreto y agregados en sus tres alcances, UNALM

FIGURA N° 3.35: Factores de conversión de Gases de Efecto Invernadero para materiales

Para la contabilidad de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) se han tomado las huellas inherentes de diferentes tipos de materiales, así como valores referenciales para la mano de obra, el combustible, el impacto del desbroce de pastos y de deforestación. Se han colocado las referencias bibliográficas de los valores. Pese a que se referencian valores fijos, se entiende que estos valores son valores medios y que pueden tener variabilidad según el método de inventario que se haya realizado, e incluso, según el país, el tipo de fábrica, el tipo de matriz energética eléctrica del país, entre otros factores.

Material	Contenido reciclado	Ratio de reciclaje al final de la vida útil	Fuente
Acero Estructural	60%	98%	World Steel, 2011
Acero de Refuerzo	70%	70%	World Steel, 2011
Aluminio	11%	100%	EAA, 2008
Concreto	0%	50%	Kelly, 1998

FIGURA N° 3.36: Impacto del reciclaje en la huella de carbono de los materiales de construcción

Otro aspecto que se debe tomar en cuenta, es la reducción de la huella de carbono de algunos materiales que se pueden reciclar.

3.3.3 Evaluación de Huella de Carbono – Parques Solares, etapa de construcción

Luego del cálculo de las diferentes fases, bajo las hipótesis explicadas previamente (límites del sistema, entradas, proceso, salidas), se realizó el inventario de huella de carbono durante la etapa de construcción para la construcción de un parque solar de 20 MW considerando dos escenarios, con desbroce de pastos y con deforestación. Debido a la gran ocupación de superficie de la planta solar, el efecto por el cambio de uso de suelo incrementa sensiblemente la huella de carbono de este tipo de generación eléctrica.

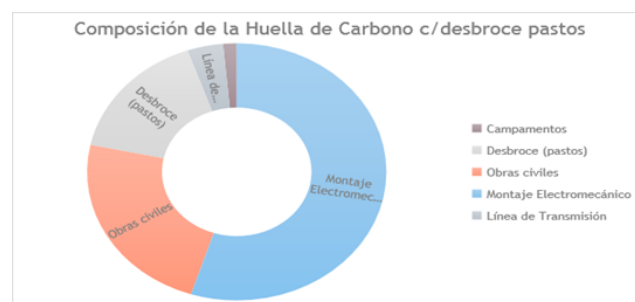


FIGURA N° 3.37: Huella de Carbono Parque Solar con suelos de pastos

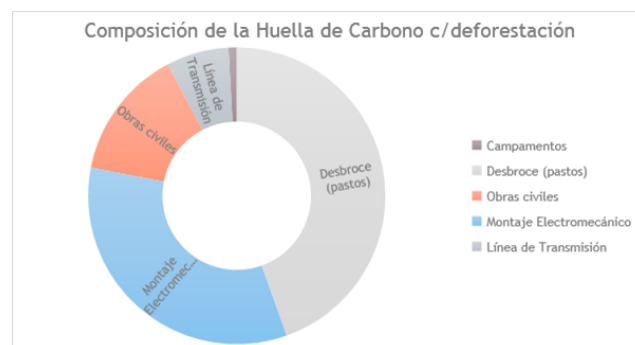


FIGURA N° 3.38: Huella de Carbono Parque Solar con suelos boscosos

Se puede observar que, si la implantación del proyecto se realiza sobre bosques inter-andinos, los suelos perderán su capacidad de almacenamiento de CO₂eq, y también el efecto de sumidero, es decir, de captura de carbono del aire para trasladarlo a la capa vegetal del suelo, a través de las raíces y de los compuestos orgánicos.

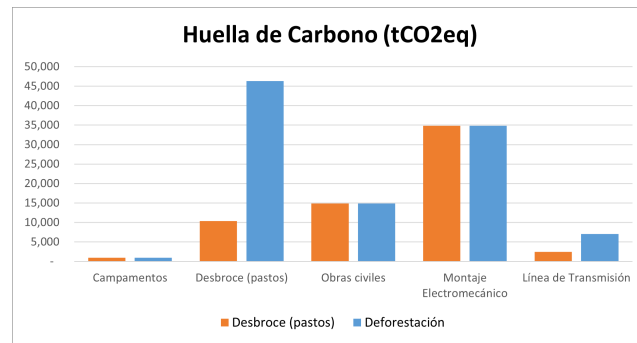


FIGURA N° 3.39: Huella de Carbono de Parque Fotovoltaico durante la Construcción

Se puede observar que, si la implantación del proyecto se realiza sobre bosques inter-andinos, los suelos perderán su capacidad de almacenamiento de CO₂eq, y también el efecto de sumidero, es decir, de captura de carbono del aire para trasladarlo a la capa vegetal del suelo, a través de las raíces y de los compuestos orgánicos.

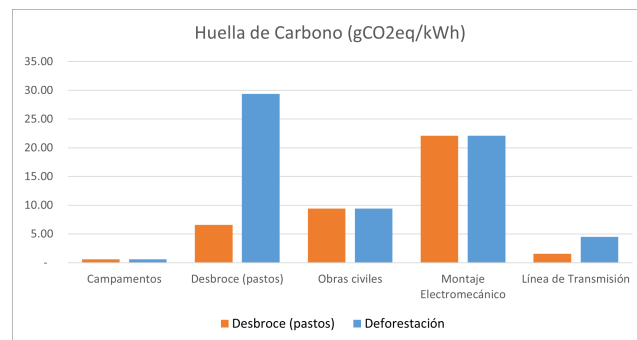


FIGURA N° 3.40: Huella de Carbono de Energía de Parque Fotovoltaico, Construcción

3.3.4 Evaluación de Huella de Carbono – Parques eólicos, etapa de construcción

Bajo la misma metodología de evaluación, se presenta el inventario de huella de carbono de los parques eólicos.

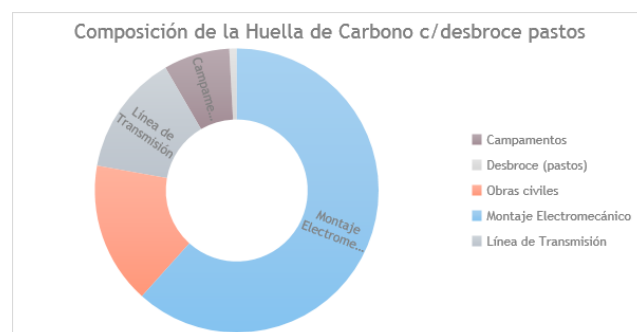


FIGURA N° 3.41: Huella de Carbono Parque Eólico con suelos de pastos

En el caso de los parques eólicos, la superficie que ocupan los aerogeneradores no es

extensiva por lo cual el impacto en el desbroce de pastos es mínimo.

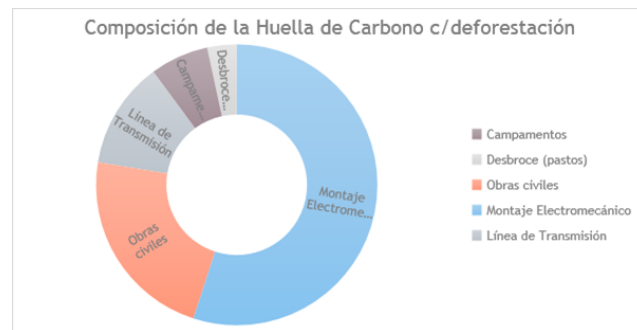


FIGURA N° 3.42: Huella de Carbono Parque Eólico con suelos boscosos

Cuando se hace la evaluación del cambio de uso de suelos el impacto aumenta ligeramente pero aún no constituye una gran huella de carbono. Sin embargo, es posible que se puedan observar otros impactos ambientales relacionados con la vida silvestre de las aves.

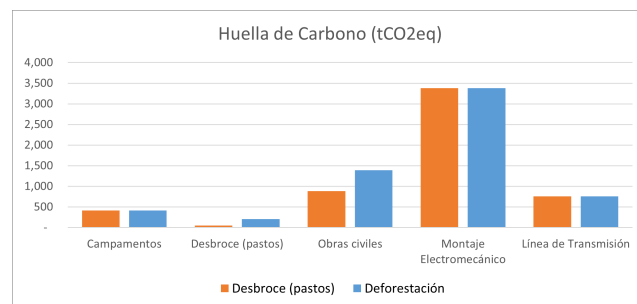


FIGURA N° 3.43: Huella de Carbono de Parque Eólico durante la Construcción

Cuando se observa el aporte de la huella de carbono para una generación de 6 MW de capacidad, el mayor aporte proviene de la huella de carbono de los aerogeneradores en el presente caso cerca de 3500 tCO_{2eq}.

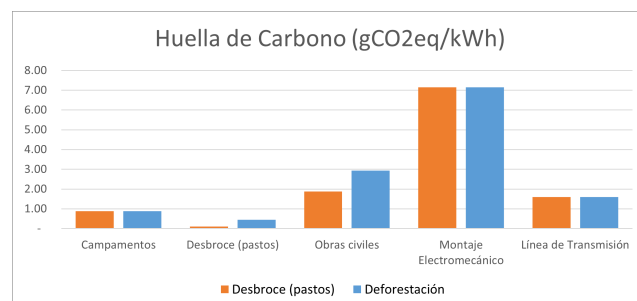


FIGURA N° 3.44: Huella de Carbono de Energía de Parque Eólico, Construcción

Cuando se hace referencia con respecto a la unidad funcional (gCO_{2eq}/kWh) se

puede ver que el aporte de los aerogeneradores en la huella de carbono es de aproximadamente 7 g CO₂eq/kWh. Los aportes por las otras causas son menores a 3 g CO₂eq/kWh.

3.3.5 Evaluación de Huella de Carbono – Minicentrales hidroeléctricas, etapa de construcción

Para el caso de las mini centrales hidroeléctricas se ha supuesto una construcción en un Valle interandino en las mismas condiciones que los casos anteriores, es decir, considerando en un caso el desbroce de pastos y en el otro caso una deforestación del área que ocupe las obras civiles. En este caso particular no sea considerado el espejo de aguas debido que las mini centrales solamente necesitan una bocatoma de bajo nivel de agua y no generaría mayor represamiento.

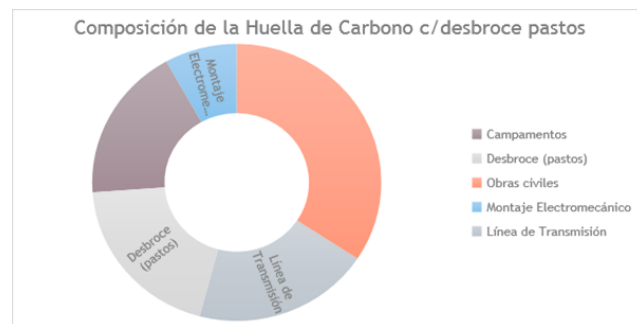


FIGURA N° 3.45: Huella de Carbono Minicentrales Hidroeléctricas, suelos de pastos

Se puede observar que el mayor aporte de los gases de efecto invernadero provienen de las obras civiles.

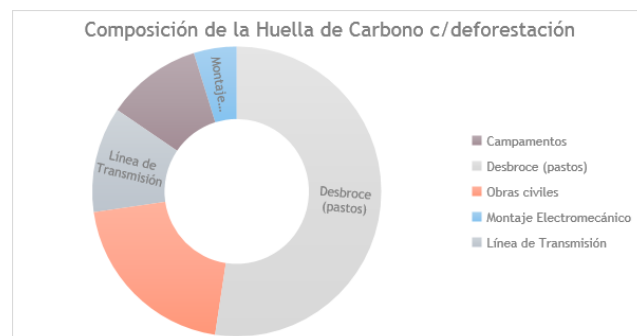


FIGURA N° 3.46: Huella de Carbono Minicentrales Hidroeléctricas, suelos boscosos

Si se considera la deforestación su aporte se convierte en el principal generador de huella de carbono.

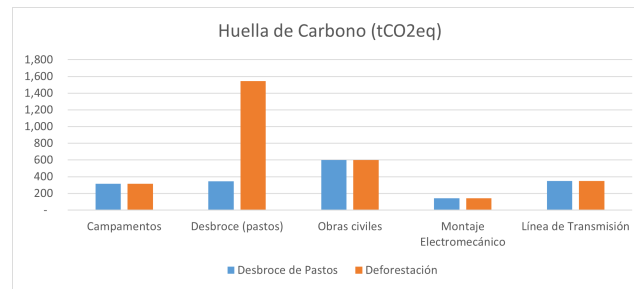


FIGURA N° 3.47: Huella de Carbono de Minicentral hidroeléctrica durante la Construcción

En cuanto a las emisiones de carbono se considera que el desbroce aporta cerca 300 toneladas, en tanto que si se tratase de una deforestación el aporte es de alrededor de 1500 toneladas de CO₂eq. Las obras civiles aportan 600 toneladas de CO₂eq aproximadamente.

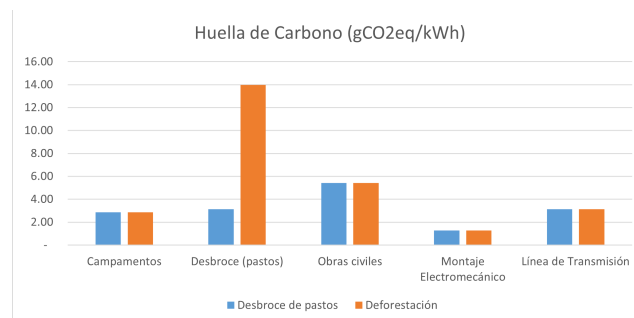


FIGURA N° 3.48: Huella de Carbono de Energía de Minicentral Hidroléctrica, Construcción

Cuando se mide la huella de carbono con respecto a la unidad funcional se observa que la deforestación podría aportar hasta 14 gramos CO₂eq/kWh, sin embargo, estas condiciones pueden cambiar si el emplazamiento de la minicentral se realiza en zonas de mayor densidad boscosa. Si se requiere una central de mayor generación es muy probable que el nivel de represamiento inunde áreas con suelos orgánicos, los cuales tienen efectos negativos, entre otros, la supresión de sumideros de carbono y también considerando que los suelos orgánicos sumergidos bajo agua pueden producir grandes cantidades de metano, un gas de efecto invernadero de mayor impacto que el dióxido de carbono.

3.3.6 Evaluación de Huella de Carbono – Centrales térmicas, etapa de construcción

Siguiendo la misma metodología presentada para el cálculo de huella de carbono de las unidades de generación, también se ha analizado el caso de una central térmica considerando un generador que funciona con combustible Diésel.

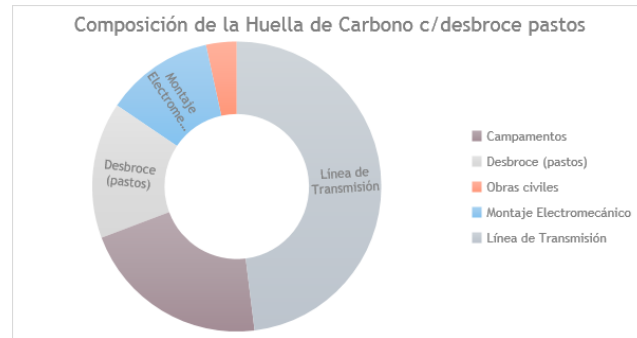


FIGURA N° 3.49: Huella de Carbono Minicentral Térmica, suelos de pastos

Este tipo de centrales pequeñas no requiere mayores obras civiles, por lo tanto, la huella de carbono durante la construcción es baja, el principal aporte provendría de la conexión que se tiene que realizar desde la central hacia la línea de transmisión que en el presente caso se ha considerado una hipótesis de 5 km de distancia a la interconexión.

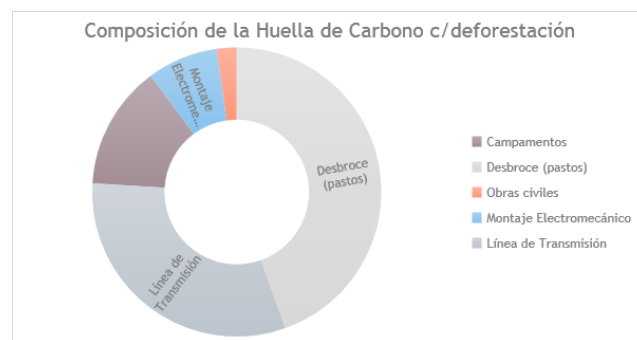


FIGURA N° 3.50: Huella de Carbono Minicentral Térmica, suelos boscosos

Si se considera que se implanta este generador en una zona boscosa la huella de carbono crece, aunque a nivel general las emisiones no son tan intensas.

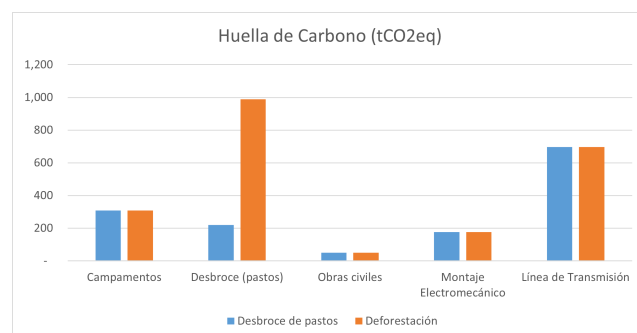


FIGURA N° 3.51: Huella de Carbono de Minicentral Térmica durante la Construcción

En caso de deforestación el aporte puede llegar a 1,000 toneladas en tanto que la

línea de transmisión podría aportar 700 toneladas de CO₂eq durante la etapa de construcción.

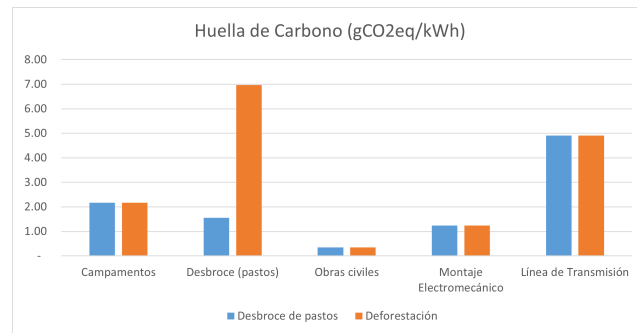


FIGURA N° 3.52: Huella de Carbono de Energía de Minicentral Térmica, Construcción

Cuando se realiza las referencias sobre unidad funcional el mayor aporte provendría de la deforestación con 7 g CO₂eq y en segundo lugar con las líneas de transmisión aportando 5 g CO₂eq/kWh.

3.3.7 Evaluación de Huella de Carbono – Parques solares, etapa de operación

Se evaluó la etapa de operación de los parques solares teniendo en cuenta el mantenimiento de la infraestructura, así como el reemplazo de algunos paneles solares debido a la obsolescencia. Se ha estimado que el 25% de los paneles se reemplazan a lo largo del período de vida útil de la planta de generación (30 años).

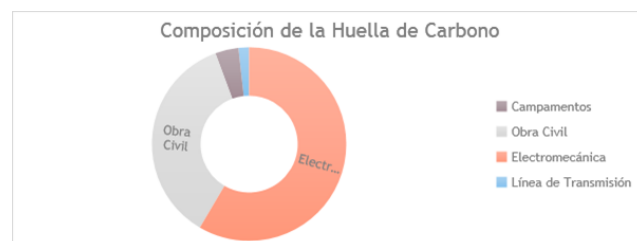


FIGURA N° 3.53: Huella de Carbono Parque Solar en Fase de Operación

La composición de la huella de carbono proviene principalmente del reemplazo de los paneles solares y en segunda medida por el mantenimiento de la obra civil.

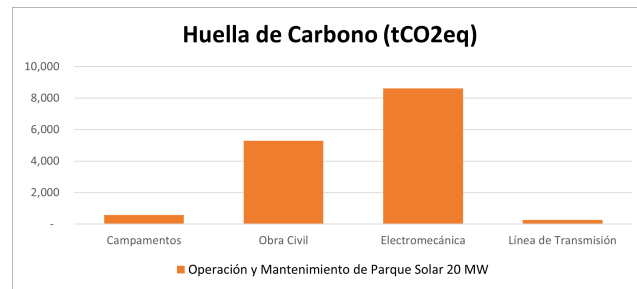


FIGURA N° 3.54: Huella de Carbono Parque Solar (tCO_{2eq})

El reemplazo y repuestos de algunos paneles solares emite cerca de 8500 toneladas de CO_{2eq} a lo largo de 30 años, en tanto que, el mantenimiento de las obras civiles aporta poco más de 5,000 toneladas a lo largo de 30 años de operación.

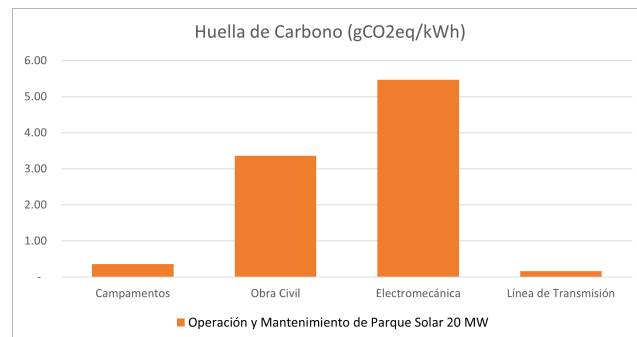


FIGURA N° 3.55: Huella de Carbono de Energía de Parque Solar, Operación

Si se toma como referencia a la unidad funcional se puede decir que el reemplazo y repuestos de paneles solares aportan poco más de 5 gramos de CO_{2eq}, en tanto que, la obra civil aporta poco más de 3 g CO_{2eq}.

3.3.8 Evaluación de Huella de Carbono – Parques eólicos, etapa de operación

Para la evaluación de la huella de carbono en la etapa de operación en los parques eólicos, se ha considerado sobre todo el mantenimiento de la obra civil, el mantenimiento periódico y preventivo del sistema de aerogeneradores y equipamiento mecánico; sin embargo, no se consideran mayores reemplazos debido a que el mantenimiento debería evitar un cambio total de las principales piezas.

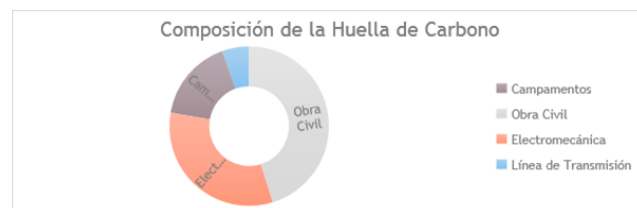


FIGURA N° 3.56: Huella de Carbono Parque Eólico en Fase de Operación

En consecuencia, se observa que los principales factores de emisión de gases de efecto invernadero se concentran en el mantenimiento de la obra civil y del equipamiento electromecánico.

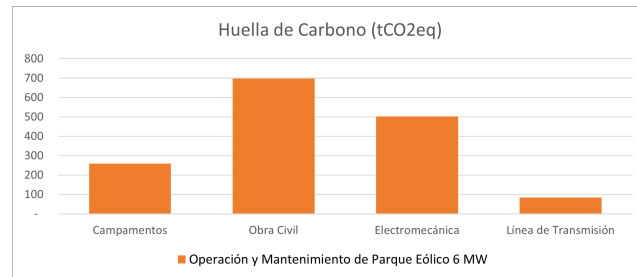


FIGURA N° 3.57: Huella de Carbono Parque Eólico (tCO_{2eq})

La huella de carbono en esta etapa de 30 años llega a aproximadamente 700 toneladas en el mantenimiento de la obra civil, en tanto que, en la obra electromecánica se alcanzan unas 500 toneladas de CO_{2eq}.

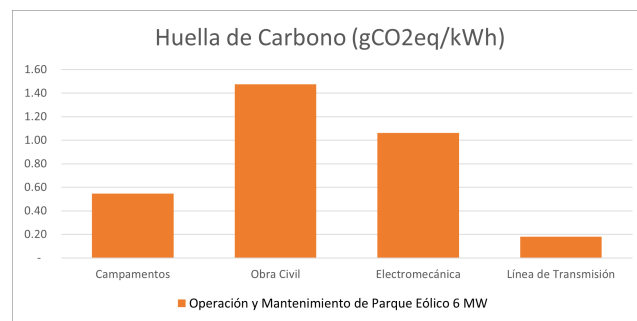


FIGURA N° 3.58: Huella de Carbono de Energía de Parque Eólico, Operación

Si nos referimos a la unidad funcional, el aporte de la huella de carbono es mínima y en todos los casos menor a 2 g CO_{2eq}/kWh.

3.3.9 Evaluación de Huella de Carbono – Minicentrales hidroeléctricas, etapa de operación

Para la medición del inventario de huella de carbono de las minicentrales hidroeléctricas se ha considerado los efectos de mantenimiento de la obra civil y demás infraestructura.

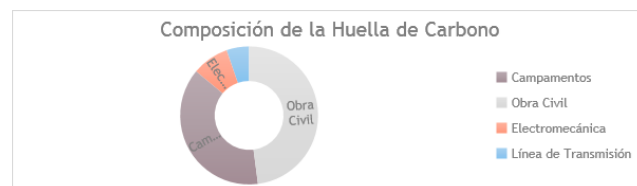


FIGURA N° 3.59: Huella de Carbono Minicentral Hidroeléctrica en Fase de Operación

Se observa que el impacto de los campamentos y la obra civil son los principales aportantes.

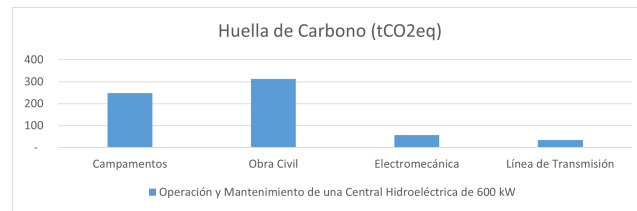


FIGURA N° 3.60: Huella de Carbono Minicentral Hidroeléctrica (tCO_{2eq})

La huella de carbono para la obra civil se estima en 300 toneladas de CO_{2eq} para 30 años de vida útil, en tanto que, la huella de carbono del mantenimiento de los campamentos llegaría a 250 toneladas durante la vida útil del proyecto.

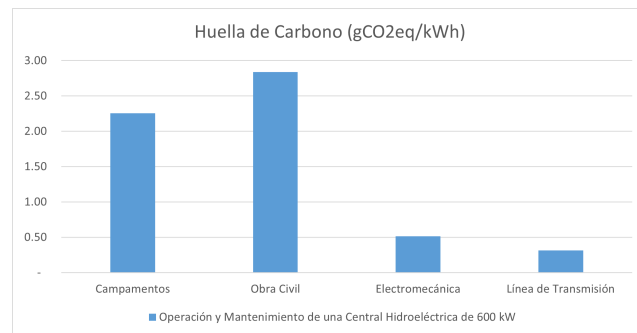


FIGURA N° 3.61: Huella de Carbono de Energía de Minicentral Hidroeléctrica, Operación

Si se refiere a la unidad funcional (kWh), el aporte del mantenimiento de la obra civil sería de aproximadamente 3 g CO_{2eq}, en tanto que el mantenimiento de los campamentos superaría apenas 2 g CO_{2eq}.

3.3.10 Evaluación de Huella de Carbono – Centrales térmicas, etapa de operación

En el caso de las centrales térmicas se evaluó el mantenimiento de la central de las obras civiles y electromecánicas, así como el consumo de combustible para la generación de electricidad.



FIGURA N° 3.62: Huella de Carbono Minicentral Térmica en Fase de Operación

En este caso el principal componente de huella de carbono proviene del uso de combustibles fósiles (Diésel), este consumo se produce en el momento de generar electricidad a partir del motor de combustión interna.

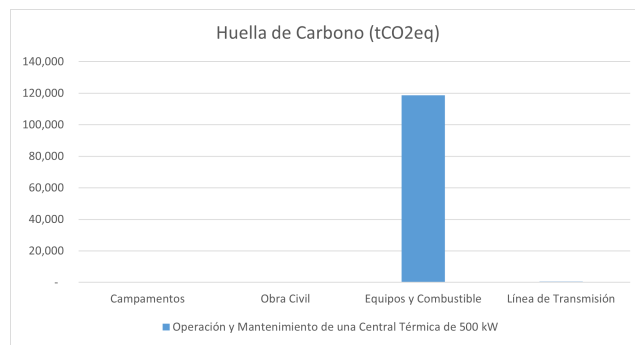


FIGURA N° 3.63: Huella de Carbono Minicentral Térmica (tCO_{2eq})

A lo largo de la vida útil de esta central de generación se producirían 120,000 toneladas de gases de efecto invernadero, primordialmente asignadas al consumo de combustible.

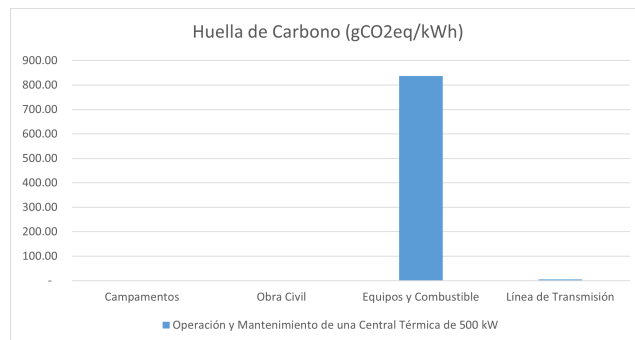


FIGURA N° 3.64: Huella de Carbono de Energía de Minicentral Térmica, Operación

En términos de unidad funcional, el aporte de la quema de combustible en la generación eléctrica se cuantifica en alrededor de 850 gramos CO_{2eq}, para el caso del presente análisis de una mini central térmica.

3.3.11 Evaluación de Impactos de Huella de Carbono – Resumen

Luego de la evaluación de los diferentes tipos de generación eléctrica, se realizó un comparativo entre las dos etapas según los límites de análisis: en la primera parte se presentan los resultados de la etapa de construcción que son principalmente influenciados por las condiciones originales del uso de suelos, es decir, existe un cambio notable por el efecto del uso de suelos por la deforestación; se puede concluir que el incremento de las emisiones de gases de efecto invernadero podrían ser muy grandes para aquellos sistemas de generación que ocupan grandes superficies, en el presente análisis, esto ocurre en el caso del parque solar fotovoltaico.

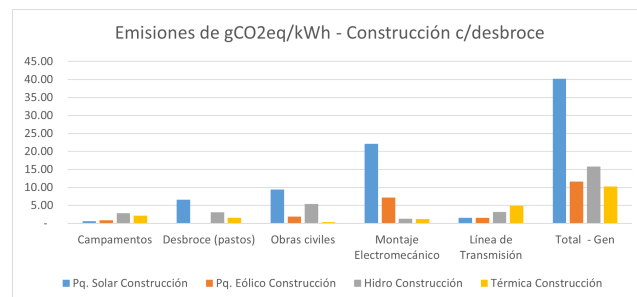


FIGURA N° 3.65: Emisiones de Energía en construcción (suelos con pastos)

De las comparaciones, se puede ver que, si se considera como uso de suelos original pastos interandinos, se puede decir que durante la construcción la central solar aportará alrededor de 40 gramos de CO2eq debido al desbroce, lo cual es más del doble de los otros tipos de generación eléctrica en condiciones similares. Recuérdese que, en el caso de las minicentrales hidroeléctricas, no se considera el aporte del espejo de aguas, que sí debería considerarse en el caso de centrales hidráulicas de mayor envergadura.

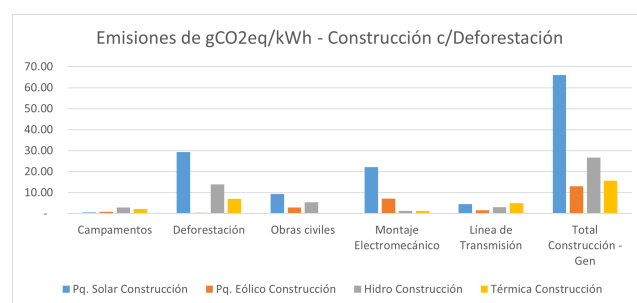


FIGURA N° 3.66: Emisiones de Energía en construcción (suelos boscosos)

Si se realizan las comparaciones con un uso de suelo original de bosques interandinos, la deforestación incrementa el valor de las emisiones de gases de efecto invernadero, el impacto es particularmente alto en el parque solar, estas emisiones llegarán a

aproximadamente 65 gramos CO₂eq/kWh.

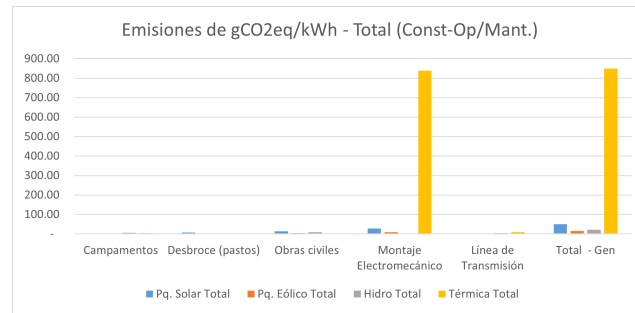


FIGURA N° 3.67: Emisiones Totales de Producción de Energía (Construcción y Operación)

Como resumen, se realiza una comparación tanto de las etapas de construcción como de la etapa de mantenimiento y operación. En este punto es notable la gran diferencia que se puede observar entre la central térmica y las centrales de energía renovables. Para los casos analizados, el aporte de combustible para la generación eléctrica térmica supera en más de 12 veces el aporte que podría generar cualquiera de las energías renovables. Para la presente evaluación, no se están considerando las eficiencias en los motores de combustión, por ejemplo, las tecnologías de los ciclos combinados podrían reducir una fracción de este nivel de emisiones haciendo que pueda presentar una menor huella. Sin embargo, se requeriría de una gran disminución por eficiencia, por lo que las energías renovables seguirán teniendo una mínima huella de carbono frente a las centrales de generación de origen fósil.

3.3.12 Caso ACV – Gases de Efecto Invernadero, Electromovilidad

Se propone evaluar el caso práctico del transporte particular, que es la principal fuente de emisiones de gases de efecto invernadero y de otros contaminantes atmosféricos. Se presenta una hipótesis del uso de vehículos eléctricos y de vehículos con motores a combustión interna. Los casos analizados incluyen 3 condiciones diferentes de generación eléctrica: la primera basada en energías renovables de acuerdo a los cálculos realizados en el presente documento, la segunda basada en la matriz energética del Perú que es una matriz mixta (renovables + fósiles) y la tercera, basada en una matriz eléctrica completamente fósil. También se han analizado dos variables en cuanto a la ocupación del vehículo para poder dimensionar el efecto del uso intensivo de los vehículos en la disminución de los gases de efecto invernadero. La unidad funcional de análisis es el pasajero kilómetro (pas-km) según las recomendaciones que se siguen en este tipo de análisis de transporte.

Caso de Estudio: Electromovilidad								
Auto sedán: 4 pasajeros								
Motor Combustión Interna	Consumo (km/gal)	Dist (km)	n° pas	pas-km	consumo (gal)	KgCO₂eq/gal	KgCO₂eq	gCO₂eq/pas-km
Combustible (1 pas)	50	20	1	20	0.4	9	3.6	180
Combustible (4 pas)	50	20	4	80	0.4	9	3.6	45
Electricidad - Renovable	Consumo (km/kWh)	Dist (km)	n° pas	pas-km	consumo (kWh)	KgCO₂eq/kWh	KgCO₂eq	gCO₂eq/pas-km
Eléct. Renov. (1 pas)	5.9	20	1	20	3.4	0.08	0.26	13
Eléct. Renov. (4 pas)	5.9	20	4	80	3.4	0.08	0.26	3
Electricidad - Perú	Consumo (km/kWh)	Dist (km)	n° pas	pas-km	consumo (kWh)	KgCO₂eq/kWh	KgCO₂eq	gCO₂eq/pas-km
Eléct. Perú (1 pas)	5.9	20	1	20	3.4	0.431	1.47	73
Eléct. Perú (4 pas)	5.9	20	4	80	3.4	0.431	1.47	18
Electricidad - Fósil	Consumo (km/kWh)	Dist (km)	n° pas	pas-km	consumo (kWh)	KgCO₂eq/kWh	KgCO₂eq	gCO₂eq/pas-km
Eléct. Fósil (1 pas)	5.9	20	1	20	3.4	0.84	2.87	143
Eléct. Fósil (4 pas)	5.9	20	4	80	3.4	0.84	2.87	36

FIGURA N° 3.68: Cálculo de emisiones de vehículos convencionales y eléctricos

Los resultados muestran que durante la operación del vehículo las mayores emisiones provendrían de los autos con motor de combustión interna, seguido por los vehículos eléctricos que usan una matriz eminentemente fósil, seguido por los vehículos que usan la matriz eléctrica peruana, y, un impacto muy reducido si la matriz eléctrica fuese completamente renovable.

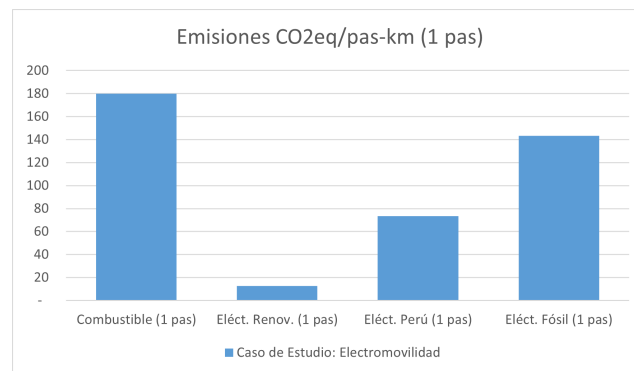


FIGURA N° 3.69: Emisiones de vehículos según recursos energéticos y tipo de electricidad (1 pasajero)

Cuando se estudia las emisiones de gases de efecto invernadero para el transporte en vehículos de combustión interna y en vehículos eléctricos bajo diferentes matrices de generación eléctrica, se puede observar que el auto a combustión interna aporta 180 gramos CO₂eq/pas-km, seguido por una matriz eléctrica puramente fósil con 140 gramos CO₂eq/pas-km, si el auto utiliza la matriz eléctrica peruana el aporte sería de 70 gramos CO₂eq/pas-km; entre tanto que, en una matriz eléctrica ideal enteramente renovable el aporte sería de 10 gramos CO₂eq/pas-km.

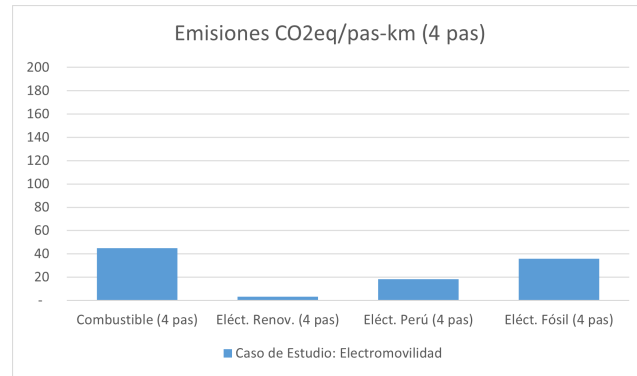


FIGURA N° 3.70: Emisiones de vehículos según recursos energéticos y tipo de electricidad (4 pasajeros)

Si se toma en cuenta el factor de ocupación con 4 pasajeros por vehículo, las emisiones se reducen a la cuarta parte. En el caso del auto combustible las emisiones serían mayores a 40 gramos CO₂eq/pas-km; en el caso de un vehículo eléctrico que usa una matriz eléctrica enteramente fósil las emisiones estarían ligeramente por debajo de los 40 gramos CO₂eq/pas-km; en el caso de las emisiones por pasajero kilómetro de un vehículo eléctrico utilizando la matriz eléctrica peruana estaría en el orden de los 20 gramos CO₂eq/pas-km; y si la matriz eléctrica fuese enteramente renovable el aporte es bastante menor a 5g CO₂eq/pas-km.

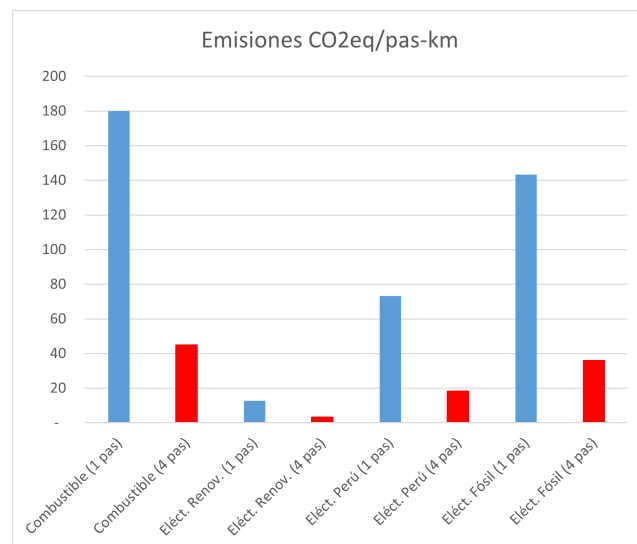


FIGURA N° 3.71: Emisiones de vehículos, comparativo de recursos y según ocupación

Cuando se comparan las emisiones de los diferentes grados de ocupación de los vehículos, se puede observar que el caso más desfavorable ocurre cuando una sola persona transita en un vehículo a combustión interna. Sin embargo, si la ocupación de este vehículo fuese de 4 pasajeros, su nivel de emisiones sería menor que un

vehículo eléctrico que transporta a una sola persona utilizando la matriz eléctrica peruana o que un vehículo eléctrico utilizando una matriz eléctrica enteramente fósil. La alta ocupación de un vehículo de combustión interna se podría compensar con un auto eléctrico a mitad de ocupación, es decir, son equiparables cuando un vehículo de combustión interno lleva a 4 pasajeros en tanto que el vehículo eléctrico con matriz eléctrica peruana lleva dos pasajeros, en ese momento el nivel de emisiones es similar.

3.4 Consumo Energético del Transporte

3.4.1 Consumo energético del Perú

De acuerdo con las publicaciones del Ministerio de Energía y Minas (Balance Nacional de Energía entre 2009 y 2021 (DGEE-MINEM, 2021)) el Perú tiene escasas reservas de energía para los próximos años, las reservas que están basadas principalmente en energía fósil y no renovable (como el gas, el petróleo, el carbón, el uranio) tienen valores que, en su conjunto, llegaron a un pico de alrededor de 25 Exajoules, y que, naturalmente, año a año han ido disminuyendo a valores cercanos a 15 Exajoules en el 2020. El principal recurso que compone las reservas energéticas del país es el gas natural, el cuál constituye más del 80 % de las reservas.

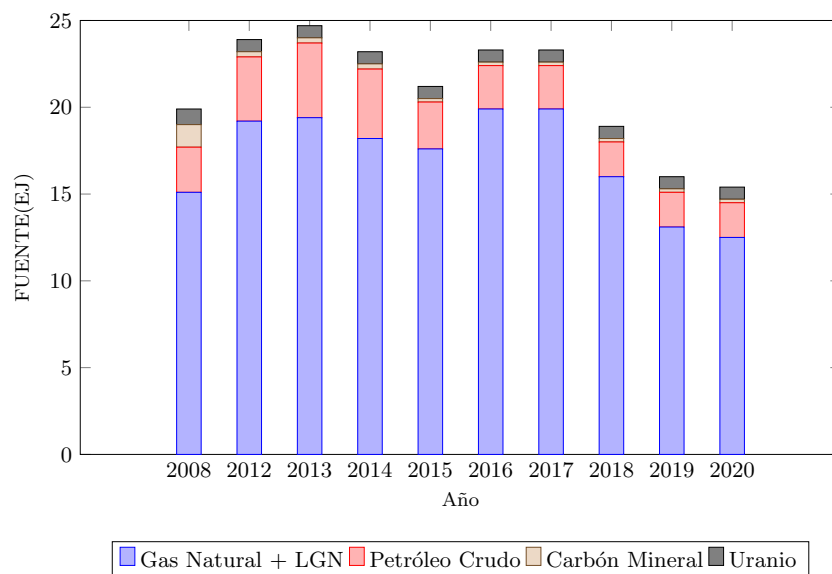


FIGURA N° 3.72: Variación de las reservas energéticas no renovables

A partir de los datos de producción (extracción) de recursos energéticos no renovables, también se puede inferir el tiempo que queda si se continúa el mismo ritmo de producción y consumo, en caso no se descubran nuevas reservas; bajo estos supuestos todas las reservas se agotarían entre los años 2038 y 2041. Es decir el Perú

no cuenta con seguridad energética más allá de los próximos 15 años. Sin embargo, la realidad podría ser más complicada, debido a que la explotación de recursos aumenta significativamente en costos conforme se agotan los recursos, por lo que es posible que los plazos de agotamiento sean menores desde el punto de vista económico, y no se cuente con seguridad energética más allá de los próximos 7 a 10 años.

Años de reserva (agotamiento)	2017	2018	2019	2020
Gas Natural + LGN (tiempo en años)	29	24	19	18
Petróleo Crudo (tiempo en años)	27	20	19	21
Gas Natural + LGN (fecha, año)	2,046	2,042	2,038	2,038
Petróleo Crudo (fecha, año)	2,044	2,038	2,038	2,041

TABLA N° 3.18: Años de reserva de Gas Natural + LGN y Petróleo Crudo

En términos de generación hidroeléctrica, la producción anual representa alrededor del 11% de la producción total de energía primaria, en tanto que las renovables no convencionales (solar y eólica) no representan aún el 1% (DGEE-MINEM, 2021), sin embargo, el nivel de eficiencia de los RER es mucho mayor. Esto significaría que la potencia efectiva actual de 5.2 GW del parque de centrales hidroeléctricas (visto en [SEIN, Estadísticas Anuales 2022, 08.jun.23](#)) deba multiplicarse por 10, para poder cubrir una demanda similar a la que existe hoy en día en términos de recursos energéticos primarios, es decir, se tendrían que construir 47 GW de potencia hidroeléctrica en el mercado actual en los próximos 15 años a razón de 3 GW por año; lo cual no se ha hecho antes e implicaría un nivel de inversiones nunca antes visto. Esto conlleva a suponer que la transición energética no ha iniciado y el camino por recorrer será bastante largo y costoso.

De ahí la necesidad urgente de establecer un plan de largo plazo, que priorice una estrategia de inversiones de gran escala para poder generar una transición hacia recursos energéticos renovables, que además puede cumplir con los objetivos de reducción de contaminación atmosférica y de cambio climático, mejorando también las condiciones de seguridad energética para el país.

3.4.2 Consumo energético del Transporte Terrestre Urbano

El consumo energético está asociado a cubrir las necesidades de desplazamiento, lo cual puede incrementarse debido a los problemas de accesibilidad de los servicios básicos y de la conectividad de las redes urbanas de transporte. La energía consumida proviene de todas las fuerzas motrices desplegadas por los diferentes modos:

1. Caminata: alimentos.

2. Bicicleta: alimentos y energía embebida debido a la fabricación del vehículo.
3. Auto privado: principalmente del combustible durante el trayecto, y de la energía embebida debido a la fabricación del vehículo.
4. Transporte público menor e intermedio: combustible durante el trayecto, y de la energía embebida debido a la fabricación del vehículo. Los valores se dividen entre el número de pasajeros transportados (MJ/pas-km).
5. Transporte público masivo: combustible durante el trayecto, y de la energía embebida debido a la fabricación del vehículo. Los valores se dividen entre el número de pasajeros transportados (MJ/pas-km).

La energía consumida puede ser descompuesta en dos grandes grupos: propias de la necesidad del desplazamiento y pérdidas debido a la congestión. La Congestión es una externalidad de efecto doble, tanto para el conductor como para los vehículos que comparten la red vial. Se produce cuando existe saturación de la capacidad de las vías, cada vehículo que se agrega, satura la red y disminuye el tiempo del trayecto. Para medir la congestión, se requiere medir el tiempo de exceso debido a la congestión, y calcular el impacto sobre los usuarios.

Las pérdidas por congestión se pueden calcular en tiempo de horas hombre incurridas en medio del tráfico, así como en el consumo de combustible y la ocupación del espacio. Se pueden proponer diferentes métodos para la estimación de la congestión, a continuación, se describen algunos:

3.4.2.1 Diagrama fundamental del tráfico

Se estudia un tramo de vía y se modelan las principales variables del tráfico: Velocidad media, Densidad vehicular e Intensidad vehicular (o flujo vehicular). Para el registro de dichas variables, se observa una red vial para el registro de datos a lo largo de un día. Uno de los gráficos necesarios es la variación de la velocidad media a lo largo del día. La diferencia entre la curva de velocidad diaria y la línea de velocidad en flujo libre.

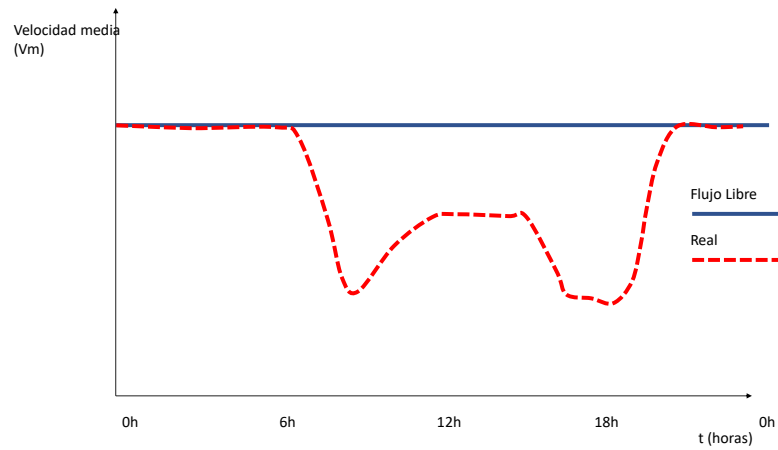


FIGURA N° 3.73: Condición de flujo libre y flujo real de vehículos a lo largo de un eje urbano

Para el cálculo de la congestión, se realiza la siguiente formulación:

Fórmula para calcular el tiempo de transporte en una circulación: Tiempo en flujo libre:

$$t_{fl} = \frac{d}{v_{fl}} \quad (3.5)$$

Donde:

t_{fl} : tiempo en flujo libre

d : longitud del tramo evaluado

v_{fl} : velocidad en flujo libre.

Tiempo del trayecto durante la congestión o flujo real:

$$t_c(h) = \frac{d}{v_c(h)} \quad (3.6)$$

t_c : tiempo durante la congestión, o tiempo de desplazamiento real según el tráfico a determinada hora.

h : hora de medición de las variables.

d : longitud del tramo evaluado.

v_c : velocidad durante la congestión.

Para hallar las pérdidas de la congestión, es necesario calcular el número de vehículos en el tramo analizado, y hallar la diferencia entre el tiempo total de transporte en

flujo libre y el tiempo total de transporte en flujo real:

Tiempo total de transporte en flujo libre, T_{Nfl} :

$$T_{Nfl} = N \times t_{fl} \quad (3.7)$$

N : número total de vehículos diario en el tramo analizado.

En el caso del flujo real, N estará en función de la intensidad (q) horaria. Si se realiza una discretización horaria, se puede formular lo siguiente:

$$N = nc \times \sum_{h=0h}^{h=24h} q(h) \Delta h \quad (3.8)$$

nc : número de carriles del tramo analizado. $q(h)$: intensidad vehicular en función de la hora del día. En una discretización continua de la intensidad vehicular, el número total de vehículos en condiciones reales Nc se puede formular de la siguiente forma:

$$Nc(h) = nc \int_0^h q(h) dh \quad (3.9)$$

Un caso particular de este valor, es el número de vehículos durante una jornada entera:

$$Nc(24) = nc \int_0^{24} q(h) dh \quad (3.10)$$

Para el cálculo del tiempo total en condiciones reales, T_{Nc} :

$$T_{Nc} = Nc(24) \times \int_0^{24} dt_c(h) \quad (3.11)$$

La solución matemática de esta ecuación, puede ser muy compleja, pero numéricamente es factible a partir de la discretización de los valores:

$$T_{Nc} = Nc(24) \times \sum_{h=0}^{24} t_c(h) \quad (3.12)$$

Una forma simplificada de abordar el problema sería considerar dos tipos de flujos: libre y real promedio, considerando la velocidad a flujo libre y la velocidad real promedio $\tilde{v}_m$:

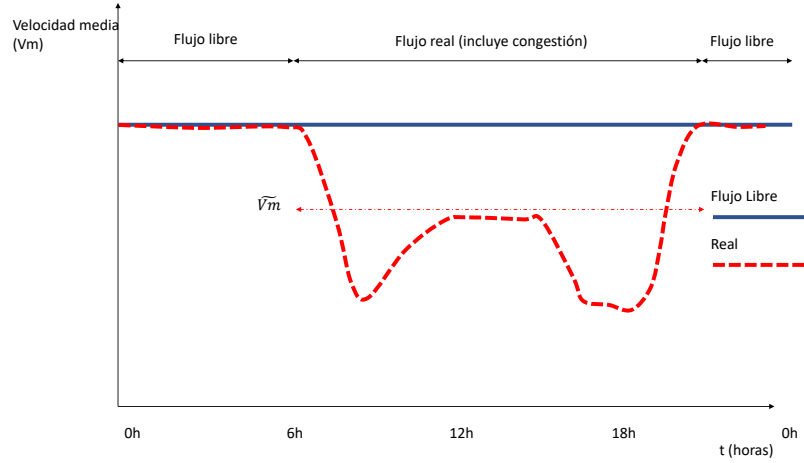


FIGURA N° 3.74: Velocidad representativa durante el período de congestión (simplificación de cálculo)

Para lo cual, se plantea entonces que el cálculo del tiempo en período de congestión sea equivalente a:

$$t_{cm} = \frac{d}{\bar{v}_m} \quad (3.13)$$

Donde:

t_{cm} : tiempo de trayecto estimado en condiciones reales (incluye período de congestión).

A partir de esta simplificación, se puede calcular el tiempo total en condiciones reales T_{Nc} :

$$T_{Nc} = N_{fl} \times t_{fl} + N_c(t_i, t_{fc}) \times t_{cm} \quad (3.14)$$

Una vez hallados los valores del tiempo total de tránsito diario en flujo libre, y en condiciones reales, se obtiene el valor de tiempo por congestión T_{cong} :

$$T_{cong} = T_{Nc} - T_{fl} \quad (3.15)$$

3.4.2.2 Vehículo flotante

Se determina previamente los horarios de congestión y de flujo libre. Se comparan los recorridos y los tiempos de trayecto entre ambas condiciones.

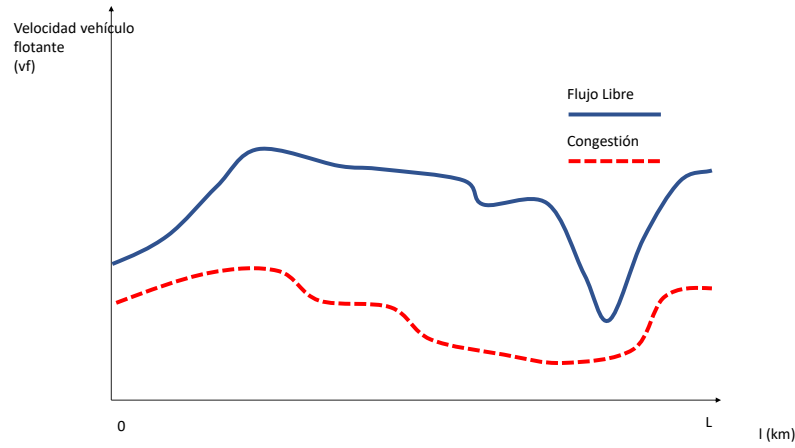


FIGURA N° 3.75: Variación de velocidad de un vehículo flotante en un eje urbano

En dicho caso, se obtiene el tiempo en flujo libre, tf_{fl} ,

$$tf_{fl} = \int_0^L vf_{fl} dl \quad (3.16)$$

en caso de tramos discretos:

$$tf_{fl} = \sum_{n=0}^{n=L/\Delta l} vf_{fl} \times l \times \Delta l \quad (3.17)$$

El tiempo del trayecto en condiciones de congestión tf_c se obtiene de la siguiente forma:

$$tf_c = \int_0^L vf_c dl \quad (3.18)$$

en caso de tramos discretos:

$$tf_c = \sum_{n=0}^{n=L/\Delta l} vf_c \times l \times \Delta l \quad (3.19)$$

Para obtener el tiempo de congestión tf_{cong} se calcula diferencia de tiempo de ambas condiciones y se multiplica por la carga vehicular (N_{cong}) en horario de congestión:

$$tf_{cong} = N_{cong} \times (tf_c - tf_{fl}) \quad (3.20)$$

En este caso, para poder calcular el costo de la congestión a lo largo del día, se realiza la sumatoria de cada cálculo horario:

$$Tf_{cong} = \sum_{h=0}^{24} tf_{cong}(h) \quad (3.21)$$

3.4.3 Cálculo energético

La energía consumida puede calcularse de dos formas:

- Energía efectiva (E_{effect}), a partir del cálculo físico de energía requerida para realizar determinado recorrido (energía cinética y de frenado, energía de rozamiento y energía aerodinámica).
- Energía real (E_{real}), a partir del registro del consumo de combustible de los vehículos, en función de la tasa de rendimiento, por ejemplo, en km/gal de combustible, o km/l de combustible. El consumo de combustible se convierte en energía a partir de valores teóricos de contenido energético, según el cuadro 3.19.

Combustible	Poder Calorífico	Unidad
Gasoholes	122.33	MJ / Gal de gasohol
DB5 S50 UV	136.45	MJ / Gal de DB5 S50
GLP	100.93	MJ / Gal de GLP
GNV-C	39.87	MJ / m3 estándar

TABLA N° 3.19: Capacidad Calorífica de Combustibles Fósiles. Fuente: DHC - MINEM

La comparación de ambos métodos nos brinda una aproximación de la eficiencia energética, sin embargo, las cantidades de energía efectivas son difíciles de cuantificar, debido a las variables de rozamiento, comportamiento aerodinámico y mecanismos de frenado. Sin embargo, el consumo total del combustible si es un hecho verificable en función del volumen que ingresa al tanque de combustible del vehículo. Es necesario tomar en cuenta que los valores de contenido energético del combustible no toma en cuenta la energía que se requirió para transporte la energía desde su punto de explotación, transporte / refinación, y transporte / distribución.

Para el cálculo de la energía efectiva del recorrido, se descomponen en función del trabajo que desarrollan las fuerzas que se oponen al movimiento.

3.4.3.1 Energía efectiva

Para el cálculo, se presentan los principales tipos de energía que se desarrollan, energía cinética, de fricción, aerodinámica. Existen otros casos como la energía potencial

en casos de ciudades con pendientes importantes, sin embargo, su impacto puede ser menor con respecto a las tres principales variables que se detallan a continuación:

Energía cinética Está compuesta por el trabajo que se realiza para lograr un cambio en la cantidad de movimiento, que ocurre desde el inicio del movimiento del vehículo, los cambios de velocidad durante el recorrido, y la reducción de velocidad a partir del frenado. La identificación de la energía de frenado es importante, debido a que en los vehículos híbridos y eléctricos puede aprovecharse el frenado regenerativo para recuperar la energía en forma de electricidad y poder aprovecharla en el recorrido. La energía cinética puede representarse como sigue:

$$E_{\text{cinética}} = \frac{m(v_f^2 - v_0^2)}{2} \quad (3.22)$$

Una solución particular para esta ecuación ocurre cuando un vehículo parte del reposo, obtiene una velocidad de recorrido, en esta circunstancia, la energía de este tramo del recorrido es:

$$E_{\text{total}} = E_{\text{cinética}} + E_{\text{fricción}} + E_{\text{aerodinámica}} \quad (3.23)$$

En tanto que cuando el vehículo empieza a reducir la velocidad, la Energía de frenado, de fricción y aerodinámica se oponen al movimiento:

$$E_{\text{total}} = E_{\text{cinética}} = E_{\text{frenado}} + E_{\text{fricción}} + E_{\text{aerodinámica}} \quad (3.24)$$

La energía cinética desarrollada durante el recorrido estará en función del número de paradas o disminuciones de velocidad que realice el vehículo, así como de las velocidades máximas y mínimas desarrolladas en cada tramo.

Energía de fricción o rodadura Está relacionado con la fricción de la carpeta de rodadura y de la carga normal que ejerce el vehículo. Para tal efecto, se considera la siguiente fórmula:

$$E_{\text{fricción}} = \mu \times m \times g \times d \quad (3.25)$$

Los valores de μ (coeficiente de fricción o de rodadura) se estiman en 0.01 para pavimentos flexibles, y puede tomar un mayor valor para otro tipo de carpetas de rodadura. El valor de la distancia d está relacionado con la longitud total del recorrido.

Tipo buses	Rodadura	Valor
Turismos	Asfalto	0.015
	Dureza media	0.08
	Arena	0.3
Camiones	Asfalto	0.012
	Dureza media	0.06
	Arena	0.25
Tractores	Asfalto	0.02
	Dureza media	0.04
	Arena	0.2

TABLA N° 3.20: Valores del coeficiente de rodadura, citado en (Guillcatanda Tacuri y Zambrano Zambrano, 2019)

Energía aerodinámica Está relacionada con el volumen del aire que se desplaza al mismo tiempo que el vehículo avanza. Los valores dependerán del coeficiente de arrastre del aire C_d , de la densidad del aire ρ , del volumen del aire desplazado (área frontal dinámica A multiplicado por la distancia recorrida d , y de la velocidad en cada tramo del recorrido:

$$E_{\text{aerodinámica}} = \frac{C_d \times A \times v^2 \times d}{2} \quad (3.26)$$

El valor del Coeficiente de arrastre C_d se toma regularmente como 0.3 para automóviles, y puede incrementarse hasta valores entre 0.6 y 0.8 en buses, debido a su frente plano y rectangular.

Se han realizado implementaciones de instrumentación embarcada en algunos autos y buses. Algo a destacar es el trabajo es la instrumentación realizada en buses del Corredor Morado, bajo coordinación con la Dirección de Seguridad Vial del MTC. Las evidencias de la instrumentación realizada con un grupo de investigadores UNI, la asociación Movus Lab y el MTC se encuentran disponibles en el siguiente enlace: [Página web sobre instrumentación vehicular](#), y se ha agregado a la tesis como parte de la calibración del modelo general para el cálculo energético del recorrido vehicular.

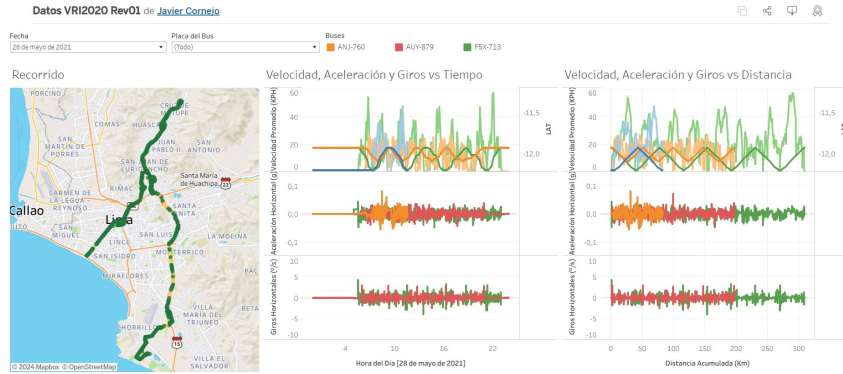


FIGURA N° 3.76: Variación de la velocidad, aceleración y giros vehiculares con instrumentación en avenidas del área urbana de Lima

En base a lo anterior, para estimar la energía consumida durante el recorrido de un automóvil en un ámbito urbano, se pueden hacer algunas simulaciones considerando un ámbito urbano donde el automóvil se detendrá cada 200 m, y que se desplazará a una velocidad relativamente baja.

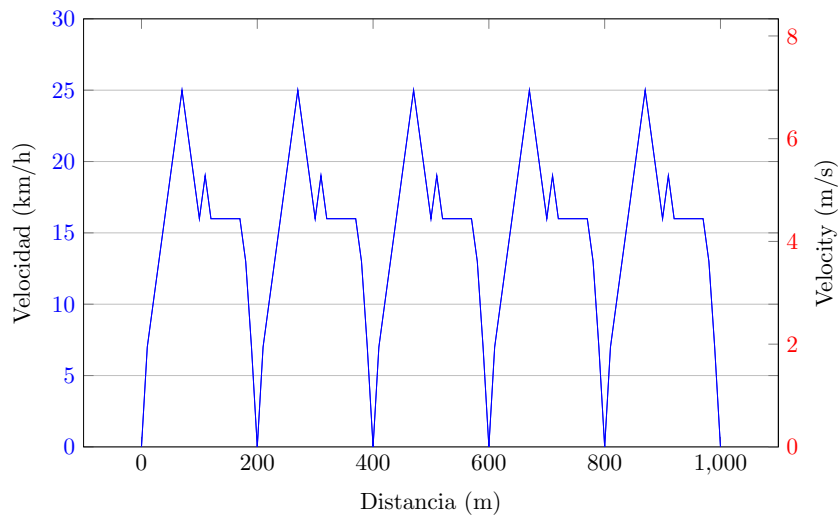


FIGURA N° 3.77: Variación de la velocidad en función del recorrido en un entorno urbano, simulación para 1 km

Para el desplazamiento de carretera se considera que el vehículo toma rápidamente velocidad con aceleración promedio de 2 m/s^2 y frena a una aceleración promedio de 15 m/s^2 . Una vez que logra una velocidad de 100 km/h mantiene su velocidad hasta la próxima parada, para esto se consideran diferentes situaciones en carreteras con diferentes condiciones, longitud y tramos en congestión, como 1 km, 3 km, 8 km y 12 km.

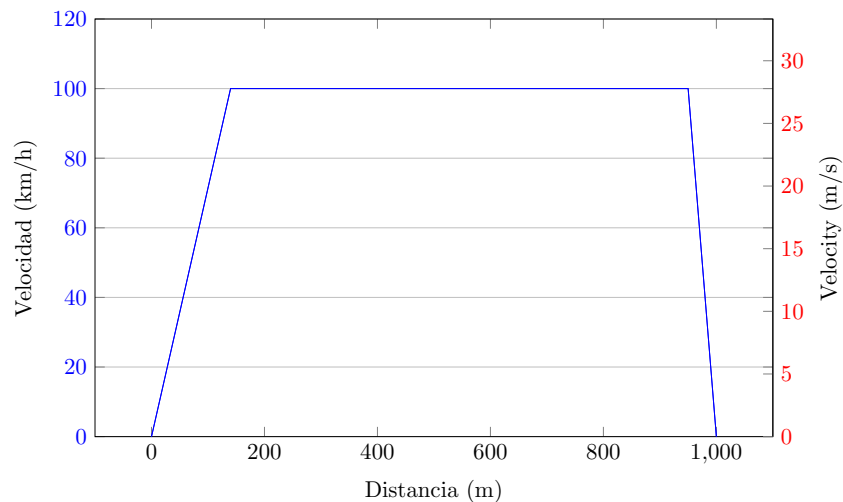


FIGURA N° 3.78: Variación de la velocidad en función del recorrido en un entorno de carretera o autopista, simulación para 1 km

En entorno urbano, se observa que el vehículo no llega a desarrollar toda la energía aerodinámica debido a las bajas velocidades de circulación, es decir, la fuerza del aire es reducida; la energía cinética es más importante en el entorno urbano, sobre todo porque el vehículo necesita desarrollar movimientos hacia adelante y paradas, por lo que se convierte en la principal energía en el entorno urbano. La forma de generar menos pérdidas dentro de un entorno urbano es reducir las paradas, es decir, creando un movimiento suave del vehículo con conducción moderada y reduciendo los cambios de movimiento, se puede optimizar el uso de energía.

Si dentro del entorno urbano se considera una situación de una carretera de 1 km (como una vía expresa o una autopista donde se pueden desarrollar velocidades de hasta 100 km/h), el consumo de energía se incrementa notablemente, tanto por el aporte de la fuerza aerodinámica como por la necesidad de desarrollar alta energía en términos de aceleración y frenado.

Si las autopistas urbanas están diseñadas para tramos más largos, o si la conducción se realiza en una carretera libre, por ejemplo con paradas de 3 km, 8 km o 12 km, la energía aerodinámica toma mayor importancia debido a que el vehículo sí mantiene a una elevada velocidad, lo cual eleva su impacto dentro de la ecuación global. La energía cinética se diluye si no existen muchas paradas, en tanto que la energía por rozamiento depende más de la distancia recorrida.

Los resultados se presentan a continuación:

RESUMEN	Urbano (1km)	Carretera (1km)	Carretera (3km)	Carretera (8km)	Carretera (12km)
E_a (MJ)/km	0.005	0.160	0.174	0.178	0.179
E_{fr} (MJ)/km	0.098	0.098	0.098	0.098	0.098
E_b (MJ)/km	0.105	0.379	0.126	0.047	0.032
E_{effect} (MJ)/km	0.177	0.392	0.131	0.049	0.033
E_t (MJ)/km	0.384	1.029	0.529	0.373	0.341

TABLA N° 3.21: Resumen de consumo energético urbano y en carretera (según distancia entre paradas)

Dentro del medio urbano resalta la importancia de la energía de frenado y la energía efectiva necesaria para el desplazamiento; en la carretera la energía aerodinámica prevalece de forma importante, y se observa que la energía de frenado es importante cuando las carreteras son cortas (1 km) y en este caso también aumenta la energía efectiva de desplazamiento; conforme los trayectos son más largos la energía efectiva disminuye debido a que, si no existe un cambio en el movimiento, se pueden recorrer largas distancias con bajos niveles de energía.

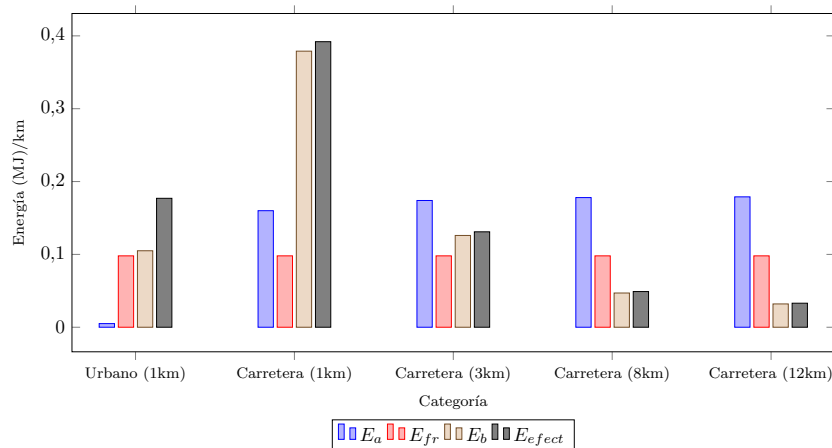


FIGURA N° 3.79: Resumen de consumo energético según tipo de infraestructura vial

Las variaciones de consumo también están relacionadas con los diferentes tamaños de motor. Esto es natural, cuando el motor tiene menor tamaño su consumo es eficiente, puede recorrer un mayor número de kilómetros; cuando el motor crece en tamaño, su consumo también. En el siguiente cuadro se muestra la comparación de diferentes tipos de motores en función del tipo de combustible, donde se aprecia que los motores de gasolina y de gas (GNV y GLP) tienen, a nivel de energía consumida por kilómetro recorrido, cierta paridad.

Motor (km/und)	Gasolina (gal)	Diésel (gal)	GLP (gal)	GNV-C (m ³ std)	Eléctrico (kWh)
1000 cc	60	65	35	11	6
2000 cc	40	45	28	9	5
3000 cc	30	35	25	7	3
4000 cc	25	30	23	5.5	2.5
5000 cc	15	18	18	3	2

TABLA N° 3.22: Eficiencia del Motor (potencia en cc o equivalente) por tipo de combustible

Los vehículos de gas consumen más energía por km que los vehículos de gasolina o de Diésel, sin embargo, debido a las subvenciones que tiene el gas natural, el costo por kilómetro recorrido resulta siendo menor. También se ha añadido la comparación con un vehículo eléctrico, en este caso se hace en kWh; como se aprecia el rendimiento es significativamente menor, entre 20 y 30 % de los consumos de energía de vehículos similares de combustión interna.

Motor (MJ/km)	Gasol.(122.33 MJ/gal)	DB5(136.45 MJ/gal)	GLP(100.93 MJ/gal-GLP)	GNV-C(39.87 MJ/m ³ std)	Eléctr.(3.6 MJ/kWh)
1000 cc	2.04	2.10	2.88	3.62	0.60
2000 cc	3.06	3.03	3.60	4.43	0.72
3000 cc	4.08	3.90	4.04	5.70	1.20
4000 cc	4.89	4.55	4.39	7.25	1.44
5000 cc	8.16	7.58	5.61	13.29	1.80

TABLA N° 3.23: Eficiencia del motor (potencia en cc o equivalente) según su consumo energético unitario, MJ/und

De acuerdo a las consulta realizada en la página de Osinergmin ¹, los precios de los combustibles para automóviles son: (En Soles, unidad) Gasolina regular (15.9, gal), Diésel DB5 (15.9, gal), GLP (6.8, gal), GNV-c (1.55, m³std), Electricidad (0.7216, kWh), con estos precios, se puede proponer el costo de recurso energético según recorrido.

Motor (S././km)	Gasolina (gal)	Diésel (gal)	GLP (gal)	GNV-C (m ³ std)	Eléctrico (kWh)
S././ und	15.9	15.9	6.8	1.55	0.7216
S././ MJ	0.13	0.12	0.07	0.04	0.20
1000 cc	0.265	0.245	0.194	0.141	0.120
2000 cc	0.398	0.353	0.243	0.172	0.144
3000 cc	0.530	0.454	0.272	0.221	0.241
4000 cc	0.636	0.530	0.296	0.282	0.289
5000 cc	1.060	0.883	0.378	0.517	0.361

TABLA N° 3.24: Costo unitario de recorrido según tipo de motor (potencia en cc o equivalente) y combustible

¹<https://www.osinergmin.gob.pe/seccion/institucional/regulacion-tarifaria/pliegos-tarifarios>, consultado el 14 de junio del 2023

3.5 Economía de la Energía del Transporte

Para el análisis de la economía de la energía, se realizará el análisis del sector transporte en los aspectos de:

- Demanda de los recursos energéticos.
- Oferta y mercado de los recursos energéticos.
- Infraestructura para mercado actual y futuro de los recursos energéticos.
- Mecanismos de Financiamiento.

3.5.1 Demanda de los recursos energéticos

La demanda está constituida a partir del parque vehicular, que hoy en día está muy fragmentado, y que se agrupa por tamaño, fuente energética y tipo de servicio de transporte. De acuerdo a la clasificación del MTC, se pone énfasis en el consumo energético por peso, y por pasajero transportado. La eficiencia de los vehículos será óptima cuando circulen a máxima capacidad, sin embargo, también es importante lograr una reducción de las distancias y de las necesidades de desplazamiento.

De acuerdo a los usos, pueden clasificarse en vehículos particulares (o individuales) y en vehículos de servicio de transporte, que a su vez, pueden tener rutas definidas (combis, microbuses, buses, corredores, metros), o no tener rutas y establecer su recorrido en función de la demanda (van, taxi, mototaxi, e incluso, moto lineal en algunas ciudades).

Para el análisis de un caso, se propone el estudio de la composición de costos de un taxi, para observar la incidencia del componente energético; para tal efecto se proponen la siguiente descomposición de costos:

Costos Fijos: Definido por la inversión inicial, se considera como costo que no se puede recuperar; se presentan los siguientes conceptos:

- Adquisición de vehículo (AV)
- Valor de rescate (VR)
- Adquisición de terrenos (AT)
- Infraestructura de Talleres (IT)

- Adquisición de Inmuebles (AI)
- Adquisición de Oficinas (AO)

Costos Variables: Definidos por la inversión operativa, y que será necesaria en función del servicio. Si el servicio es formal, se considerará un aporte importante de los gastos administrativos y generales; se presentan los siguientes conceptos:

- Salarios (SA), principalmente el salario del conductor
- Combustible (CO)
- Repuestos (RE)
- Gastos Generales (Seguros, Administración) (GG)

Para poder referenciar los costos sobre la unidad funcional de pasajero transportado, se describen las siguientes variables:

- Número de vehículos (nv)
- Número de pasajeros de ocupación promedio (np)
- D (distancia total recorrida), d (distancia recorrida diaria)
- $q = nv * np * d$ (servicio pas-km)

Se proponen las siguientes ecuaciones para los costos fijos:

$$CF = nv * (AV - VR) + AT + IT + AI + AO \quad (3.27)$$

$$(\overline{CF}) = \frac{nv * (AV - VR) + AT + IT + AI + AO}{nv * np * D} \quad (3.28)$$

Para los costos variables se proponen las siguientes ecuaciones:

$$CV = nv * SA + nv * CO + nv * RE + nv * GG \quad (3.29)$$

$$(\overline{CV}) = \frac{nv * SA + nv * CO + nv * RE + nv * GG}{nv * np * d} \quad (3.30)$$

$$(\overline{CV}) = \frac{SA + CO + RE + GG}{np * d} \quad (3.31)$$

3.5.2 Oferta y mercado de los recursos energéticos

En el mercado peruano, existen diferentes actores que constituyen la oferta energética para el transporte. Esto se puede dividir de acuerdo a los tipos de recursos energéticos y de acuerdo a las etapas de la producción, distribución y consumo.

3.5.2.1 Recursos Fósiles

Estos están divididos en los relacionados al petróleo y al gas. El 90% de los combustibles están concentrados en la venta de Diésel (40%), GLP (24%) y Gasolina (20%), según (INDECOPI, 2022). La gasolina es predominante en los vehículos ligeros, el GLP en los vehículos ligeros y en particular, en los taxis y algunos buses de transporte público (debido a los incentivos hacia el precio de venta), en tanto que el Diésel predomina en los vehículos pesados del transporte público y, sobre todo, en el transporte de carga terrestre.

Petróleo La cadena de comercialización se descompone en:

- Aguas arriba: Compuesto por la Exploración, la Perforación y la Explotación. Los lotes petroleros en territorio peruano son propiedad de Perú Petro, quien adjudica la explotación en forma de concesiones por períodos determinados. Parte de la explotación también se realiza por Petro Perú.
- Central: Describe el proceso de traslado de los recursos fósiles extraídos hacia el tratamiento en las refinerías. Esto puede realizarse por diferentes medios terrestres (ferrocarril, oleoductos o camiones cisterna). También puede considerarse la importación de petróleo crudo.
- Aguas abajo: Inicia con el proceso de refinación, o con el mismo efecto, con la importación de derivados del petróleo. Los productos en forma de combustible son llevados por los transportistas hacia los distribuidores mayoristas que cuentan con plantas y tanques de almacenamiento, a partir de los cuales se distribuyen a los grifos y estaciones de servicio, donde se brinda el abastecimiento a las unidades vehiculares. Pueden existir clientes directos, dependiendo de los volúmenes (por ejemplo, proyectos de construcción de infraestructura).

Los costos de explotación del petróleo en el Perú varían entre 30 y 40 USD/barril, en tanto que en los países árabes pueden ser entre 20 y 30 USD/barril, lo cual demuestra el nivel de competitividad y de productividad de los diferentes campos, y que están basados en los métodos y en las condiciones geológicas de los campos petrolíferos. Los productores de la OPEP tienen costos de producción menores, debido a las mejores condiciones geológicas para el afloramiento del oro negro. Las

reservas probadas, probables y posibles se calculan en función de los costos mínimos para el retorno de la inversión. Si el precio del barril del petróleo cae por debajo del costo de producción, entonces el volumen de las reservas pueden caer. Esta oscilación determina que en el Perú queden pocas décadas para la explotación del petróleo en el territorio nacional.

Gas Natural La cadena de comercialización se descompone en:

- Aguas arriba: Compuesto por la Exploración, la Perforación y la Explotación. Los lotes de las reservas de gas se concentran en Camisea (Cusco), principalmente en el lote 88. El operador de los lotes de gas es la empresa PlusPetrol,
- Central: El proceso de transporte del gas se realiza a través de los sistema de gasoductos de más de 700 km que van desde la Selva Central hacia la Costa Peruana, en Pisco (Ica) y Lurín (Lima). Parte del gas se utiliza para la exportación, y otra parte, para el consumo del mercado peruano.
- Aguas abajo: Las plantas de abastecimiento y de distribución para los Gasocentro (estaciones de servicio) se realizan a través de camiones cisterna, que realizan las maniobras siguiendo las regulaciones vigentes de seguridad de OSITRÁN.

Debido a las reservas importantes para el tamaño del mercado peruano, se cuentan con incentivos de diferente índole para promover la masificación del gas natural. Sin embargo, debido a la escasa exploración, los volúmenes de reserva serán agotados en pocos lustros, generando una dependencia de la matriz energética del país.

3.5.2.2 Recursos Renovables

En los últimos años, el Perú ha impulsado la construcción de nueva infraestructura relacionada con la explotación de los recursos energéticos renovables. Las fuentes no convencionales se han incrementado notablemente, sólo en el 2021 se han añadido 1.2 GW de capacidad instalada, mayoritariamente de fuente solar y eólica. Sin embargo, esto es aún insuficiente para el cambio progresivo y la transición energética del transporte. En la condición actual de precios elevados y oscilantes de los combustibles asociados al petróleo y al gas, a una progresiva preocupación por el cambio climático, la reducción de los costos de adquisición de los insumos de las plantas de energía renovable, y a los incentivos para la construcción de nueva infraestructura de este tipo, surge la oportunidad para este cambio de matriz energética, aunque podría ser insuficiente para las necesidades de mediano y largo plazo. En el Decreto Legislativo 1002 para la promoción de la Generación de Energías Renovables, se induce a que el

MINEM pueda proponer incrementos significativos de la participación de energías renovables en la matriz energética, con un límite de 5% de la matriz eléctrica anual durante el primer quinquenio (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2010a). Luego de más de una década de esta emisión, se puede corroborar que la participación apenas ha llegado a ese porcentaje en todo este período.

Centrales Hidroeléctricas Las centrales hidroeléctricas de mayor magnitud se han construido aprovechando el caudal de los ríos, las caídas, la legislación ambiental de la época y una menor oposición social. Hoy en día, los grandes proyectos hidroeléctricos conllevan muchos problemas ambientales y sociales, lo que incrementa su costo de ejecución y lo hace menos competitivo que otros proyectos de energías renovables. Los proyectos en cartera de gran envergadura como Inambari se han postergado, y es muy probable, que no sean factibles por el alto impacto ambiental y social. Las centrales hidroeléctricas de menor tamaño surgen como una opción de generación distribuida, aunque su impacto no será lo suficiente para una producción energética de gran envergadura que sustente la transición energética del transporte.

La oferta actual de centrales hidroeléctricas suman 5 GW, y anualmente se agregan algunas decenas de MW de potencia de las micro y minicentrales hidroeléctricas. En el año 2010, DL 1002 (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2010a), se considera que las centrales hidroeléctricas con potencia instalada menor a 20 MW constituyen recursos energéticos renovables.

Plantas Eólicas Las Plantas eólicas constituyen una alternativa eficaz para el logro de una capacidad instalada, sobre todo por el desarrollo acelerado de la tecnología, el tiempo de despliegue y construcción, y de los costos que han ido disminuyendo de manera rápida. Las instalaciones de plantas eólicas terrestres (*on-shore*) tenían un costo aproximado de 5,200 USD/kWh en 1983, entre tanto, en 2019 los costos promedios se habían reducido a menos de la tercera parte, a 1,500 USD/kWh (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinerghmin), 2020). Los proyectos eólicos marinos (*off-shore*) pueden presentar algunas ventajas en razón de mayores velocidades de viento y mayor estabilidad en la generación eléctrica, sin embargo, sus costos de instalación y explotación son mayores; de otro lado, los precios para la instalación han ido disminuyendo, desde 5,700 USD/kWh en 2013 a 3,800 USD/kWh en 2019 (Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinerghmin), 2020). Sin embargo, el factor de capacidad de los parques eólicos en el Perú es inferior a 40%, además de su condición variable, lo que condiciona la necesidad de contar con una planta fija térmica para brindar estabilidad de inercia al Sistema Eléctrico.

Plantas Solares Las plantas fotovoltaicas han tenido un crecimiento importante en las últimas 4 décadas, y es una de las principales apuestas de China para la electrificación del sistema energético, con un claro impacto en el sector transporte. Pese a la notable disminución de los costos de instalación (1,000 USD/kWh), su factor de planta en el Perú es muy bajo ($<20\%$), lo que genera la necesidad de almacenamiento temporal, y el requerimiento de un vector energético complementario, como el hidrógeno verde o un sistema de baterías. Las plantas térmicas solares pueden compensar mejor esta fluctuación debido a su capacidad de almacenamiento de energía.

Biomasa La biomasa puede generar energía para el transporte a través de sustitutos basados en alcohol (caña de azúcar, remolacha, etc.) que puede producir etanol y combinarse con la gasolina, o sustitutos basados en esteres (colza, girasol, palma aceitera, etc.) que puede producir biodiesel. La infraestructura requerida es similar a las refinerías, y puede reemplazar parcialmente a los combustibles derivados del petróleo. En el caso del gas natural o del GLP, se puede generar biogas a partir de la descomposición de residuos orgánicos (aguas servidas, restos orgánicos, etc.).

3.5.3 Infraestructura para el mercado actual

Los recursos energéticos necesitan el desarrollo de infraestructura para su explotación y distribución en las diferentes ciudades.

3.5.3.1 Recursos Fósiles

Petróleo La infraestructura requerida es compleja y se relaciona con la localización de los yacimientos petrolíferos. Actualmente, los yacimientos peruanos se encuentran principalmente en el Norte del país, principalmente en los departamentos de Piura, Loreto y Ucayali. Para el desarrollo de la cadena de extracción y producción de los derivados del petróleo se necesitan:

- Maquinaria de perforación: En función de la profundidad y dificultad de acceso a los pozos.
- Oleoducto Nor-Peruano: Que enlaza los campos de explotación en la Selva Norte con la refinería de Talara y los puertos petrolíferos.
- Refinerías: Existen principalmente la refinería de Talara (Talara), de La Pampilla (Ventanilla), de Conchan (Lurín), de El Milagro (Amazonas), Pucallpa (Ucayali), Negritos (Piura). Las refinerías son administradas por operadores públicos (Petro Perú) y operadores privados (Repsol, Maple (Petróleos de La

Selva), entre otras). La capacidad conjunta es superior a 200 mil barriles diarios de derivados del petróleo, lo que cubre más del 85% de las necesidades del país, aunque parte de los productos se exportan.

- Tanques de almacenamiento: Relacionados con los diferentes operadores logísticos de derivados de petróleo. Los tanques almacenan los productos derivados del petróleo, entre otros, gasolina, diésel, kerosene, gas licuado de petróleo (GLP) y asfalto. Los tanques están ubicados en distintos puntos del territorio, como las refinerías y en otros emplazamientos, a partir de los cuales se distribuye en el territorio.

Debido a la naturaleza y dimensión de las inversiones, la infraestructura se amortiza en varias décadas, por lo que fortalecen el estatus quo de una matriz energética basada en el petróleo.

Gas De forma similar que en el caso del petróleo, la infraestructura del gas requiere una infraestructura de gran envergadura, y esto puede incrementarse en función de la ubicación del yacimiento a explotar. Para el desarrollo de la cadena de extracción, producción y almacenamiento, se requiere la siguiente infraestructura básica:

- Maquinaria de perforación.
- Gasoductos, que incluyen estaciones de monitoreo a lo largo del recorrido.
- Plantas de procesamiento, para la transformación en productos como metano, propano, butano, GNL.
- Tanques de almacenamiento, principalmente terrestres.
- Puertos y terminales de exportación, que permite redirigir el combustible hacia otros mercados.

3.5.3.2 Recursos Renovables

A diferencia de los combustibles fósiles, los recursos renovables brindan energía activa (no acumulada) que existe en el entorno físico, principalmente basado en las derivaciones de la energía solar (hidráulica, fotovoltaica, viento, undimotriz), también acumular energía solar en la biomasa, energía propia del planeta (geotérmica), o debido a la fuerza de gravedad (marea). Debido a que la energía no está almacenada en forma química (como el caso de los recursos fósiles), es necesario contar con infraestructura mínima para convertir la energía en un vector energético, principalmente electricidad:

- Equipos de generación, que toma la energía del ambiente para transformarla en electricidad.
- Redes de transmisión y distribución, que transportan la electricidad desde las centrales de generación hacia los lugares de consumo.
- Almacenamiento de energía, debido a que la energía renovable es intermitente en el muy corto o corto plazo (días o según estaciones), se requiere el almacenamiento para ayudar a estabilizar el flujo de electricidad.
- Infraestructura complementaria, como caminos de acceso, sistema de monitoreo, sistema de despacho, entre otros.

Centrales Hidroeléctricas En función de la magnitud de las centrales, pueden requerirse infraestructura complementaria de envergadura como presas y túneles de derivación. Una vez lograda la energía potencial, se requerirán turbinas y generadores, así como un patio de llaves para conectar a la red existente.

Plantas Eólicas Requieren turbinas eólicas, e infraestructura de transmisión. Si las torres están ubicadas en zona marina se requerirán cables de transmisión, y en zona terrestre se requerirán líneas de transmisión convencionales.

Plantas Solares Requieren paneles solares, inversores de corriente y estructuras de soporte. La electricidad se toma en corriente continua y se eleva a corriente alterna para su transmisión.

Biomasa En el caso de electricidad, requieren infraestructura para generar calor y vapor, y funcionarán con turbinas de vapor convencionales. En el caso de combustibles líquidos, se requerirán refinerías.

3.5.4 Mecanismos de financiamiento

3.5.4.1 Recursos Fósiles

Los recursos fósiles tienen un Fondo de Estabilización de Precios de Combustible para regular las fluctuaciones del precio internacional del crudo. Dado que el Perú es netamente importador de petróleo y de derivados, se requiere este tipo de mecanismos.

Petróleo Hoy en día se cuenta con un fondo de estabilización basado en el Impuesto Selectivo al Consumo (ISC) que sirve para mitigar los efectos de la variabilidad del precio internacional del barril del petróleo.

Gas Existe el interés de parte del Estado Peruano para financiar la infraestructura y la masificación del gas. En particular, los mecanismos de apoyo público se descomponen en los siguientes puntos:

- Impuesto General a las Ventas (IGV, o su equivalente IVA en otros países de la región): Las compañías pueden obtener una exención de este impuesto si invierten en desarrollo y producción, y aplica desde la importación de equipos, construcción de infraestructura gasífera, venta del gas natural, y servicios relacionados.
- Impuesto a la Renta (IR): Es posible deducir el 100% de dicho impuesto si las inversiones están relacionadas con la infraestructura del gas.
- Crédito fiscal: Hasta el 30% del monto de inversión para las inversiones en infraestructura.
- Bono fiscal: Hasta el 20% de la inversión relacionados a la infraestructura del Gas.

3.5.4.2 Recursos Renovables

Los recursos renovables aún están en una fase de desarrollo, muy por debajo del 10% de su potencial. El desarrollo de alternativas de generación de electricidad o de combustibles líquidos equivalentes a los existentes, será clave para la transición energética del transporte. De acuerdo a (Schmerler et al., 2019), la potencia instalada con respecto a la técnicamente aprovechable es de 7.12% para la energía hidráulica, 1.83% para la energía eólica, 1.14% para la energía solar, 7.88% para la biomasa, y 0% para la geotermia.

Uno de los aspectos claves en la estabilidad de los mercados de Recursos Energéticos Renovables es la cotización de la energía eléctrica mediante costos marginales. Actualmente, los costos marginales (influenciados por la depreciación de activos y las eficiencias tecnológicas) sean relativamente bajos (menores a 20 USD/MWh), en tanto, que las subastas RER pueden llegar a pagar precios garantizados por precios altos (mayores a 40 USD/MWh), los cuales se trasladan a la factura de los usuarios.

Centrales Hidroeléctricas Los nuevos proyectos hidroeléctricos están relacionados con los pequeños aprovechamientos, debido a que no tienen mayor huella ambiental (normalmente, están basados en barrajes de derivación o de captación, que luego se derivan a tuberías. Debido a su bajo impacto ambiental, están catalogados como energías renovables con cero emisiones. En el Perú se han otorgado diversas concesiones para minicentrales hidroeléctricas (menores a 20 MW) como parte de las subastas RER.

Plantas Eólicas Las concesiones eólicas han sido incluidas en el régimen promocional de Subastas RER con una cuota en el mercado energético que es administrado por el SEIN. Esto ha propiciado que se construyan varias plantas eólicas a partir del año 2010. En paralelo, se puede observar algunos cambios tecnológicos que han mejorado el rendimiento de estas plantas, la altura, la producción a escala, los precios de la electricidad; los cambios en el mercado han propiciado que las nuevas plantas eólicas no requieran de subastas RER.

Las fuentes de financiamiento provendrán de los canales clásicos, como Deuda, Fondos de Inversión, Bancos, Agencias Multilaterales (como Banco Mundial, BID o CAF), o capital propio de los inversionistas. De manera general, el financiamiento requiere un 20% de capital y el resto puede obtenerse como deuda. Los aspectos importantes a tener en cuenta en las inversiones es la disponibilidad del terreno, además de los estudios técnicos de la disponibilidad del viento.

Plantas Solares Los costos de instalación de las plantas solares han disminuido de forma tan importante que entre la primera y cuarta subasta RER (2009 al 2015), ha habido una reducción del precio promedio de adjudicación de la energía en 78%.

Proy. Fotovoltaico	Inicio Proy.	Capacidad (MW)	Energía (GWh)	F.Planta	Ref.
Tacna Solar	2012	22.2	47.3	24 %	Solar Pack (web)
Panamericana	2012	21.2	50.7	27 %	Solar Pack (web)
Moquegua	2014	19.4	46.8	28 %	Solar Pack (web)

TABLA N° 3.25: Proyectos Fotovoltaicos

Se observa que los proyectos fotovoltaicos tienen un bajo factor de planta, y además, su producción se genera en las horas de bajo consumo doméstico. Estos aspectos deben ser considerados en el respectivo modelo financiero.

Biomasa Se generan dos tipos de aprovechamientos:

- Termoeléctrica: Con la generación a partir de turbinas de biogás.

- Combustibles líquidos: A partir de la transformación del etanol. Parte de los incentivos provienen de la obligatoriedad del uso de un porcentaje de etanol y biodiesel.

3.6 Políticas de Energía en el Transporte Terrestre

3.6.1 Diagnóstico de las Políticas de Transporte y Urbanismo

Entre los documentos de mayor significancia para la planificación urbana y del transporte se encuentran los Planes de Desarrollo Metropolitano. La versión 2022 del Planmet ha sido publicada recientemente luego de un proceso de difusión y consulta con comunidades y diferentes organizaciones interesadas.

Planmet 2040 ²

Este expediente aborda un horizonte de planificación de mediano largo y plazo (20 años), por lo que es un ejercicio interesante para tomar aspectos sociales, ambientales y de desarrollo del área metropolitana de Lima. Algunos aspectos a destacar son: Protección de ejes ribereños, disminución de la vulnerabilidad de poblaciones asentadas en laderas (inundación o sismos), integración múltiple de actividades económicas y sociales, desarrollo de ejes viales y de transporte multimodal, creación de zonas de conservación y paisajísticas, de recreación, de turismo y de actividades económicas complementarias, en particular, rescatando las áreas verdes y potenciando las áreas naturales existentes en el territorio (humedales, costa marina, parques, ejes viales con reserva de derecho de vía); agrupación de distritos para una gestión por áreas urbanas de mayor superficie. Esto puede ser controvertido, pero se pueden trazar algunas líneas de políticas comunes; en transporte: orientado al transporte intermodal, accesos al área metropolitana y líneas férreas, telecabinas, y enlace con el aeropuerto y el transporte por cabotaje.

Sin embargo, este tipo de planeamiento debería realizarse por fases y concertando cada una de las etapas, es decir, hacerlo a partir de:

1. Definición de las políticas y objetivos de largo plazo (2100, 2050, 2040, 2030).
2. Definición de la visión y las metas intermedias, alineadas al desarrollo urbano.
3. Definición de los ejes de infraestructura, urbana y de transporte.
4. Propuesta de cartera de proyectos y proyectos específicos o icónicos.

²Plan de Desarrollo Metropolitano de Lima 2021-2040, PLANMET 2040, ORDENANZA N° 2499-2022, Lima, 14 de setiembre de 2022

5. Creación de un observatorio de seguimiento de proyectos.

Sobre el proyecto en su conjunto, convendría hacer algunas preguntas: ¿Cómo se correlaciona con los Planes de Desarrollo Urbano precedentes? ¿Cómo se correlaciona con los Objetivos de Desarrollo Sostenible propuestos por la ONU? ¿Cómo se correlaciona con los compromisos internacionales relacionados al Cambio Climático? ¿Cómo se correlaciona con los objetivos de los planes de desarrollo energético del Perú? ¿Cómo se correlaciona con los objetivos de reducción de siniestralidad y seguridad vial? ¿Cómo se correlaciona con el Plan Maestro del Metro de Lima?

El Enfoque de Transporte es básicamente sobre la conectividad de los diferentes modos (terrestre, aéreo, acuático), algunos aspectos fundamentales del transporte son necesarios para una interpretación de la largo plazo, variables como:

- Densificación urbana alrededor de ejes principales de transporte. Usos mixtos del suelo.
- Seguridad vial.
- Congestión.
- Polución atmosférica e Ineficiencia energética.
- Desarrollo del Transporte Público Masivo y de Modos Suaves.
- Desarrollo de Infraestructura Básica del Transporte.

Planes de Movilidad Urbana Sostenible, PMUS Los Planes de Movilidad Urbana Sostenible (PMUS) surgen como parte de la ampliación de los alcances del Plan de Desarrollo Urbano, debido a que la red de transporte influye notablemente en la forma de desplazamiento de los ciudadanos; a su vez, la forma de la urbe crea una correlación de tensiones para los desplazamientos de la red de transporte; esta interacción que se repite una y otra vez en ciclos infinitos generan círculos virtuosos o viciosos para el rendimiento de un sistema de transporte urbano. La mayor parte de las ciudades peruanas tienen un Plan de Desarrollo Urbano, sin embargo, muy pocas de ellas han evaluado un Plan de Movilidad Urbana Sostenible; recientemente el Ministerio de Vivienda ha propuesto la creación de un manual de Planes de Movilidad Urbana Sostenible, pese a ello, son pocas las ciudades las que lo han llevado a cabo. Los Planes de Movilidad Urbana Sostenible realizados no tiene aún uniformidad de criterios ni de metodología de desarrollo, tal y como veremos a continuación,

- Lima y Callao: En el 2014 se presentó el "Plan Metropolitano de Desarrollo Urbano de Lima y Callao al 2035", el cual proponía políticas urbanas sostenibles y sentaba las bases para el mejoramiento de la infraestructura urbana,

equipamiento, vivienda y espacios públicos de la ciudad, con el cual se buscaba ordenar y modernizar la capital.

- Arequipa: Presentado el año 2022 (disponible en <https://pmus.impla.gob.pe/>). El Plan de Movilidad Urbana Sostenible (PMUS) de Arequipa se enfoca en el periodo 2022-2042 en la provincia y departamento de Arequipa. Este plan se enmarca en el Decreto Supremo 022-2016-VIVIENDA y el Acuerdo Municipal 030-2020-MPA de la Municipalidad Provincial de Arequipa. Es un proyecto financiado por la Unión Europea (UE) mediante el programa EURO-CLIMA+ y ejecutado en Perú por la Agencia Francesa de Desarrollo (AFD) a través del consorcio Egis y Rupprecht Consult.
- Trujillo: Presentado el 2021, se enfoca en el período 2021-2030. Fue elaborado por el Plan de Desarrollo Territorial (PLANDET) y Transportes Metropolitanos de Trujillo (TMT) de la Municipalidad de Trujillo, con la participación de distintos actores sociales que conforman el Comité de Movilidad Urbana Sostenible (COMUS), y con el apoyo de la Cooperación Alemana para el desarrollo GIZ.
- Chiclayo: proyecto financiado por la cooperación alemana GIZ. Se hace incidencia sobre el transporte urbano, rutas de transporte público, la sostenibilidad.
- Piura: El proyecto fue financiado por KfW (Banco de Inversiones alemán) y CAF, y ejecutado por la empresa Idom.
- Huancayo: El proyecto Plan de Movilidad Urbana Sostenible de Huancayo se realizó con el equipo técnico de la Municipalidad Provincial de Huancayo, y fue presentado en el año 2020.
- Cusco: Fue presentado en el marco del Plan de Movilidad y Espacio Público de Cusco, y ejecutado por la Municipalidad, Gobierno Regional, y contó con el apoyo del Banco Mundial, Ministerio de Vivienda, Ministerio de Cultura, y la UNESCO.
- Ayacucho: Se presentó el año 2020, y fue realizado por la UNI con el financiamiento de la Cooperación Alemana (GIZ y DKTI).
- Puno: Fue encargado por la Municipalidad Provincial de Puno, y realizado por la consultora Angus Laurie en el año 2018.

La Metrópoli Nacional (Lima y Callao) cuenta con diversos documentos que planifican la movilidad urbana sostenible, pese a que no existe aún un PMUS como tal si existen esfuerzos para apuntalar la planificación de la ciudad. En el caso de las 08

metrópolis regionales, 06 cuentan con PMUS, en tanto que las ciudades de Iquitos y Pucallpa no cuentan con dicho documento de planificación. En el caso de las 05 ciudades mayores principales, sólo Ayacucho cuenta con PMUS. Dentro de las 12 ciudades mayores, sólo Puno cuenta con PMUS.

Las ciudades con una población importante (mayor, mayor principal, metrópoli regional y metrópoli nacional) que cuentan con PMUS son 35 % del total:

Descripción	Total	PMUS	%	Ciudades PMUS
Metrópoli Nacional	1	1	100 %	Lima y Callao
Metrópoli Regional	8	6	75 %	Arequipa, Trujillo, Chiclayo, Piura, Huan- cayo, Cusco
Ciudad Mayor Principal	5	1	20 %	Ayacucho
Ciudad Mayor	12	1	8 %	Puno

TABLA N° 3.26: Descripción de Ciudades con PMUS

Debido al objetivo principal basado en la sostenibilidad, se toma en cuenta que el PMUS debe contener diversos aspectos, entre los cuales destacan los relacionados a la Transición Energética:

- Transporte Público:
 - Reducción de la congestión del tráfico: el transporte público, buses, tranvías y trenes, puede transportar una gran cantidad de pasajeros simultáneamente, lo que reduce la cantidad de vehículos privados en las calles.
 - Promoción de modos de transporte sostenibles: Proporciona una alternativa al uso de automóviles privados, que generalmente tiene un mayor consumo de energía y emisiones por pasajero.
 - Mejorar la accesibilidad y la equidad: Para todos los segmentos de la sociedad, incluidas las personas con movilidad limitada, los grupos de bajos ingresos y aquellos que no tienen acceso a vehículos privados.
 - Optimización del uso del suelo y la planificación urbana: se pueden respaldar desarrollos de uso mixto, reducir la expansión urbana y crear vecindarios más transitables para caminar y andar en bicicleta. Esto puede conducir a distancias de viaje reducidas, mayor conectividad y mejor calidad de vida.
 - Mejorar la calidad del aire y la salud: Se reduce la cantidad de vehículos privados en las carreteras, lo que se traduce en menores emisiones de contaminantes atmosféricos, como partículas y óxidos de nitrógeno y de azufre.
 - Uso eficiente de los recursos: Un solo bus o tren puede transportar una gran cantidad de pasajeros, haciendo un uso más eficiente del espacio

vial y reduciendo la necesidad de grandes estacionamientos. Esto ayuda a optimizar el uso de recursos limitados y apoya el desarrollo urbano sostenible.

- Modos Suaves:
 - Modos de transporte sostenibles y activos: como caminar, andar en bicicleta y formas de transporte no motorizadas. Estos modos tienen un bajo impacto ambiental, contribuyen a reducir la congestión del tráfico y las emisiones y promueven estilos de vida más saludables.
 - Salud y Bienestar: Promueve la actividad física y el transporte activo, que tienen importantes beneficios para la salud. Caminar y andar en bicicleta son formas de ejercicio que pueden ayudar a mejorar la salud cardiovascular, reducir el riesgo de enfermedades crónicas y mejorar el bienestar general. Es importante considerar que los PMUS planifiquen la creación de infraestructura y políticas que apoyen la movilidad blanda.
 - Accesibilidad y equidad: Caminar y andar en bicicleta son modos de transporte asequibles y accesibles que no requieren una inversión financiera significativa o una infraestructura especializada, aunque sí políticas de promoción. Al mejorar la infraestructura para peatones y ciclistas, los PMUS pueden garantizar que todos, incluidos aquellos con movilidad limitada, tengan el mismo acceso a opciones de transporte seguras y convenientes.
 - Dependencia reducida de los automóviles: fomenta un cambio modal hacia modos de transporte sostenibles, al proporcionar infraestructura, como peatonalización de calles, carriles para bicicletas y sistemas de bicicletas compartidas. Esto puede conllevar a una reducción de la congestión del tráfico, una mejor calidad del aire y un uso más eficiente del espacio urbano.
 - Entorno urbano habitable y activo: Los carriles para bicicletas y los espacios públicos aptos para peatones pueden mejorar la estética de las áreas urbanas, promover la interacción social y crear un sentido de comunidad.
 - Seguridad y protección: Al mejorar la infraestructura para peatones y ciclistas, como veredas, cruces peatonales y carriles para bicicletas bien diseñados, las ciudades pueden crear entornos más seguros para los usuarios viales vulnerables. Esto puede conducir a la reducción de accidentes.
- Disminución de emisiones atmosféricas:
 - Sostenibilidad ambiental: el transporte contribuye significativamente a las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación del aire. Al priorizar la reducción de las emisiones del transporte en los PMUS (SOx,

- NOx, partículas en suspensión, entre otros), las ciudades pueden mitigar el impacto ambiental del sector del transporte.
- Mitigación del cambio climático: los PMUS pueden contribuir a reducir las emisiones relacionadas con el transporte si promueven modos de transporte sostenibles, el uso de vehículos de bajas emisiones y la integración de fuentes de energía renovable.
 - Mejora de la calidad del aire: con la reducción de las emisiones del transporte, como partículas, óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles, que tienen efectos adversos en la calidad del aire y provocan problemas respiratorios y otros problemas de salud.
- Transporte de Carga:
 - Gestión de la congestión: la planificación eficiente del transporte de mercancías puede ayudar a mitigar la congestión del tráfico en las zonas urbanas. Las ciudades pueden optimizar el uso de la infraestructura vial, designar zonas específicas de entrega y carga e implementar estrategias para administrar las horas pico para las actividades de carga.
 - Soluciones de entrega del último segmento: Los PMUS pueden incorporar estrategias para mejorar la entrega en el último segmento, como promover el uso de vehículos de entrega eléctricos o de bajas emisiones, alentar la consolidación de entregas y apoyar métodos de entrega alternativos como bicicletas de carga o motocicletas eléctricas.
 - Colaboración y participación de las partes interesadas: como las empresas de transporte, los proveedores de logística, los centros comerciales, los centros de distribución, los mercados, los minoristas y las autoridades locales.
 - Transición Energética:
 - Reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero. Promueve el uso de fuentes de energía limpias y renovables, como los vehículos eléctricos o las pilas de combustible de hidrógeno, que pueden reducir significativamente las emisiones y mitigar el cambio climático.
 - Eficiencia y Conservación Energética: Los vehículos eléctricos son más eficientes energéticamente en comparación con los vehículos con motor de combustión interna.
 - Diversificación de fuentes de energía: Esto reduce la dependencia de los combustibles fósiles, que son finitos y contribuyen a las incertidumbres geopolíticas y económicas.

- Innovación tecnológica y oportunidades económicas: al crear nuevos mercados, nuevas industrias, por ejemplo, la reconversión los autos con motores de combustión por motores eléctricos.
- Infraestructura de Transición Energética:
 - Promoción de la movilidad eléctrica: promover y organizar las estaciones de carga y las fábricas de vehículos eléctricos como desarrollo de actividades productivas.
 - Apoyo a modos de transporte sostenibles: Al proporcionar estaciones de carga para bicicletas eléctricas, scooters y otras soluciones de micromovilidad, las ciudades pueden facilitar la transición hacia opciones de transporte más limpias y sostenibles.
 - Desarrollo económico y creación de empleo: el establecimiento de infraestructura de transición energética, como fábricas de vehículos eléctricos o proyectos de energía renovable, puede estimular el desarrollo económico y la creación de empleo en áreas urbanas, participando en una futura economía verde.
 - Innovación e Investigación Tecnológica: El desarrollo de tecnologías de carga, soluciones de almacenamiento de baterías y técnicas de integración de energías renovables puede conducir a avances que aceleren aún más la transición energética en la movilidad urbana.
 - Resiliencia y Seguridad Energética: Al diversificar las fuentes de energía para el transporte, las ciudades pueden mitigar los riesgos asociados con la volatilidad de los precios, las interrupciones del suministro y las tensiones geopolíticas relacionadas con las fuentes de energía tradicionales.

Se ha realizado la evaluación de estos aspectos en los PMUS disponibles, donde se ha verificado que no existe un tratamiento específico para la Transición Energética del Transporte ni para la Infraestructura de Transición Energética del Transporte. Se ha utilizado una escala del 0 al 3 para explicar una evaluación cualitativa del desarrollo de temas en los Planes de Movilidad Urbana Sostenible de ciudades peruanas: Nivel 0 (se indica "NO.^{en} el cuadro), ausencia o desarrollo casi inexistente, no se menciona en el PMUS, no hay objetivos, estrategias o medidas específicas para el tema, es decir, sin mayor profundidad. Nivel 1, desarrollo básico, el tema se menciona en el PMUS, hay objetivos generales para el tema, se esbozan algunas estrategias o medidas para el tema, falta de análisis y diagnóstico, las estrategias o medidas tienen poco alcance o no están bien definidas. Nivel 2, desarrollo intermedio, el tema se desarrolla con mayor profundidad en el PMUS, hay objetivos específicos y cuantificables para el tema tratado, se definen estrategias y medidas concretas para alcanzar los objetivos,

se presenta un análisis y diagnóstico del tema. Las estrategias o medidas tienen alcance adecuado y están bien definidas. Nivel 3, desarrollo avanzado, el tema se trata de manera integral en el PMUS, hay objetivos específicos, cuantificables y de gran amplitud para el tema, se definen estrategias y medidas innovadoras y bien definidas para alcanzar los objetivos, se presenta un análisis y diagnóstico detallado del tema, se incluye un plan de seguimiento y evaluación del tema.

Ciudad	Categoría	TPU	MSU	DEM	TCA	TEN	ITE
Lima y Callao	Metrópoli Nacional	3	3	2	2	NO	NO
Arequipa	Metrópoli Regional	3	3	3	3	NO	NO
Trujillo	Metrópoli Regional	3	3	3	2	NO	NO
Chiclayo	Metrópoli Regional	2	3	1	2	NO	NO
Piura	Metrópoli Regional	3	3	2	3	NO	NO
Huancayo	Metrópoli Regional	3	3	2	3	NO	NO
Cusco	Metrópoli Regional	3	3	2	3	NO	NO
Ayacucho	Ciudad Mayor Principal	3	3	2	3	NO	NO
Puno	Ciudad Mayor	3	3	2	3	NO	NO

TABLA N° 3.27: Nivel de desarrollo de temas en los Planes de Movilidad Urbana Sostenible de ciudades peruanas

En la tabla 3.27 se han tomado las siguientes siglas: TPU (Transporte público), MSU (Modos Suaves), DEM (Disminución de emisiones), TCA (Transporte de Carga), TEN (Transición Energética), ITE (Infraestructura de transición energética).

3.6.2 Diagnóstico de las Políticas de Transición Energética del Transporte

Para el proceso de descarbonización y reducción de emisiones del Sector Transporte, existen una serie de medidas a nivel de Políticas y de herramientas de Planeamiento, que se pueden resumir en:

1. Gestionar la demanda de desplazamientos: El transporte es una demanda derivada de otras necesidades de la sociedad. Las personas y mercaderías se mueven en un contexto de requerimientos de salud, educación, trabajo, turismo, etc. Si es posible orientar la demanda para una satisfacción adecuada, cumpliendo con los requerimientos iniciales, se puede lograr el objetivo de disminuir las necesidades de movilidad sin afectar la calidad de vida.
2. Impulsar el uso de transporte público y transporte no motorizado: mediante la construcción y organización de nuevas líneas de transporte público, la mejora de las infraestructuras para el transporte no motorizado (como ciclovías y veredas) y la promoción del uso de la bicicleta y el transporte público. Se puede complementar con medidas como la reducción de impuestos para los vehículos eficientes, los incentivos para el uso del transporte público y la bicicleta, y la creación de zonas de bajas emisiones (ZBE).

3. Incrementar la tasa de ocupación de los vehículos: La mayor parte del peso de los vehículos del transporte está constituido por la carga bruta, por lo que el incremento de la capacidad con pasajeros o con carga aumentará la eficiencia en términos de unidad funcional (pasajero – km o tonelada – km). El uso de la máxima capacidad de los vehículos permite lograr el menor consumo de energía en un trayecto determinado, logrando los objetivos de desplazamiento.
4. Mejorar la eficiencia energética de los vehículos: mediante la implementación de estándares de eficiencia energética más estrictos, el uso de motores más eficientes y la promoción de vehículos híbridos y eléctricos. Debido a la condición de la industria nacional, es recomendable dar un impulso para incentivar zonas productivas que permitan la fabricación y ensamblaje de nuevos vehículos, de baterías y la adaptación y cambio de motores térmicos por motores eléctricos.
5. Disminuir la intensidad carbono de los combustibles: Enfocado en la mejora de la matriz energética de la electricidad, para disminuir su dependencia de los combustibles fósiles (principalmente del gas) y fomentar el ingreso de energías renovables.
6. Desarrollar infraestructura para el transporte eléctrico: El transporte motorizado eléctrico es más eficiente que sus equivalentes térmicos, por lo que, desde el punto de vista de eficiencia energética se debe promover su uso. Al mismo tiempo, si se logra que las fuentes energéticas provengan de fuentes renovables, puede lograrse una reducción importante en el contenido o intensidad carbono de los combustibles. Complementariamente, se requiere la construcción de estaciones de recarga eléctrica y la promoción del uso de vehículos eléctricos.

La implementación de estas medidas requiere del esfuerzo conjunto de las entidades públicas, las empresas privadas, la academia, la industria y la sociedad civil. El punto de partida es la evaluación prospectiva de los escenarios de emisiones hacia el año 2050, a partir de los cuales, se deberá seleccionar el escenario o los escenarios deseados, y trazar las políticas que permitan lograr esos objetivos, a la par de los observatorios dinámicos para evaluar los avances que se vayan realizando; las metodologías de Prospectiva reconocen distintas fases, iniciando por la búsqueda de información, diagnóstico e información de entrada para el desarrollo de la estrategia, y el planeamiento estratégico (Voros, 2003). La transición energética en el sector Transporte es un reto importante, por lo que es necesario analizar los escenarios de futuro para plantear correctamente las estrategias que logren cubrir los objetivos planteados.

Para tal efecto, se realizó la identificación de las principales políticas relacionadas con la transición energética. Para tal efecto, se identificaron 04 temas transversales:

- Transporte terrestre.
- Transición energética del transporte.
- Infraestructura para la transición energética del transporte.
- Incentivos fiscales o similares para la transición energética.

Se identificaron la siguiente lista de políticas relacionadas a la transición energética del transporte urbano:

- Congreso de la República:
 - Decreto Legislativo N° 30754 Ley Marco sobre Cambio Climático (Congreso de la República del Perú, 2018).
- Ministerio de Economía y Finanzas (MEF):
 - Plan Estratégico de Energía Sostenible y Bioenergía para Perú (PEESB): Elaboración de la Nueva Matriz Energética Sostenible y Evaluación Ambiental Estratégica, como Instrumentos de Planificación (CENERGIA, 2012).
- Ministerio del Ambiente (MINAM):
 - Política Nacional del Ambiente (Ministerio del Ambiente del Perú, 2009).
 - Decreto Supremo que aprueba el Reglamento de la Ley N° 30754, Ley Marco sobre Cambio Climático (Ministerio del Ambiente del Perú, 2020).
 - Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático del Perú: un insumo para la actualización de la Estrategia Nacional ante el Cambio Climático (Ministerio del Ambiente del Perú, 2019).
- Ministerio de Energía y Minas (MINEM):
 - Política Energética Nacional del Perú 2010-2040 (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2010b).
 - Evaluación de Implementación Anual 2020 de la Política Energética Nacional del Perú 2010-2040 (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2020b).
 - Decreto Supremo que aprueba disposiciones sobre la infraestructura de carga y abastecimiento de energía eléctrica para la movilidad eléctrica (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2020a).
 - Plan Energético Nacional 2014-2025 (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2014).

- Metodologías de Planificación Energética e Institucionalidad en el Estado Peruano (Mercados Energéticos Consultores, 2015).
- Guía de Orientación del Uso Eficiente de la Energía - Sector Transporte (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2020c).
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones (MTC):
 - Política Nacional de Transporte Urbano – PNTU (Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú, 2019)

Cada uno de los documentos citados corresponden a diferentes entidades públicas involucradas en el planeamiento estratégico de la transición energética del transporte terrestre urbano. Los documentos fueron analizados bajo cuatro ejes temáticos, con el objetivo de resaltar el grado de madurez de cada uno de estos aspectos en la definición de políticas coherentes entre sí. Se pone de relieve que en ninguno de los documentos se presentan escenarios de futuro al 2050 y al 2100, que serían los horizontes mínimos de análisis para el futuro deseado. Se observan que las políticas en general no precisan los objetivos ni la estrategia a seguir (que involucra ejes de acciones, involucrados, períodos); en los documentos técnicos complementarios se observan algunos desarrollos técnicos que sugieren algunas justificaciones de las políticas, pero que no logran un nivel de detalle suficiente y con referencias e indicadores únicos a nivel intersectorial.

3.6.2.1 Análisis de información y recursos utilizados

Se realizó la lectura de los documentos bajo la intención de encontrar una secuencia de análisis, es decir, diagnóstico, causas, objetivos, estrategia, planes, u otra jerarquización similar. Se tomó como eje de análisis el transporte terrestre urbano habida cuenta de su alta participación en las emisiones de gases de efecto invernadero, la contaminación atmosférica local, así como su casi absoluta dependencia del petróleo y del gas (recursos energéticos fósiles no renovables). A priori, y en concordancia con estrategias de otros países, uno de los primeros objetivos para la neutralidad carbono es una reducción progresiva de esta dependencia y una migración hacia un transporte con fuentes diversificadas de energía renovable. Los cuatro ejes de análisis buscan diagnosticar el enfoque de los documentos sobre el transporte y su importancia en la transición energética hacia el 2050:

- Transporte urbano (TUR): Enfoque en la demanda del transporte (personas y mercaderías), las necesidades que deben ser tratadas en función de las necesidades (salud, educación, accesibilidad, trabajo, comercio, turismo, etc.). Requiere de la organización de los sistemas de transporte y la priorización del

transporte público y del transporte suave no motorizado. Es importante tomar en cuenta la tasa de ocupación para aumentar la eficiencia energética y de emisiones en los desplazamientos, así como el ordenamiento urbano para la creación de zonas de bajas emisiones (ZBE).

- Transición energética del transporte (TEN): Enfoque en la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles, y generar una nueva economía basada en la adaptación a la electromovilidad, y a su vez, que la electricidad provenga de fuentes renovables para la disminución de la intensidad carbono. También incluye políticas que favorezca la mejora de la eficiencia energética de los vehículos existentes y la renovación del parque automotor.
- Infraestructura para la transición energética del transporte (ITE): Enfoque en la creación de un ecosistema para el desarrollo de los vehículos eléctricos, tanto a nivel de mercados como de industria nacional para la fabricación de repuestos, baterías, adaptación / cambio de motores térmicos por eléctricos. Desde el punto de vista del suministro de recursos energéticos renovables, la infraestructura necesaria estará basada en la generación (nuevas centrales hidroeléctricas, eólicas y solares), transmisión (nuevas líneas de alta tensión que conecten las nuevas centrales RER), generación distribuida y microgeneración (incluyendo redes inteligentes) y los puntos de recarga para los vehículos. La infraestructura se complementa con vías y adecuaciones urbanas para el transporte público masivo y organizado, así como para el transporte no motorizado.
- Incentivos fiscales o similares para la transición energética (IFI): Enfoque en los mecanismos de financiamiento que pueden ser dedicados para el cambio del comportamiento del mercado existente. A partir del incremento de la recaudación fiscal (lo cual requiere una formalización inherente de todos los servicios de transporte), se pueden generar incentivos para la reducción del costo de la energía eléctrica de fuentes renovables, para la compra de vehículos eléctricos, para la instalación de estaciones de recarga (electrolineras). Así mismo, establecer estándares de eficiencia energética en los vehículos con motor térmico para incrementar las restricciones a su uso.

Se presenta el análisis multicriterio (04) mencionado para cada uno de los documentos descritos:

Congreso (2018) - Ley Marco sobre el Cambio Climático (CON-LMC)

- Transporte Urbano: Se hace referencia al transporte sostenible como una de las medidas de mitigación frente al cambio climático, sin mayor desarrollo ni acciones particulares.

- Transición Energética: Se propone el cambio progresivo de la matriz energética hacia energías renovables y limpias. Se hace referencia al desarrollo bajo en carbono para desvincular el crecimiento económico de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI).
- Infraestructura para la Transición Energética: Sólo se menciona la necesidad de adaptación de la infraestructura frente al cambio climático, no hay menciones para la infraestructura de carga.
- Incentivos Fiscales: Se establece que el MINAM y el MEF establecerán los lineamientos para el financiamiento climático, y velarán por su uso. De forma particular, se anuncia la creación de un fondo de garantías para la promoción de inversiones en energías renovables.

MEF (2012) - Plan Estratégico de Energía Sostenible y Bioenergía para Perú (MEF-EESB)

- Transporte Urbano: Reducir el consumo de combustibles enfocado en proyectos de transporte masivo de pasajeros, y con mejora de la eficiencia energética. Dentro de los lineamientos generales y programas prioritarios del Plan de Eficiencia Energética se propone el Programa para el Sector Transporte de alcance intersectorial. Entre otros aspectos, se propone el programa intensivo para la conducción racional y eficiente de choferes, de la gestión eficiente de combustibles, y de la reconversión tecnológica del parque automotor.
- Transición Energética: La definen como el uso del GNV en el Transporte Público a imagen del Sistema Metropolitano que usa Buses a GNV. No proyectan la transición energética del transporte, aunque evalúan escenarios con recursos renovables en la estructura de la matriz energética del transporte. Se describen aspectos para el fortalecimiento y desarrollo de la generación y distribución eléctrica a gran escala, en particular de tecnologías limpias con una inversión superior a 7 mil millones de dólares.
- Infraestructura para la Transición Energética: Se propone inversión en el sistema eléctrico para aumentar una capacidad de producción de 5 GW de potencia instalada al año 2040. No existen menciones particulares para la infraestructura del transporte, como la recarga o el análisis de la demanda para los requerimientos del cambio del parque automotor eléctrico.
- Incentivos Fiscales: Se sugieren incentivos por el uso de energía limpia. Los incentivos estarían enfocados en la disminución del IGV para las actividades neutras en carbono; sin embargo, no profundiza el análisis de esta propuesta. Se indica que podría haber una reducción de impuestos relacionados a la

conducción racional, a la gestión eficiente del combustible, y a la reconversión tecnológica.

MINAM (2009) – Política Nacional del Ambiente (AMB-PNA)

- Transporte Urbano: Sólo se hace una citación a usar medios de transporte y combustibles enfocados en la reducción de la contaminación atmosférica.
- Transición Energética: Ninguno de los 4 ejes de la política (conservación y aprovechamiento sostenible, gestión integral calidad ambiental, gobernanza ambiental, compromisos y oportunidades ambientales internacionales) hace referencia a la Transición Energética del transporte, aunque se hace una mención indirecta en cuanto al cumplimiento de obligaciones y acuerdos internacionales. También se hace referencia a la eficiencia energética de forma general. Se menciona la promoción de la inversión para biocombustibles y energías renovables como una oportunidad para la sustitución del petróleo y el gas.
- Infraestructura para la Transición Energética: La infraestructura está orientada a la calidad ambiental, no hay referencias a la infraestructura para la transición energética.
- Incentivos Fiscales: No existen menciones particulares.

MINAM (2020) – Reglamento sobre Ley Marco sobre Cambio Climático (AM-B-RLMC)

- Transporte Urbano: Pese a que el transporte (y en particular el transporte terrestre) es el mayor emisor de gases de efecto invernadero (GEI) desde el punto de vista energético, no existe ninguna referencia a este sector.
- Transición Energética: Se indica que las medidas de mitigación deben orientarse, entre otros aspectos, a la energía, y a la reducción de emisiones GEI.
- Infraestructura para la Transición Energética: No existen referencias particulares.
- Incentivos Fiscales: Recomendaciones generales de incentivos por reducción de emisiones GEI, así como la promoción de inversión en energías renovables y limpias. Los mecanismos de incentivos están relacionados a fomentar las Asociaciones Público Privados, y otros mecanismos como las obras por impuestos, bonos verdes y el financiamiento climático internacional. Las medidas están orientadas a la resiliencia y a la disminución de gases de efecto invernadero (GEI), sin mayor desarrollo ni referencia al transporte terrestre.

MINAM (2021) - RM. 096-2021-MINAM Plan Nacional de Adaptación al Cambio Climático del Perú (AMB-ACC)

- Transporte Urbano: El diagnóstico está asociado a la repercusión del cambio climático sobre la infraestructura y las actividades económicas, sobre la vulnerabilidad de la infraestructura y su capacidad resiliente; no se detalla específicamente sobre un cambio en la matriz energética del transporte, ni la necesidad de la planificación urbana y del transporte.
- Transición Energética: Dentro del capítulo 4 del citado documento (Ámbitos adicionales para la adaptación al cambio climático), se consideran algunas medidas para la transición energética, fomentando la economía baja en carbono, con medidas que fomentan las energías renovables, la eficiencia energética y el cambio de combustibles. No hay otras referencias ni medidas de importancia.
- Infraestructura para la Transición Energética: Se contemplan algunas medidas para fomentar infraestructura para la resiliencia de la economía frente al cambio climático; no hay menciones particulares para la infraestructura de recarga, los sistemas de distribución para electromovilidad, industria de vehículos eléctricos, ni de baterías. Se nota una ausencia total del sector Transporte como uno de los principales emisores de gases de efecto invernadero.
- Incentivos Fiscales: En el capítulo 6 del citado documento (Financiamiento para la adaptación), se pone en relieve la necesidad de contar con un sector transporte de bajas emisiones, y del financiamiento que podría accederse bajo mecanismos de desarrollo limpio y bonos de carbono. También se propone la promoción de la inversión privada a través de asociaciones público privadas (APP).

MINEM (2010) - DS-064-2010-EM Política Energética Nacional del Perú 2010-2040 (MEM-PEN)

- Transporte Urbano: Sólo se menciona el esfuerzo para la sustitución de combustibles líquidos por Gas Natural o GLP para los diferentes tipos de vehículos.
- Transición Energética: Se declara como uno de los lineamientos la mitigación de las emisiones provenientes de las actividades energéticas. De otro lado, se propone la diversificación de recursos energéticos e impulso a los RER.
- Infraestructura para la Transición Energética: Integración con mercados energéticos regionales. También la priorización de las líneas de transmisión para la seguridad y confiabilidad del sector eléctrico, así como la generación distribuida. No hay menciones a la infraestructura para la electromovilidad.

- Incentivos Fiscales: Incentivos para el desarrollo de infraestructura requerida. Incentivos por uso eficiente de la energía. Promoción de los proyectos de energía con el uso de los certificados de reducción de emisiones (CER) asociados al mercado de carbono.

MINEM (2020) - Política Energética Nacional del Perú 2010-2040 (Evaluación Anual 2020) (MEM-PEN20)

- Transporte Urbano: Toma la utilización del Gas Natural en el transporte como parte de los objetivos prioritarios, enfocado en la seguridad energética del país. Sin embargo, las reservas de gas en el Perú están limitadas a pocos lustros. Se destaca el dato de que el transporte es uno de los principales consumidores de energía, así como la mayor fuente de emisiones de gases de efecto invernadero.
- Transición Energética: En este documento, la transición energética se interpreta como la masificación del gas natural y la implementación de proyectos emblemáticos de hidrocarburos como parte de la política de seguridad y diversificación de la matriz energética”. Se plantea el desarrollo de energías limpias y de bajas emisiones contaminantes.
- Infraestructura para la Transición Energética: Indica que se están proponiendo políticas para la infraestructura de carga para la electromovilidad. De otro lado, se propone aumentar la infraestructura de almacenamiento de combustibles para mejorar la seguridad energética del país.
- Incentivos Fiscales: Se da cuenta del Programa BonoGas Vehicular, y de las 3033 conversiones vehiculares financiadas con fondos públicos.

MINEM (2020) - DS022-2020-EM Infraestructura de carga y abastecimiento de energía eléctrica para la movilidad eléctrica (PEN-EMOV)

- Transporte Urbano: Está enfocado en la promoción de vehículos eléctricos. Se destacan algunos aspectos como el uso racional de los recursos energéticos, y la reducción de la dependencia de los combustibles fósiles. No hay mención a los aspectos de planificación de sistemas de transporte ni su interrelación con las ciudades.
- Transición Energética: Se menciona en el Objeto, aunque sin metas ni indicadores concretos. Sin embargo, todo el documento está dedicado a conceptos relativos a la disminución de la huella de carbono y a la eficiencia energética.

- Infraestructura para la Transición Energética: Se presentan algunos lineamientos escuetos sobre infraestructura de carga. Sin embargo, no se indica la forma de operacionalizar estos lineamientos. Se requiere una visión intersectorial con el Ministerio de Vivienda y el Ministerio de Transportes y Comunicaciones.
- Incentivos Fiscales: No existen referencias.

MINEM (2014) – Plan Energético Nacional 2014-2025 (PLEN)

- Transporte Urbano: El enfoque principal es la sustitución de los combustibles líquidos (productos del petróleo) por GLP y GNV. Complementariamente, se hace una referencia a la propuesta de la ampliación de los corredores de transporte masivo y de metros (ferrovías electrificadas).
- Transición Energética: Pese a que considera que el documento es central para la transición energética del país, no se muestra ninguna intención para un proceso de descarbonización de la energía. Menos aún en el caso del transporte. Se hacen algunas citaciones difusas a la transición hacia una “economía de menor emisión de carbono”.
- Infraestructura para la Transición Energética: Orientada principalmente a la infraestructura para la explotación, refinación y distribución del petróleo y gas. También se resalta la importancia de fortalecer la infraestructura de distribución de electricidad.
- Incentivos Fiscales: Orientado a mejorar la permisología para promover “la inversión en la exploración y explotación del petróleo de manera sostenible”.

MINEM (2015) – Metodologías de Planificación Energética e Institucionalidad en el Estado Peruano (MEM-MPE)

- Transporte Urbano: No hay referencias.
- Transición Energética: Describen los mecanismos de transición energética, con casos de estudios de diferentes países: Brasil, Chile, Colombia y el Reino Unido. Se hace énfasis en la planificación, no hay mayor detalle sobre las metas requeridas en el transporte terrestre ni urbano. Se hacen menciones esporádicas para la necesidad de monitorear las futuras emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en las metodologías y modelos para la planificación energética.
- Infraestructura para la Transición Energética: Énfasis en el proceso de desarrollo de la infraestructura energética, y de su validación social. No hay metas

ni prospectiva de lo que requiere para el transporte terrestre ni el transporte urbano.

- Incentivos Fiscales: Se brindan algunos ejemplos de incentivos, sin mayor detalle de su aplicación en la realidad peruana ni en el transporte urbano. Se hace una reflexión general sobre el impacto de la tarifa en el mercado eléctrico nacional.

MINEM DGEE (2020) - Guía de Orientación del Uso Eficiente de la Energía - Sector Transporte (MEM-GET)

- Transporte Urbano: Se presentan las alternativas de eficiencia energética relacionadas con la normativa europea, en particular Euro IV (europeo) y Tier (EEUU). Se presentan análisis sobre indicadores de eficiencia energética por contexto geográfico, desde el punto de vista de sistema de eficiencia, distribución modal de los desplazamientos y eficiencia vehicular. Se insiste en la necesidad de disminuir el consumo de energéticos fósiles, crear un mercado para la electromovilidad, fomentar el cambio del parque automotor; también se insiste en la necesidad de incrementar la tasa de ocupación vehicular. No se destacan los aspectos de demanda y demanda proyectada como requisitos para la ampliación del sistema eléctrico de generación, distribución, generación distribuida, estaciones de recarga y puntos de recarga domiciliarios.
- Transición Energética: Orientado básicamente en la eficiencia. Por ejemplo, que se pueden lograr ahorros potenciales entre 10-15% por la optimización de recorridos para evitar km innecesarios, evitar frenos y partidas bruscas por aceleración/desaceleración, y 5% por la presión adecuada en los neumáticos. Los valores de reducción de emisiones y de inversión para la transición por cambio de combustible apenas tiene un impacto del 1%.
- Infraestructura para la Transición Energética: No se presentan menciones particulares, salvo lo relacionado a la infraestructura vial y férrea, a la infraestructura para mejorar la movilidad. Salvo algunos esporádicos conceptos, no se puntualiza sobre la infraestructura de generación eléctrica que se requerirá para el futuro parque automotor eléctrico ni del sistema de recarga por estaciones y domiciliaria para vehículos.
- Incentivos Fiscales: Se proponen mecanismos de incentivo a bajos consumos de combustible individual y por flota, una medida para las empresas, la cual no es fácil implementar a nivel público. Se sugiere el uso de los mecanismo de financiamiento climático, relacionado a los proyectos de eficiencia energética y energías renovables.

MTC (2019) - Política Nacional de Transporte Urbano (MTC-PNTU)

- **Transporte Urbano:** Se describe la situación futura deseada, basada en algunos principios rectores: El usuario es la razón de ser del servicio de transporte, el servicio público, la estructuración responsable, la sostenibilidad, la institucionalidad pública fuerte y con alta capacidad técnica, cooperación público-privada, integración, compatibilidad con el ordenamiento territorial, eficiencia en la gestión del transporte, uso de los recursos y tecnología, la inclusión, la igualdad y no discriminación. Además, propone 04 objetivos prioritarios: OP1: sistemas de transporte urbano público de alta eficacia. OP2: Gobernanza del transporte urbano de personas y mercancías. OP3: Desarrollo de servicios de transporte urbano con infraestructura adecuada. OP4: Satisfacción de necesidades de transporte urbano en coordinación con el desarrollo urbano. No se describen los escenarios futuros, ni el estudio prospectivo de la demanda ni el desarrollo futuro de las ciudades, sin embargo, los ejes rectores y objetivos se orientan a una necesidad de organización del sistema actual de transporte urbano.
- **Transición Energética:** Se proponen algunas metas: Reducir la dependencia de los combustibles fósiles. Promover el uso de energías renovables. Mejorar la eficiencia energética. Se describen metas con indicadores para el año 2030, como la reducción del 30% del tiempo diario de viaje, la disminución de muertes por accidentes viales y la reducción del 20% de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) para ese año.
- **Infraestructura para la Transición Energética:** Enfocado principalmente en los sistemas de transporte público y transporte no motorizado. No hay previsiones para la electromovilidad.
- **Incentivos Fiscales:** Las recomendaciones se orientan principalmente al subsidio de la tarifa pública. Se detallan algunas fuentes alternativas, como impuestos específicos, cobros por congestión, estacionamientos, valoración inmobiliaria, plusvalía, y criterios para la participación privada en este sector económico. Las medidas no son precisas, y pueden conllevar a cambios legislativos que aún no están previstos en las normas peruanas.

Se ha utilizado una escala del 0 al 3 para explicar una evaluación cualitativa de las Políticas de Transición Energética del Transporte en el Perú, tomando en cuenta los siguientes criterios: TUR (Transporte Urbano), TEN (Transición Energética), ITE (Infraestructura para la Transición Energética), IFI (Incentivos Fiscales). Nivel 0, ausencia o desarrollo casi inexistente, no se menciona en las políticas, no hay objetivos, estrategias o medidas específicas para el tema, es decir, sin mayor profundidad.

Nivel 1, desarrollo básico, el tema se menciona en las políticas, hay objetivos generales para el tema, se esbozan algunas estrategias o medidas para el tema, falta de análisis y diagnóstico, las estrategias o medidas tienen poco alcance o no están bien definidas. Nivel 2, desarrollo intermedio, el tema se desarrolla con mayor profundidad en las políticas, hay objetivos específicos y cuantificables para el tema tratado, se definen estrategias y medidas concretas para alcanzar los objetivos, se presenta un análisis y diagnóstico del tema. Las estrategias o medidas tienen alcance adecuado y están bien definidas. Nivel 3, desarrollo avanzado, el tema se trata de manera integral en las políticas, hay objetivos específicos, cuantificables y de gran amplitud para el tema, se definen estrategias y medidas innovadoras y bien definidas para alcanzar los objetivos, se presenta un análisis y diagnóstico detallado del tema, se incluye un plan de seguimiento y evaluación del tema. Se presenta a continuación el resumen del análisis:

Docum./Criterio	TUR	TEN	ITE	IFI	Puntaje	%
CON-LMC	0	3	0	2	5	42
MEF-EESB	3	2	2	2	9	75
AMB-PNA	1	2	1	0	4	33
AMB-RLMC	0	1	0	2	3	25
AMB-ACC	1	1	1	1	4	33
MEM-PEN	1	2	1	1	5	42
MEM-PEN20	1	1	2	1	5	42
MEM-EMOV	1	1	1	0	3	25
MEM-PLN	1	0	2	0	3	25
MEM-MPE	0	1	0	1	2	17
MEM-GET	3	2	1	2	8	67
MTC-PNTU	3	3	2	1	9	75
Puntaje	15	19	13	13		
%	42	53	36	36		

TABLA N° 3.28: Evaluación de Políticas de Transición Energética del Transporte en el Perú

Los documentos con las siglas corresponden a cada entidad y los archivos analizados, las iniciales corresponden a: CON (Congreso), MEF (Ministerio de Economía y Finanzas), AMB (Ministerio del Ambiente), MEM (Ministerio de Energía y Minas, MTC (Ministerio de Transportes y Comunicaciones).

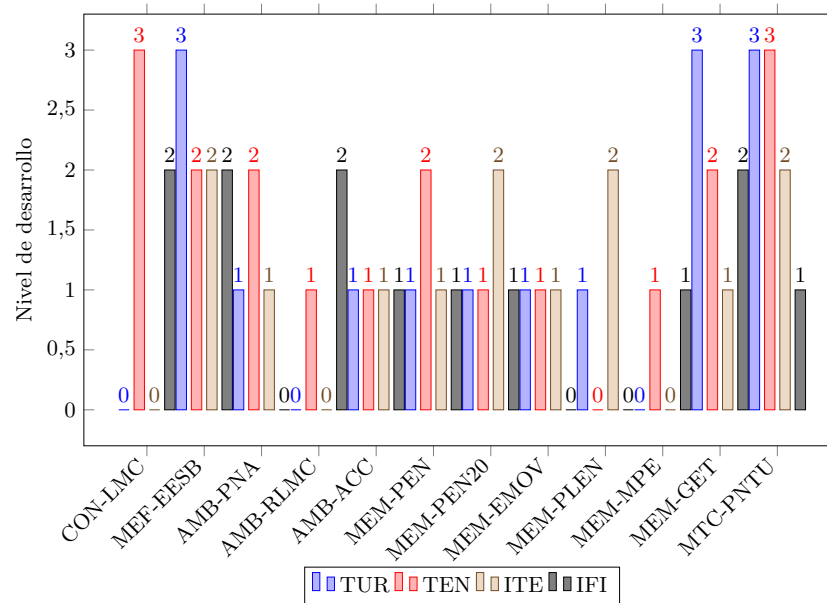


FIGURA N° 3.80: Evaluación de las Políticas de Transición Energética del Transporte según criterios cualitativos

Se observa que las políticas y documentos de planificación no contienen a detalle los elementos requeridos para un adecuado diagnóstico, planificación, estrategia, metas e indicadores de seguimiento para la transición energética del transporte.

CAPÍTULO IV: ANÁLISIS PROSPECTIVO Y RESULTADOS

En este capítulo se presentan los análisis de escenarios, y los resultados de la investigación. Complementariamente, se presenta la contrastación de las hipótesis.

4.1 Análisis Prospectivo

4.1.1 Matriz Energética del Transporte

La matriz energética del transporte se refiere a las diferentes fuentes de energía que se utilizan para propulsar vehículos y otros modos de transporte. El sector del transporte es un importante consumidor de energía y representa una parte importante de las emisiones mundiales de gases de efecto invernadero. Según la página web oficial [Infocarbono](#), el Sector Transporte aporta el 12.2% de GEI en el Perú, y sin contar el sector UTCUTS (uso de la tierra, cambio de uso de la tierra y silvicultura), se elevaría al 23.4% como principal emisor y asociado únicamente al consumo energético, es decir, sin considerar los GEI embebidos en la fabricación de los vehículos. En el Perú, el 12. Según el Balance Nacional de Energía (DGEE-MINEM, 2021), el 89% de la energía del sector transporte corresponde al transporte terrestre, y el Sector Transporte constituye el 40% (entre el 39% (2020) y 41% (2019)) del Consumo Total de Energía según descomposición por sectores económicos (Tabla 11). La matriz energética específica del transporte puede variar según la región, el tipo de vehículos en uso y otros factores. En ciudades menores, la matriz está más vinculada al transporte de las cortas distancia, por ejemplo, a la circulación de mototaxis. En ciudades intermedias y mayores, la energía del transporte se amplía hacia las unidades de transporte público. En las Metrópolis regionales, la matriz energética del transporte se concentra en los grandes desplazamientos que se realizan principalmente en autos (taxis y colectivos) y transporte público (combis, microbuses y buses). En la Metrópoli Nacional (Lima y Callao), el consumo energético está asociado a los desplazamientos pendulares y concentrados en el transporte público.

Las principales fuentes de energía que se utilizan actualmente en el transporte:

- Combustibles fósiles: Los derivados del petróleo (gasolina, diésel y GLP) y del gas natural (GNV), son las fuentes de energía más comunes para el transporte en todo el mundo; en el Perú representan entre el 85% (2019) y 91% (2020) según el Balance Nacional de Energía (DGEE-MINEM, 2021). Estos combustibles se utilizan para hacer funcionar los motores de combustión interna, que se encuentran en la mayoría de las motocicletas, automóviles, camiones, autobuses, aviones y barcos. Las cadenas de distribución de combustibles fósiles

están basados en las grandes cadenas de grifos y estaciones de servicio presentes en el Perú, como Petro Perú, Repsol, Primax, Pecsá, y otros cadenas de distribución menores.

- **Biocombustibles:** Son combustibles que se fabrican a partir de materia prima de origen vegetal, como el maíz, la caña de azúcar y la soja. Estos combustibles representan alrededor del 4% de las importaciones de hidrocarburos (DGEE-MINEM, 2021) y se pueden usar en lugar de gasolina o combustible diesel, en vehículos con motores modificados o en proporciones para motores convencionales (10% para motores de gasolina y 20% para motores de diésel). Algunos tipos de biocombustibles, como el etanol celulósico, se pueden producir a partir de fuentes no alimentarias, como los desechos agrícolas; y esto se convierte en una oportunidad para los desechos orgánicos en las ciudades, que pueden generar una oportunidad para el tratamiento de los residuos sólidos. También se pueden incorporar plantas de biogás como complemento de las estaciones depuradoras de aguas residuales (PTAR).
- **Electricidad:** Los vehículos eléctricos (EV) utilizan la electricidad almacenada en baterías para alimentar sus motores eléctricos. La electricidad puede provenir de una variedad de fuentes, incluidas fuentes renovables como la energía solar y eólica. Sin embargo, la huella de carbono debe observarse a lo largo de todo el ciclo de vida (ACV), es decir, considerando las emisiones en la fuente de generación. En el caso del Perú, la matriz tiene un componente altamente renovable (principalmente hidroeléctrica), pero en la misma proporción ha instalado una capacidad de producción eléctrica basada en gas natural (según el Balance Nacional de Energía (DGEE-MINEM, 2021), los combustibles fósiles generan el 37.2% de la energía eléctrica, y entre ellos, el Gas Natural tiene el mayor aporte, 34.3%).
- **Hidrógeno:** las celdas de combustible de hidrógeno convierten el gas de hidrógeno (H_2) en electricidad, que puede alimentar vehículos eléctricos. El hidrógeno se puede producir a partir de una variedad de fuentes, incluido el gas natural y fuentes renovables como la eólica y la solar. Los tipos de hidrógeno se asignan diversos colores, donde el color verde (H_2v) corresponde a la producción a partir de fuentes sin emisiones de gases de efecto invernadero. La transición energética del transporte requiere que se desarrolle la industria del hidrógeno verde. Algunas zonas en el Perú pueden ser adecuadas para tal propósito, la producción de H_2v a partir de Parques Solares como la zona del Sur Andino, con alta exposición solar y próxima al mar, a partir de Central Eólicas, así como algunas zonas del centro y norte de la Costa Peruana, a partir de Centrales Hidroeléctricas, como en la cordillera de los Andes, lo cual ayudará en proyectos de conservación de lagos y lagunas altoandinos.

- Combustibles sintéticos (e-fuel), que parten del principio de combinar el hidrógeno libre de la hidrólisis del agua, y combinarlo con el dióxido de carbono (CO₂) capturada de la atmósfera o de un proceso de combustión (por ejemplo, en plantas de generación eléctrica térmica). Estos comubustibles tienen procesos costosos, por lo que es posible que su aplicación se reduzca a los sectores de transporte que tengan dificultades con la electrificación, como los camiones de carga a gran distancia, los barcos y los aviones.

En muchas partes del mundo y en el Perú, los combustibles fósiles siguen siendo ampliamente la fuente de energía dominante para el transporte. Sin embargo, ha habido un interés creciente en los combustibles alternativos, como los biocombustibles, la electricidad y el hidrógeno, como parte de los esfuerzos para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y mejorar la calidad del aire. Este esfuerzo está condicionado al desarrollo de tecnología competitiva, a las políticas que tomen los gobiernos, a la forma y organización de las ciudades, a la implementación de un sistema de transporte público y de carga eficiente, entre otros aspectos.

El posicionamiento del Perú en la región es mixto, en términos de capacidad, se observa que su parque eléctrico es Renovable a medias, en tanto que países como México y Argentina tienen un parque básicamente No Renovable, y Chile, un parque que recientemente ha ido potenciando como Renovable, a partir de su intensa política para aprovechar los recursos de viento (al Sur) y solares (al Norte) del país.

Capacidad del Sistema Eléctrico (MW)	México (2021)		Argentina (2020)		Chile (2022)		Perú (2022)	
Renovables	26,900	31.2%	16,017	37.2%	20,586	62.0%	6,221	47.2%
Hidráulica	12,614	14.6%	11,855	27.5%	7,396	22.3%	5,202	39.4%
Eólica	6,977	8.1%	3,169	7.4%	4,328	13.0%	672	5.1%
Solar	5,955	6.9%	860	2.0%	8,018	24.1%	282	2.1%
Bioenergía, Geotérmica	1,354	1.6%	133	0.3%	844	2.5%	64	0.5%
No Renovables	59,254	68.8%	27,077	62.8%	12,633	38.0%	6,969	52.8%
Gas	40,390	46.9%	21,365	49.6%	5,031	15.1%	4,228	32.1%
Carbón	5,463	6.3%	396	0.9%	4,332	13.0%	140	1.1%
Petróleo	11,793	13.7%	3,561	8.3%	3,270	9.8%	2,601	19.7%
Nuclear	1,608	1.9%	1,755	4.1%	-	0.0%	-	0.0%
Total	86,154	100%	43,094	100%	33,219	100%	13,190	100%

TABLA N° 4.1: Capacidad de producción eléctrica de los países, según fuente de energía (Fuente: México - CONACYT Energía, Argentina - Informe Gobierno a IEA, Chile - Generadoras.cl, Perú - COES, SEIN)

Pese a un menor parque eléctrico, la generación de energía eléctrica peruana es mayoritariamente Renovable, explicada por su mayor efectividad en el uso del recurso hidráulico. La electricidad chilena, por su lado, ha evolucionado recientemente hacia una generación eléctrica renovable, equivalente a la peruana en proporción.

Generación Eléctrica (GWh)	México (2021)		Argentina (2020)		Chile (2022)		Perú (2022)	
Renovables	77,686	24.0%	41,830	31.2%	46,266	55.6%	31,592	56.3%
Hidráulica	34,717	10.7%	30,350	22.6%	20,290	24.4%	28,486	50.8%
Eólica	21,075	6.5%	9,409	7.0%	8,872	10.7%	1,930	3.4%
Solar	17,069	5.3%	1,345	1.0%	14,463	17.4%	821	1.5%
Bioenergía, Geotérmica	4,825	1.5%	726	0.5%	2,641	3.2%	354	0.6%
No Renovables	245,841	76.0%	92,347	68.8%	36,979	44.4%	24,493	43.7%
Gas	203,335	62.8%	69,471	51.8%	15,895	19.1%	24,108	43.0%
Carbón	8,704	2.7%	1,287	1.0%	19,291	23.2%	90	0.2%
Petróleo	22,196	6.9%	11,579	8.6%	1,793	2.2%	295	0.5%
Nuclear	11,606	3.6%	10,011	7.5%	-	0.0%	-	0.0%
Total	323,527	100%	134,177	100%	83,245	100%	56,084	100%

TABLA N° 4.2: Generación eléctrica de los países, según fuente de energía, en la última línea se obtienen los factores de planta globales de los países, (Fuente: México - CONACYT Energía, Argentina - Informe Gobierno a IEA, Chile - Generadoras.cl, Perú - COES, SEIN)

La generación de electricidad en México y Argentina mantienen bajos indicadores de generación renovable (24 y 31 % respectivamente), y su camino hacia la descarbonización marca un reto adicional para la electromovilidad, debido a que no será suficiente con migrar hacia los vehículos eléctricos, sino también hacia una larga inversión en energías renovables. En el caso peruano y recientemente el chileno, existe un mejor posicionamiento en la generación de electricidad renovable (en ambos casos, alrededor del 56 % del total de la matriz eléctrica), lo cual brinda una mejor perspectiva peruana para la futura electrificación del sector transporte de baja intensidad carbono, y que pueda tener un efecto sensible en los objetivos de reducir los gases de efecto invernadero. Adicionalmente, si los nuevos proyectos de generación eléctrica son renovables, la ventaja competitiva del país se fortalece.

Factor de Planta	México (2021)	Argentina (2020)	Chile (2022)	Perú (2022)
Renovables	0.33	0.30	0.26	0.58
Hidráulica	0.31	0.29	0.31	0.63
Eólica	0.34	0.34	0.23	0.33
Solar	0.33	0.18	0.21	0.33
Bioenergía, Geotérmica	0.41	0.62	0.36	0.63
No Renovables	0.47	0.39	0.33	0.40
Gas	0.57	0.37	0.36	0.65
Carbón	0.18	0.37	0.51	0.07
Petróleo	0.21	0.37	0.06	0.01
Nuclear	0.82	0.65	-	-
Total	0.43	0.36	0.29	0.49

TABLA N° 4.3: Factor de Planta de la generación eléctrica de los países, según fuente de energía, (Fuente: México - CONACYT Energía, Argentina - Informe Gobierno a IEA, Chile - Generadoras.cl, Perú - COES, SEIN)

Otra ventaja comparativa del caso peruano frente a sus pares latinoamericanos, es el factor de planta de la generación eléctrica, lo que demuestra la alta disponibilidad de los recursos renovables, el Factor de Planta del Perú RER equivalente a 0.58 casi duplica a sus vecinos latinoamericanos en general. Las nuevas centrales eléctricas

renovables deberán suponer factores de planta altos para mantener la proporción y garantizar el retorno de la inversión en centrales de generación (con un mayor factor de planta, se podrá contar con una mayor producción energética, al mismo tiempo, una menor inversión inicial mejora los ratios de bancabilidad del proyecto, en particular para reducir los períodos de recuperación de la inversión (*payback period*). En particular, se recomienda que las centrales fotovoltaicas superen un factor de planta de 0.30 y que las centrales eólicas superen un factor de planta de 0.50 al menos.

4.1.2 Inventario Energético del Transporte

El inventario de energía del transporte se lleva a cabo para estimar la cantidad total de energía consumida y los gases de efecto invernadero emitidos por el sector del transporte, así como para comprender el desglose del uso de energía y emisiones por diferentes modos de transporte, tipos de vehículos y fuentes de energía. El proceso se describe a continuación:

- Recopilar datos sobre la población, la demanda de viajes (generadores y atractores), partición modal y el uso de vehículos; se recopilan datos sobre la cantidad de vehículos en uso en un área determinada, así como su marca, modelo, edad y patrones de uso. Estos datos se obtienen de fuentes como INEI, MTC, SUNARP, y encuestas de transporte. Una alternativa es el uso de datos de seguimiento de GPS.
- Estimar el consumo de combustible en función de los valores de eficiencia de combustible promedio, que se pueden obtener de fuentes como bases de datos de economía de combustible, especificaciones del fabricante y datos de pruebas de combustible.
- Estimar el consumo de energía para otros modos de transporte que no utilizan combustibles fósiles, como los vehículos eléctricos y el transporte público electrificado (caso de la Línea 1, y futura Línea 2 y otras líneas del Metro de Lima y Callao), el consumo de energía se estima en función de la cantidad de electricidad. El consumo de electricidad de los vehículos eléctricos es aún marginal en el ámbito peruano.
- Calcular el consumo total de energía sumando el consumo de energía estimado para todos los tipos de vehículos y modos de transporte.
- Analizar resultados para identificar tendencias y patrones en el consumo de energía, así como para evaluar el impacto de diferentes políticas y programas destinados a reducir el uso de energía y promover un transporte más sostenible.

El inventario de energía del transporte es una herramienta importante para comprender el consumo de energía del sector del transporte y para desarrollar estrategias para promover prácticas de transporte más sostenibles, con menor consumo de energía por pasajero transportado, con menores emisiones de contaminantes atmosféricos y para la disminución de la huella de carbono del transporte. La línea base puede establecerse a partir del año 2019 (el año 2020 fue un año atípico debido a la pandemia), con un monitoreo adecuado para objetivos a largo plazo (30, 20, 10, 5 años), y de corto plazo (3 y 2 años).

4.1.3 Sistema de recarga

Es el eje para el desarrollo y cobertura del abastecimiento de los vehículos eléctricos, tomando en cuenta la baja densidad energética de las baterías, se requiere que los puntos estén distribuidos en todo el territorio, y en particular, los sistemas de recarga rápida. Recientemente, se ha visto la participación de las empresas eléctricas (como Enel) en el fomento e instalación de sistemas de recarga, y en particular, de la recarga rápida.

Los requisitos técnicos están asociados a la seguridad y el tiempo de recarga principalmente. Deben contar con una fuente conectada a la red eléctrica y un adecuado sistema de control. La clasificación del tiempo de recarga puede establecerse por rangos:

- Carga lenta: Puede realizarse en los domicilios, con un adaptador de la corriente. La carga es bastante lenta, pero, se aprovecha el tiempo en el que el vehículo está estacionado en la vivienda o la oficina. El adaptador puede contar con un inversor de corriente, de forma que el automóvil pueda convertirse en un sistema de almacenamiento para la edificación, esto favorecería a la estabilidad de la carga eléctrica en las horas de mayor consumo, y promovería el uso de energías renovables.
- Carga rápida: Entre 30 minutos y una hora, para un vehículo convencional.
- Carga ultrarrápida: Entre 15 y 30 minutos, el sistema requiere de alta potencia y su uso extendido puede sobrecargar la red eléctrica.

En octubre del 2023, Enel anuncia la cobertura de 821 km de la costa peruana con 10 cargadores rápidos (DC) para vehículos eléctricos, los cargadores pertenecen a diferentes concesionarias: Aunor (en Virú, en Chimbote, en Huarney, en Fortaleza), Estación UltraGrifos en Chorrillos, Grifo Kio en Lurin, Grifo Petro Perú en San Pedro de Mala y Grifo el Óvalo en el distrito de Ica. Los cargadores de alta capacidad

permiten que se desarrollen las grandes distancias, y pueden fomentar el desarrollo de viajes largos en automóviles, y sobretodo, de la carga pesada.

4.1.4 Escenarios prospectivos

La prospectiva es el arte de proponer escenarios a partir del estudio de las tendencias hacia el futuro, a partir de las cuales se pueden establecer ejes de acción que permitan cumplir con objetivos de largo plazo, que en cascada se traducen en objetivos de mediano y corto plazo. La estrategia es la forma de lograr los objetivos trazados por los escenarios deseados de la prospectiva. El estudio de las diferentes tendencias depende de muchos factores, algunos de ellos relacionados con el medio ambiente (cambio climático, agotamiento de recursos, disminución de la biodiversidad, etc.), con la tecnología, y, sobre todo, relacionados con la sociedad (evolución de marco político y jurídico, cambios normativos, cambios culturales, intereses de actores sociales y políticos, etc.).

La Prospectiva es una mirada de largo plazo, sin anclarse en los planes de corto plazo; es necesario levantar la mirada para ver el desarrollo de otras sociedades y países, y advertir los impactos que pueden anticiparse debido a la tecnología, el medioambiente, la globalización, etc. El futuro estará influenciado por los elementos disruptores o cambios bruscos en las tendencias, que usualmente, no pueden ser anticipadas en toda su magnitud. Para el desarrollo de la Prospectiva se requiere de la participación de personas especialistas relacionadas al tema a tratar, procurando la mayor cantidad de puntos de vista transversales.

Los escenarios prospectivos para la transición energética del transporte que se están estudiando e implementando en diferentes países están orientados a la prevalencia de algunos escenarios, que son sustentados en las nuevas políticas de mitigación de efectos del cambio climático y la escasez y decrecimiento de la producción de petróleo y gas convencionales. Los escenarios utilizados en la presente investigación utilizan la combinación de los siguientes escenarios prospectivos:

- Escenario de vehículo eléctrico (VE): implica la adopción generalizada de vehículos eléctricos que funcionan con baterías que se pueden cargar con electricidad de una variedad de fuentes, incluidas fuentes de energía renovables como la eólica y la solar. A medida que mejora la tecnología de las baterías y disminuye el costo de los vehículos eléctricos, se están convirtiendo en una opción cada vez más popular para la movilidad urbana de personas y transporte de bienes.
- Escenario de vehículo de pila de combustible de hidrógeno (Vehículo de Celda

de Combustible, VCC): que describe el uso de pilas de combustible de hidrógeno para impulsar vehículos eléctricos. El hidrógeno se puede producir a partir de una variedad de fuentes, incluido el gas natural (H2 gris) y fuentes renovables como la eólica y la solar (H2 verde). Los VCC emiten solo agua como escape y pueden tener rangos de conducción más largos en comparación con los vehículos eléctricos de batería, debido a una mayor densidad energética. Sin embargo, actualmente el número de estaciones de servicio de hidrógeno es casi nulo en comparación con las estaciones de carga de vehículos eléctricos, por lo que esta opción será válida cuando exista el desarrollo industrial suficiente para la producción, distribución y mantenimiento en condiciones seguras y que sean económicamente viables.

- Escenario de biocombustibles: que propone el uso de biocombustibles hechos de materia prima vegetal en lugar de gasolina o combustible diesel, lo que podría producir menos emisiones que los combustibles fósiles tradicionales y se pueden producir a partir de una variedad de materias primas, como los desechos agrícolas. Sin embargo, existen preocupaciones sobre la sostenibilidad y el impacto en los precios de los alimentos y el uso de la tierra con la adopción generalizada de biocombustibles, debido a una concurrencia natural. El uso de biocombustibles a partir del aprovechamiento de tierras eriazas, semidesérticas o desérticas podría tener una huella favorable, pero su viabilidad económica sería un serio escollo para su desarrollo.
- Escenario de Movilidad Urbana Sostenible: enfatiza el uso del transporte público, andar en bicicleta y caminar como una forma de reducir la cantidad de vehículos individuales en las vías urbanas y en las carreteras, reduciendo así las emisiones GEI / contaminantes y la congestión. Este modelo se basa en la implementación de políticas e infraestructura para promover el transporte activo, así como el desarrollo de sistemas de transporte público, como autobuses, trenes, trenes ligeros y conexiones de mayor eficacia (como la densificación urbana para propiciar condiciones adecuadas de explotación para el Sistema de Transporte Público Masivo, STPM).
- Escenario Movilidad Inteligente (Smart Mobility): Forma parte de las tendencias y políticas de Smart Cities, y está basado en el uso intensivo de tecnología e inteligencia artificial, como vehículos conectados y autónomos, para mejorar la eficiencia y reducir las emisiones en el transporte. Por ejemplo, los vehículos conectados pueden comunicarse entre sí y con la infraestructura de tráfico para optimizar rutas y reducir la congestión del tráfico, mientras que los vehículos autónomos pueden reducir potencialmente los accidentes y mejorar el flujo de tráfico.

- Escenario Vehículo de Motor de Combustión Interna (MCI): considera que las condiciones de mercado no varían y no hay mayor cambio en la composición del parque automotor, debido a la presencia significativa y dominante de la cadena logística y comercial, que algunas marcas de automóviles no han abandonado la industria y se han concentrado en la venta de estos vehículos en países no industrializados (no productores). Han trabajado sus estándares de sostenibilidad basados en la reducción de emisiones por km ($\text{gCO}_2\text{eq/km}$) y en la eficiencia energética (MJ/km).

Estos escenarios no son mutuamente excluyentes y pueden combinarse de varias maneras para satisfacer necesidades y objetivos específicos. Los escenarios prospectivos para la transición energética del transporte están en constante evolución y se están desarrollando nuevas innovaciones y estrategias para promover prácticas de transporte más sostenibles.

4.1.4.1 Factores críticos para la transición energética

La transición energética referida al cambio progresivo y definitivo desde la situación actual de dominio en los vehículos de los combustibles fósiles a fuentes de energía más limpias y sostenibles en el transporte; está impulsada por las preocupaciones sobre el cambio climático y los impactos ambientales de la quema de combustibles fósiles en la salud y la contaminación atmosférica, así como por la accesibilidad y las tarifas del transporte. Algunas de las tecnologías y estrategias clave que se están utilizando para facilitar la transición energética en el transporte incluyen:

- Vehículos eléctricos (EV): los EV funcionan con baterías que se pueden cargar con electricidad de una variedad de fuentes, incluidas fuentes de energía renovables como la eólica y la solar. A medida que mejora la tecnología de las baterías y disminuye el costo de los vehículos eléctricos, se están convirtiendo en una opción cada vez más popular para el transporte personal.
- Combustibles alternativos: existe una variedad de combustibles alternativos que se pueden usar en lugar de gasolina o combustible diésel, incluidos los biocombustibles hechos de materia vegetal, gas natural y celdas de combustible de hidrógeno. Estos combustibles pueden producir emisiones más bajas que los combustibles fósiles tradicionales.
- Transporte público: Los sistemas de transporte público, como autobuses y trenes, pueden ayudar a reducir la cantidad de vehículos individuales en la carretera, reduciendo así las emisiones y la congestión.
- Transporte activo: Caminar, andar en bicicleta y otras formas de transporte

activo pueden ayudar a reducir el uso de vehículos por completo, reduciendo aún más las emisiones y mejorando los resultados de salud.

- **Urbanismo:** Elevar el nivel de planificación de las ciudades, poniendo de relieve la densificación de los ejes de avenidas importantes que puedan acoger transporte público masivo, de gran capacidad u organizado eficientemente. También se debe considerar la mezcla de funciones urbanas para disminuir los desplazamientos de gran distancia, es decir, promover un mejor servicio administrativo distribuido en las ciudades, mejores servicios comerciales y de abastecimiento, así como servicios educativos, de salud y fuentes de trabajo.
- **Tarifas:** Es un aspecto importante para el cambio de comportamiento de las personas, la subvención de tarifas del transporte público puede ayudar al cambio modal, y, las tasas impositivas sobre los vehículos (a nivel de compra, revisiones técnicas, circulación, combustibles), puede ayudar a crear un presupuesto público que permita fortalecer la infraestructura del transporte público y asegurar una tarifa accesible.
- **Reducción de la demanda:** La reducción de la demanda de movilidad impacta directamente en la disminución de desplazamiento de vehículos, su mayor efecto puede concentrarse en el menor uso del auto particular. El impacto en el Transporte Público puede ser importante también, pero si eso ocurre, es necesario redimensionar y adaptar el sistema de transporte, debido a que una reducción de la tasa de ocupación podría ser contraproducente.
- **Cambio modal:** Conservar y mejorar la partición modal del transporte público, lo cual pasa por mejorar el nivel de servicio (capacidad, frecuencia, seguridad, accesibilidad, conectividad, entre otros aspectos). También se requiere lograr que los usuarios que usen auto privado, puedan migrar hacia el transporte público o hacia modos suaves que tienen menos consumo energético y menores emisiones GEI y de contaminantes atmosféricos.
- **Tasa de ocupación de vehículos:** Para mejorar y optimizar el uso de vehículos, está relacionado con el incremento de la tasa de ocupación, lo cual genera un incremento marginal de la energía, pero reduce considerablemente el promedio basado en la unidad funcional del transporte (pas-km), es decir, del recorrido real de un pasajero que puede compartir y disminuir las externalidades de sus desplazamientos.
- **Eficiencia energética de vehículos:** Orientada al favorecimiento de nuevas tecnologías que optimicen el consumo energético de los vehículos: en el caso de los motores MCI, mejorar la eficiencia energética en los mecanismos internos que aprovechen la explosión de gases, sin embargo, existe un límite natural debido

a que es muy difícil aprovechar el elevamiento de temperatura y convertirlo en energía mecánica (debido a la Segunda Ley de la Termodinámica, de otro lado, la exergía de la combustión de los derivados del petróleo tiene limitaciones tecnológicas). En el caso de los vehículos eléctricos (VE), la eficiencia energética está enfocado a reducir pérdidas en el transporte de la energía y una mayor durabilidad de las baterías.

- Contenido e intensidad carbono de la energía: Orientado al aprovechamiento máximo de la energía, y reducir su huella de carbono. En el caso de la energía fósil, está orientado al mejor aprovechamiento mecánico y acciones para el secuestro de carbono en la fuente. En el caso de la energía eléctrica, está orientado a que la producción de energía se concentre en los recursos renovables y en aquellos de baja intensidad carbono. En el caso de combustibles sintéticos o biocombustibles, la huella de carbono luego de un procedimiento ACV (Análisis de Ciclo de Vida) debe ser neutro o mucho menor que los recursos fósiles.

La transición energética en el transporte es una parte importante del esfuerzo más amplio para la transición a una economía más sostenible y baja en carbono. Si bien aún quedan muchos desafíos por abordar en esta área, ha habido un progreso significativo en los últimos años hacia la reducción de los impactos ambientales del transporte y la promoción de formas de movilidad más sostenibles.

Se ha realizado una encuesta a ingenieros estudiantes de la Maestría en Ciencias con mención en Transporte, de la Universidad Nacional de Ingeniería, entre noviembre del 2021 y octubre del 2023, mediante encuesta virtual. La herramienta utilizada fue "Formularios Google" como parte de las actividades del curso Economía del Transporte, se obtuvieron 64 encuestas acumuladas. Sobre las encuestas, se presenta el siguiente análisis y se adjunta el anexo de las preguntas procesadas:

Resumen de los principales resultados de la encuesta "Prospectiva de infraestructura de Transporte Urbano (2050)": El futuro del transporte urbano estará marcado por la sostenibilidad, la tecnología y la colaboración entre diferentes actores. Se espera una mayor eficiencia en el transporte, con menores costos y tiempos de viaje. La planificación urbana será clave para garantizar un futuro sostenible para las ciudades. También se indica que esta encuesta está basada en algunas preguntas y escenarios resumidos, no es exhaustiva pero sí indicativa. Las respuestas de 64 ingenieros con conocimientos y experiencia profesional en el Sector Transporte brinda una visión interesante, pero aún así es una muestra bajo un entorno universitario.

- Variable Población (P): Crecimiento poblacional: Se espera un crecimiento

mayor que la tasa actual debido a la migración. Urbanización: La población urbana será mayor al 60%. Envejecimiento: La población adulta mayor (60+) representará entre el 15% y el 20% de la población total.

- Variable Economía (E) PBI per cápita: Se espera un crecimiento del PBI per cápita, siendo un crecimiento moderado de 3% el escenario preferido (61%). Formas de pago: Predominarán las aplicaciones móviles, criptomonedas e identificación biométrica. Costos de combustible: Los combustibles fósiles podrían aumentar o disminuir de precio, mientras que la electricidad se mantendrá estable, se espera que la electricidad irá reemplazando a los combustibles. Tasas de interés: Se esperan tasas de interés bajas para proyectos de infraestructura (a nivel corporativo entre 10 y 12%, social entre 6 y 8%). Modelos de financiamiento: La inversión pública y la iniciativa privada serán los principales modelos de financiamiento, con una tendencia a la mayor participación privada. Inversión en activos de Infraestructura: principalmente ferroviario y estaciones multimodales.
- Variable Sociedad y Ambiente (SA): Tipos de empleo: Predominarán el trabajo asalariado en empresas medianas o grandes, el teletrabajo y el emprendimiento. Niveles de pobreza: Se espera una reducción significativa de la pobreza. Cambio climático: Se espera un incremento de la temperatura por encima de 1.5°C en 80% (>1.5°, >2°, >2.5°), es decir, no se cumpliría el Acuerdo de París.
- Variable Tecnología (T): Combustibles de vehículos: Predominarán los vehículos eléctricos, híbridos y con combustibles renovables. Tecnología de vehículos: Prevalcerán los vehículos eléctricos e híbridos. Nivel de automatización de viajes: Se espera una mayor automatización de los viajes, con diferentes niveles de participación humana. Infraestructura de transporte urbano terrestre: Electricificación de vías e infraestructura mixta (combustibles y electricidad).
- Variable Urbanismo (U): Densidad urbana: Predominará la densidad urbana media y alta (>150 hab/ha, 76%). Control gubernamental: Se espera un control gubernamental estricto en la gestión urbana.
- Movilidad (M): Modos de transporte: Predominará el transporte público y modos de transporte con nuevas tecnologías. Destinos: El trabajo y educación sigue siendo el principal motivo, pero hay una expectativa de aumento de desplazamientos por esparcimiento. Cantidad de desplazamientos: Se espera un aumento en la cantidad de desplazamientos diarios por persona (>3 despl./día, 50%). Costo personal del transporte: Se espera que los costos de desplazamientos se mantengan entre 10 y 25 Soles, 72%. Tiempo personal dedicado al transporte: Se espera una reducción del tiempo personal dedicado al

transporte (<1 h diaria, 55 %, <1.5 h diarias, 80 %). Tiempo promedio de un viaje urbano: Se espera una reducción del tiempo promedio de un viaje urbano, <30 min 40 %, <45 min 69 %. Motorización: Se espera una limitación de autos por familia, incluyendo el uso de autos compartidos, [0;2] autos/familia 84 %.

4.1.4.2 Desarrollo de modelos prospectivos para la transición energética

Se presentan a continuación las combinaciones consideradas en la presente investigación para los escenarios para el año 2050:

1. Tendencial (bau): 80 % de la matriz del parque automotor se conserva como fósiles, 20 % de la matriz energética en vehículos eléctricos, los modos progresan hacia un uso más intensivo del auto particular.
2. Biocombustibles: 80 % de la matriz del parque automotor mantiene los líquidos como combustible, 50 % de los cuales provienen del petróleo y 50 % provienen de biocombustibles, 20 % de la matriz energética en vehículos eléctricos
3. Vehículos eléctricos: 80 % de la matriz energética del parque automotor se convierte en eléctrica, 20 % permanece relacionada a los combustibles fósiles. Existe una industria de adaptación de motores eléctricos.
4. Vehículos eléctricos, híbridos e hidrógeno: 80 % del parque automotor es eléctrico, híbrido (combustible y eléctrico), 20 % se mantiene como combustibles fósiles.
5. Movilidad urbana sostenible: Los modos suaves toman proporciones importantes, alrededor del 30 % de la partición modal corresponde a los modos suaves en línea con los mejores desempeños actuales de ciudades como Amsterdam (Holanda). El transporte público concentra el 70 % de la partición modal, y el auto particular concentra el 10 % de la partición modal.
6. Movilidad inteligente (Smart mobility): La infraestructura urbana permite optimizar los desplazamientos. Una red importante de telecomunicaciones se ha instalado en las ciudades, para optimizar los centros de carga de electricidad, tanto para el transporte público, para los vehículos de micromovilidad, los servicios de transporte (MaaS, Mobility as a Service), así como el transporte de carga. La red está interconectada, y permite optimizar el flujo y optimizar los desplazamientos, la duración de los trayectos y evitar el congestionamiento de las vías.

4.2 Resultados de la Investigación

4.2.1 Resultados de la Evaluación Prospectiva

Se ha realizado el planteamiento del estudio prospectivo de la Transición Energética con mirada hacia el 2050, para lo cual se han establecido las fases de análisis.

Proceso de Prospectiva: Transición Energética al 2050

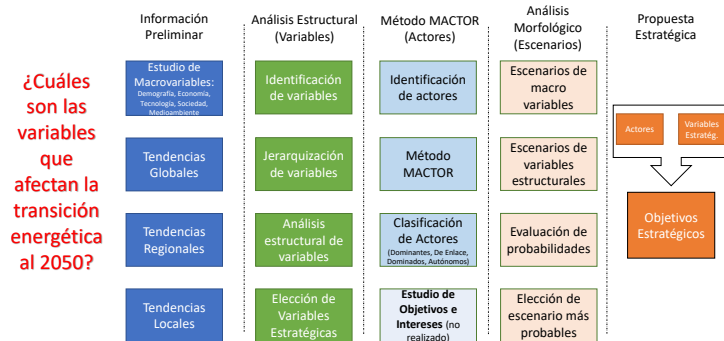


FIGURA N° 4.1: Proceso de evaluación prospectiva, determinación de escenarios

Se eligen las variables que están asociadas a la pregunta principal, es decir, que son claves e influyen en la respuesta. Para tal efecto, es necesario partir de una lluvia de ideas para poder identificar el máximo número de variables. Se realizan las definiciones de las variables. Se realiza la agrupación de variables, y luego, en base a la opinión experta, se realiza la respectiva jerarquización a partir del promedio de las evaluaciones vertidas. Las variables de mayor significancia para la Transición Energética son: Tarifa Eléctrica, Políticas Públicas Energéticas, Desarrollo Tecnológico, Gobernanza, Subastas para RER, Precios de Inversión en RER, Generación Distribuida, entre otras.

Variables de la Transición Energética			V1	V2	V3	V4	V5	V6	V7	V8	V9	V10	V11	V12	V13	V14	V15	V16	V17	V18	V19	V20	INFLUENCIA	
Tarifa eléctrica	TAREL	V1		5	5	3	4	2	3	1	2	2	3	3	4	3	3	2	2	4	5	4	60	
Políticas Públicas (Energéticas)	POENE	V2	4		5	4	4	3	2	2	3	3	4	4	4	4	5	4	2	2	3	3	4	65
Legislación (Energética)	LEELC	V3	3	4		3	4	3	2	2	3	3	2	2	4	4	4	3	2	3	3	4	58	
Desarrollo Tecnológico	DETEC	V4	4	3	3		3	4	3	2	3	3	4	4	4	5	5	3	2	3	3	4	65	
Gobernanza	GOBER	V5	5	5	5	5		5	3	1	4	4	2	2	4	4	3	4	2	1	2		65	
Concesiones eléctricas	COELE	V6	3	1	2	3	1		3	1	3	4	4	2	2	2	1	1	2	2	3	4	44	
Impactos ambientales	IMPAM	V7	2	3	2	1	3	1		3	1	1	1	1	4	3	1	1	2	5	1	2	38	
Valor de los terrenos	VTERR	V8	3	3	3	1	2	4	1		4	2	3	3	2	3	4	3	3	3	1	2	50	
Incentivos para inversionistas RER	INRER	V9	4	5	3	5	1	1	4	4		4	3	3	5	5	2	4	1	5	4	5	68	
Subastas RER	SURER	V10	4	4	2	5	1	2	4	2	4		4	3	4	4	1	3	2	4	4	2	59	
Almacenamiento de electricidad	ALELE	V11	2	2	3	4	1	3	1	2	4	3		1	4	4	3	2	3	4	3	3	52	
Almacenamiento energético	ALENE	V12	4	4	2	4	2	4	3	2	2	2	5		4	5	3	1	3	2	3	2	57	
Matriz energética (Política Pública)	MAENE	V13	5	4	3	4	3	4	4	3	4	4	4		3	4	3	3	1	4	3	3	67	
Seguridad Energética	SEENG	V14	1	2	2	4	3	3	3	2	2	2	3	3		4	3	4	1	2	2	48		
Demanda de energía	DENER	V15	5	4	4	4	4	3	3	3	3	2	2	2	2		3	4	1	1	2	2	56	
PBI per cápita	PBIPC	V16	4	4	2	3	3	1	2	2	4	2	1	1	2	2		4	4	3	2	2	48	
Políticas Públicas (Ambientales)	POAMB	V17	2	5	4	1	5	4	4	2	5	5	2	2	3	2	1		2	5	5	5	64	
Electromovilidad	ELMOV	V18	3	1	1	4	2	2	5	1	4	4	5	4	4	2	5	2		3	4	5	61	
Precio de inversión renovables	PRENO	V19	5	4	4	5	1	5	5	5	5	5	5	4	4	3	3	1		2	1	5	72	
Generación Distribuida	GEDIS	V20	5	4	4	5	1	4	5	4	5	1	4	3	4	5	5	3	2		2	4	70	
DEPENDENCIA				68	67	59	68	48	58	60	44	65	56	61	53	67	66	61	46	49	54	56	61	

FIGURA N° 4.2: Clasificación y jerarquización de variables

Esta medición se realiza en una escala de Likert (1 cuando la variable no influye, 5 cuando la influencia de la variable V_i sobre la variable V_j es máxima). Se realizan las sumatorias para hallar la influencia y dependencia total de cada variable. Se plasman los resultados en un gráfico cartesiano para realizar el análisis para identificar a las variables de entrada, a las variables de enlace, a las variables resultado, y a las variables de pelotón. Las variables de enlace (aquellas que por su importancia constituyen el eje de la estrategia) son: Generación Distribuida (GEDIS), Incentivos para inversionistas RER (INRER), Matriz energética como Política Pública (MAENE), las Políticas Energéticas en su conjunto (POENE), el Desarrollo Tecnológico (DETEC) y las Tarifas Eléctricas (TAREL).

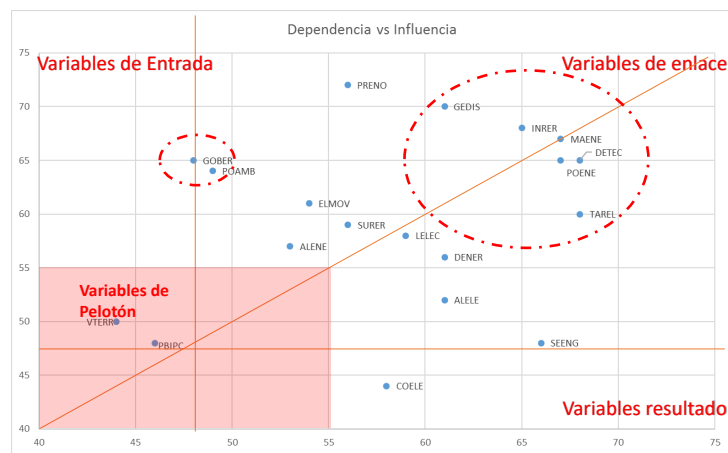


FIGURA N° 4.3: Análisis Estructural, gráfico de posicionamiento de variables

Siguiendo la estructura de elección de variables, se identifican también a los principales actores que influyen en el proceso, es decir, que están involucrados directamente con el desarrollo de la transición energética. En una segunda fase, se ordenan en una columna la lista de actores y se realiza una evaluación bajo la escala de Likert sobre los niveles de influencia de los actores, unos sobre otros. La sumatoria de influencias revelará la influencia global, en el otro sentido de la sumatoria, se podrá evaluar la dependencia global de cada variable.

Actores de la Transición Energética		A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8	A9	A10	A11	A12	A13	A14	A15	A16	A17	A18	A19	A20	A21			
Ejecutivo - MEF	MEF	A1		5	5	5	5	5	5	5	5	4	2	2	1	5	3	3	3	5	2	2	77		
Ejecutivo - MINEM	MINEM	A2	3		4	3	4	4	4	3	3	4	4	2	2	1	5	4	4	4	5	3	3	67	
Ejecutivo - GORES	GORES	A3	3	4		3	4	4	3	2	2	5	3	3	4	3	2	3	3	4	4	2	2	63	
Municipalidades	MUNIC	A4	2	3	4		3	2	2	2	1	5	2	3	4	1	1	2	2	2	3	1	1	46	
Congreso	CONGR	A5	5	4	3	3		2	2	1	3	3	2	2	2	3	3	1	4	3	3	3	2	2	54
OSINERGMIN	OSINE	A6	2	3	2	2	2		3	2	3	2	4	4	4	4	4	5	5	5	4	4	4	68	
COES	COES	A7	2	2	2	2	3	5		3	4	3	4	4	4	4	3	4	4	4	3	2	2	64	
INDECOPI	INDEC	A8	3	2	3	3	4	4	3		4	4	5	5	3	3	4	3	3	3	1	5	5	70	
CONCYTEC	CONCY	A9	2	2	2	2	2	2	4	1		3	3	3	2	4	1	1	1	1	1	4	4	46	
SUNAT	SUNAT	A10	2	2	2	2	2	2	2	2	1		3	3	3	1	1	3	3	3	4	3	3	47	
Inversionistas en Renovables	INVRE	A11	2	2	2	2	2	2	2	1	1		3	3	3	2	3	4	2	4	3	3	3	48	
Consumidores	CONSU	A12	3	3	3	3	3	3	1	3	1	1		3	3	3	2	2	1	3	1	1	1	44	
Comunidades	COMUN	A13	2	4	5	5	4	2	1	3	1	1	3		2	2	2	2	2	3	3	1	2	90	
ONG	ONG	A14	2	1	1	1	2	1	1	1	1	2	2	2		3	1	1	1	1	1	1	1	27	
Universidades	UNIVE	A15	1	2	1	1	2	1	1	1	3	1	1	1	1		1	1	1	1	1	3	2	27	
Concesionarios de Generación	CONGE	A16	1	4	2	2	2	4	5	3	1	1	3	1	2	1		2	3	3	4	2	1	47	
Concesionarios de Transmisión	CONTR	A17	1	3	3	3	2	2	3	2	1	1	3	2	3	1	1		3	3	4	2	1	44	
Concesionarios de Distribución	CONDI	A18	2	3	3	4	2	2	3	2	1	1	3	4	2	1	1	3		3	4	2	1	47	
SNMPE	SNMPE	A19	4	5	3	3	4	1	1	2	1	1	4	3	2	1	2	5	5		5	3	3	58	
Industrial con patente (p.e. AB)	INDPA	A20	1	1	1	1	3	2	3	4	4	2	5	2	2	1	3	4	4		4	2	2	53	
Industrial masivos (p.e. Paneles)	INDMA	A21	1	1	1	1	3	2	3	4	2	2	5	2	2	2	3	4	4		4	2	2	52	
			44	56	52	51	58	52	50	51	43	46	66	54	55	38	47	61	57	63	62	48	45		

FIGURA N° 4.4: Clasificación y Jerarquización de Actores

Los resultados se presentan en un diagrama cartesiano, y se diferencian a los actores dominantes, a los actores de enlace, a los actores dominados, y a los actores autónomos. De forma complementaria se podrán estudiar los intereses de los actores, para conocer sus preferencias a favor o en contra de los escenarios proyectados.

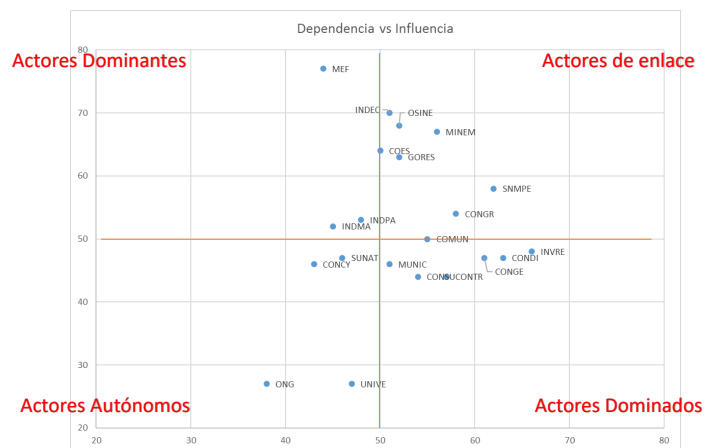


FIGURA N° 4.5: Mapa de Posicionamiento de Actores, Método MACTOR

Los actores dominantes clave y de enlace de mayor significancia para la ejecución de la estrategia son: Ministerio de Economía y Finanzas (MEF), INDECOPI (como actor decisor de fusiones y de control del mercado eléctrico), OSINERGMIN (como regulador eléctrico), Ministerio de Energía y Minas (MINEM), Comité de Operación Económica del Sistema Eléctrico (COES), los Gobiernos Regionales (GORES). Existen otros actores de gran importancia, como el Congreso (debido a sus facultades legislativas) y la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (SNMPE) por su influencia en las políticas energéticas, como representante de la sociedad civil y empresarial.

Los actores deberán capitalizar su influencia a través de la estrategia nacional que

brinde seguridad energética, asegure disponibilidad tecnológica, salvaguarde y cree empleos, permita descarbonizar el sector transporte y fomente el desarrollo sostenible. Todo basado en normas y políticas con visión de largo plazo.

Se proponen escenarios pesimistas, tendenciales y optimistas, se resume a continuación los escenarios tendenciales para las políticas de transición energética que se recomendarán:

Demografía Las familias disminuyen en cantidad de miembros. Los ingresos per cápita aumentan ligeramente. Los niveles educativos mejoran. La tasa de pobreza se mantiene. A nivel internacional el continente africano mantiene su crecimiento de los años entre 2010 a 2015, a saber 2.55%. Considerando las cifras de la ONU, Africa pasaría del 2015 al 2030 de unos 1200 millones a 1700 millones y al 2050 este mismo continente llegaría a unos 2500 millones. Asia es el continente más poblado, aunque su población empieza a decaer. Sudamérica comienza a ralentizar su crecimiento poblacional, e incluso empieza a decaer para el 2050, el Perú sigue esta tendencia.

Economía

- El PBI se incremento 1.2% al 2050. La cantidad de empleos en energías renovables 0.2 millones al 2050. Empleos en el sector energético 0.4 millones para el 2050. El costo del desarrollo tecnológico se reducen en -30% para Solar PV, -35% Eólico offshore y -20% Eólico onshore. El teletrabajo se constituye en una alternativa productiva en las industrias y en los empleos.
- De acuerdo al contexto de la economía, la tarifa eléctrica se reduce en 1.5% por el ingreso de energías renovables. Algunos inversionistas cuentan con concesiones para la Generación con Energía Renovable. El valor de los terrenos triplican su valor por m², debido al ingreso de ER Eólica y Fotovoltaica.
- Mediana inversión a la Generación con Energía Renovable. El estado promueve la subasta RER para todas las tecnologías debido a la reducción de sus costos de inversión.
- Los nuevos proyectos industriales, los proyectos mineros y el crecimiento de la electromovilidad han generado un incremento constante de la demanda de energía, llegando a una capacidad máxima de 11 GW de potencia instalada. La participación de las energías renovables es de 40%. Reducción del precio de inversión de renovables medianamente significativo por el ingreso de nueva tecnología.

Tecnología

- Los compromisos de cambio climático han potenciado las industrias de energías renovables. La industria del automóvil ha cambiado casi por completo hacia motor eléctrico, con características duales (batería y H2). Las centrales de carbón y de derivados del petróleo han ido cerrando progresivamente en el mundo. En el Perú, se ha incrementado la participación de energías renovables en el mix energético, cubriendo más del 50% del total del consumo energético.
- Las baterías han logrado equiparar la producción de energías renovables, y han suavizado los vaivenes de la producción renovable. Surgen diversas formas de almacenamiento de energía de tipo físico - mecánico (reservorio de agua), así como sistemas de compresión de aire, biomasa, entre otros.
- Los compromisos de cambio climático y la reducción del precio de la tecnología renovable, modifican la Matriz energética con participación considerable de la ER (30%).
- Se desarrolla el parque automotor de autos eléctricos, fomentado por la mayor disponibilidad de modelos eléctricos en el mercado. Se incorpora la Generación distribuida con una normatividad adecuada e incentivos económicos.

Sociedad

- La pobreza se erradica en su mayor parte (<5%), sin embargo, surgen poblaciones vulnerables que generan nuevos problemas sociales (como el desempleo, población de mayor edad, cobertura social). Los problemas sociales y ecológicos se fusionan en un solo concepto.
- Políticas públicas enfocadas en el crecimiento económico con balance ambiental. Preocupación incipiente en la solución de los problemas estructurales del país.
- Legislación da prioridad a la inversión privada en función de promover el crecimiento económico con compromiso ambiental. Interés incipiente en la solución de los problemas estructurales del país. Estado con algunos mecanismos que le permiten asegurar el cumplimiento de las normas.

Medio Ambiente

- Manejo incipiente de los impactos ambientales. Políticas públicas con énfasis en mejora de la calidad ambiental. Mayor preocupación por la mitigación de

los pasivos ambientales. Algunos compromisos ambientales son asumidos por el Estado. Problemas de deforestación de la Amazonía afectan la imagen del Perú respecto a sus compromisos internacionales en materia ambiental.

- Optimización de los impactos en los hábitat de las aves, sostenibilidad del trade off entre energía obtenida e influencia de las corrientes marinas, de tal manera que no se afecte en demasía los mares.
- Las Políticas Públicas Ambientales se endurecen y se alinean a los compromisos internacionales a nivel de América Latina. Las Políticas Públicas Económicas y de Energía se compatibilizan. Las Políticas Ambientales no logran establecerse como transversales a todas las actividades.

4.2.2 Políticas para la Transición Energética del Transporte Terrestre Urbano

Los países latinoamericanos han establecido algunos aspectos transversales en sus políticas de transición energética del transporte, aunque no todas ellas tienen la misma velocidad de implementación ni el mismo nivel de desarrollo; en el siguiente resumen se toman en cuenta algunos elementos básicos de las políticas de transición energética del transporte de Chile y Colombia:

- Promoción de la movilidad eléctrica: En Latinoamérica la mayoría de los países cuentan con políticas destinadas a promover la movilidad eléctrica. En algunos casos, se ofrecen incentivos fiscales y subvenciones para la compra de vehículos eléctricos y se propone impulsar el desarrollo de infraestructuras de carga. En el Pacífico Sur, Chile ha sido el más ambicioso en esta materia, con la meta de tener un transporte público 100 % eléctrico para 2040 y que el 2050 el parque automotor sea 40 % eléctrico ¹. El mercado de vehículos eléctricos (EV) en Perú, Chile y Colombia se encuentra en diferentes etapas de desarrollo:
 - Perú: El mercado de vehículos eléctricos en Perú es relativamente pequeño pero está creciendo. Según el MINEM (Ministerio de Energía y Minas), había alrededor de 500 vehículos eléctricos en el país a partir de 2019. Hay declaraciones de funcionarios públicos que indican que el gobierno podría fijarse metas entre el 5 y el 10 % de la flota nacional de vehículos sea eléctrica para 2030. Recientemente, el MINEM ha preparado un proyecto de ley con incentivos para la adopción de vehículos eléctricos en el país, que incluyen exenciones de ciertos impuestos y derechos aduaneros ².

¹<https://energia.gob.cl/electromovilidad/orientaciones-de-politicas-publicas>, consultado en abril 2023

²<https://www.gob.pe/institucion/minem/noticias/652435-minem-alista-proyecto-de-ley-para-impulsar-el-ingreso-de-vehiculos-electricos-al-pais>, consultado en abril 2023

- Chile: tiene uno de los mercados de vehículos eléctricos más desarrollados de América Latina, con más de 13,000 vehículos eléctricos registrados a 2020. Además de las metas de composición del parque vehicular, se han considerado incentivos para adopción de vehículos eléctricos en Chile incluyen exenciones de ciertos impuestos, beneficios para la reducción de depreciación, subsidios para la compra de vehículos y acceso a infraestructura de recarga.
- Colombia: El mercado de vehículos eléctricos en Colombia también está creciendo, con más de 8,500 vehículos eléctricos registrados a partir de 2022. El gobierno se ha fijado el objetivo principal de tener 600,000 vehículos eléctricos en las carreteras para 2030 (Gobierno de Colombia, 2019). Los incentivos para la adopción de vehículos eléctricos en Colombia incluyen exenciones de ciertos impuestos (variables en IVA y aranceles, y descuentos), subsidios para la compra de vehículos y acceso a la infraestructura de recarga.

Pese a los avances, el mercado de vehículos eléctricos en el Pacífico Sur aún es relativamente pequeño en comparación con otros países del Norte.

- Biocombustibles: Los países del Pacífico Sur tienen políticas destinadas a promover el uso de biocombustibles en el transporte. Por ejemplo, existen dispositivos para la mezcla de biocombustibles con gasolina y diésel en pequeñas proporciones.
- Modos de transporte sostenibles: Recientemente ha habido un renovado interés por incrementar la participación del transporte público. Se han implementado medidas como ciclovías, zonas peatonales e infraestructura complementaria al transporte público. Sin embargo, el alcance y la eficacia de estas medidas varían de país a país.
- Tasas, incentivos tributarios y subsidios: Los países sudamericanos de la costa Pacífico han tomado incentivos fiscales y subsidios para promover la adopción de vehículos de bajas emisiones y modos de transporte sostenibles. Existe un apoyo particular en el Perú para la masificación de vehículos con GLP y Gas Natural, aunque su eficacia en las emisiones GEI es discutible, se toma en cuenta que ayuda a reducir la polución atmosférica del Diésel, y en menor proporción de la gasolina.
- Marco regulatorio: El marco regulatorio para la transición energética del transporte tiene un impulso diferenciado en los países de América del Sur. Chile, ha implementado un impuesto al carbono que incluye el sector del transporte, se tienen una referencia de 5 USD / tCO₂eq, enfocado en el precio de los

energéticos y en la producción de la energía en la fuente ³. En Colombia se cuenta con un mecanismo de fijación de precios del carbono que se aplica a todos los sectores, que equivale a 3 USD / tCO₂eq y que se aplica al precio de los combustibles. En el caso del Perú aún no ha implementado un mecanismo específico de fijación de precios del carbono, sin embargo, el Impuesto Selectivo al Consumo funciona de forma similar.

La transición energética del transporte en las ciudades peruanas requiere una combinación de elaboración de planes, políticas y medidas permanentes para apoyar la adopción de tecnologías, estándares y prácticas bajas en carbono; sobre todo, la vigilancia y la aplicación de la ley. Dentro del marco general, se pueden delinear la política principal basado en algunos elementos fundamentales.

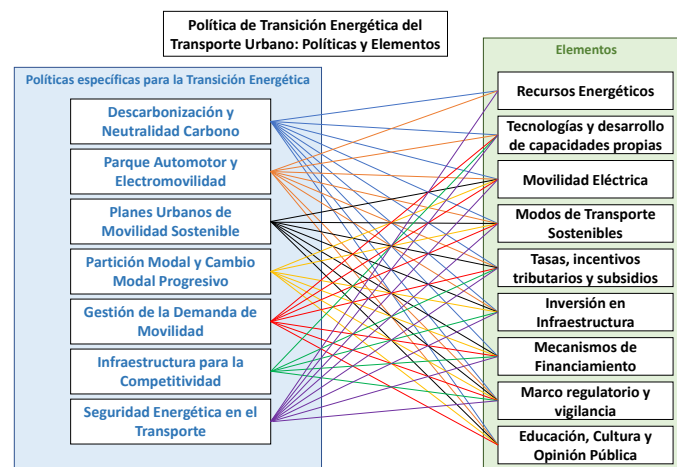


FIGURA N° 4.6: Políticas y elementos para la Transición Energética del Transporte Urbano

4.2.2.1 Elementos para la transición energética del transporte urbano

Recursos energéticos Para promover el cambio hacia recursos energéticos bajos en carbono para el transporte urbano, como la electricidad de fuentes renovables o los biocombustibles sostenibles. La disponibilidad de infraestructura de carga para vehículos eléctricos o la disponibilidad de biocombustibles sostenibles para su uso en vehículos convencionales pueden influir en la adopción y el uso de opciones de transporte con bajas emisiones de carbono.

Adicionalmente, el costo de los recursos energéticos puede afectar la adopción de opciones de transporte bajas en carbono. En algunos casos, el costo de la transición a fuentes de energía bajas en carbono puede ser más alto que el costo de continuar

³<https://cambioclimatico.mma.gob.cl/wp-content/uploads/2020/07/Minuta-Sistema-compensaciones-impuesto-verde-.pdf>

usando combustibles fósiles convencionales. Sin embargo, las políticas e incentivos que fomentan el uso de recursos energéticos bajos en carbono, como créditos fiscales o subsidios para el desarrollo de infraestructura de carga, pueden ayudar a compensar estos costos y hacer que el transporte bajo en carbono sea más atractivo y accesible para los consumidores.

Tecnologías y desarrollo de capacidades propias Creación de capacidad y transferencia de tecnología, desarrollar la capacidad de las instituciones locales y promover la recepción de transferencia de tecnología ayudará a respaldar la adopción de tecnologías y prácticas de transporte con bajas emisiones de carbono. Esto debe incluir programas de capacitación para técnicos e ingenieros locales, así como asociaciones con organizaciones y empresas para apoyar el desarrollo y la implementación de tecnologías bajas en carbono. Los ejes a fortalecer son:

- Vehículos eléctricos.
- Sistemas inteligentes de transporte (big data, infraestructura básica).
- Sistemas de Transporte Público y Transporte Compartido.
- Nuevos recursos energéticos.
- Recursos minerales para el desarrollo de la industria de la electromovilidad.

Movilidad eléctrica Puede tener un impacto importante en la reducción de las emisiones GEI y de contaminantes atmosféricos (PM , NO_x , SO_x , entre otros), sobre todo en zonas con niveles rápidos de urbanización. También es importante para reducir la dependencia del petróleo importado y mejorar la seguridad energética.

La adopción de la electromovilidad puede ayudar a estimular la innovación tecnológica y el desarrollo económico en el sector de la energía limpia, creando nuevas oportunidades de trabajo y ayudar a impulsar el crecimiento económico sostenible, sin embargo, se requiere de políticas de apoyo, infraestructura y mecanismos de financiamiento. Estos incluyen políticas para incentivar la compra de vehículos eléctricos, el desarrollo de infraestructura de carga y mecanismos de financiación para apoyar el despliegue de tecnologías de energía limpia.

Modos de transporte sostenible Son aquellos de bajo impacto socio-ambiental, contribuye al desarrollo económico y es accesible para toda la comunidad. Tienen baja huella de carbono, promueve la equidad social y son abordables desde el punto de vista económicos. Se consideran modos sostenibles:

- Caminata, bicicletas y vehículos de micromovilidad.
- Transporte público, sobre todo bajo el enfoque de transporte de alta capacidad, y que tiene influencia en el retiro de automóviles de las vías urbanas.
- Vehículos eléctricos y de bajas emisiones, con impacto en la calidad del aire.
- Movilidad compartida, para reducir el uso individual de los autos. El incremento de pasajeros por vehículos incrementa la tasa de ocupación y reduce la huella ambiental.

Inversión en Infraestructura Invertir en infraestructura de transporte con bajas emisiones de carbono, como sistemas de transporte público de alta capacidad y vehículos de alta ocupación, infraestructura para ciclistas y peatones, y estaciones de carga de vehículos eléctricos. Esto también ayudará a reducir la congestión y mejorar la calidad del aire en las zonas urbanas.

Tasas, incentivos tributarios y subsidios Enfocados en mejorar la accesibilidad de la compra de autos eléctricos, y en la renovación del parque automotor. De un lado, los gobiernos pueden ofrecer subvenciones y subsidios para apoyar el desarrollo de infraestructura y servicios de transporte sostenibles, como buses eléctricos o programas de bicicletas compartidas. De otro lado, algunos impuestos a los combustibles fósiles permiten incentivar el uso de modos de transporte sostenibles y generar ingresos para invertir en infraestructura y servicios de transporte sostenibles.

Mecanismos de financiamiento Se pueden plantear alternativas, sean provenientes del sector público, y fomentadas por las autoridades. Las transiciones suponen un cambio de estatus, por lo que los inversionistas privados necesitan alguna estabilidad de sus parámetros de predicción de demanda y de ingresos:

- Asociaciones público-privadas: para financiar el desarrollo de infraestructura y servicios de transporte sostenibles, como estaciones de carga de vehículos eléctricos o sistemas de transporte público.
- Bonos verdes: que se emiten para financiar proyectos de infraestructura sostenible, como proyectos de energía renovable o transporte sostenible.
- Créditos de carbono: se obtienen al reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, que luego pueden venderse a empresas o gobiernos que necesitan compensar sus emisiones.

- **Financiamiento internacional:** Las organizaciones internacionales y los países donantes interesados en compensar sus emisiones y acelerar los compromisos frente al cambio climático.

Marco regulatorio y vigilancia Establecer estándares regulatorios para la eficiencia de combustible para vehículos y promover el uso de combustibles con menores tasas de emisiones carbono y menores contaminantes, como biocombustibles o gas natural. Los estándares regulatorios también pueden promover la adopción de tecnologías de transporte bajas en carbono, como los vehículos eléctricos e híbridos.

Educación, Cultura y Opinión Pública Basados en las campañas de concientización pública sobre los beneficios de las opciones de transporte con bajas emisiones de carbono, como el transporte público, la bicicleta y los peatones. Esto está enfocado en cambiar el comportamiento de los consumidores y promover la adopción de prácticas bajas en carbono.

4.2.2.2 Política de Descarbonización y Neutralidad Carbono en el Transporte

El objetivo es disminuir progresivamente la huella de carbono del sector Transporte, logrando una reducción con respecto al año 2020 del 50 % en el año 2040, del 75 % en el año 2050 y del 100 % en el año 2060.

Basado en los siguientes elementos:

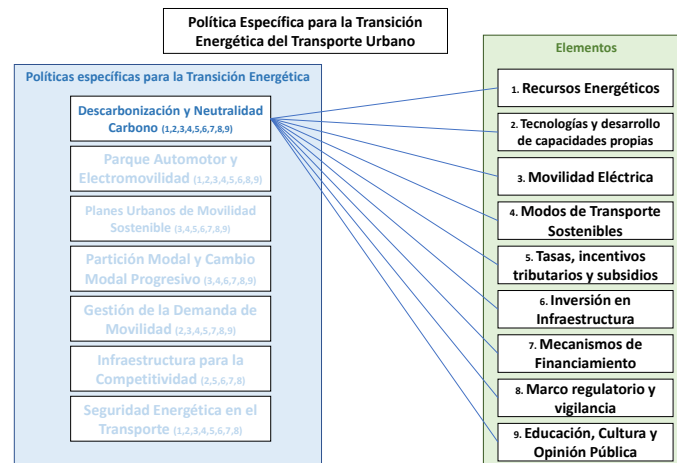


FIGURA N° 4.7: Elementos de la Política de Descarbonización y Neutralidad Carbono

Recursos energéticos Para lograr un proceso progresivo de descarbonización se debe disminuir el uso de los combustibles fósiles, y según la disponibilidad de recursos energéticos en el país, para lograr reducir el uso de combustibles fósiles con respecto

al 2020 de 50% (2040), de 75% en el 2050, y de 100% en el año 2060. La transición inicia con mejorar la calidad del combustible con el uso de combustibles más limpios, como el diesel bajo en azufre y el gas natural o el GLP en una primera fase, lo que puede ayudar a reducir mínimamente las emisiones del sector del transporte. Esto puede ser apoyado por políticas tales como estándares de calidad de combustible e incentivos para la adopción de combustibles más limpios. En una siguiente etapa, se requiere que los combustibles sean carbono neutrales, o al menos, tener una baja huella de carbono. Esto puede justificarse a partir de la incorporación de recursos energéticos como biocombustibles de zonas provenientes de campos irrigados en zonas semidesérticas, la electricidad de fuentes renovables o el hidrógeno verde (H_2v). Es importante contar con el uso de la energía renovable (solar o eólica), dedicados o parcialmente dedicados al parque de vehículos eléctricos o sistemas de transporte público, mediante la implementación de un sistema de distribución y de almacenamiento con baterías.

Tecnologías y desarrollo de capacidades propias La industria minera podría reorientarse hacia los minerales críticos (Litio, Cobalto, Cobre, entre otros) y a la generación de energía renovable y a la producción de componentes para la producción y ensamble de vehículos eléctricos. Bajo esa perspectiva, se puede lograr una meta de introducción de componentes nacionales en la industria de generación eléctrica y de automóviles de 10% en el año 2040 y de 15% en el año 2050. De forma complementaria, promover la implementación de los sistemas inteligentes de gestión del tráfico, puede ayudar a reducir significativamente las emisiones, lo cual se puede lograr con la participación de universidades.

Movilidad eléctrica Apoyar la adopción de vehículos eléctricos, como bicicletas y motocicletas y autobuses. Esto puede ser respaldado por políticas para incentivos fiscales e inversión en infraestructura de carga. La movilidad eléctrica puede lograr una penetración de 30% de los vehículos vendidos en el año 2040 y del 50% de los vehículos vendidos en el año 2050 (Según AAP, actualmente los vehículos eléctricos constituyen el 2% del parque automotor nuevo ⁴).

Modos de Transporte Sostenible Migrar a los usuarios que utilizan el Auto Particular (AP) hacia modos sostenibles, como caminata, bicicleta, Transporte Público. Limitar los desplazamientos en AP con políticas restrictivas o que desincentiven su uso. Esto debe ser respaldado por políticas como la inversión en infraestructura y servicios de transporte público y la promoción del desarrollo de infraestructura de transporte no motorizado, así como la seguridad vial.

⁴[Página web AAP](#)

Tasas, incentivos tributarios y subsidios Las tasas están orientadas a impuestos específicos, que se pueden implementar a nivel local, regional o nacional. Los incentivos tributarios permiten reducir el nivel de tasas para actividades que generen beneficio social orientado a los objetivos de las políticas, y los subsidios están orientados a fortalecer tipos de comportamientos en las actividades económicas, tanto en la oferta como en la demanda del transporte. Reducir impuestos a energías descarbonizadas o con bajas emisiones (basados en el control de emisiones en $grCO_2(eq)/MJ$), y vehículos con baja huella de carbono (basados en el control de emisiones en $grCO_2(eq)/km$ recorrido o por pas-km transportado). Incrementar impuestos a vehículos con altas emisiones de CO₂ (basados en el tamaño de los motores térmicos y en las emisiones de GEI en $grCO_2(eq)/km$ recorrido), que podría estar comprendido entre 1 y 2% del ISC (8% y que constituye una recaudación proyectada en 2023 de 1700 millones de soles (Diario El Peruano, 06/06/23), que en términos de recaudación actual significaría entre 200 y 400 millones de soles, que se invertirían en el Transporte Público Urbano.

Inversión en Infraestructura Es necesario promover la inversión en infraestructura de baja huella de carbono, en el servicio de recursos eléctricos o de bajas emisiones, desde la generación, distribución, y tomando en cuenta infraestructura de recarga y de almacenamiento de los recursos energéticos renovables y carbono neutrales. Invertir en infraestructura de transporte público, principalmente en los sistemas de buses de tránsito rápido (BRT), para alentar a más personas a usar el transporte público en lugar de los automóviles privados. Fortalecer la promoción del desarrollo de sistemas integrados de transporte público, basados en mejorar la capacidad, la regularidad y la reducción de la informalidad.

Mecanismos de financiamiento Compensación de las emisiones de carbono mediante la inversión en proyectos de reducción de carbono, como proyectos de energía renovable o reforestación. El financiamiento se puede realizar a partir de recaudación tributaria, del mercado de carbono, y de los fondos que promueven el financiamiento verde (TCFD, TNFD).

Marco regulatorio y vigilancia Crear una regulación específica para promover la descarbonización y disminuir la huella de carbono, así como los mecanismos de vigilancia. Los marcos regulatorios y leyes no han tenido en cuenta los cambios potenciales y de adaptación en respuesta al Cambio Climático, por lo que es necesario generar leyes en concordancia de la prospectiva de los cambios climáticos en curso y con las acciones legislativas que vienen realizando otros países. La vigilancia normativa y de objetivos está orientada a establecer observatorios para el cumplimiento

de los objetivos trazados en las políticas de transición energética.

Educación, cultura y opinión pública Fortalecer la educación básica y universitaria orientada a la sensibilización sobre la necesidad de compromisos en la descarbonización, frente a una acción conjunta y global para disminuir los efectos del cambio climático y de la pérdida de biodiversidad. Trabajar difusión en medios de comunicación. Para fortalecer la aplicación de las políticas, se requiere trabajar en la educación cívica, en el cambio de comportamiento de la sociedad, así como en la percepción de necesidad y urgencia de implementar políticas y modificaciones normativas frente a la urgencia del cambio climático y sus impactos.

4.2.2.3 Política de Parque Automotor y Electromovilidad

Basado en los siguientes elementos:

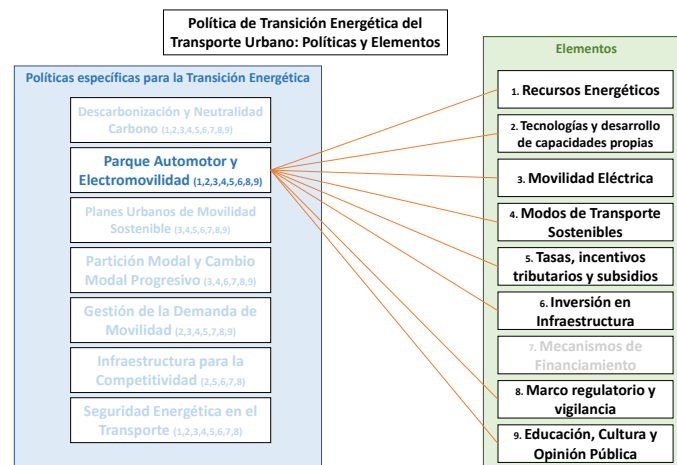


FIGURA N° 4.8: Elementos de la Política de Parque Automotor y Electromovilidad

Recursos energéticos Electrificar el transporte 50 % (2040), 100 % (2060). La matriz eléctrica debe ser 100 % renovable al 2060.

Tecnologías y desarrollo de capacidades propias Adaptación de vehículos térmicos existentes y conversión en eléctricos, lo cual puede generar una industria nacional que pueda crear un nuevo mercado de automóviles convertidos, y de mejora de capacidades técnicas. Estándares de economía de combustible para alentar a los fabricantes de automóviles a producir vehículos más eficientes, incluidos los vehículos eléctricos, y pueden ayudar a reducir las emisiones del sector del transporte, además de fomentar la industria nacional. Apoyo a la investigación y el desarrollo en el campo de los vehículos eléctricos puede ayudar a impulsar la innovación y reducir el

costo de los vehículos eléctricos en el mercado local. Para tal efecto, se pueden desarrollar fondos concursables con entidades públicas (CONCYTEC o universidades), y también promover las incubadoras de negocio con la participación privada.

Movilidad eléctrica Fortalecer la movilidad eléctrica ya existente (Metro) e incrementar nuevos usos, micromovilidad y autos privados. Es necesario acelerar la electrificación y penetración del parque vehicular, aumentando la variedad de modelos, hoy en día las ventas de vehículos eléctricos constituyen el 1% de las ventas nacionales, pero se requiere tener metas y estrategias más restrictivas para lograr que el año 2050 el 100% de las ventas de vehículos nuevos sean eléctricos.

Modos de Transporte Sostenible Reducción del tamaño de autos, mejorar la tasa de ocupación de los vehículos, y fortalecimiento de micromovilidad y bicicletas.

Tasas, incentivos tributarios y subsidios Incentivos financieros, como los créditos fiscales o los reembolsos, pueden alentar a los consumidores a comprar vehículos eléctricos al reducir el costo inicial del vehículo. La contratación pública puede ayudar a crear demanda de vehículos eléctricos y proporcionar un mercado para los fabricantes de vehículos eléctricos. Incentivos para cambio de motores térmicos a motores eléctricos. Promover el chatarreo de vehículos antiguos, en favor de los autos eléctricos. Desarrollar el mercado de Garantías extendidas para los vehículos eléctricos, debido a que se tratan de nuevos productos, es posible que dichas garantías requieran de infraestructura de talleres, reposición de repuestos, y una política de incentivos. Promover los seguros para la nueva flota en coordinación con la empresa privada. Priorizar la compra de vehículos electrificados en el Sector Público. Proponer regímenes de reducción temporal de los aranceles ad-valorem para los vehículos eléctricos. Promover las excepciones tributarias o convenios de doble tributación para reducir el efecto del IGV de los vehículos eléctricos.

Inversión en Infraestructura : la inversión en infraestructura de carga, como estaciones de carga públicas, puede ayudar a aliviar la ansiedad por la autonomía y respaldar la adopción de vehículos eléctricos. Infraestructura para parques industriales de automóviles eléctricos, plantas de chatarreo, y estaciones de recarga.

Marco regulatorio y vigilancia Regulación específica para el cambio de matriz energética y tipo vehicular, favoreciendo el cambio de tipos de motores para los vehículos nuevos, y la adaptación para los vehículos en circulación. Declarar las preferencias

en la circulación (carriles exclusivos o preferenciales, zonas urbanas exclusivas) para vehículos electrificados o basados en el hidrógeno verde H_2v .

Educación, cultura y opinión pública Difusión de ventajas y desventajas de vehículos con motores térmicos y eléctricos, bajo campañas de educación y concientización que pueden ayudar a crear discusiones sobre los beneficios de los vehículos eléctricos y alentar a los consumidores a considerar la electromovilidad como una opción viable.

4.2.2.4 Política de Planes Urbanos de Movilidad Sostenible

Basado en los siguientes elementos:

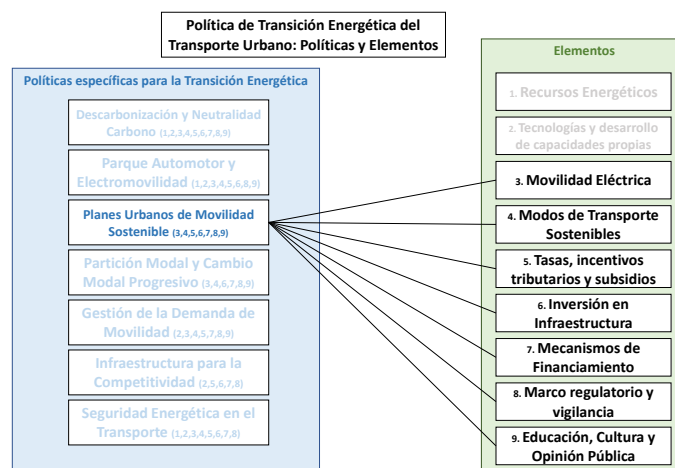


FIGURA N° 4.9: Elementos de la Política de Planes de Movilidad Urbana Sostenible (PMUS)

Movilidad eléctrica Privilegiar la movilidad eléctrica en los PMUS e integrarlo en los mecanismos de financiamiento.

Modos de Transporte Sostenible Fortalecer los modos de transporte sostenibles en los PMUS. Disminuir la informalidad en el transporte, y gestionar las unidades de baja capacidad. Inversión en transporte público, como los sistemas de autobuses de tránsito rápido (BRT) o el tren en Metros. Infraestructura de transporte no motorizado, como peatonalización en zonas urbanas y carriles para bicicletas, para fomentar modos de transporte activos y reducir la dependencia de los vehículos motorizados. Promover las opciones de transporte con bajas emisiones de carbono, como vehículos eléctricos o combustibles alternativos.

Tasas, incentivos tributarios y subsidios Estudiar la aplicación de impuestos locales al uso del suelo por vehículos. Implementar parqueos en vías libres (vía parquímetros o estacionamientos públicos con tarifa). A partir de la recaudación se puede plantear un subsidio parcial para el Sistema de Transporte Público.

Inversión en Infraestructura Se requiere una asignación presupuestaria específica, en la Cuenta General de la República. Los fondos públicos están orientados a las actividades de planeamiento de largo plazo y al monitoreo del cumplimiento de los objetivos.

Mecanismos de financiamiento Presupuesto Público. Promoción de APP locales. Estímulos y difusión para la aplicación del mecanismo de Obra por Impuestos (OxI) y búsqueda de Fondos para la lucha contra el cambio climático (organismos y banca internacional enfocados en los créditos verdes).

Marco regulatorio y vigilancia Iniciativas Privadas a nivel local. Observatorios locales. Promover el planeamiento en el uso del suelo. Gestión del estacionamiento a partir de la fijación de precios por el uso del espacio público o las restricciones al estacionamiento en la calle, pueden ayudar a reducir el uso del automóvil y fomentar el uso del transporte público o modos activos de transporte. Medidas de seguridad vial, como los límites de velocidad, pueden mejorar la seguridad de todos los usuarios de la vía y promover modos de transporte sostenibles.

Educación, cultura y opinión pública Participación y compromiso público, que reflejen las necesidades y prioridades de la comunidad y puedan promover una mayor propiedad y apoyo para las iniciativas de movilidad sostenible. Promover la formación de funcionarios en PMUS.

4.2.2.5 Política de Partición Modal y Cambio Modal progresivo

Basado en los siguientes elementos:

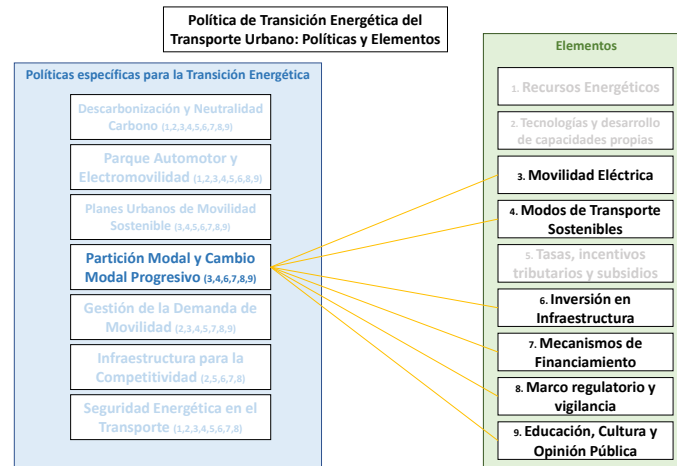


FIGURA N° 4.10: Elementos de la Política de Partición Modal y Cambio Modal Progresivo

Movilidad eléctrica Privilegiar la partición modal eléctrica, con una partición modal de 50% en el año 2050.

Modos de Transporte Sostenible Promover el incremento de los Niveles de Servicio en el Transporte Público.

Inversión en Infraestructura Favorecer la inversión en proyectos del Transporte Público Masivo, sobre todo para mejorar la frecuencia y la organización operativa (velocidad comercial, fiabilidad, seguridad, nivel de servicio).

Mecanismos de financiamiento Incentivos para el TP (subsidios) a partir del Tesoro Público o del Endeudamiento de Bonos Carbono.

Marco regulatorio y vigilancia Marco regulatorio para restricción vehicular.

Educación, cultura y opinión pública Promoción de la concienciación y el cambio de comportamiento para promover el cambio de comportamiento hacia modos de transporte más sostenibles y fomentar el apoyo a las políticas de movilidad sostenible.

4.2.2.6 Política de la Gestión de la Demanda de Movilidad

Basado en los siguientes elementos:

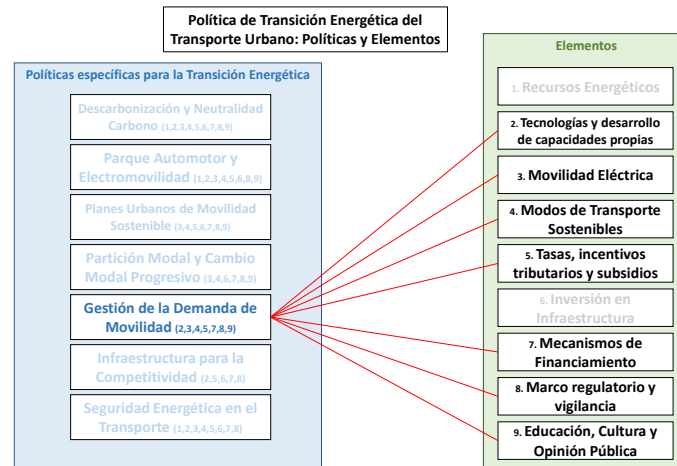


FIGURA N° 4.11: Elementos de la Política de Gestión de la Demanda de Movilidad

Tecnologías y desarrollo de capacidades propias Organización y administración de Megadatos, Centros de Control, procesamiento de señales e instrumentación en colaboración con universidades

Movilidad eléctrica Monitorear la movilidad eléctrica, indicadores de desarrollo y evolución de partición modal en las principales ciudades del país.

Modos de Transporte Sostenible Monitorear el crecimiento y restricciones de los modos suaves y sostenibles. Gestionar la demanda a través de incentivos y desincentivos, se debe utilizar políticas de precios, como cargos por congestión, peajes o precios de estacionamiento, para desalentar el uso de automóviles privados y promover el uso de modos de transporte sostenibles.

Tasas, incentivos tributarios y subsidios Tarificación dinámica para AP en zonas congestionadas en zonas de alta demanda de tráfico, como en autopistas urbanas de ciudades grandes o de metrópolis. En ciudades menores, restricción de circulación en principales arterias para privilegiar el transporte público.

Mecanismos de financiamiento Mecanismos de Desarrollo Limpio (MDL) y mercados de carbono.

Marco regulatorio y vigilancia Gestión de la congestión, como Pico y Placa, y Tarificación dinámica. Planes de Movilidad Empresas y de Entidades Públicas.

Educación, cultura y opinión pública Promoción de alternativas para reducir los desplazamientos en horas pico. Fomentar el cambio de comportamiento, para educar e involucrar a los usuarios para que adopten comportamientos de viaje más sostenibles, como compartir vehículos o usar el transporte público.

4.2.2.7 Política de Infraestructura para la Competitividad

Eficiencia y productividad: Orientado a mejorar la velocidad y confiabilidad de los desplazamientos de personas y bienes. Comercio e inversión: Las redes eficientes de transporte reducen las barreras comerciales y facilitan el intercambio de bienes y servicios y competitividad de ciudades. Integración regional: para lograr economía de escala y factores productivos comunes. Desarrollo humano: al brindar acceso a servicios esenciales como atención médica, educación y accesibilidad a los servicios urbanos esenciales. Innovación: el desarrollo de parques de investigación, incubadoras de tecnología e infraestructura especializada para ciertas industrias puede ayudar a fomentar la innovación y respaldar el crecimiento de nuevos negocios. La Política está basada en los siguientes elementos:

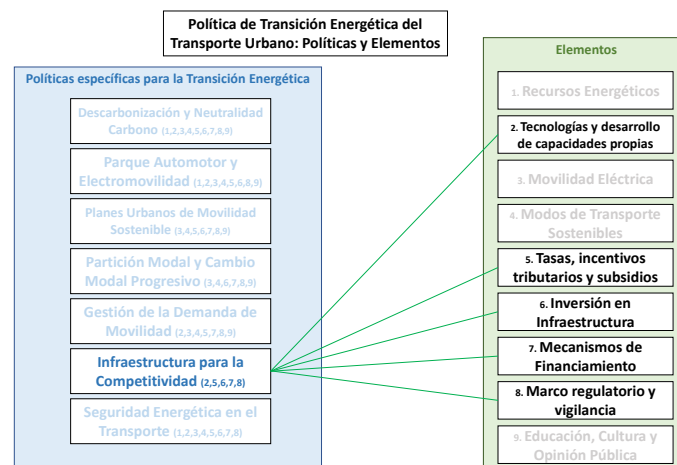


FIGURA N° 4.12: Elementos de la Política de Infraestructura para la Competitividad

Tecnologías y desarrollo de capacidades propias Infraestructura eléctrica, principalmente en generación. Tomar en cuenta intermitencia de renovables:

Tasas, incentivos tributarios y subsidios Tasas a matrículas (placas), por tamaño de automóvil, por emisiones, uso de espacio público como estacionamiento

Inversión en Infraestructura Infraestructura básica para el TP, y modos suaves

Mecanismos de financiamiento Inversión Pública y Mecanismos de Desarrollo Limpio

Marco regulatorio y vigilancia Planeamiento de Inversión Multianual y Plan de Infraestructura para la Competitividad como Normativa de referencia

4.2.2.8 Política de Seguridad Energética en el Transporte

Basado en los siguientes elementos:

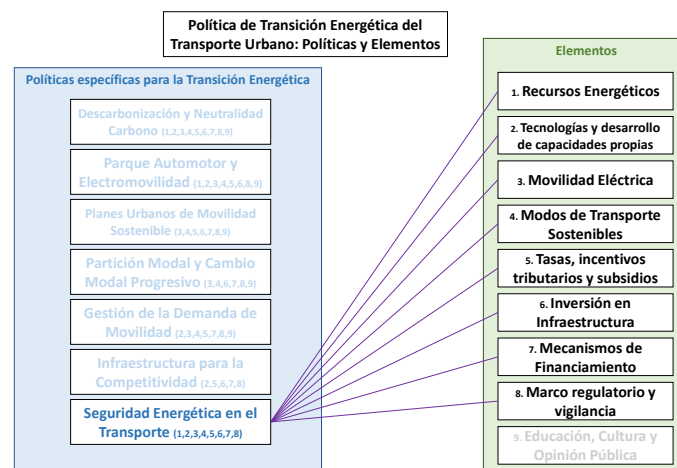


FIGURA N° 4.13: Elementos de la Política de Infraestructura para la Competitividad

Recursos energéticos Los recursos energéticos deben producirse en el país, >50 % 2050, >80 % en 2060

Tecnologías y desarrollo de capacidades propias Tecnología propia, inversión en Investigación Básica y Aplicada en Recursos Energéticos propios (solar, eólica, hídrica)

Movilidad eléctrica Aseguramiento de energías renovables, H_2v , Amoníaco verde, otros vectores energéticos verdes

Modos de Transporte Sostenible Promover combustibles alternativos (biocombustibles, H_2v , electricidad). Disminuir el uso de recursos energéticos (eficiencia energética y modos suaves).

Tasas, incentivos tributarios y subsidios Implementar impuesto al carbono y a los combustibles fósiles, en particular a combustibles importados. Subsidios para desarrollo de recursos energéticos propios

Inversión en Infraestructura APP en infraestructura energética de respaldo (baterías, para renovables e hidráulica)

Mecanismos de financiamiento Créditos verdes, Banca Multilateral

Marco regulatorio y vigilancia Adoptar estándares de eficiencia energética y de emisiones en los vehículos.

4.2.2.9 Presupuestos Carbono

Calcular el presupuesto para llegar a la neutralidad de carbono para el sistema de transporte terrestre urbano en el Perú implica estimar las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) asociadas con diferentes modos de transporte y luego determinar el nivel de reducción de emisiones adecuado. Puede tomarse la siguiente secuencia:

Recopilar datos sobre el sector del transporte: recopilar datos sobre la cantidad de vehículos, el consumo de combustible, los volúmenes de pasajeros y carga, y otros factores relevantes para los diferentes modos de transporte en ciudades del Perú.

Calcular emisiones: Estimar las emisiones GEI asociadas a cada modo de transporte. Esto se puede hacer usando factores de emisión para diferentes tipos de combustibles y vehículos (en función del recorrido), o mediante cálculos usando modelos o datos sobre las características del vehículo y los patrones de viaje.

Establecer una línea de base: nivel de emisiones de GEI del sector del transporte en un año determinado, usando los datos y cálculos realizados. La línea de base será contrastada con las futuras reducciones de emisiones.

Establecer un objetivo de neutralidad de carbono: Este objetivo debe ser consistente con los objetivos nacionales o internacionales de reducción de GEI y debe considerar factores como el crecimiento esperado en la demanda de transporte, la viabilidad de diferentes estrategias de reducción de emisiones y el costo de implementación.

Identificar estrategias de reducción de emisiones: como la promoción del transporte público, el fomento del uso de vehículos de bajas emisiones, la inversión en infraestructura para andar en bicicleta y caminar, y la implementación de políticas de precios para desalentar el uso de automóviles privados.

Calcular los ahorros de emisiones: asociada a cada estrategia de reducción de emisiones, utilizando datos y modelos para proyectar el impacto potencial de cada medida.

Determinar el presupuesto de neutralidad de carbono: Esto proporcionará un presupuesto para las emisiones que se pueden asignar a cada estrategia, en función de sus ahorros de emisiones estimados.

4.2.2.10 Mecanismos de Financiamiento

Existen varios mecanismos de financiamiento que podrían considerarse para apoyar la transición energética del sistema de transporte en el Perú. Aquí hay algunas opciones posibles:

Precio del carbono: la implementación de un mecanismo de precio del carbono, como un impuesto al carbono o un sistema de comercio de emisiones, puede proporcionar un incentivo para reducir las emisiones de GEI del sector del transporte, al mismo tiempo que genera ingresos que pueden usarse para apoyar la transición a modos de transporte más limpios. Los ingresos generados por el precio del carbono se pueden utilizar para financiar la investigación y el desarrollo, las inversiones en infraestructura y los incentivos para vehículos y combustibles bajos en carbono.

Bonos verdes: La emisión de bonos verdes puede ser una fuente de financiamiento para proyectos relacionados con la transición energética del sistema de transporte en Perú. Estos bonos están diseñados específicamente para financiar proyectos que tengan un impacto ambiental positivo, como invertir en autobuses eléctricos o construir infraestructura de carga para vehículos eléctricos.

Asociaciones público-privadas: comprometerse con inversionistas del sector privado puede proporcionar financiamiento adicional y experiencia para proyectos de transición energética. Las asociaciones público-privadas pueden implicar una variedad de arreglos, desde empresas conjuntas hasta concesiones o contratos de servicios, y pueden ayudar a aprovechar los recursos del sector privado para lograr objetivos de política pública.

Subvenciones y subsidios: proporcionar subvenciones o subsidios para apoyar el despliegue de vehículos e infraestructura de bajas emisiones puede ayudar a reducir el costo de la transición a modos de transporte más limpios. Estos incentivos pueden estar dirigidos a segmentos específicos de la población o industrias, como taxistas o empresas de transporte, para ayudar a superar las barreras a la adopción.

Financiamiento climático internacional: a través de mecanismos como el Fondo Verde para el Clima o el Fondo para el Medio Ambiente Mundial, que se pueden utilizar para apoyar la implementación de proyectos de transición energética en el sector del transporte, en áreas donde el costo de adopción es alto o donde la inversión del sector privado es limitada.

También es importante establecer un marco regulatorio y de políticas claro para apoyar la transición energética del sistema de transporte. Un marco de políticas de apoyo ayudará a atraer inversiones y a reducir la incertidumbre para los inversores y quienes desarrollan los proyectos de infraestructura de energía y de transporte.

4.2.2.11 Monitoreo y Seguimiento

Es importante monitorear la implementación de políticas en la transición energética del sistema de transporte en Perú para garantizar que las políticas estén logrando los objetivos previstos e identificar áreas donde se pueden necesitar ajustes:

Recopilación y análisis de datos: sobre indicadores clave, como las emisiones de gases de efecto invernadero, las ventas de vehículos y el consumo de combustible. Los datos se pueden recopilar a través de encuestas, programas de monitoreo y requisitos de informes reglamentarios.

Indicadores de desempeño: Por ejemplo, se podrían establecer objetivos para el despliegue de vehículos de bajas emisiones o la reducción de las millas recorridas por vehículos.

Participación de las partes interesadas: Las partes interesadas pueden proporcionar información sobre la eficacia de las políticas, las barreras potenciales para la implementación y las oportunidades para la innovación.

Revisiones de políticas: Las revisiones pueden ser realizadas por agencias gubernamentales, expertos independientes u otras partes interesadas.

Transparencia y presentación de informes: Esto puede incluir informes periódicos sobre el progreso hacia los objetivos de las políticas, la divulgación pública de datos y análisis, y la participación de auditores independientes u organismos de verificación.

4.3 Contrastación de la hipótesis

Se ha planteado la siguiente Hipótesis General: *La descarbonización de la matriz energética del transporte se basa en la transición hacia la energía eléctrica como fuerza motriz de los vehículos, la que puede ser implementada a partir de políticas públicas para el desarrollo limpio del país. La matriz del sistema eléctrico debe aumentar su componente renovable y es necesario modernizar el parque automotor, construyendo infraestructura de recarga. La eficiencia energética complementa las reducciones de emisiones atmosféricas y de gases de efecto invernadero.*

Para contrastar esta hipótesis, se han realizado las siguientes evaluaciones:

- Estudio de las matrices energéticas y eléctricas de los diferentes países, y del Perú en particular.

- Estudio de las políticas energéticas del Perú y de diferentes países.
- Estudio del consumo energético del transporte urbano.
- Estudio económico del transporte.
- Evaluación prospectiva de la transición energética del transporte terrestre urbano.
- Propuestas de políticas para la transición energética.

Se sustentan las siguientes hipótesis específicas:

H.E.: *Los vehículos eléctricos contribuyen a la disminución de externalidades del parque automotor, aunque hoy en día aún tienen restricciones en su autonomía de recorrido. El desarrollo de la infraestructura de recarga en domicilios, comercios y centros de abastecimiento permitirá incrementar la flota de vehículos eléctricos, renovando el parque automotor y diversificando la matriz energética del transporte.*

Para contrastar esta hipótesis se han realizado las siguientes evaluaciones:

- Valoración ambiental de los autos, en particular, asociados al consumo energético tomando en cuenta la matriz energética. Se ha realizado un análisis de tipo ACV (Análisis de Ciclo de Vida).
- Se ha comparado la huella de carbono tomando en cuenta la fuente de energía, así como el grado de ocupación.
- Se ha realizado una propuesta de eficiencia energética para diferentes tipos de vehículos. Se comprueba que los vehículos eléctricos tienen menor impacto de gases de efecto invernadero (GEI), sin embargo, su huella ambiental depende de la matriz eléctrica.
- Estudio de Costos Total de Propiedad de los vehículos eléctricos. Actualmente, los costos de operación son menores, sin embargo, las barreras de ingreso (compra y financiamiento del vehículo eléctrico) no permiten su mayor ingreso en el mercado.

Recomendaciones para mejorar la validación Complementar con estudio sobre la viabilidad económica del sistema de recarga eléctrica y sobre el planeamiento de la red de recarga.

H.E.: *Las redes de información de datos masivos (big data) provenientes de los sistemas de transporte permitirán anticipar la formación de congestión y la administración eficiente del espacio público.*

Para contrastar esta hipótesis se han realizado las siguientes evaluaciones:

- Modelos de simulación para consumo energético.
- Estudios de seguimiento vehicular con instrumentación embarcada en buses del Corredor Morado, basado en GPS y acelerómetros, y comprobación del consumo energético.

Recomendaciones para mejorar la validación Desarrollo de modelos básicos para uso de información a partir de celulares.

H.E.: *La reducción de externalidades del transporte (congestión, polución atmosférica, ruido, entre otros) y la competitividad de fuentes de energía alternativas, permitirá reducir los costos de inversión y explotación de los sistemas de transporte público masivo en las principales ciudades del Perú.*

Para contrastar esta hipótesis se han realizado las siguientes evaluaciones:

- Se han mostrado ejemplos de las externalidades del transporte, sobre la congestión y el uso indebido del suelo urbano.
- Se ha comparado la eficiencia del transporte público frente al uso del auto particular.
- Se ha verificado que los recursos renovables permiten reducir la huella de carbono del transporte.
- Se ha verificado que los recursos renovables a través de la electrificación del transporte, permite reducir la polución atmosférica.

Recomendaciones para mejorar la validación Estudio de proyecciones de costos futuros con escenarios de reducción de externalidades. El Valor Social del Tiempo y el Costo de la Salud Pública pueden ser variables importantes en la monetarización de los costos. Estudio de la competitividad de las fuentes de energía alternativa, como el Hidrógeno Verde H_2v y el almacenamiento de energía renovable.

H.E.: *La inversión en infraestructura de mayor capacidad de transporte (ferrocarril) y las políticas de incentivo / desincentivo de fuentes de energía permitirá generar un cambio al horizonte del 2050.*

Para contrastar esta hipótesis se han realizado las siguientes evaluaciones:

- Estudio de la influencia de la capacidad en la mejora del desempeño del sistema de transporte.
- Estudio de la necesidad de capacidad eléctrica (potencia efectiva y generación eléctrica) requerida para la transición energética.

Recomendaciones para mejorar la validación Estudio para evaluar la necesidad de incrementar el grado de ocupación y de favorecer la eficiencia del transporte urbano en ejes de movimiento. Estudios para la mejora del tiempo de transporte y de distancia de recorrido.

CONCLUSIONES

4.3.1 Comentarios Finales

El modelo de prospectiva ha permitido revisar las condiciones actuales del consumo energético del transporte, de sus externalidades y de alinear si los compromisos de una transición energética son factibles, y qué se requiere en cuanto a la implicación de actores y políticas específicas. Es una herramienta importante en planeamiento estratégico y ha permitido llegar a las conclusiones de una transición energética hacia la electromovilidad y a disminuir la dependencia de los combustibles fósiles. Algunos aspectos específicos se detallan en el estudio de diferentes escenarios, tomando en cuenta el futuro parque vehicular eléctrico y diferentes fuentes de energía para la generación de electricidad, e identificando aspectos claves como la implementación de infraestructura de carga, para proponer, luego, las políticas y estrategias recomendadas. También se identificaron factores clave que influyen en la transición energética, como el costo de los vehículos eléctricos, el consumo energético de los vehículos, la disponibilidad de infraestructura de carga y las preferencias de los consumidores (como la encuesta de prospectiva y el análisis del costo total de propiedad (TCO)), en base a lo anterior se recomiendan políticas y estrategias más efectivas para promover la electromovilidad. De otro lado, se hicieron evaluaciones de externalidades, así como la propuesta de monetarización, sin embargo, esto no es exhaustivo y futuras investigaciones pueden tomar otros aspectos, como el costo de la accesibilidad, las enfermedades, las muertes por seguridad vial, la reducción de la competitividad por tiempos excesivos de viajes urbanos, entre otros factores, que pueden tener impacto en la calidad de vida y en los aspectos sociales y ambientales que más preocupan a la sociedad, y que impactarán en las futuras generaciones. Finalmente, es muy importante la comunicación de hallazgos, se han realizado diferentes jornadas de comunicaciones, como la participación en el el Congreso Internacional ICTI (11.ago.2022, Hotel Sheraton), Conferencia del autor: "Movilidad Urbana y Transición Energética del Transporte en el Perú, un reto de largo plazo", seminarios en línea de la Escuela Central de Posgrado de la UNI ([Webinar Hidrógeno Verde y Energías Renovables](#)), y otros seminarios en línea en la Unidad de Posgrado de la Facultad de Ingeniería Civil de la UNI, así como cursos y seminarios brindados con este propósito.

En contraparte, es importante tener en cuenta las limitaciones de los modelos de prospectiva, dado que son herramientas simplificadas que no pueden tomar toda la complejidad de la realidad, es decir, no son predicciones del futuro, sino que ayudan a explorar diferentes políticas, actores y evaluar las posibles consecuencias de diferentes decisiones en el largo plazo. El futuro no está escrito, pero es importante imaginarlo para que se implementen las mejores políticas y estrategias.

4.3.2 Conclusiones de la Investigación

1. La transición energética del transporte urbano será un proceso bastante lento y difícil, debido a que los recursos energéticos que se utilizan actualmente en el Perú están muy relacionadas con la emisión de gases de efecto invernadero y, sus consecuentes daños en la biodiversidad y el cambio climático.
2. La transición energética hacia fuentes renovables de energía es necesaria por diversas razones: mitigación del cambio climático, seguridad e independencia energética, nuevos mercados de producción de recursos energéticos, adaptación geopolítica, una industria nacional relacionada a las baterías y a los autos eléctricos, soluciones integrales para la congestión y enfoque en el aumento de la productividad en las ciudades peruanas.
3. La transición energética se basa en un incremento de la movilidad eléctrica y de la generación eléctrica basada en RER, para lo cual se estima que las centrales fotovoltaicas superen un factor de planta de 0.30 y que las centrales eólicas superen un factor de planta de 0.50 al menos.
4. Los vehículos eléctricos no emiten directamente gases de efecto invernadero, aunque su fabricación y los recursos energéticos utilizados para la electricidad sí podrían contener emisiones. Pese a ello, son más eficientes que los vehículos de combustión interna. También debe tomarse en cuenta que la energía utilizada para la recarga de los vehículos eléctricos debe provenir de fuentes renovables como la energía solar o eólica.
5. El sector transporte es el primero en nivel de emisiones de gases de efecto invernadero, a su vez es un sector muy dependiente de las energías fósiles debido a que, gran parte de los vehículos se movilizan gracias a motores térmicos. Sólo se cuenta con transporte electrificado en la Línea 1 del Metro de Lima y en los pocos teleféricos y funiculares que existen en el país.
6. La política de transición energética del transporte en el Perú tiene como objetivo reducir la emisión de gases de efecto invernadero y mejorar la calidad del aire. El Plan Nacional de Energía 2014-2025 (Ministerio de Energía y Minas del Perú, 2013) establece que el 20% del consumo total de energía eléctrica debe provenir de fuentes renovables no convencionales para el año 2025, y el 60% de todas las renovables para el mismo año. Sin embargo, la política peruana no es lo suficientemente ambiciosa en comparación con otros países sudamericanos. Por ejemplo, Chile tiene como objetivo tener la venta de Transporte Público Urbano y de vehículos livianos y medianos 100% electrificados para el año 2035, y una flota de 40% electrificada para el año 2050, y 100% del transporte

- público electrificado para el mismo año (Ministerio de Energía, Gobierno de Chile, 2021).
7. El Perú carece de infraestructura adecuada para la transición energética del transporte terrestre urbano, como estaciones de carga para vehículos eléctricos o estaciones de combustible alternativo, que son esenciales para la adopción generalizada de tecnologías de transporte de bajas emisiones y huella de carbono.
 8. El desarrollo de la infraestructura de recarga es fundamental para impulsar la adopción de los vehículos eléctricos en el país. Los sistemas de recarga lenta en los domicilios pueden funcionar en ambos sentidos, como almacenamiento de energía para viviendas y edificios, reduciendo los niveles de inversión del estado.
 9. Los recursos financieros limitados y el acceso a la financiación plantea un desafío importante para el Perú en la implementación de medidas de transición energética. Los altos costos iniciales de las nuevas tecnologías, la falta de incentivos financieros y los problemas de accesibilidad para los consumidores dificultan la adopción de opciones de transporte de baja huella de carbono.
 10. El Perú deberá enfrentar barreras tecnológicas, incluido el acceso limitado a tecnologías de transporte avanzadas y limpias, falta de experiencia técnica y capacidades de fabricación locales inadecuadas, dada la ausencia de industria nacional. La transferencia tecnológica es un reto que debe priorizarse como parte de las negociaciones de compra de nuevos vehículos para entidades públicas, y como parte de los incentivos para la industria local.
 11. Las variables que tienen mayor impacto en la transición energética son: Generación Distribuida (GEDIS), Incentivos para inversionistas RER (INRER), Matriz energética como Política Pública (MAENE), las Políticas Energéticas en su conjunto (POENE), el Desarrollo Tecnológico (DETEC) y las Tarifas Eléctricas (TAREL).
 12. Los actores dominantes clave y de enlace de mayor significancia para la ejecución de la estrategia de transición energética son: Ministerio de Economía y Finanzas, INDECOPI (como actor decisor de fusiones y de control del mercado eléctrico), OSINERGMIN (como regulador eléctrico), Ministerio de Energía y Minas (MINEM), Comité de Operación Económica del Sistema Eléctrico (COES), los Gobiernos Regionales (GORES), el Congreso (debido a sus facultades legislativas) y la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (SNMPE) por su influencia en las políticas energéticas, como representante de la sociedad civil y empresarial.

13. Influenciar en el cambio del comportamiento de los consumidores, creando conciencia sobre los beneficios de las opciones de transporte sostenible; sin embargo, la amplitud del mercado informal para la reventa y vehículos de segundo uso, dificultan este paso. Las preferencias culturales, la falta de conocimiento y la resistencia al cambio pueden impedir la adopción de la transición energética del transporte.
14. Los marcos normativos fuertes, con Norte bien definido y hojas de ruta oficiales favorecerían la transición energética en el sector del transporte. Es importante el fortalecimiento de marcos de políticas integrales que incentiven la adopción de opciones de transporte de baja huella de carbono. En el presente documento, se proponen Políticas para la Transición Energética del Transporte Urbano.
15. Los análisis de escenarios futuros demuestran que existe un grave déficit por la búsqueda de nuevas fuentes de energía, debido a la proyección del agotamiento de los recursos energéticos fósiles y al nivel requerido de inversiones para la generación eléctrica en base renovable que sustente el desarrollo del transporte terrestre urbano.
16. El análisis de Costo Total de Propiedad (TCO, por sus siglas en inglés) favorece al vehículo eléctrico en costos operativos, sin embargo, la barrera de entrada (compra del vehículo) sigue siendo comparativamente muy alto frente al vehículo de combustión. En vehículos con mayor recorrido, como los taxis, es evidente que el cambio hacia la matriz eléctrica puede mejorar la rentabilidad.
17. Los vehículos GNV tienen mejor desempeño de TCO que los vehículos eléctricos debido a las actuales subvenciones del Estado al gas natural.
18. La transición energética del transporte requiere muchos elementos concurrentes: infraestructura de generación y transporte de energía renovable, infraestructura para la recarga de vehículos eléctricos, renovación del parque vehicular, incremento del nivel de ocupación de los vehículos, reducción de desplazamientos (en distancia), entre otros aspectos.
19. El crecimiento poblacional tiene una tendencia a una reducción constante, e incluso, pudiendo ser negativa en el corto o mediano plazo, lo cual condiciona el crecimiento de la proyección de demanda del transporte.
20. El Análisis de Ciclo de Vida de la huella de carbono de los vehículos eléctricos y de combustión permite clarificar el impacto de cada recurso energético, con un claro balance a favor del vehículo eléctrico.
21. El desempeño de la huella de carbono del vehículo eléctrico está asociado también al nivel de ocupación y al contenido de carbono de la matriz eléctrica de

referencia. En el caso peruano, una matriz mayoritariamente renovable permite un mejor desempeño.

22. El nivel de ocupación medio de los vehículos tiene un impacto importante en la huella de carbono.
23. Los vehículos eléctricos mantienen otros grados de externalidades, como la congestión y el uso del suelo urbano. Por tal motivo, se requiere fomentar el uso del transporte público en áreas urbanas.
24. Se ha sintetizado la matriz de viajes de Lima Metropolitana. Se modeló el tiempo promedio de viaje en hora punta de 1.20 h, y una distancia promedio de 25 km.

RECOMENDACIONES

1. En la presente investigación no se ha abordado a detalle la medición de consumo energético ni emisiones de diferentes tipos de vehículo, esto podría hacerse en futuras investigaciones para comprobar el nivel de GEI y de contaminantes atmosféricos de los vehículos del parque automotor peruano.
2. Realizar estudios de diferentes tecnologías para evaluar el desempeño, la eficiencia y el impacto ambiental de diferentes tecnologías utilizadas en el transporte urbano, como vehículos eléctricos y de celdas de hidrógeno, e infraestructura de carga de energía renovable.
3. Medir y observar la efectividad de las políticas y regulaciones existentes relacionadas con la transición energética en el transporte urbano, las cuales se han elaborado sin metas plausibles. Evaluar su impacto en la promoción de modos de transporte sostenibles, la reducción de emisiones y el fomento de la adopción de tecnologías bajas en carbono. Identificar espacios de mejora en las políticas.
4. Realizar estudios integrales para comprender los patrones de movilidad, de viaje, comportamientos de desplazamiento y de demanda de transporte en áreas urbanas. Identificar los factores que influyen en la elección del modo, como el costo, la conveniencia y la accesibilidad, y proponer estrategias para cambiar hacia modos de transporte sostenibles.
5. Identificar estrategias para la planificación y el diseño de infraestructura para apoyar la transición energética en el transporte urbano, así como su inserción en los planes multianuales de inversión en infraestructura. Evaluar los requisitos para las estaciones de carga, la integración de energías renovables, los sistemas de redes inteligentes y otras infraestructuras de apoyo. Las variables básicas (ubicación, capacidad, escalabilidad, rentabilidad, entre otros) deben ser valorados en un plan de inversiones y una estrategia nacional.
6. Evaluar la factibilidad económica y mecanismos financieros para la implementación de medidas de transición energética en el transporte urbano. Evaluar los costos y beneficios de diferentes tecnologías, inversiones en infraestructura y programas de incentivos. Revisar modelos de financiación de otros países e identificar posibles fuentes de ingresos, directos y complementarios.
7. Estudiar los aspectos sociales y de comportamiento relacionados con la adopción de modos de transporte sostenibles y la transición energética. Investigar la percepción, las actitudes y las preferencias del público hacia las nuevas tecnolo-

- gías y las opciones alternativas de transporte. Identificar incentivos y barreras para el cambio de comportamiento.
8. Realizar estudios integrales para evaluar el impacto ambiental de los sistemas de transporte urbano y los beneficios potenciales de la transición energética. Cuantificar la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, la contaminación del aire y la contaminación acústica asociada con la adopción de tecnologías bajas en carbono y modos de transporte sostenibles.
 9. Analizar casos de éxito de diferentes ciudades o regiones que han implementado medidas de transición energética en el transporte urbano, en particular los altos índices de electromovilidad en los países nórdicos, así como en los países del Este asiático, y de países sudamericanos con una realidad próxima al Perú. Identificar las mejores prácticas, las lecciones aprendidas y las estrategias transferibles que se pueden aplicar en diferentes contextos, según tamaño de ciudades y niveles de desarrollo.
 10. Evaluar el impacto de los actores y partes interesadas, incluidas las entidades gubernamentales, las universidades, los operadores de transporte, la industria, las comunidades. Investigar modelos exitosos de asociaciones de múltiples partes interesadas para implementar medidas de transición energética.
 11. Proponer escenarios prospectivos de largo plazo y enfoques de modelos para evaluar los requisitos energéticos futuros y las vías de transición para los sistemas de transporte urbano. Analizar las implicaciones de diferentes escenarios sobre el consumo de energía, los tipos de vehículos, las emisiones, entre otros aspectos.
 12. Estudiar la implementación del Sistema de Recarga de Vehículos Eléctricos, el cual puede ser un facilitador para la Estabilidad del Sistema Eléctrico en una situación de mayor explotación de recursos renovables intermitentes como la energía solar y eólica.
 13. Sintetizar bases de datos a partir de información registrable en celulares. En el ámbito universitario se puede realizar a partir de grupos de voluntarios. Recomendar a las entidades del estado y observatorios de movilidad y transporte, el uso de sensores para el monitoreo del tráfico y cámaras de videovigilancia para la calibración de modelos de tráfico. Realizar estudios de simulación energética en vehículos particulares y de transporte público.
 14. Fomentar el cambio cultural para el uso de energía eléctrica durante el período de mayor disponibilidad de recursos energéticos renovables, en particular, en horario diurno para las plantas fotovoltaicas.

Recomendaciones sobre la disponibilidad de información La tesis enfrentaba inicialmente el reto de recopilar datos completos y confiables en un contexto donde la información abierta no es ampliamente disponible en Perú. En el Perú no existe mucha disponibilidad de información verificada sobre el consumo energético en el transporte, la generación de electricidad de todo tipo de fuentes y a toda escala, cálculos sobre las emisiones de gases de efecto invernadero, y otros factores relevantes para la medición de externalidades. La información disponible está presente en bases de datos de diferente origen, sin estándar de medición, ni de validación, por lo que el análisis a partir de ella puede presentar incongruencias. Eventualmente, las organizaciones públicas realizan consultorías para suplir alguna falta de información, sin embargo, suele realizarse de forma discontinuada y sin un programa duradero. Cuando se requiere de información sobre la huella de carbono, sobre el consumo energético del transporte, sobre la seguridad en el transporte, etc., ésta se consolida a través de estudios realizados por terceros con bases de datos propias o fuentes secundarias, lo cual hace difícil la validación de resultados. A partir de estos estudios, se realizan propuestas de diferente plazo (corto, mediano, largo plazo), pero que no tienen seguimiento ni vinculación por parte de las entidades públicas, es decir, no hay compromiso con los resultados de los estudios encargados. La ausencia de información del consumo del transporte tiene diversas aristas:

- Fragmentación de la información: la cual se encuentra dispersa en diferentes fuentes, tanto públicas como privadas. Parte de la información se puede encontrar en repositorios públicos (INEI, MEF, MINEM, MINAM, MTC, Congreso de la República, COES, SEIN, OSINERGMIN, BCR, etc.), como fuentes privadas (AAP, Perú Energía, H2 Perú, Deloitte, Bloomberg, etc.). Sin embargo, es muy frecuente encontrar disparidad en información sobre la misma variable (por ejemplo, sobre el Parque Automotor de vehículos ligeros, trimotos y motocicletas entre INEI, MTC y AAP).
- Insuficiencia de la información: Debido a la falta de recursos para recopilar y mantener la información, o a la falta de interés de los responsables de generarla. Es sabido que las relaciones entre Universidad, Empresa y Estado no genera información de calidad ni monitoreo de la información, lo cual genera vacíos para la validación de la información existente.
- Calidad de la información: La información disponible sobre energía puede ser de baja calidad, lo que puede llevar a errores en la planificación y la toma de decisiones. Los factores están relacionados con la falta de estandarización de la información, o a la falta de controles de calidad en su recopilación y procesamiento.
- Tercerización de los análisis de datos y de la planificación: Se realizan por

especialistas sin vinculación de acción por parte de las entidades. Los análisis tampoco tienen vinculación intersectorial.

Para poder superar esta condición, se requieren tomar acciones específicas que permitan un acceso abierto a información verificada, que tome en cuenta lo siguiente:

- Desarrollar un marco normativo que promueva la creación y apertura de bases de datos sobre energía y transporte, con participación de universidades, para facilitar la disponibilidad de datos de fuentes públicas y privadas.
- Crear un portal de datos abiertos sobre el uso de la energía en el transporte, con validación de un ente central (COES, MINEM, MTC, MINAM). Este portal podría ser administrado por una Laboratorio dependiente de una Universidad o Asociación de Universidades.
- Desarrollar estándares para la recopilación y el procesamiento de datos sobre el uso de la energía en el transporte.
- Fortalecer las capacidades de los actores involucrados en la recopilación de datos sobre energía y consumo energético en el transporte. En particular, este desarrollo debería ser liderado por las universidades con colaboración de entidades públicas y privadas.
- Promover que la recopilación de la información debe realizarse en todos los niveles públicos de ejecución y ser monitoreada por un laboratorio científico ligado a las universidades.
- Incentivar los análisis de escenarios y recomendaciones de tomas de decisiones, vinculadas a diferentes períodos de planeamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albatayneh, A., Assaf, M. N., Alterman, D., y Jaradat, M. (2020). Comparison of the overall energy efficiency for internal combustion engine vehicles and electric vehicles. *Rigas Tehniskas Universitates Zinatniskie Raksti*, 24(1), 669–680.
- ANRE, Japan - Agency for Natural Resources & Energy. (2018). Structure of the fifth strategic energy plan.
- Autoridad de Transporte Urbano para Lima y Callao (ATU). (2021, 30 de noviembre). *Documento técnico descriptivo del modelo de transporte estratégico versión 1.0*. Lima, Perú: ATU.
- Banco Interamericano de Desarrollo. (2012). *Elaboración de la nueva matriz energética sostenible y evaluación ambiental estratégica, como instrumentos de planificación*. Recuperado de: <http://www.minem.gob.pe/publicacion.php>.
- CENERGIA. (2012). *Elaboración de la nueva matriz energética sostenible y evaluación ambiental estratégica, como instrumentos de planificación*. Lima, Perú: MEF, BID.
- Congreso de la República del Perú. (2018, 18 de abril). *Ley marco sobre cambio climático*.
- Córdova-Chavez, L., y Santa-María-Dávila, E. (2021). Planes de desplazamiento de empresa: una propuesta para mejorar la movilidad del sector construcción en el área metropolitana de Lima y Callao. *Tecnia*, 31(2), 11–21.
- Cox, B. (2018). *Mobility and the energy transition: a life cycle assessment of swiss passenger transport technologies including developments until 2050* (PhD thesis). ETH Zurich.
- Cullen, J., y Allwood, J. M. (2009). *Engineering fundamentals of energy efficiency* (PhD thesis). University of Cambridge.
- Daly, H. E. (2015). *Transport energy demand: techno-economic modelling and scenarios for irish climate policy* (PhD thesis). University College Cork.
- Dato, P. (2016). *La transition énergétique* (PhD thesis). Université Grenoble Alpes (ComUE).
- DGEE-MINEM. (2019). *Balance nacional de energía 2018*. Lima: MINEM.
- DGEE-MINEM. (2021). *Balance nacional de energía 2020*. Lima: MINEM.
- DPPE, División de Prospectiva y Política Energética Ministerio de Energía de Chile. (2016). *Energía 2050: Política energética de Chile*. Ministerio de Energía de Chile.

- Energy Research Institute (ERI). (2015). 2050 high renewable energy penetration scenario and roadmap study. *Energy Research Institute: Beijing, China*.
- European Commission. (2012). *Energy roadmap 2050*. Publications Office of the European Union.
- Faberi, S., Paolucci, L., Lapillonne, B., y Pollier, K. (2015). Trends and policies for energy savings and emissions in transport. *Report, ODYSSEE-MURE project coordinated by ADEME*, 1–83.
- Farreny Gaya, R. (2011). *Working on strategies towards urban sustainability* (PhD thesis). Universitat Autònoma de Barcelona,.
- Flores, I. V. (2018, noviembre). *Análisis de patrones de movilidad urbana en Lima y Callao basados en tecnología big data*. Lima, Perú: AATE - MTC. (Cargo: Director de Desarrollo AATE - MTC)
- Flores González, Leonardo and Santa María Dávila, Edward and Valero Camarena, Yeltsin Luis and Montenegro Sono, Walter Jesús. (2018, July 18-20). Análisis del comportamiento del flujo vehicular y nivel de servicio de la av. Javier Prado – Lima, Perú. En *Innovation in education and inclusion: Proceedings of the 16th laccei international multi-conference for engineering, education and technology*. Lima, Perú. (Full Paper #409)
- Fundación Transitemos. (2013). *Hacia una ciudad para las personas: Hoja de ruta para una movilidad y un transporte sostenibles en lima y callao al 2025*. Lima: Fundación Transitemos.
- García-Olivares, A., Solé, J., y Osychenko, O. (2018). Transportation in a 100% renewable energy system. *Energy conversion and management*, 158, 266–285.
- Gattie, D. K. (2020). Us energy, climate and nuclear power policy in the 21st century: The primacy of national security. *The Electricity Journal*, 33(1), 106690.
- Gobierno de Colombia. (2019). Estrategia nacional de movilidad eléctrica. *Obtenido de: <https://www.minenergia.gov.co/documentos/10192/24230999/EstrategiaNacionalMovilidadElectrica2020.pdf>*.
- Godet, M. (2007). *Prospectiva estratégica: problemas y métodos* (Segunda ed.). Donostia-San Sebastián: Prospektiker. Descargado de <https://www.prospektiker.es/wp-content/uploads/2014/07/Cuaderno20.pdf>
- Guillcatanda Tacuri, P. A., y Zambrano Zambrano, M. J. (2019). *Análisis y optimización del comportamiento aerodinámico de la carrocería de un bus categoría m3 (interprovincial)*.

- Haas, T. (2021). From green energy to the green car state? the political economy of ecological modernisation in germany. *New political economy*, 26(4), 660–673.
- Hagos, D. A., y Ahlgren, E. O. (2020). Exploring cost-effective transitions to fossil independent transportation in the future energy system of denmark. *Applied Energy*, 261, 114389.
- Hernández-Vásquez, A., y Díaz-Seijas, D. (2017). Contaminación ambiental y repositorios de datos históricos de contaminantes atmosféricos en Perú. *salud pública de méxico*, 59(5), 507–508.
- Hofer, J. (2014). *Sustainability assessment of passenger vehicles: Analysis of past trends and future impacts of electric powertrains* (PhD thesis). ETH Zurich.
- INDECOPI. (2022). *Informe de lanzamiento del estudio de mercado sobre combustibles líquidos y gas licuado de petróleo en el Perú*. Lima, Perú: Indecopi.
- INEI, Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2018). *Censos nacionales 2017: XII de población, VII de vivienda y III de comunidades indígenas-resultados definitivos 2017*. Lima-Perú.
- Joller, L., y Varblane, U. (2016). Learning from an electromobility living lab: Experiences from the estonian elmo programme. *Case studies on transport policy*, 4(2), 57–67.
- Kennedy, S. F. (2018). *The global energy transition and its contradictions: emerging geographies of energy and finance in indonesia and california* (PhD thesis). University of California, Los Angeles.
- Kutani, I., Sudo, Y., y cols. (2016). Addressing energy efficiency in the transport sector through traffic improvement.
- Llanes-Cedeño, E. A., Carguachi-Caizatoa, J. B., y Rocha-Hoyos, J. C. (2018). Evaluación energética y exergetica en un motor de combustión interna ciclo otto de 1.6 l. *Enfoque UTE*, 9(4), 221–232.
- Línea-1. (2019). *Línea 1 metro de lima: Informe de sostenibilidad*. Lima, Perú: Línea 1.
- Marín Cots, P. (2012). Modelos urbanos sostenibles. *Metodología de trabajo y resultados, Malaga*, 48, 53.
- Maslow, A. (1974). *A theory of human motivation*. Lulu. com.
- Mercados Energéticos Consultores. (2015). *Metodologías de planificación energética e institucionalidad en el Estado Peruano*. Lima, Perú: MINEM.
- Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2013). *Perú: Plan energético nacional*. MINEM.

- Ministerio de Energía, Gobierno de Chile. (2021). *Estrategia nacional de electromovilidad*. (Disponible en: https://energia.gob.cl/sites/default/files/estrategia-nacional-electromovilidad_ministerio-de-energia.pdf)
- Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2010a). *Decreto legislativo n° 1002 de promoción de la inversión para la generación de electricidad con el uso de energías renovables*. Lima, Perú: Ministerio de Energía y Minas del Perú. Descargado de https://www.minem.gob.pe/archivos/legislacion-9ozj22z9ap5zz33z-DL_de_promocion_de_la_inversion_para_la_generacion_de_electricidad_con_el_uso_de_energias_renovables_1002.pdf
- Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2010b). *Política energética nacional del Perú 2010-2040*. Lima, Perú: El Peruano.
- Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2014). *Plan energético nacional 2014-2025*. Lima, Perú: DGEE - MINEM.
- Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2020a, August). *Decreto supremo que aprueba disposiciones sobre la infraestructura de carga y abastecimiento de energía eléctrica para la movilidad eléctrica*. Decreto Supremo No. 022-2020-EM.
- Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2020b). *Evaluación de implementación anual 2020: Política energética nacional del Perú 2010-2040*. Lima, Perú: MINEM.
- Ministerio de Energía y Minas del Perú. (2020c). *Guía de orientación del uso eficiente de la energía y de diagnóstico energético*. Lima, Perú: DGEE - MINEM.
- Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú. (2019). *Política nacional de transporte urbano (ds 012-2019-MTC)*. Lima, Perú: MTC.
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento - VIVIENDA. (2016). *Decreto supremo n 022-2016-vivienda*. Lima.
- Ministerio del Ambiente del Perú. (2009). *Política nacional del ambiente*. Lima, Perú: Decreto Supremo N° 012-2009-MINAM de 23 de Mayo de 2009.
- Ministerio del Ambiente del Perú. (2019). *Plan nacional de adaptación al cambio climático del Perú*. Lima, Perú: Resolución Ministerial N°096-2021-MINAM.
- Ministerio del Ambiente del Perú. (2020, 2 de enero). *Decreto supremo que aprueba el reglamento de la ley n° 30754, ley marco sobre cambio climático*.
- Ministerio del Ambiente del Perú. (2021). *Inventario nacional de gases de efecto invernadero del 2016*. Lima, Perú: Ministerio del Ambiente.

- MOVE, DG. (2014). Update of the handbook on external costs of transport. *Report for the.*
- Nordin, L. (2011). *Energy use within road maintenance operations with potentials for increased efficiency* (PhD thesis). Department of Earth Sciences, University of Gothenburg.
- Ochoa Bique, A. (2019). *Strategic design of a hydrogen infrastructure under uncertainty* (PhD thesis). Universität Bremen.
- Organismo Supervisor de la Inversión en Energía y Minería (Osinermin). (2020). *Reporte de análisis económico sectorial. sector electricidad. energías renovables: características y perspectivas. año 9 – n° 16 – diciembre 2020*. Lima, Perú: Gerencia de Políticas y Análisis Económico - GPAE, Osinermin.
- OSINERGMIN. (2014). *Apuntes para el plan energético nacional*. Lima: MINEM.
- Reitz, R. D. (2013). Directions in internal combustion engine research. *Combustion and Flame*, 160(1), 1–8.
- Schmerler, D., Velarde, J. C., Rodríguez, A., y Solís, B. (2019). Energías renovables: experiencia y perspectivas en la ruta del Perú hacia la transición energética. *Lima: Grafica Biblos SA*.
- Shafiei, E., Davidsdottir, B., Leaver, J., Stefansson, H., y Asgeirsson, E. I. (2015). Comparative analysis of hydrogen, biofuels and electricity transitional pathways to sustainable transport in a renewable-based energy system. *Energy*, 83, 614–627.
- Smokers, R., y Kampman, B. (2006). *Energy efficiency in the transport sector* (Inf. Téc.). Discussion paper prepared for the PEEREA Working Group on Energy Efficiency
- SNE, Secretaría Nacional de Energía Gobierno de Panamá. (2016). Panamá: Plan energético nacional 2015-2050.
- Song, M., Wu, N., y Wu, K. (2014). Energy consumption and energy efficiency of the transportation sector in Shanghai. *Sustainability*, 6(2), 702–717.
- SPE, Subsecretaría de Planeamiento Energético. (2019). *Escenarios energéticos 2030*. Secretaría de Gobierno de Energía, Ministerio de Hacienda de Argentina.
- Taibi, E. (2020). *A multi-sector framework for accelerating renewable energy deployment in power, transport and industry* (PhD thesis). KTH Royal Institute of Technology.
- Thomas, M.-P., Adly, H., Pattaroni, L., Kaufmann, V., y Galloux, S. (2011). *Choix résidentiels et modes de vie dans l'agglomération franco-valdo-genevoise* (Inf. Téc.). Lasur, EPFL.

- Transportation Research Board. (2000). Hcm, highway capacity manual. *Washington, DC*, 2(1).
- UPME, Unidad de Planeación Minero Energética, Colombia. (2015). *Plan energético nacional colombia: Ideario energético 2050*.
- Voros, J. (2001). A primer on futures studies, foresight and the use of scenarios. *Prospect: The Foresight Bulletin*, 6(1).
- Voros, J. (2003). A generic foresight process framework. *foresight*, 5(3), 10–21.
- Wentland, A. (2016). Imagining and enacting the future of the german energy transition: electric vehicles as grid infrastructure. *Innovation: The European Journal of Social Science Research*, 29(3), 285–302.
- Yachiyo Engineering. (2005). Callao - MTC 2005 Plan maestro de transporte urbano para el área metropolitana de Lima y Callao en la República del Perú. *Agencia de Cooperación Internacional de Japón–JICA*.

ANEXOS

Prospectiva de Infraestructura de Transporte Urbano (2050)

Las preguntas se realizan con el enfoque de la situación futura de las ciudades peruanas en el año 2050. Responda a éstas desde su experiencia personal, con su mejor proyección informada para el 2050.

Características de la población encuestada (encuesta realizada entre el 23/11/21 y el 06/10/23. 64 encuestados)

¿Cuál es su perfil profesional?	¿Cuál es su rango etario?	¿Cuál es su formación académica?	Indicar su rango de experiencia profesional
Ingeniero / Arquitecto / Científico	100% 15-25	8% Superior / Estudiante Universitario	3% Sin experiencia profesional
Economista / Administración y Contabilidad	0% 25-35	67% Universitario completo	23% 0-9 años
Ciencias de la Salud	0% 35-45	16% Diplomado / Estudiante de Maestría	64% 10-19 años
Derecho / Ciencias Sociales	0% 45-55	6% Maestría	9% 20-29 años
Otras profesiones	0% 55-65	3% Doctorado	0% 30 años o más
	>65	0%	

P1 (Población): ¿Cuál es el crecimiento poblacional esperado en el 2050? (tome en cuenta que la población peruana ha crecido alrededor de 70% en los últimos 30 años)	P2 (Población): Urbanización o Ruralización (2050)	P3 (Población): Envejecimiento poblacional (2050) ¿Cuál será la proporción de la población adulta mayor?	E1 (Economía): PBI per cápita (2050 con respecto al 2020)
Crece más que la tasa actual debido a migraciones externas	34% La población urbana será mayor a 80%	36% Población adulta mayor (>60) -15%	20% El PBI per cápita se mantendrá igual
Crece constantemente a la misma tasa actual	23% Población urbana 60%, rural 40%	48% Población adulta mayor (>60) -17.5%	20% El PBI per cápita crecerá a ritmo de 1% interanual
Crece a la tasa actual hasta el 2035, luego se mantendrá estable hasta el 2050	30% Población urbana 50%, rural 50%	3% Población adulta mayor (>60) -20%	42% El PBI per cápita crecerá a ritmo de 3% interanual (promedio de años recientes)
Se mantendrá estable hasta el 2050	0% Población urbana 40%, rural 60%	8% Población adulta mayor (>60) -22.5%	3% El PBI per cápita crecerá a ritmo de 5% interanual (promedio de los últimos 30 años)
La población envejecerá, y el 2050 la población será el 90% que el 2020	13% La población rural será mayor a 80%	5% Población adulta mayor (>60) -25%	14% El PBI per cápita crecerá a ritmo de 7% interanual (promedio de China de los últimos 30 años)

E2 (Economía): Formas de pago prevalcientes en el 2050	E3 (Economía): Costos de combustible en el 2050	E4 (Economía): ¿Cuáles serán las tasas de interés que prevalezcan en proyectos de infraestructura en el 2050?	E5 (Economía): Modelos de financiamiento de infraestructura prevalcientes en el 2050
Con papel moneda y tarjeta de crédito	5% Los combustibles fósiles aumentarán 1% y la electricidad al mismo nivel, sobre la inflación	6% Tasa de interés social 10% Tasa de interés corporativo 14%	23% Obra Pública 100%
Con aplicaciones de celular	38% Los combustibles fósiles al mismo nivel y la electricidad crecerá 1%, sobre la inflación	13% Tasa de interés social 8% Tasa de interés corporativo 12%	25% Obra Pública 75%, APP o Iniciativa Privada 25%
Con criptomonedas	17% Los combustibles fósiles disminuirán 1% y la electricidad al mismo nivel, sobre la inflación	21% Tasa de interés social 6% Tasa de interés corporativo 10%	31% Obra Pública 50%, APP o Iniciativa Privada 50%
Con identificación biométrica	36% Los combustibles fósiles aumentarán 2% y la electricidad al mismo nivel, sobre la inflación	24% Tasa de interés social 4% Tasa de interés corporativo 8%	14% Obra Pública 25%, APP o Iniciativa Privada 75%
Con acciones e instrumentos de microdeuda	5% Los combustibles fósiles desaparecerán y la electricidad crecerá al mismo nivel, sobre la inflación	37% Tasa de interés social 2% Tasa de interés corporativo 6%	6% APP o Iniciativa Privada 100%

E6 (Economía): Inversión de activos de infraestructura urbana de transporte preferentes en el 2050	SA1 (Sociedad y Ambiente): Tipos de empleo prevalcientes en el 2050	SA2 (Sociedad y Ambiente): Niveles de pobreza prevalcientes en el 2050	SA3 (Sociedad y Ambiente): Cambio Climático en el 2050
Autopistas	11% Autoempleo individual, profesional/técnico independiente	20% Pobreza extrema 5% y pobreza 25%, o mayor	25% La temperatura media global se descontrola y sube por encima de 2.5°C
Ferrocarriles (metros, tranvías, buses con guía de riel)	42% Autoempleo colectivo, microempresa, en propio hogar	17% Pobreza extrema 4% y pobreza 20%	16% La temperatura media global sube por encima de 2°C
Teleféricos	5% Asalariado, mediana o gran empresa, teletrabajo 100%	16% Pobreza extrema 3% y pobreza 15%	27% La temperatura media global sube por encima de 1.5°C
Ciclovías / Remodelación urbana	13% Asalariado, mediana o gran empresa, teletrabajo 50% presencial 50%	42% Pobreza extrema 2% y pobreza 10%	17% La temperatura media global sube por encima de 1°C
Estaciones multimodales	30% Asalariado, mediana o gran empresa, presencial 100%	5% Pobreza extrema 1% y pobreza 5%	16% No existen cambios, se controla la situación

T1 (Tecnología): Combustibles de vehículos de transporte	T2 (Tecnología): La tecnología de vehículos de transporte que prevalecerá en el 2050	T3 (Tecnología): ¿Cuál será el nivel de autonomía de los viajes urbanos en vehículos (2050)?	T4 (Tecnología): ¿Cuál es su previsión de la infraestructura de transporte urbano terrestre en el 2050?
El tipo de combustible de los vehículos seguirá siendo fósil	5% MCI Motor a combustión interna (líquidos, derivados del petróleo)	3% Se realizarán con conducción autónoma, sin participación humana	13% Se contará con infraestructura para vehículos voladores
El combustible será dos tercios fósil y un tercio renovable	16% MCI Motor a combustión interna (Gas: GNV o GLP u otro)	8% Los viajes en vehículos particulares serán semiautónomos y los públicos autónomos	34% Sólo se habilitarán algunas pocas estaciones aéreas, el resto será terrestre
El combustible será mitad fósil y mitad renovable	19% Vehículo eléctrico, con carga para conectarse a red eléctrica	35% Se realizarán con conducción semiautónoma	44% Sólo infraestructura terrestre. Las autopistas serán eléctricas
El combustible será un tercio fósil y dos tercios renovables	36% Vehículo híbrido (eléctrico / MCI)	40% Se realizarán con predictores de ruta (humano), y autonomía en tramos rectos	6% Sólo infraestructura terrestre. Las autopistas son mixtas, electrificadas y con gasolinerías
Los combustibles provendrán exclusivamente de los recursos renovables	25% Vehículo eléctrico, con carga de Hidrógeno	14% Se realizarán con predictores de ruta (conducción humana)	3% La infraestructura será terrestre, con mejor distribución de gasolinerías

U1 (Urbanismo): Densidad Urbana de las ciudades en el 2050	U2 (Urbanismo): Control gubernamental del territorio urbano en el 2050	M1 (Movilidad): Sobre los modos de transporte en el 2050	M2 (Movilidad): ¿Cuáles serán los destinos de viajes urbanos (zonas de atracción) que prevalecerán en el 2050?
Muy densa > 300 hab/ha	31% La administración municipal es muy estricta con el desarrollo urbano	16% El automóvil prevalecerá como modo de transporte	16% Trabajo / Educación
Densa [150, 300] hab/ha	45% La administración municipal es muy estricta en la zona central, y medianamente en las periferias	36% El transporte público prevalecerá como modo de transporte	31% Compras
Medianamente densa [50, 150] hab/ha	17% La administración municipal es muy estricta en la zona central, en las periferias no hay control	19% La bicicleta y modos suaves prevalecerán como modo de transporte	8% Salud
Poco densa [25, 50] hab/ha	2% La administración municipal sólo controla medianamente la zona central urbana	14% La movilidad como servicio (MaaS) prevalecerá como modo de transporte	13% Trámites
Extendida < 25 hab/ha	5% El crecimiento urbano es caótico e irregular, las inversiones de terrenos públicos continúan	16% Los modos de nuevas tecnologías, (nuevos tipos de vehículos) prevalecerán como modo de transporte	33% Esparcimiento, entretenimiento, diversión

M3 (Movilidad): Movilidad en el 2050: ¿cuántos desplazamientos diarios promedio realizará una persona?	M4 (Movilidad): ¿Cuál será el gasto personal diario promedio en transporte previsto en el 2050?	M5 (Movilidad): ¿Cuál será el tiempo personal diario promedio dedicado al transporte y la movilidad en el 2050?	M6 (Movilidad): ¿Cuál será el tiempo promedio de un viaje urbano en el 2050?
>5 desplaz./día/persona	8% > 25 soles (equiv. 2020)	22% >120 minutos	3% >60 minutos
[4,5] desplaz./día/persona	22% [20,25] soles (equiv. 2020)	25% [90,120] minutos	17% [45,60] minutos
[3,4] desplaz./día/persona	20% [15,20] soles (equiv. 2020)	25% [60,90] minutos	25% [30,45] minutos
[2,3] desplaz./día/persona	38% [10,20] soles (equiv. 2020)	22% [30,60] minutos	39% [15,30] minutos
<2 desplaz./día/persona	13% <10 soles (equiv. 2020)	6% <30 minutos	16% <15 minutos

M7 (Movilidad): Motorización promedio en el 2050 ¿Cuántos autos tendrán cada familia en promedio?
>3 autos / familia
[2,3] autos / familia
[1,2] autos / familia
[0,5,1] autos / familia
Los autos serán parte de una economía de servicio, no tendrán propiedad individual