

UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE CIENCIAS



TESIS

“SIMULACIÓN CON EL PROGRAMA RETSCREEN EXPERT PARA LA
APLICACIÓN DE ENERGÍAS RENOVABLES EN TRENES ALSTOM
METROPOLIS 9000 DE LIMA (PERÚ)”

PARA OBTENER EL GRADO ACADÉMICO DE MAESTRO EN
CIENCIAS EN ENERGÍAS RENOVABLES Y EFICIENCIA ENERGÉTICA

ELABORADO POR:

ESTEFANI GABRIELA MENDOZA GUERRA

ASESOR:

Dr. JORGE LUIS MÍREZ TARRILLO

LIMA – PERÚ

2021

Dedicatoria: Esta investigación se la dedico a mi familia, a mi madre Isabel Guerra, mi padre Richard Mendoza, mis hermanos Juan José y Rafael, a mis abuelos Erasmo Guerra y Leonor Simón por su apoyo incondicional. También a todos los colegas que desean ser parte del cambio a través de las energías renovables.

AGRADECIMIENTOS

A mis padres, por siempre acompañarme en mis sueños y decisiones; a mis hermanos, por cada día del aislamiento social preguntarme: ¿Gabriela estás haciendo tu tesis?; al Dr. Jorge Mírez, por su constante revisión y corrección en cada detalle de la presente tesis. Espero que esta tesis pueda impactar de manera muy positiva en la sociedad, porque le dediqué mucho tiempo y dejé mucho de mí para que cuando llegué en las manos correctas pueda ejecutarse de la mejor manera sin cometer los errores de otros países en el desarrollo del transporte masivo con energías renovables.

INDICE DE CONTENIDO

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	16
1.1. Realidad problemática y motivación.	16
1.2. Justificación de la tesis.	19
1.3. Hipótesis.	24
1.4. Objetivos.....	24
1.4.1. Objetivo principal.	24
1.4.2. Objetivos específicos.	25
CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE DE TRANSPORTE MASIVO.....	26
2.1. Antecedentes.	26
2.2. Descripción teórica.	42
CAPÍTULO III: TECNOLOGÍAS DE ENERGÍAS RENOVABLES AFINES AL TRANSPORTE PÚBLICO	51
3.1. Energía eólica.....	51
3.1.1. Definición de energía eólica.	51
3.1.2. Recursos eólicos y sus características.....	52
3.1.3. Mecanismos del movimiento del viento.	52
3.1.4. Otros patrones de circulación atmosférica.	55
3.1.5. Estimación del recurso viento.	58
3.1.6. Características de la capa límite atmosférica.	58
3.1.7. Métodos directos de los análisis de datos, caracterización del recurso y productividad de turbina- Uso directo de datos.....	65
3.1.8. Métodos directos de los análisis de datos, caracterización del recurso y productividad de turbina- Método de Bins.	66
3.1.9. Análisis estadístico de datos de viento.....	67
3.1.10. Velocidad de viento extrema.....	70
3.2. Energía solar fotovoltaica.	71

3.3. Almacenamiento eléctrico.....	76
3.3.1. Servicios y beneficios del almacenamiento de electricidad.	79
CAPÍTULO IV: DESARROLLO DEL PROCESO DE SIMULACIÓN	81
4.1. Metodología.	81
4.2. Análisis técnico - económico RETScreen Expert.	82
4.2.1. Escenario 1: Planta eólica.	83
4.2.2. Escenario 2: Planta solar fotovoltaica.	85
4.2.3. Escenario 3: Planta eólica - planta solar fotovoltaica.	88
4.3. Simulación de planta solar fotovoltaica Rubi - Moquegua - Perú.	91
4.4. Evolución futura de costos de las energías renovables.	94
4.5. Análisis y discusión del transporte público y las energías renovables.	98
CAPÍTULO V: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y CONTRIBUCIÓN.....	103
5.1. Conclusiones.	103
5.2. Recomendaciones.....	105
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
ANEXOS.....	118

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 : Emisiones de GEI a nivel mundial por gases, año 2014	16
Figura 2: Población mundial proyectada hasta 2100	17
Figura 3: Emisión de GEI a nivel mundial por sector económico, año 2014	17
Figura 4: Emisión de SO ₂ por sector, 2015 y 2040	18
Figura 5: Congestión de tráfico promedio en horas pico en ciudades seleccionadas en 2019 y durante cierres por pandemia	18
Figura 6: Demanda urbana de energía primaria en escenarios de ETP 2013-2050	20
Figura 7: Reducciones de emisiones de carbono en edificios y transporte, 2013-2050	20
Figura 8: Índice de tráfico 2020 en Sudamérica	22
Figura 9: Tasa de motorización al 2009 en América	23
Figura 10: Mapa de Red del Sistema de Transporte Colectivo de Ciudad de México	31
Figura 11: Transporte urbano en Lima y contaminación (T CO ₂ / millón de clientes	32
Figura 12: Calidad de aire NO ₂ , en etapa de aislamiento social en Lima - Perú	32
Figura 13: Calidad de aire NO ₂ en Europa	33
Figura 14: Simbología de estado de las estaciones de la red metro de Santiago	35
Figura 15: Recorrido del metro Bilbao	36
Figura 16: Esquema estructural y funcional de HEC (central de energía híbrida)	41
Figura 17: Importancia de la densidad articulada para el transporte masivo	46
Figura 18: Configuración de un tren de 9 carros	47
Figura 19: Comparativa de ahorro en coste por kilómetro ofrecida por vehículos propulsados por gasolina, etanol, híbridos, diésel, biodiésel, gas licuado (GLP), gas natural (GNV), y eléctricos	48
Figura 20: Patrón mundial de vientos superficiales	53
Figura 21: Viento geostrófico: F _p es la fuerza de presión en el aire; F _c es la fuerza de Coriolis	54
Figura 22: Gradiente de viento U _{gr} ; R, radio de curvatura	55
Figura 23: Evento de ráfaga discreta; a, amplitud; b, tiempo de subida; c, variación máxima de la ráfaga; lapso de tiempo d	56
Figura 24: Flujo de aire a través de un disco de rotor; A es el área; U es la velocidad del viento	56
Figura 25: Perfil de temperatura sobre la superficie terrestre, antes (sólido) y después	

(discontinuo) del amanecer	62
Figura 26: (a) Energía específica (en Wh kg ⁻¹) y densidad de energía (en Wh l ⁻¹) de diferentes tecnologías de baterías. (b) Diagrama de voltaje vs. capacidad para baterías de litio recargables basadas en diferentes materiales	77
Figura 27: Esquema de un sistema de almacenamiento de energía por batería	78
Figura 28: Ubicación de Humedales de Mamacona.....	83
Figura 29: Características nominales y de costos del aerogenerador.....	84
Figura 30: Análisis de emisión de GEI en planta de aerogeneradores.....	84
Figura 31: Análisis económico con planta de aerogeneradores.....	85
Figura 32: Características de panel solar fotovoltaico.....	86
Figura 33: Selección de panel solar fotovoltaico.....	86
Figura 34: Análisis de GEI en planta solar fotovoltaica.....	87
Figura 35: Análisis económico de planta solar fotovoltaica.....	87
Figura 36: Características de la planta de aerogeneradores.....	88
Figura 37: Características de planta solar fotovoltaica.....	89
Figura 38: Análisis de GEI de planta de aerogenerador más dos plantas de paneles solares fotovoltaicos.....	89
Figura 39: Análisis financiero de planta de aerogenerador más dos plantas de paneles solares fotovoltaicos.....	90
Figura 40: Ubicación de central solar fotovoltaica Rubí.....	91
Figura 41: Ingreso de datos de central fotovoltaica Rubí en RETScreen.....	92
Figura 42: Análisis de costos CAPEX, OPEX y mantenimiento.....	93
Figura 43: Análisis de emisiones de central fotovoltaica Rubí.....	93
Figura 44: Análisis financiero con RETScreen.....	94
Figura 45: Precio de módulos solares fotovoltaicos en los principales mercados 2015-2023 (US\$/ Wdc)	95
Figura 46: Costos de sistemas instalados a 2025 de planta solar fotovoltaica	95
Figura 47: Evolución reciente de los costes	96
Figura 48: Contribución típica al costo de una turbina eólica de 3 MW	97
Figura 49: Población total por millones del año 2019.....	99
Figura 50: Población de Lima y Callao 2018	100
Figura 51: Crecimiento de viajes totales vs. población	100
Figura 52: Distribución del total de viajes por modo de transporte	101

INDICE DE TABLA

Tabla 1: Comparativo entre las ciudades de Buenos Aires, Santiago de Chile y Bogotá. ...	28
Tabla 2: Costo por km de Metro en EE.UU, Canadá , Europa y Latinoamérica al 2014. ...	34
Tabla 3: El coste de cargar un vehículo eléctrico, reducido a 100 km	41
Tabla 4: Estándares nacionales de calidad medioambiental	44
Tabla 5: Cuadro de índice de calidad de aire	45
Tabla 6: Dimensiones del tren Alstom Metrópolis 9000	49
Tabla 7: Potencia por unidad de área disponible de viento constante (densidad de aire: 1,225 kg/m ³)	57
Tabla 8: Clasificación de servicios de almacenamiento de energía para la red eléctrica	79
Tabla 9: Detalle de central solar fotovoltaica Rubí	91
Tabla 10: Tabla de radiación solar diaria de la NASA	92
Tabla 11: Población de Sudamérica en millones, año 2019.....	99
Tabla 12: Viajes diarios en transporte público por modo	101

RESUMEN

En la presente tesis se estudia la implementación de las energías renovables en el transporte urbano; a través de la recopilación de información en las ciudades más importantes del mundo (según PBI), así como de los países sudamericanos y de otros continentes que han apostado y realizado su gestión para el desarrollo del transporte masivo de manera eficiente para disminuir los impactos de la problemática del tráfico urbano (congestión, demoras, accidentes y problemas ambientales), que es producto del aumento de la población y de una mala planificación urbana. Por lo tanto se desarrolla la investigación en ciertas capitales o ciudades importantes de los países con mayor desarrollo tecnológico y/o gran número de población, ya que si bien es cierto que el crecimiento económico genera: empleos, sueldos altos, flujo masivo de dinero; en una metrópolis (ciudades con población superior a 1 millón de personas) genera estrés, estilo de vida rápida, contaminación, pequeños espacios de áreas verdes, tráfico y en consecuencia tiempo perdido en el transporte, ya sea para ir a trabajar o regresar a casa; afectando nuestra calidad de vida.

Ver, conocer, estudiar, recolectar las experiencias en transporte masivo con energía renovables (tipo de transporte urbano masivo, cantidad de personas transportadas, horarios de servicio, horas punta, inversión, tiempos, forma de pago, uso de aplicativos, etc.) de las otras metrópolis en el afán de mejorar la calidad de vida de su población, va a permitir tener una visión más amplia de las posibles soluciones que se podrían aplicar en Lima (capital del Perú), la cual tiene uno de los peores tráficos urbanos a nivel regional (segundo lugar en Traffic Index 2020).

La implementación de las energías renovables en el sistema de transporte masivo basado en trenes Alstom se ha estudiado mediante la simulación de tres escenarios en que se combina las fuentes de energías renovables: paneles solares fotovoltaicos y turbinas eólicas, usando el programa RETScreen Expert que permite el análisis técnico y económico. Además, se ha realizado una validación de las variables técnico-económicas de la Central Solar Fotovoltaica Rubí comparando los resultados del programa RETScreen Expert y la información presentada por organismo supervisor de energía de Perú.

La presente tesis se compone de los cinco capítulos siguientes:

En el Capítulo I se presenta la introducción, el planteamiento del problema y los objetivos de la tesis.

En el Capítulo II se muestra la información posible de los sistemas de transporte masivo a nivel regional y mundial, es decir, el marco teórico y los antecedentes.

En el Capítulo III se detalla la información de las tecnologías de energías renovables (paneles solares fotovoltaicos, turbinas eólicas y almacenamiento) que se aplican a transporte masivo.

En el Capítulo IV se describe la metodología y resultados de la investigación, que implica el análisis de la información obtenida en base a tres escenarios de estudio y uno de comparación con una central solar fotovoltaica actualmente en operación.

En el Capítulo V se dan las conclusiones y recomendaciones de la presente tesis.

Finalmente se tiene la bibliografía y anexos. En la bibliografía se presenta las referencias bibliográficas consultadas para la presente tesis, y; en los anexos se complementan con fichas técnicas.

ABSTRACT

In this thesis the implementation of renewable energies in urban transport is studied; through the collection of information in the most important cities in the world (according to PBI), as well as in the South American countries and other continents that have bet and carried out their management for the development of mass transport in an efficient way to reduce the impacts of the problem of urban traffic (congestion, delays, accidents and environmental problems), which is the product of the increase in population and poor urban planning. Therefore, the research is carried out in certain capitals or important cities of the countries with greater technological development and / or a large number of population, since although it is true that economic growth generates: jobs, high salaries, massive flow of money; in a metropolis (cities with a population greater than 1 million people) it generates stress, fast lifestyle, pollution, small spaces of green areas, traffic and consequently time lost in transport, either to go to work or to return home ; affecting our quality of life.

See, know, study, collect experiences in mass transport with renewable energy (type of mass urban transport, number of people transported, service hours, peak hours, investment, time, payment method, use of applications, etc.) of the other metropolises in the desire to improve the quality of life of their population, will allow a broader vision of the possible solutions that could be applied in Lima (capital of Peru), which has one of the worst urban traffic in regional level (second place in Traffic Index 2020).

The implementation of renewable energies in the Alstom train-based mass transport system has been studied by simulating three scenarios in which renewable energy sources are combined: photovoltaic solar panels and wind turbines, using the RETScreen Expert program that allows the technical and economic analysis. In addition, a validation of the technical-economic variables of the Rubí Solar Photovoltaic Plant has been carried out, comparing the results of the RETScreen Expert program and the information presented by the Peruvian energy supervisory body.

This thesis is made up of the following five chapters:

Chapter I presents the introduction, the statement of the problem and the objectives of the thesis.

Chapter II shows the possible information on mass transportation systems at the regional and global level, that is, the theoretical framework and the background.

Chapter III details the information on renewable energy technologies (photovoltaic solar panels, wind turbines and storage) that are applied to mass transport.

Chapter IV describes the methodology and results of the research, which involves the analysis of the information obtained based on three study scenarios and one comparison with a photovoltaic solar power plant currently in operation.

In Chapter V the conclusions and recommendations of this thesis are given.

Finally you have the bibliography and annexes. The bibliographic references consulted for this thesis are presented in the bibliography, and; in the annexes they are supplemented with technical sheets.

LISTA DE ACRÓNIMOS

AATE	Autoridad Autónoma del Tren Eléctrico.
ADAS	<i>Advanced Driver Assistance Systems.</i>
AM	<i>Air Mass.</i>
ATU	Autoridad de Transporte Urbano.
BTR	Buses de tránsito rápido.
BOP	<i>Balance of plant.</i>
CAES	Almacenamiento de energía de aire comprimido.
CAPEX	<i>Capital expenditure</i> o gasto en capital.
CDMX	Ciudad de México.
COT	Coefficiente de ocupación total.
CO₂	Dióxido de carbono.
COV	Compuestos orgánicos volátiles.
CTS	<i>Corporate travel service.</i>
DPP	<i>Diesel power plant.</i>
ECA	Estándar de calidad ambiental.
Eco2	Ciudades ecológicas como ciudades económicas.
ETP	<i>Energy Technology Perspectives.</i>
EV	<i>Electric vehicle.</i>
FF	Factor de forma.
GDS	Gestión de la demanda del transporte.
GEI	Gases de efecto invernadero.
GLP	Gas licuado de petróleo.
GUI	<i>Graphical user interface.</i>
HEC	<i>Hybrid energy central.</i>
IE	Índice de edificabilidad.
INCA	Índice de calidad de aire.
JICA	Agencia de Cooperación Internacional del Japón.
LMP	Límites máximos permisibles.
NAMA	Acciones Nacionales Apropriadas de Mitigación.
MTC	Ministerio de Transporte y Comunicaciones.
OCDE	Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos.
OEFA	Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental.

PEA	Población económicamente activa.
PVP	<i>Photovoltaic Plant.</i>
RES	<i>Renewable Energy Systems.</i>
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología de Perú.
STC	Sistema de transporte colectivo.
STCM	Sistema de transporte colectivo metro.
VAR	Potencia reactiva.
VUEC	Valor umbral del Estado de cuidado.
WPP	<i>Wind Power Plant</i>
ZMVM	Zona metropolitana del Valle de México.
2DS	Escenario de calentamiento global con aumento de temperatura media: 2 °C.
4DS	Escenario de calentamiento global con aumento de temperatura media: 4 °C.
6DS	Escenario de calentamiento global con aumento de temperatura media: 6 °C.

LISTA DE SIMBOLOS

α	Coeficiente de temperatura para la corriente de cortocircuito.
ΔT	Variación de la temperatura de la célula solar [°C, K].
η	Eficiencia de la célula solar [%].
I	Corriente [A].
k	Constante de Boltzmann [W/ m ² K ⁴].
λ	Longitud de onda [nm].
q	Carga del electrón [1,602 x 10 ⁻¹⁹ C].
S	Constante solar [1361 W/m ²].
V	Voltaje [V].
V_{ac}	Voltaje de corriente alterna [V].
V_{cc}	Voltaje de corriente continua [V].

CAPÍTULO I: PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En el presente capítulo se describe la realidad problemática, la justificación, las hipótesis, el objetivo principal y los objetivos específicos. Así también se detalla el crecimiento de la población a nivel mundial, la contaminación por la emisión de los gases de efecto invernadero (GEI) generados por el sector transporte, la problemática del calentamiento global y la ubicación del tráfico en el Perú en el ranking 2020 del índice de tráfico por TomTom [1].

1.1. Realidad problemática y motivación.

Son los GEI (ver Figura 1), una población mundial en crecimiento (ver Figura 2) [2] y la necesidad de movilizarse a distancias más largas; lo que ha provocado un desencadenante ritmo de vida acelerado, con el uso de automóviles, motos, trenes y bicicletas.

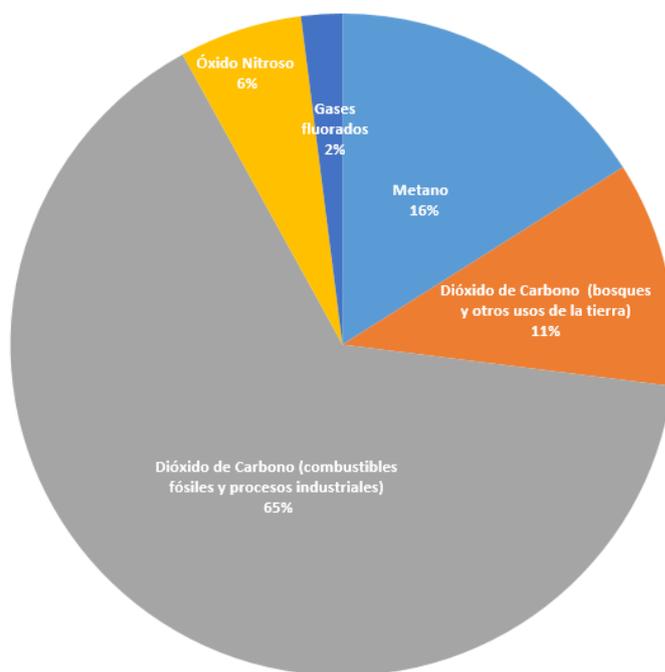


Figura 1 : Emisiones de GEI a nivel mundial por gases, año 2014 [3].

En las ciudades más pobladas y extensas [4] han optado por las líneas de tren para atender la demanda solicitada, sin embargo; aún hay muchos lugares en el mundo que necesitan implementar soluciones al transporte de mercancías y personas según las características de su territorio.

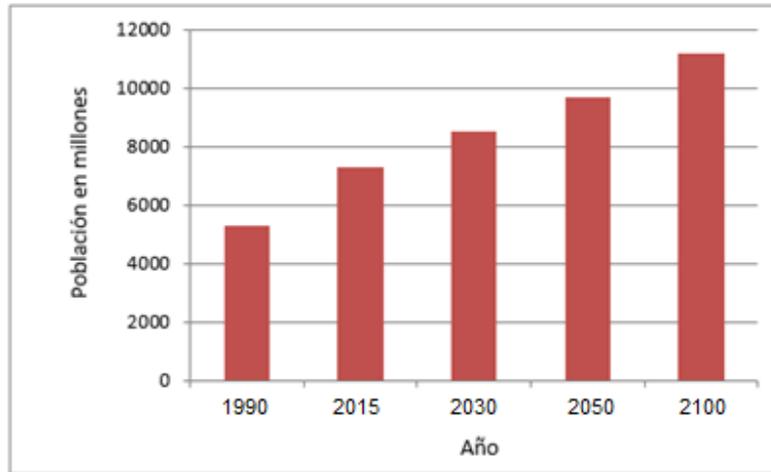


Figura 2: Población mundial proyectada hasta 2100 [2].

La Figura 3 muestra la participación del sector transporte en la emisión de GEI.

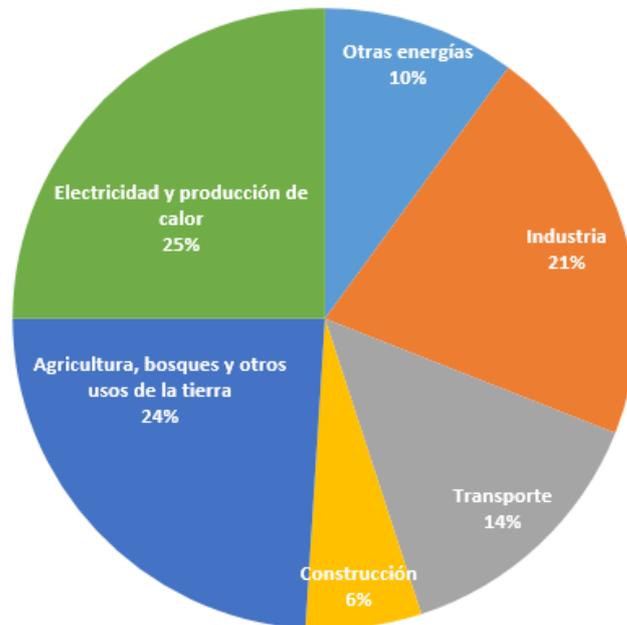


Figura 3: Emisión de GEI a nivel mundial por sector económico, año 2014 [3].

En el año 2014 según [5], sólo el sector transporte consumió alrededor de 2 500 millones de toneladas equivalentes de petróleo (MTEP), casi un tercio del consumo final de energía, debido al uso derivados del petróleo y que ha conllevado a una participación importante en la emisión de SO_2 a la atmósfera (Ver Figura 4).

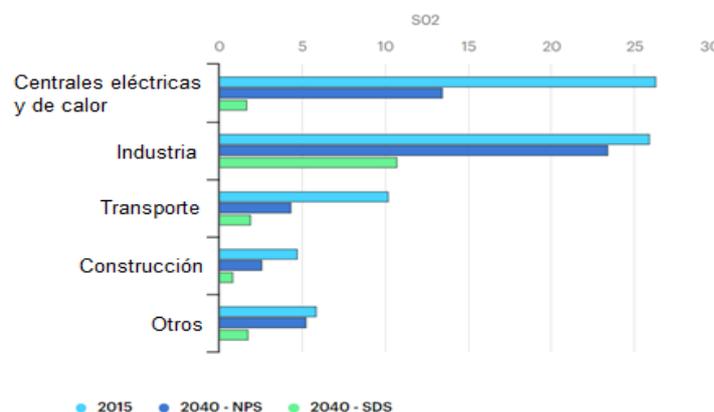


Figura 4: Emisión de SO₂ por sector, 2015 y 2040 [6].

Además, un mal transporte público conlleva a una pérdida de tiempo, en la Figura 5 se compara la congestión de tráfico promedio en horas pico en ciudades seleccionadas en 2019 y durante cierres por pandemia.

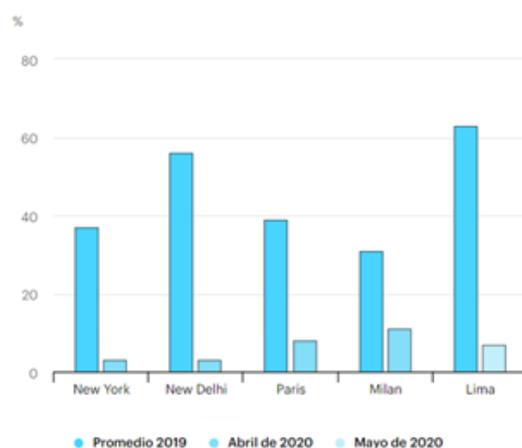


Figura 5: Congestión de tráfico promedio en horas pico en ciudades seleccionadas en 2019 y durante cierres por pandemia [7].

Las emisiones globales del transporte aumentaron 0,5 % en 2019 (en comparación con el 1,9 % anual desde 2000) debido a las mejoras de eficiencia, la electrificación y el mayor uso de biocombustibles. Sin embargo, el transporte sigue siendo el responsable del 24 % de las emisiones directas de CO₂ de la quema de combustible. Los vehículos de carretera (automóviles, camiones, autobuses y vehículos de dos y tres ruedas) representan casi el 75% de las emisiones de CO₂ del transporte, y las emisiones de la aviación y el transporte marítimo continúan aumentando [8].

Por lo tanto, es un problema que motiva a la búsqueda y recopilación de información

a nivel nacional e internacional, entre ellas: tesis, artículos, reportes, etc. Sobre los sistemas de transporte masivo urbano y las experiencias de implementación de energías renovables en ellas, para poder analizarlas y conocer sus detalles técnicos (dimensionamiento, mantenimiento, tecnologías, técnicas, gestión, y demás términos similares) con la finalidad de crear experticia y conocimiento en la temática.

1.2. Justificación de la tesis.

La importancia del desarrollo de la presente tesis, se sustenta en lo siguiente:

Contexto ambiental:

Las ciudades dan forma al paisaje energético. Con más de la mitad de la población de todo el planeta y con el 80 % del PBI mundial en 2013, representan 2/3 de la demanda de energía primaria (aquella que está disponible en la naturaleza antes de ser convertida o transformada, por ejemplo: combustibles crudos, energía solar, energía eólica, geotérmica.) y el 70 % de las emisiones totales de CO₂ relacionadas con la energía. La huella de energía y carbono de las áreas urbanas aumentará con la urbanización y la creciente actividad económica de los ciudadanos urbanos. Para 2050, la población urbana aumentará hasta abarcar los 2/3 de la población mundial y la cuota urbana del PBI mundial girará en torno al 85 %. La continuación de las tendencias actuales del sistema energético, impulsadas por políticas existentes como las del 6DS, incrementará la demanda urbana de energía primaria en el orden de un 70 %, desde los niveles de 2013, hasta unos 620 EJ en 2050, año en que dicha demanda representará un 66 % del total (ver Figura 6). Asimismo, las emisiones de carbono derivadas del uso de la energía en las ciudades (incluidas las emisiones indirectas relacionadas con la generación de electricidad y calor) aumentarían un 50 %. Por tanto, los esfuerzos destinados a impulsar vías energéticas urbanas sostenibles son cruciales para alcanzar las ambiciones nacionales y mundiales de bajas emisiones de carbono [9].

Los sistemas energéticos urbanos ofrecen grandes oportunidades para proporcionar servicios en transporte y edificios con una mayor eficiencia. En el 2DS, la demanda energética final en los sectores de los edificios y el transporte urbanos en 2050 se reduce en un 60 % (unos 80 EJ) con respecto al 6DS. Estos ahorros energéticos pueden hacerse realidad evitando la “necesidad” de una serie de servicios energéticos

de uso final (por ejemplo reduciendo la longitud y frecuencia de los trayectos en ciudades compactas) y con más opciones de eficiencia energética para satisfacer el mismo nivel de demanda de servicios, como el cambio del modo de transporte reemplazando el vehículo personal por el transporte público, caminar e ir en bicicleta [9].

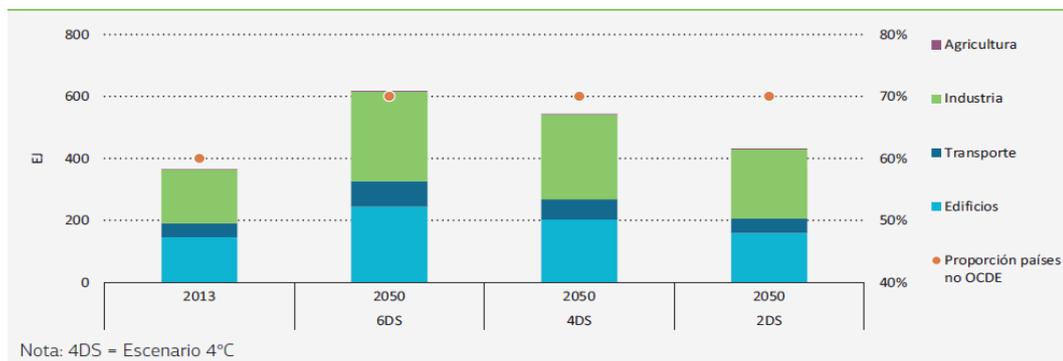


Figura 6: Demanda urbana de energía primaria en escenarios de ETP 2013-2050 [9].

Los ahorros energéticos y los combustibles de bajas emisiones de carbono en edificios y en el transporte urbano pueden implicar una reducción directa e indirecta (por ejemplo la generación evitada de electricidad y calor) de las emisiones de unas 8 GT de aquí a 2050 en el 2DS (con respecto al nivel logrado en el 6DS), lo cual equivale a casi 2/3 de la reducción total de emisiones de estos dos sectores y cerca del 40 % de todos los sectores de uso final. La clave de la energía sostenible en sistemas urbanos radica en una mayor electrificación de los usos finales, por ejemplo, mediante bombas de calor y vehículos eléctricos, acompañado de un sector eléctrico con drásticas reducciones de emisiones de carbono (ver Figura 7) [9].

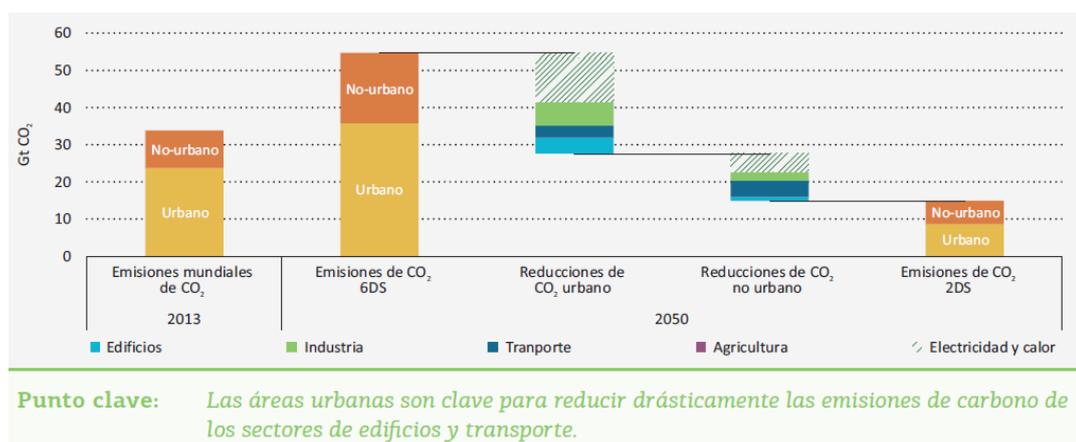


Figura 7: Reducciones de emisiones de carbono en edificios y transporte, 2013-2050 [9].

Las ciudades son principales motores de la demanda de movilidad mundial. La actividad del transporte urbano representó en torno al 40 % del consumo energético total del transporte y de las emisiones totales de GEI “del pozo a la rueda” en 2013. Además, una parte importante de la actividad del transporte no urbano proviene de la demanda de productos y materiales por parte de negocios y hogares urbanos. Distintos patrones regionales de movilidad urbana determinarán en los países de la OCDE, que la mayor parte de la movilidad urbana tiene lugar con vehículos personales ligeros, de modo que es esencial pasar del transporte personal al transporte público, al desplazamiento a pie y a la bicicleta para alcanzar las metas del 2DS en materia de transporte. El papel del transporte público es igual de relevante en las economías no pertenecientes a la OCDE para evitar la expansión urbana desordenada y la consecuente elevada proporción de transporte personal [9].

Existen muchas oportunidades en las ciudades para frenar las emisiones de carbono relacionadas con el transporte, reduciendo los trayectos y las distancias de los mismos, orientándose hacia el transporte público y adoptando paulatinamente vehículos más eficientes de bajas emisiones de carbono. En el 2DS, las áreas urbanas pueden contribuir directamente a casi la mitad de los ahorros energéticos y a 2/5 de la reducción de emisiones del sector transporte con respecto al 6DS, de aquí a 2050 [9].

Las opciones “evitar” y “cambiar” en las áreas urbanas contribuirían en un 36 % - 39 % a la reducción de emisiones del transporte urbano (y aproximadamente un 15 % - 16 % a la del transporte total), lo cual subraya la importancia estratégica de las políticas de planificación urbana y de la gestión de la demanda del transporte (GDT) urbano para el 2DS [9].

La movilidad de bajas emisiones de carbono puede generar beneficios de sostenibilidad adicionales como: menor contaminación ambiental, menor congestión del tráfico y mayor seguridad. Las ciudades son también bancos de pruebas importantes para la introducción de tecnologías de transporte avanzadas, como “Mobility as a Service”, un concepto de movilidad nuevo, o la incorporación de las tecnologías de la información y la comunicación (TIC) en el transporte urbano (p. ej., como un medio para integrar servicios de transporte público, o incluso con la posible

llegada de los vehículos autónomos)[9].

El transporte público tiende a ser más grande y sofisticado para poder trasladar a la población durante las actividades diarias (educación, trabajo, transporte de mercancías, etc.) y para tal crecimiento se necesita una mayor cantidad de energía para su funcionamiento. Una alternativa a la reducción de tal demanda energética es la implementación de energías renovables en los sistemas de transporte público.

Situación del tráfico en Lima a nivel de Sudamérica:

Según [1], Lima es la segunda ciudad con el peor tráfico en Sudamérica, siendo el primer lugar Bogotá. Calificación hecha en función al nivel de congestión y población de la ciudad, en el ranking 2020 del índice de tráfico por TomTom, Lima se ubica en la posición 15 de 416 ciudades evaluadas en el mundo (ver Figura 8).

RANK BY FILTER	WORLD RANK ▼	CITY	DAYS WITH LOW TRAFFIC ▼	CONGESTION MONTH BY MONTH	CONGESTION LEVEL 2020 ▼	CHANGE FROM 2019 ▼
1	3	Bogota Colombia	116 days		53%	↓ 15%p >
2	15	Lima Peru	144 days		42%	↓ 15%p >
3	24	Recife Brazil	95 days		37%	↓ 13%p >
4	40	Rio de Janeiro Brazil	130 days		32%	↓ 14%p >
5	44	Santiago Chile	165 days		31%	↓ 13%p >

Figura 8: Índice de tráfico 2020 en Sudamérica [1].

En nuestro país, según el MTC [10] menciona que en el 2014 habían 1,5 millones de vehículos en la Región Lima (66 % de los vehículos a nivel nacional). En los últimos años, el parque automotor de Lima ha crecido a una tasa de entre 8 % y 9 % anual. En cuanto a la tenencia de vehículos, en Lima el 15,5 % de hogares cuenta con al menos un automóvil, mientras que los que cuentan con una bicicleta son un 23,4 %.

A pesar de la creencia extendida de que la alta congestión y el tráfico es producto de la excesiva cantidad de automóviles que transitan las calles de Lima, la realidad es que la tasa de motorización de la capital es una de las más bajas de la región (ver Figura 9). En el caso de Lima, la congestión se debe, en mayor parte, a la deficiente

gestión del tránsito. En Lima, en una vía mediana semaforizada, transitan aproximadamente 400 vehículos por hora, mientras que en una vía similar en Santiago de Chile transitan entre 800 y 1 000 vehículos en el mismo tiempo. Aunque parezca contradictorio, el correcto diseño de la infraestructura y la adecuada programación de semaforización, fiscalización electrónica y un sistema de transporte público ordenado en Santiago de Chile resultan en un tránsito más fluido, más seguro y mejor [11]. Es decir, en Lima podríamos resolver muchos de los problemas del transporte si se apostara por un saneamiento de las vías y se invirtiera en un sistema de transporte público masivo de calidad, integrado y multimodal.

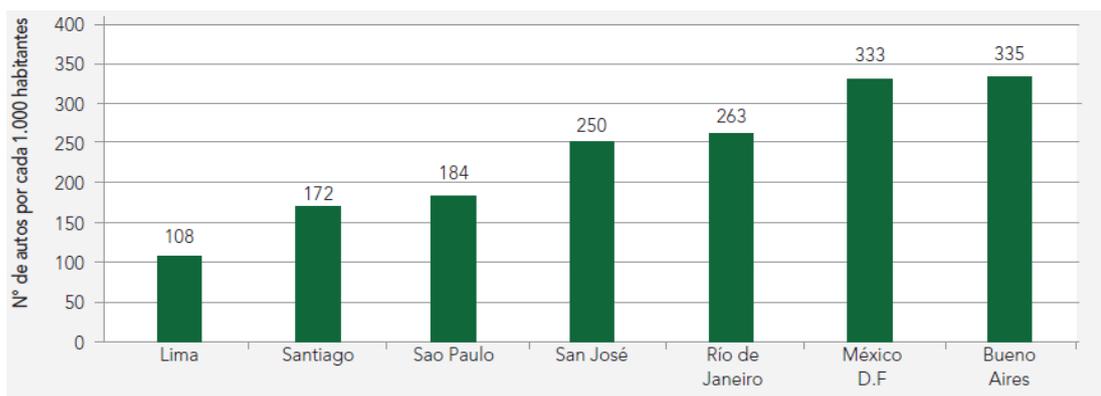


Figura 9: Tasa de motorización al 2009 en América [11].

Las estrategias de ahorro de energía en el transporte se pueden organizar en cinco categorías: 1) Cambiar el tráfico a modos más eficientes reduciendo el consumo de energía por milla de asiento; 2) Aumentar el factor de carga aumentando las millas de pasajero por milla de asiento; 3) Reduzca la demanda reduciendo las millas de pasajeros; 4) Aumentar la eficiencia de conversión de energía al reducir el consumo de energía por milla por asiento, y; 5) Mejorar el patrón de uso bajando las millas de asiento; además presenta modos de uso no-motorizados, patrones de uso de suelo urbano [12].

Por lo tanto, la presente tesis se centrará en investigar las implementaciones de energías renovables en sistemas de transporte masivo: transporte público de tren ligero [12]. Se iniciará con tomar conocimiento de los sistemas de transporte existentes tanto en Latinoamérica y en diferentes países desarrollados y en vías de desarrollo (considerando que los países con mayor emisión de GEI, ver Anexo 1, son

países con mayor PBI, ver Anexo 2); para luego, realizar los análisis y discusiones técnicas según las tecnologías renovables utilizadas en los casos de estudio.

Situación de la planificación del transporte masivo urbano en Lima:

Realizando la búsqueda bibliográfica, no se ha encontrado en el país, una propuesta presentada o similar para dar solución al tráfico en las metrópolis y que tenga como base la aplicación de tecnologías de energías renovables en los sistemas de transporte urbano.

Porque la implementación de transporte masivo urbano a través de trenes está en crecimiento dado que se cuenta con el metro Línea 1 en operación (ver Anexo 3), con avances en construcción del metro Línea 2 de Lima [13], estudios de pre-inversión para los futuros metro Líneas 3 [14] y 4 [15] , también la intención de construcción de las metro Líneas 5 [16] y 6 [17] .

1.3. Hipótesis.

1. Es posible realizar la simulación del suministro de energía eléctrica en los trenes Alstom Metrópolis 9000 de Lima, empleando fuentes de energías renovables híbridas, con el programa RETScreen Expert.
2. Son los paneles fotovoltaicos la mejor opción para reducir la emisión de GEI en el transporte masivo urbano, siendo los paneles fotovoltaicos implementados en los trenes Alstom Metrópolis 9000 de Lima.
3. La tecnología más favorable para suministrar energía eléctrica a los trenes Alstom Metrópolis 9000 de Lima, en el factor económico es una planta eólica.

1.4. Objetivos.

1.4.1. Objetivo principal.

Usar software RETScreen Expert para la simulación de energías renovables (eólica,

fotovoltaica u otras) en los trenes Alstom Metrópolis 9000 de Lima.

1.4.2. Objetivos específicos.

- Realizar la simulación de energía solar fotovoltaica, eólica y fuentes híbridas en el programa RETScreen Expert para suministrar energía eléctrica a los trenes Alstom Metrópolis 9000 de Lima.
- Identificar el mejor escenario (tipo de energía renovable) para reducir la emisión de GEI en el transporte masivo urbano por los trenes Alstom Metrópolis 9000 de Lima.
- Seleccionar el escenario de tecnologías de energía renovable más favorable en el sector económico para entregar energía eléctrica a los trenes Alstom Metrópolis 9000 de Lima.

CAPÍTULO II: ESTADO DEL ARTE DE TRANSPORTE MASIVO

En el presente capítulo se brinda información recopilada sobre los metros según ciudad, tipos de transporte urbano (trenes, tranvía, sistemas de bus rápido), fecha de inicio de funcionamiento, kilometraje, cantidad de clientes, cantidad de estaciones, cantidad de trenes, conformación de trenes según modelo, rutas, formas de pago, uso de aplicativos para conectar los diferentes tipos de transporte, funcionamiento del tren, opinión de especialistas sobre transporte urbano masivo, indicadores, frecuencia de viajes, casos de transporte urbano con energía renovables.

2.1. Antecedentes.

El transporte ha sido parte central de la historia económica de la humanidad al igual que lo ha sido la energía. Ha sido sinónimo de movilidad de personas y mercancías y, en la sociedad actual, el transporte y su gestión están adquiriendo un protagonismo central en la economía [18].

Un sistema de transporte eficiente y sostenible es también sinónimo de desarrollo económico y bienestar, así como un termómetro cualificado sobre el grado de avance de una sociedad. El transporte y la energía están asociados de manera estructural y, en el presente siglo, la movilidad y la energía son dos caras de la misma moneda, entre otras, por tres profundas razones [18]:

- a. La primera, por el impacto de las políticas internacionales, europeas y domésticas en materia de descarbonización, con el acervo jurídico consecuente referente a la movilidad urbana.
- b. La segunda, por la revolución digital que estamos viviendo y que está afectando el modo y la manera de organizar y vivir en las sociedades urbanas modernas.
- c. La tercera, por la evolución tecnológica que está transformando energéticamente la movilidad y la gestión de la energía en el hábitat urbano.

El especialista en movilidad Rene Albisser [19] destaca las siguientes 9 Reglas para definir un transporte masivo:

- a. Tener claro el número de personas a transportar.
- b. El costo no puede ser más importante.
- c. El sistema debe promover la inter-modalidad.
- d. Aplicar la teoría de 500 m (es decir desde nuestro punto de origen hacia un paradero debemos de caminar menos de 500 m de la misma manera al bajar del medio de transporte hacia nuestro destino caminar menos de 500 m).
- e. La ciudad intermedia debe planear el doble.
- f. Evaluar el factor geográfico (en lugares complicados optar por cables aéreos).
- g. Los tranvías superan barreras geográficas (para pendientes con 12 % se recomienda llanta de hierro, para pendiente superior al 12 % se recomienda llanta de caucho).
- h. Los buses eléctricos son eficientes.
- i. Ser flexibles con las condiciones culturales (es decir considerar los museos, teatros, etc., como paraderos) [19].

Una solución al problema mencionado anteriormente a través del desarrollo de la aplicación móvil, la cual permite conocer las líneas y rutas de transporte público que recorren la ciudad de Lima logrando orientar al usuario con información precisa sobre el importe del pasaje, el tiempo que demora en llegar al destino, líneas, rutas y paraderos [20].

Con fecha 27 de diciembre del 2018, se promulgó la Ley N° 30900, que crea la Autoridad de Transporte Urbano (ATU) para Lima y Callao, cuyo objeto radica en garantizar el funcionamiento de un sistema integrado de transporte eficiente, dirigido por una autoridad autónoma funcional, económica y financiera, con presupuesto propio para el transporte masivo de pasajeros [21].

Hasta la fecha la gestión pública no ha solucionado el problema, es decir, sus políticas no han dado resultados significativos. Entonces, sí urge tomar medidas, las cuales, no solo deben tornar más eficiente el transporte, sino también, contribuir a preservar el medio ambiente libre de contaminación aérea y sonora, en concordancia con el Acuerdo de Estocolmo - Suecia de 1972 [22].

El transporte masivo en el Perú se evidencia aún más la yuxtaposición de funciones entre el gobierno central y los gobiernos sub nacionales, porque la propia Constitución Política establece que los gobiernos locales son competentes para normar y gestionar – directa o indirectamente – todo lo relacionado con el transporte urbano masivo, pero en virtud del Reglamento del Sistema Eléctrico de Transporte de Pasajeros en Vías Férreas, es el gobierno nacional quien también asume – en la práctica – competencia en dicha materia (transporte masivo). De ese modo, el gobierno local queda sustraído del proceso de regulación y supervisión del Metro de Lima [23].

A nivel regional se realiza un comparativo entre las ciudades de Buenos Aires, Santiago de Chile y Bogotá que se muestra en la Tabla 1 en cuanto a detalles técnicos y económicos de las inversiones en sus respectivos sistemas de transporte público.

Tabla 1: Comparativo entre las ciudades de Buenos Aires, Santiago de Chile y Bogotá.

Característica/ Ciudad	Buenos Aires	Santiago de Chile	Medellín	Perú
Metro /Año de funcionamiento	Metro de Buenos Aires en 1913 [24]	Primera Línea funcionó en 1975 [25]	Metro de Medellín en 1995 [26]	Metro de Lima en 2012 [27]
Bus/ Año de funcionamiento	Metrobus 2011	Transantiago 2007	Transmilenio 2010	Metropolitano 2010
Inversión por BTR (US\$)	124 millones			241 millones [28]
Organismo Supervisor		Ministerio de transporte		Ositrán, AATE, ATU, Invermet
Kilometraje Metro	6 líneas	7 líneas, 140 km [25]	11 líneas	1 Línea, 34 km
Kilometraje bus	59,7 km [24]	2 834 km [29]	12 líneas con 113 km	33 km [30]
Pasajeros al año por metro		985 millones		
Pasajeros al año por bus		1 200 millones		

Pasajeros al día por metro		2,6 millones [25]		692 mil [30]
Pasajeros al día por bus		3,3 millones		700 mil [31]
Ejecutor del proyecto BTR	Local	Local	Local/Nacional	Local [31]
Ejecutor del proyecto Metro	Nacional	Nacional	Local/Nacional	Nacional

Siendo el TRANSMILENIO, el primer proyecto aprobado por las Naciones Unidas como mecanismo de desarrollo limpio, lo que le permite vender certificados de reducción de emisiones al gobierno holandés, cuyos recursos se reinvierten en infraestructura [23].

Un diagnóstico [27] detallado de la situación del transporte y de la viabilidad en la zona Metropolitana del Valle de México, brinda la siguiente información:

- a. Comprender el flujo de viajes.
- b. La infraestructura vial que cuenta el área conurbada de la ciudad de México.
- c. Los medios de transporte del Distrito Federal y Estado de México.

En 1976 se desarrolló el Plan Maestro del Metro, el Plan de Vialidad y el Sistema de Transporte de Superficie que preveía modificaciones a las rutas de autobuses para adecuarles a la infraestructura de los “Ejes viales”, derivados de los problemas en la vialidades, derivado de una estructura desarticulada y falta de continuidad con trazos tortuosos y sin destino. Para enfrentar el problema se empieza un programa que contempla la construcción de 34 ejes y la conclusión de vías primarias y dar preferencia al transporte público. Como primera etapa, en 1979 se construyó 15 ejes viales, que en conjunto suman 113,3 km, que atraviesan de Norte a Sur y de Oriente a Poniente la ciudad dentro del circuito interior. Esto es con el fin de comunicar zonas de habitación, las áreas industriales, de servicios y recreación. La superficie de influencia abarca 93 km², en la parte más poblada de la urbe, la más usada, conflictiva por su concentración de oficinas, establecimientos oficiales, dependencias gubernamentales, etc [32].

Con el apoyo del Instituto de Recursos Mundiales con sede en Washington, en el año 2002 se creó en México: el Centro Sustentable de la ciudad de México (CTS), con el propósito de buscar la solución al transporte masivo de pasajeros. Así se impulsó la creación del Metrobús Insurgentes, el cual se ha convertido en el primer corredor estratégico tipo BRT (Bus Rapid Transit) en la Ciudad de México. Atiende a un promedio de 260 000 usuarios al día. Esta situación, similar la ha desarrollado la Municipalidad de Lima con el transporte de bus rápido denominado: Metropolitano. El CTS de la Ciudad de México ha realizado experiencias que favorecen al control de emisión de partículas contaminantes mediante la instalación de trampas de partículas y de convertidores catalíticos en unidades de transporte. El resultado fue asombroso: redujo en un 90 % la emisión de gases contaminantes [22].

Uno de los transportes públicos de pasajeros más utilizado en la Ciudad de México es el STCM. Una de las problemáticas en este tipo de transporte es la posible sobredemanda por lo que en esta investigación se estudia a la afluencia de una de las líneas del Metro, la Línea B, que realiza un recorrido en una parte del Estado de México y en parte de la Ciudad de México [33].

Es importante resaltar que de las diez concentraciones urbanas más pobladas en el mundo, sólo tres de ellas: Nueva York, Tokio y la ciudad de México se encuentran en la lista de las ciudades con mayor extensión de red. Por ejemplo, el número de pasajeros por kilómetro de vía en la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (ZMCM) es aproximadamente ocho veces mayor que el de ciudades nórdicas como Oslo y Estocolmo y cinco veces mayor que el de ciudades como Madrid o Londres [32].

En la Figura 10 se puede apreciar el Mapa de la Red del STC que inició en 1967 y [34] describe 6 etapas. Actualmente el metro de CDMX está conformada por 226,48 km [35], con 12 líneas más 2 tramos A y B, con 195 estaciones.

Cifras de operación del metro de la CDMX.

Según [35] el Metro de México durante el 2018 generó las siguientes cifras:

- Total de pasajeros transportados: 1 647 475 013 usuarios.
- Total de accesos de cortesía otorgados: 208 383 433.

- Total energía consumida (estimada): 786 772 431 kWh.
- Estación de menor afluencia: Deportivo 18 de marzo de Línea 6 con 681 350 usuarios.
- Estación de mayor afluencia: Pantitlán Línea "A" con 40 850 325 usuarios.
- Longitud de la Red en servicio: 226,488 km
- Servicio: 365 días.



Figura 10: Mapa de Red del Sistema de Transporte Colectivo de Ciudad de México [34].

Línea 1 del Metro de Lima es un sistema de transporte ambientalmente amigable, que utiliza como principal fuente de energía para operar la energía eléctrica. Como un eje central del sistema de transporte público de Lima, recorre 2,9 millones km al año sin

emitir GEI, convirtiéndolo así en un aporte real para los planes de reducción de emisiones del país y, por lo tanto, para elevar el estándar de vida y salud de la población limeña. De acuerdo con la Autoridad Autónoma del Tren Eléctrico (AATE), con la operación de Línea 1 del Metro de Lima se ha evitado la emisión de unas 32 000 T de CO₂ por año (Ver Figura 11), lo cual es beneficioso para la salud pública comparándola con las denominadas “combis” y taxis, los medios de transporte colectivo más contaminantes y populares en la ciudad [36].

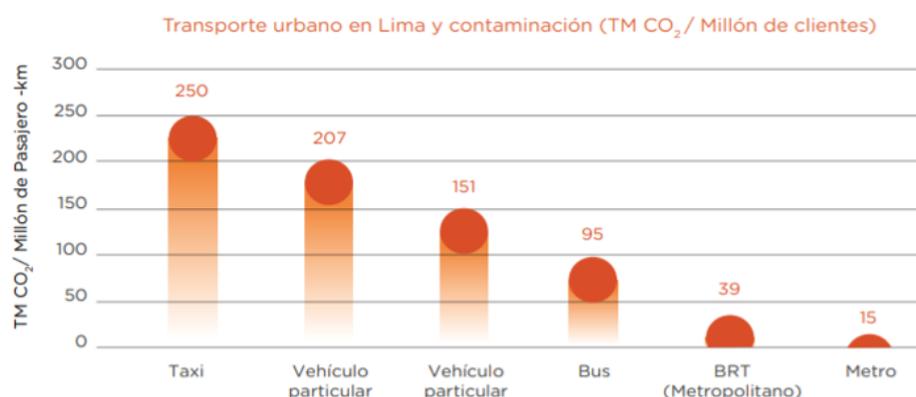


Figura 11: Transporte urbano en Lima y contaminación (T CO₂/ millón de clientes [36].

Se tiene como referencia la calidad del aire observado el 02/04/2020 (día 18 de estado de emergencia en Perú por pandemia del COVID-19), como se aprecia en la Figura 12, el Perú está dentro de los parámetros estándares de calidad de aire respecto al NO₂, por ejemplo en Lima se observa 4,94 µg/m³ a diferencia de Europa con 69,7 µg/m³ (Ver Figura 13).



Figura 12: Calidad de aire NO₂, en etapa de aislamiento social en Lima - Perú [37].

Estos cambios se deben al aislamiento social, toque de queda y el muy limitado parque automotor que transita – en aquel momento – por todo el territorio peruano, y que parece indicar que el factor principal es la reducción de transporte público y privado.

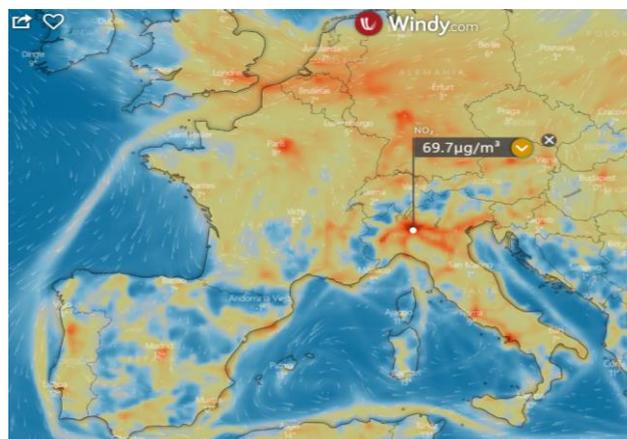


Figura 13: Calidad de aire NO₂ en Europa [37]

Una Línea de Metro, además de no contaminar ni entorpecer la circulación de superficie, transporta 3 veces más pasajeros con 2 veces menos energía que cualquier medio de combustión; tiene los costos de transporte urbano a motor más bajos y ofrece niveles de regularidad, velocidad y seguridad inalcanzables para otros medios [38].

En la ZMVM, aunque el Metro sólo efectúa el 28,7 % de los 15,57 millones de viajes en transporte público, que en un día hábil generan sus 20,8 millones de viajes, su alta eficiencia favorece al transporte en general, al orden vial y a la baja contaminación, tanto en áreas directamente cercanas como en zonas lejanas aparentemente desligadas. Además, la complejidad técnica del Metro lo sitúa como un gran generador de actividad industrial, capaz de inducir el desarrollo tecnológico, el empleo y la economía en la entidad, únicamente comparable con un gran parque industrial[38].

En Bogotá entre los beneficios más importantes para la población se encuentran la reducción de la congestión, la disminución de la dependencia de los automóviles, el ahorro de tiempo en el desplazamiento y el aumento de la calidad de vida. Como estos beneficios no son apropiables por los ejecutores del proyecto, se requiere la participación del sector público para hacerlo viable, aun cuando no necesariamente participe en la construcción y operación [39].

Entre las metodologías para calcular los beneficios y costos sociales se aplican las de disponibilidad a pagar y costos evitados. La primera se relaciona con la percepción de los ciudadanos y la segunda con indicadores de los resultados con y sin proyecto. Desde la perspectiva del ahorro del tiempo se ocasionan costos durante su construcción (Ver Tabla 2) y beneficios una vez esté disponible. Otros beneficios son los relacionados con la reducción en la contaminación, disminución de la accidentabilidad y aumento de la seguridad. Mientras, en los costos también se encuentran la disposición de los residuos sólidos del material extraído para la construcción de los túneles [39].

Tabla 2: Costo por km de Metro en EE.UU, Canadá , Europa y Latinoamérica al 2014 [39].

Metro	Año de apertura	Longitud en km	Distribución vertical (% subterráneo)	Costos en US\$ millones por km a precios de 2014
Estados Unidos y Canadá				
Metro Toronto (línea Sheppard)	2002	5,5		177,6
Metro Baltimore (secciones A& B)	1983	12,2	56 %	191,3
Metro Washington	1985	97,3	57 %	148,2
Metro Allanta	1986	43,1	42 %	114,1
Europa				
Metro Copenhague (primera fase)	2002	11		112,2
Metro Atenas (Attko líneas 2 & 3)	2000	18		167,3
Metro Londres (extensión línea Jubilee)	1999	16	78 %	427,9
Metro Madrid (extensión)	1999	56,3	68 %	34,6
Metro Turín (fase 1)	2005	9,6	100 %	93,0
Latinoamérica				
Metro Santo Domingo (línea 1)	2009	14,5	69 %	52,4
Metro San Juan (Tren Urbano)	2004	17,2		163,9
Metro Panamá (línea 1)	2014	13,7	53 %	137,2
Metro Santiago (extensión línea 5)	2000	2,8	100 %	93,1
Metro Caracas (línea 3)	1994	4,4	100 %	127,6

Metro de Santiago.

En [25] apreciamos las Líneas 1, 2, 3, 4, 4A, 5, 6 y a manera real indica estatus de las estaciones, considera la siguiente simbología que se muestra en la Figura 14. Cuando se señala a través de la página web la situación o estado de las estaciones es más sencillo poder decidir si corresponde usar el servicio, caso contrario se puede optar por otro medio de transporte o postergar la actividad programada (si se pudiera) y así evitar esfuerzos innecesarios de traslado y más aún reducir el flujo de la demanda del servicio ferroviario.

Estado de la Red Simbología: ○ Estación Operativa ● Estación Cerrada Temporalmente 🚫 Estación No Habilitada

Figura 14: Simbología de estado de las estaciones de la red metro de Santiago [25].

El metro de Bilbao.

El proyecto del metro de Bilbao se remonta a finales de los años 70, cuando la Diputación de Bizkaia diagnóstica la manera caótica como crecía el área metropolitana, además del problema de transporte de la comarca y el posible estrangulamiento del tráfico [40].

El trazado definitivo del metro toma la representación gráfica de una "Y" que, siendo Basauri el extremo inferior, se desplaza a través de Etxebarri, Bolueta, Santutxu, Casco Viejo, Arenal, Gran Vía, Indautxu, San Mamés, Olabeaga, Deusto, Sarriko y San Inazio, con un total de 10,5 km. Aquí se produce la división de los brazos de la "Y", ver Figura 15 [40].

Sus brazos forman dos líneas: la Línea 1 (brazo derecho), dirección Plentzia Basauri y de 31 km. de longitud, y la Línea 2 (brazo izquierdo), dirección Kabiezes- Basauri, de 20 km. La idea conceptual de las estaciones subterráneas estuvo basada en “cavernas”, los grandes desafíos del metro de Bilbao era conseguir que las estaciones se situaran lo más próximo a la superficie, de tal modo que el acceso desde la calle hasta los andenes fuera sencillo, directo, amplio, permeable y con iluminación natural [40].

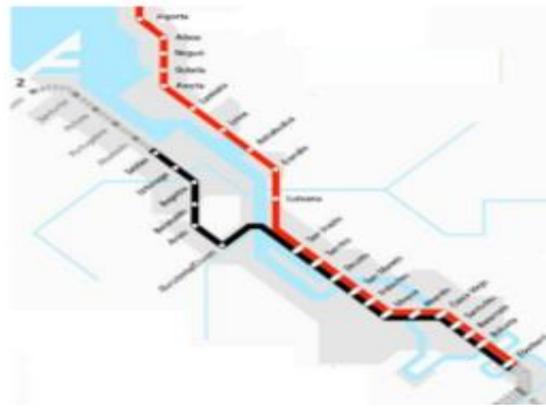


Figura 15: Recorrido del metro Bilbao [40].

El tranvía de Bilbao.

Conecta Basurto y la estación ferroviaria de San Mamés con el margen izquierdo de la ría y Atxuri. A la vez permite el acceso al barrio de Deusto, a la Universidad, al ámbito Mazarredo Uribitarte, la nueva zona de Abandoibarra y al núcleo histórico-comercial del Casco Viejo [40].

Su trazado facilita las conexiones directas del tranvía con los otros transportes públicos colectivos. Las paradas se han situado en los puntos de conexión con el objetivo de reducir los tiempos de trasbordo en las diferentes etapas de cada desplazamiento. Tres paradas importantes del tranvía enlazan con las redes ferroviarias de gran capacidad, éstas son las de San Mamés, Abando y Atxuri [40].

Dancer es una solución de transporte urbano que incluye autobuses eléctricos, mantenimiento completo y su propio suministro de energía verde. Desde que dieron a conocer un prototipo en 2016, el equipo de diseño de Dancer ha vuelto con un autobús urbano eléctrico ultraligero totalmente operativo. El proyecto rediseña desde cero un autobús para hacer que el transporte público sea atractivo para los pasajeros y respetuoso con el medio ambiente [41]. Sus características son:

- Está diseñado como el autobús de tamaño convencional más ligero del mundo, con un tiempo de carga súper rápido de tan sólo 6 minutos [41].
- Sus laterales curvos le dan una fuerza extra y están hechos con botellas PET (tereftalato de polietileno) recicladas [41].
- El diseño también cuenta con pantallas traseras para mejorar la visibilidad del

tráfico para el resto de conductores o para fines publicitarios [41].

- El autobús está equipado con cámaras de visión trasera, visión nocturna infrarroja de 360°, una rampa automática para usuarios discapacitados y una conexión totalmente automatizada con la estación de carga [41].
- El espacio para los pasajeros tiene ventanas extra grandes, tragaluz y un interior minimalista y espacioso [41].
- La tecnología de fabricación está compuesta por cinco grandes módulos que se parecen a las turbinas de energía eólica o a los yates deportivos, se inventó en la propia empresa en cooperación con la Universidad de Klaipeda [41].
- Tiene una nueva estructura modular y un material compuesto de fibra de vidrio, resina de éster de vinilo y espuma de PET reciclada [41].
- El concepto de estructura modular simplifica el montaje, mientras que el material compuesto recientemente desarrollado garantiza que la carrocería del Dancer sea ultraligera, fuerte y esté lista para ser reciclada [41].

Utilizando el espacio libre disponible en los techos de los trenes en la India para el aprovechamiento de la energía solar, podría ser un movimiento significativo en la reducción de dependencia de los combustibles fósiles y reducir el calentamiento global, desde el tipo de terreno, el clima y otras condiciones ambientales pueden tener un impacto significativo en el diseño, el rendimiento y fiabilidad de un sistema de captación de energía solar. Como estudio se analiza la implementación de una adquisición de datos, monitoreo y sistema de control de análisis para un vagón de Linke Hofmann Busch (LHB) de un tren en la India [42].

El rendimiento de la energía solar de paneles fotovoltaicos en un vehículo en movimiento depende de varios factores como las horas de sol, radiación solar, condiciones climáticas como temperatura y humedad, dirección de desplazamiento, número de paradas, velocidad del vehículo, calidad de la carrocería del vehículo y la tecnología de paneles fotovoltaicos colocados encima de este. De ahí una implementación prototipo y se requiere más investigación sólida para demostrar la viabilidad de instalar paneles solares sobre los techos de los vehículos [42].

Al sistema se integró un piranómetro, que mide el irradiancia solar en los paneles, un sensor de vibración y también un sensor de temperatura, estos sensores transducen las

mediciones físicas a señales eléctricas. Estas señales eléctricas de los sensores se enrutan a la unidad DAC, alimentada por National Instrumentos (NI) Entrada / Salida reconfigurable (RIO) dispositivo integrado conectado a un circuito electrónico para supervisar los datos en un sistema informático, un Interfaz Gráfica de Usuario (GUI) construida usando el software LabVIEW. Las señales adquiridas por el dispositivo incorporado se transmiten inalámbricamente a través de la red de área local (LAN). El sistema también incorpora un relé controlable para descargar la batería. Un registrador de datos se incorporó en el software para registrar el rendimiento del sistema para análisis fuera del sitio, una tarjeta Secure Digital (SD) también fue incorporado para tener una copia de seguridad de todos los datos requeridos. El usuario también puede personalizar el registrador de datos, quién tiene la opción de seleccionar la velocidad de registro de los datos desde un intervalo de 1 segundo a 5 minutos. Separar las carpetas se crean cada día y la carpeta de cada día contiene archivos de 1,000 valores de datos para un procesamiento y análisis conveniente. Estos informes generados están en .csv (separados por comas). En caso de mal funcionamiento o emergencias, el usuario puede anular manualmente la carga y descarga del banco de baterías a través de un relé controlable, mediante la interfaz del software [42].

Los datos adquiridos por el sistema en 26 de junio de 2015, un típico día del monzón (peor de los casos) generó 1,35 kWh de energía por día para una irradiancia horizontal global (GHI) de 4,39 kWh/m² los paneles flexibles que se usaron fueron calificados para tener una eficiencia del 20 % al 25 % (eficiencia medida en panel fue 16,39967 %). Si se implementa en todos los 63 511 vagones de los ferrocarriles, se obtiene como resultado un ahorro de 11 millones de litros de diésel [42].

Los datos recopilados por este sistema se utilizarán para diseñar un bajo costo, versión comercial de esta tecnología y también puede ser considerado para varios otros transportes terrestres [42].

En [43] se realizó un estudio técnico-económico de 3 escenarios de transporte masivo con tecnología solar fotovoltaica: tren, bus y tranvía para la ciudad de Arequipa. De los cuales el mayor costo de inversión es el tren solar fotovoltaico, sin embargo el tiempo de vida de los trenes y su infraestructura es de 50 años, contra una combi que es de 15 años. El proyecto necesariamente tiene que ser financiado por el estado.

El Metro de Moscú, inaugurado el 15 de mayo de 1935, es la base del sistema de transporte de la capital. Conecta de manera confiable el centro de la ciudad con áreas industriales y áreas residenciales. Hoy, la participación del Metro de Moscú en el transporte de pasajeros entre las empresas de transporte urbano de pasajeros en la capital es de aproximadamente el 56 % [44].

La estructura de anillo radial del metro de Moscú reproduce el diseño histórico de Moscú. Las líneas de metro se extendían desde el centro de la ciudad hasta sus alrededores, proporcionando a los pasajeros un transporte rápido y confiable. El rango promedio de un viaje en el metro es de aproximadamente 14,5 km. En promedio, 9 millones de pasajeros utilizan los servicios de metro entre semana. Más de 12 000 trenes pasan diariamente por 15 líneas de metro, incluido el Anillo Central de Moscú (MCC) y el Sistema de Transporte de Monorraíl de Moscú, con 275 estaciones (238 estaciones de metro, 31 estaciones de metro MCC y 6 estaciones de monorraíl) [44].

Sólo el metro puede proporcionar una entrega rápida de una gran cantidad de pasajeros de un distrito de Moscú a otro. El 25 % de las estaciones de Metro experimentan una carga diaria total de más de 50 000 pasajeros. Las más concurridas hoy son las estaciones Komsomolskaya (Línea Koltsevaya), Novogireevo, Schelkovskaya, Vykhino, Novokosino, VDNH, Baumanskaya, por las que pasan diariamente de 80 a 138 mil personas [44].

La velocidad operativa promedio de los trenes del metro de Moscú (incluidas las paradas) es de aproximadamente 41,61 km/h. Esto asegura una alta regularidad de los trenes con un intervalo mínimo de 90 segundos y se logra gracias al trabajo de más de 59 000 empleados [44].

En términos de intensidad de tráfico, fiabilidad y volumen de tráfico, el Metro de Moscú ocupa el primer lugar del mundo de forma estable. Está en los primeros tres subterráneos del mundo en casi todos los demás indicadores [44].

En [45] tomando como base el sistema integrado de transporte propuesto en el "Plan Maestro de Transporte Urbano para el Área Metropolitana de Lima y Callao en la República de Perú" para el período 2005 - 2025. Se identificó rutas troncales, sobre las

cuales se propone un sistema integrado de transporte, y en las que transitarán trenes, tranvías y buses de alta capacidad, de acuerdo a la futura demanda de viajes, con lo que se logrará un buen rendimiento del transporte, como la reducción de tiempo de viaje, una tarifa razonable y un viaje cómodo. Se plantean 04 líneas de metro, 05 líneas troncales de buses y 05 líneas de tranvías. El costo total de inversión se estima en US\$ 8 486 millones de dólares, detallado de la siguiente manera: 4 Líneas de Metro: US\$ 5 718,42 millones (incluye costo de los trenes: US\$ 1 716 millones), 5 líneas troncales de Buses: US\$ 1 408,46 millones (incluye costo de la flota de buses US\$ 533,05 millones), y 05 líneas de tranvía: US\$ 1 359,20 millones (incluye costo de los tranvías: US\$ 425,60 millones). Excluyendo los costos de los proyectos ejecutados y los que se encuentran en marcha a presente año, y excluyendo los costos de material rodante y buses, los cuales serán financiados por las empresas que asuman la operación del sistema; tenemos que el costo total del sistema propuesto asciende a la suma de US\$ 4 772 millones, el cual deberá ser asumido por el gobierno central, los gobiernos regionales y los gobiernos locales, en un periodo de 15 años hasta el 2025, requiriendo un financiamiento anual de aproximadamente US\$ 318 millones por año [45].

En [46] se analiza los resultados de la investigación sobre la eficiencia en el uso de complejos de energía híbrida basados en fuentes de energía renovables, incluidos diferentes tipos de estaciones de carga, en la Federación de Rusia. Las posiciones líderes en el número de estaciones de carga en el mundo son: China - más de 140 000 unidades, Estados Unidos - más de 40 000 unidades y Holanda - más de 25 000 unidades. En cuanto a las estaciones de sustitución de baterías, hay algo más de 15 en el mundo. Están en Israel, Dinamarca y Eslovaquia. En Rusia, a su vez, hay más de 350 estaciones de carga hasta la fecha, pero ninguna estación de tiene implementado el reemplazo de batería.

Las tareas de investigación se resolvieron utilizando el modelo matemático desarrollado de HEC (central de energía híbrida) incluyendo plantas generadoras basadas en RES y estaciones de carga o estaciones de reemplazo de baterías. El esquema estructural-funcional de tal HEC se muestra en la Figura 16 [46].

Los resultados muestran que con un consumo de combustible de 8 - 10 l/km (su costo equivale a 4,5 US\$ - 5,5 US\$) y un consumo eléctrico de 21 kWh y 23 kWh por 100 km respectivamente para autos eléctricos como Nissan Leaf y Chevrolet Volt el costo de

cargar un vehículo eléctrico en algunos casos llega a ser menor, ver Tabla 3 [65].

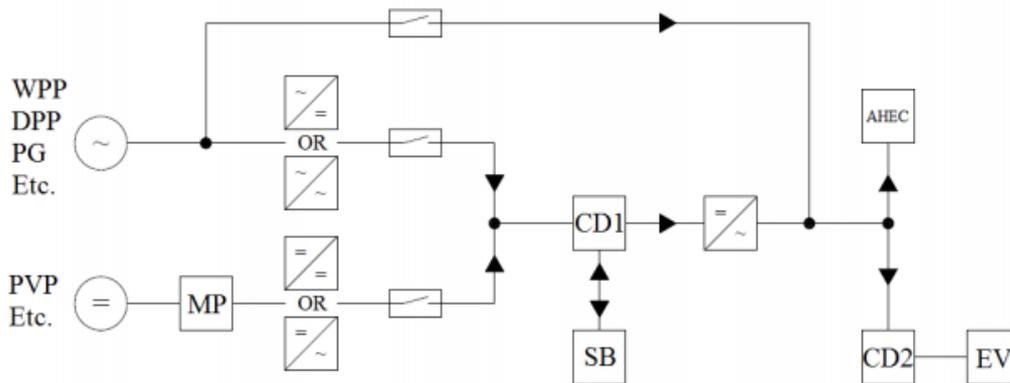


Figura 16: Esquema estructural y funcional de HEC (central de energía híbrida) [46].

Tabla 3: El coste de cargar un vehículo eléctrico, reducido a 100 km [46].

Tipo de estación de carga	Fuente de alimentación de la estación de carga de:			
	DPP	Basado en HEC en PVP	Basado en HEC en WPP	Basado en HEC en PVP y WPP
Para áreas con suministro de energía centralizado (duplicación de la red eléctrica)				
Carga en Estación		6 - 7 US\$	2 - 4 US\$	6 - 9 US\$
Carga con batería de reemplazo		4 - 6 US\$		4,5 - 8 US\$
Para áreas aisladas (Duplicación de DPP)				
Carga con batería de reemplazo	9 US\$	14 - 15 US\$	7,5 - 11,5 US\$	13 - 18 US\$

En [46] se obtiene las siguientes conclusiones (a) Los HEC basados en WPP y la estación de carga o la estación de reemplazo de batería pueden ser efectivos a una velocidad del viento anual promedio de más de 3,5 m/s; (b) los HEC basados en PVP y la estación de reemplazo de batería son efectivos con una llegada anual promedio de radiación solar de más de 190 W/m², y; (c) para áreas aisladas, los HEC basados en WPP y la estación de reemplazo de batería son más eficientes que los HEC similares basados en DPP a una velocidad del viento anual promedio de 4 m/s – 4,5 m/s y más.

La vieja línea de tren construida tras la Segunda Guerra Mundial que conectaba la ciudad de Byron Bay con su distrito de North Beach necesitaba dos motores diésel para recorrer tres kilómetros de trayecto. Ahora y tras casi 50 años abandonada, su apariencia parece

no haber cambiado mucho, pero sí su funcionamiento: en diciembre de 2017 se convirtió en el que se autodenomina el “primer tren turístico solar del mundo”. En condiciones normales, el tren se mueve gracias a la energía solar captada a través de paneles fotovoltaicos incorporados en la parte superior del convoy doble que alimentan un sistema de almacenamiento de baterías de 77 kWh, así como baterías de iones de litio para funcionar íntegramente con energía solar, que pueden generar hasta 6,6 kW [47].

También en 2017 y con un funcionamiento muy similar, la Organización de Ferrocarril para Alternativas de Combustibles presentó el primer tren local y primera estación de la India alimentado con energía solar en Guyahati [47].

Al día de hoy, la India tiene más de 250 trenes solares y varias granjas fotovoltaicas en distintos puntos del territorio para aliviar el peso en la cubierta de cada convoy. Una energía que también sirve para el óptimo funcionamiento de luces, ventiladores y sistema de visualización de información. Según la organización, la incorporación de estos trenes supondría el ahorro de 21 000 litros de diésel y la reducción de 9 T de CO₂ por tren al año [47].

2.2. Descripción teórica.

Material Rodante.

Son todos los tipos de vehículos dotados de ruedas capaces de circular sobre una vía férrea cuyo principal objetivo es transportar diferentes tipos de cargas. Usualmente los criterios fundamentales para clasificar el material rodante suelen ser su capacidad tractora y su uso comercial [48].

Tranvía.

Son vehículos que se mueven sobre rieles empotradas en el pavimento de las calles, alimentados con energía eléctrica con cables de conducción instalados a lo largo de la ruta (catenarias) o por una tercera riel (bajo tierra) para no destruir la imagen urbana. En general, pueden transportar más pasajeros que un autobús convencional y reducen la contaminación del medio ambiente [49].

Metrópolis.

Según [50] una metrópoli se define como una ciudad con un millón de habitantes como mínimo, con una densidad media mínima de 2 000 habitantes/km² y con una estructura monocéntrica. Ésta es, sin embargo, una definición muy pragmática.

Sistema de buses de tránsito rápido (BRT, por sus iniciales en inglés).

Los BRT (Buses de tránsito rápido), conocido por sus siglas en inglés BRT (Bus Rapid Transit) es un servicio de buses de alta calidad que tiene muchas de las características de los sistemas de un metro de alta capacidad, pero a una fracción del costo. Los buses se asemejan más a los servicios del metro cuando transitan en carriles especialmente designados o cuando tienen carriles físicamente separados para su uso exclusivo. La separación de los carriles de buses en las intersecciones y coyunturas críticas también agiliza el flujo de vehículos. Con frecuencia, los sistemas BRT incluyen estaciones de buses, en vez de paradas o paraderos, que proporcionan protección contra el clima y permiten que los pasajeros paguen antes de embarcar [51].

En [52] los Programas de Calle Abierta, también conocidos como ciclovía, son programas multisectoriales gratuitos para personas de diferentes orígenes socioeconómicos donde los espacios públicos y las calles están cerrados al tráfico motorizado y abiertos para actividades de ocio. La tasa de expansión de dichos programas en todo el mundo ha aumentado drásticamente debido a sus beneficios generales para la salud pública y su implementación eficiente en el uso de recursos. Los indicadores de desempeño permiten analizar el impacto de los programas en la salud pública. El número de participantes es un indicador clave de desempeño, por lo que su estimación confiable es fundamental para medir la rentabilidad de los programas para las ciudades y municipios. Un estudio de caso fue la ciudad de Bogotá (Colombia), donde estimaron un promedio de 675 000 participantes por día. También realizaron un análisis de sensibilidad sobre la tasa de llegada y estudiaron su impacto en la estimación. La ciclovía de Bogotá está abierta los domingos y feriados desde las 7:00 a 14:00 horas. En el 2014 con una extensión de 113,6 km y con una distribución geográfica en toda la ciudad, permitía la participación de personas de diferentes clases socioeconómicas [52].

ECA (Estándar de calidad ambiental)

Son las medidas que establecen el nivel de concentración o del grado de elementos,

sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos, presentes en el aire, agua o suelo - en su condición de cuerpo receptor -, que no representa riesgo significativo para la salud de las personas ni para el ambiente [53].

Calidad del Aire: En [54] se rige a través de la Resolución Ministerial 181-2016-MINAM (ver *Tabla 4* y *Tabla 5*).

Tabla 4: Estándares nacionales de calidad medioambiental [53].

Parámetros	Período	Valor ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Norma de referencia
Dióxido de azufre (SO_2)	Anual	80	D.S.N°074-2001-PCM
	24 horas	20	D.S.N°003-2008-MINAM
PM-10	Anual	50	D.S.N°074-2001-PCM
	24 horas	150	
Dióxido de nitrógeno (NO_2)	Anual	100	D.S.N°074-2001-PCM
	24 horas	200	
PM-2,5	Anual	15	D.S.N°074-2001-PCM
	24 horas	25	D.S.N°003-2008-MINAM

¿Cuál es la diferencia entre los ECA y los LMP?

Los ECA y los LMP (Límites máximos permisibles) hacen referencia a los niveles máximos de elementos, sustancias o parámetros físicos, químicos y biológicos establecidos por las normas en base a lo que el Estado considera ambiental y socialmente aceptable, y que no representa un riesgo significativo a la salud y al ambiente. Los LMP regulan los niveles máximos a ser emitidos desde un punto específico de emisión o vertimiento, generados por una actividad productiva[53].

¿Cuáles son los ECA para aire?

Actualmente, según [53] los ECA para aire consideran los niveles de concentración máxima de los siguientes contaminantes del aire: Dióxido de azufre (SO_2); material particulado con diámetro menor o igual a 10 micrómetros (PM-10); monóxido de carbono (CO); dióxido de nitrógeno (NO_2); ozono (O_3); plomo (Pb); sulfuro de hidrógeno (H_2S); material particulado con diámetro menor o igual a 2,5 micrómetros

(PM-2,5); hidrocarburos totales expresados como hexano (C₆H₁₄), y; benceno (C₆H₆).

Tabla 5: Cuadro de índice de calidad de aire [53].

Calidad del Aire	INCA	Cuidados	Recomendaciones
Buena	0-50	La calidad del aire es satisfactoria y no representa un riesgo para la salud	La calidad del aire es aceptable y cumple con el ECA de Aire. Puede realizar actividades al aire libre.
Moderada	51-100	La población sensible (niños, tercera edad, madres gestantes, personas con enfermedades respiratorias crónicas y cardiovasculares) podría experimentar algunos problemas de salud.	La calidad del aire es aceptable y cumple con el ECA de Aire. Puede realizar actividades al aire libre con ciertas restricciones para la población sensible.
Mala	101-VUEC	La población sensible podría experimentar problemas de salud. La población en general podía sentirse afectada.	Mantenerse atento a los informes de calidad del aire. Evitar realizar ejercicios y actividades al aire libre.
Umbral de cuidado	>VUEC	La concentración del contaminante puede causar efectos en la salud de cualquier persona y efectos serios en la población sensible, tales como niños, ancianos, madres gestantes, personas con enfermedades pulmonares obstructivas crónicas y cardiovasculares.	Reportar a la Autoridad de Salud para que declare los Niveles de Estados de Alerta de acuerdo al Decreto Supremo Nro. 009-2003- SA y su modificatoria Decreto Supremo N°012-2005-SA.

El servicio público debe cumplir, en su prestación, determinadas características [53]:

- a. **Continuidad:** Debe ser provisto sin interrupciones, de manera permanente, salvo en casos material o tecnológicamente justificados.
- b. **Regularidad:** En su prestación debe conservar los niveles de calidad según haya sido establecido contractualmente.

- c. **Igualdad:** Debe ser brindado sin ningún tipo de exclusión a ninguna persona, natural o jurídica, salvo por razones claramente establecidas en el contrato.
- d. **Mutabilidad:** El servicio público debe estar preparado para adaptarse e implementar cambios tecnológicos, propios de la industria a la que pertenezca.

Densidad articulada vs. Densidad demográfica.

Lo más importante para la integración entre el transporte y los usos del suelo no son las densidades demográficas promedio, sino las “densidades articuladas” (densidades estratégicamente distribuidas a través de las diferentes partes del área metropolitana). El modelo ilustrado en la maqueta c de la Figura 17 es más adecuado para el transporte masivo que el de la maqueta a, aun cuando ambas tienen la misma densidad demográfica promedio [51].

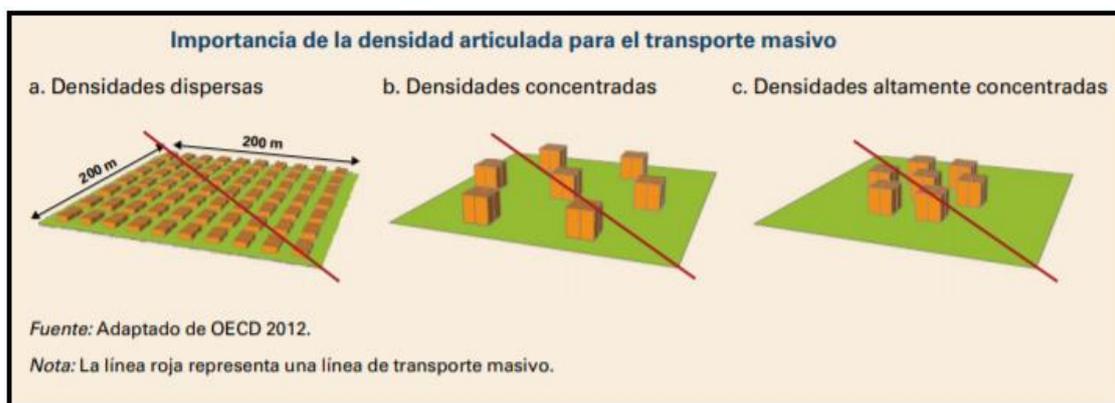


Figura 17: Importancia de la densidad articulada para el transporte masivo [51].

Curitiba (Brasil) ha creado densidades articuladas a lo largo de sus corredores de BRT. Bogotá (Colombia) no ha hecho lo mismo a lo largo de los corredores del TransMilenio. Eso mantiene un COT bajo (0-2), excepto dentro del sector central de negocios y unas cuantas áreas determinadas [51].

Conformación de un tren del metro.

Los trenes de la ciudad de México están constituidos por nueve carros (Ver Figura 18), seis de los cuales proporcionan movimiento de tracción al tren a los cuales se les denomina motrices. Los vagones de los extremos tienen la característica de tener cabina y a los cuales se les denomina con la letra “M” y a los restantes motrices se les denomina con la letra “N”, a los otros carros se les denomina remolques designados por la letra

“R”, estos trenes constan de tres elementos constituidos de la siguiente manera, además de contar el tren con un vagón designado con las letras “PR” en el cual se encuentra montado el equipo de pilotaje automático [55].

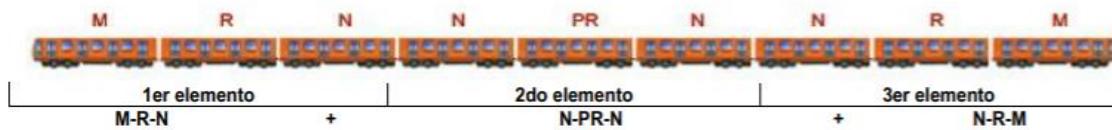


Figura 18: Configuración de un tren de 9 carros [55].

Electromovilidad.

Para evitar la concentración de altos niveles de CO₂, dióxido de nitrógeno (NO₂) y otros GEI, en la mayoría de países desarrollados, las autoridades están fomentando la utilización de vehículos eléctricos, principalmente mediante la aparición de incentivos fiscales, ayudas a la compra, u otras medidas especiales como la gratuidad en los aparcamientos públicos o en el uso de autopistas. Estas medidas buscan promover la movilidad sostenible y un modelo de transporte eficiente. Los EV's ofrecen las siguientes ventajas frente a los vehículos tradicionales [56]:

- a. **Cero emisiones:** Estos vehículos no emiten contaminantes como CO₂ u óxidos de nitrógeno, y sus procesos de producción suelen ser más respetuosos con el medio ambiente.
- b. **Sencillez:** El número de elementos del motor de un EV es menor, y además su mantenimiento es mucho más económico debido a su simplicidad mecánica. Sus motores son más sencillos y compactos, no necesitan un circuito de refrigeración y no es necesario incorporar cambio de marchas, embrague o elementos que silencien el ruido del motor.
- c. **Fiabilidad:** Al tener menos y más sencillos componentes, este tipo de vehículos tienen menos averías. Además, no sufren el desgaste inherente producido por las explosiones del motor, las vibraciones, o la corrosión de los combustibles.
- d. **Coste:** El coste de mantenimiento del vehículo y del combustible es mucho menor que en los vehículos tradicionales de combustión. El coste energético por kilómetro

es inferior en los EV's que en los vehículos tradicionales (Ver Figura 19).

- e. **Comodidad:** Viajar en un EV será mucho más cómodo, debido a la ausencia de vibraciones o ruidos del motor.
- f. **Eficiencia:** Los EV's son más eficientes que los vehículos tradicionales. En concreto, los vehículos eléctricos convierten alrededor del 75 % de la energía eléctrica de la red en energía en las ruedas, mientras que los vehículos a gasolina convencionales tienen un nivel de eficiencia inferior al 27 %.
- g. **Accesibilidad:** Este tipo de vehículos permite acceder a áreas urbanas que no están permitidas para el resto de vehículos, ya que no sufre de las mismas restricciones de circulación en las grandes ciudades, sobre todo en los momentos de alto nivel de contaminación.

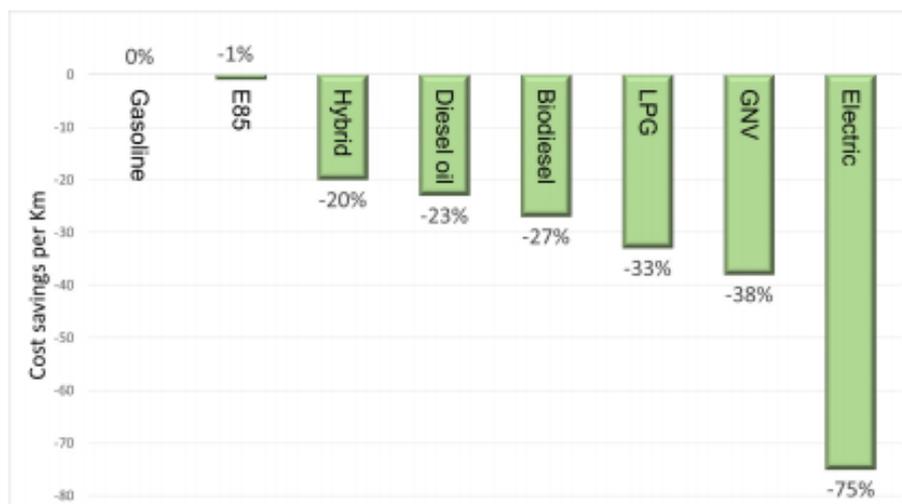


Figura 19: Comparativa de ahorro en coste por kilómetro ofrecida por vehículos propulsados por gasolina, etanol, híbridos, diésel, biodiesel, gas licuado (GLP), gas natural (GNV), y eléctricos [56].

Especificaciones técnicas del tren Alstom Metrópolis 9000.

Cada uno de los trenes ALSTOM Metrópolis 9000 que recorren el Metro de Lima está conformado por seis coches denominados Ma1-Mb1-R-R-Mb2-Ma2, que pueden clasificarse por dos tipos de coche remolque y motriz (Ver Tabla 6), donde [48]:

- Ma1 y Ma2 son coches motores (cada coche posee 4 motores, es decir: un motor

por eje) con puesto de conducción. Disponen, cada coche motor, de 1 enganche de unión automático en el extremo de cabina (para realizar la unión mecánica, neumática y eléctrica con otra unidad de tren de la misma serie suministrada por Alstom Metrópolis 9000 o mecánica y neumática con los trenes existentes).

- Mb1 y Mb2 son coches motores intermedios con pantógrafo.
- R es un coche remolque intermedio (sin motor, no posee tracción) [48].
- Requiere una tensión en la línea de 1 500 Vcc.
- Tiene un sistema redundante de comunicación, en modo master y modo esclavo esto permite que los coches estén conectados y ante la identificación de que un equipo no está funcionando, entra el sistema de respaldo o según el tipo y cantidad de equipos que no funcionen impide la tracción del tren, por tal motivo los trenes son un medio de transporte seguro [48].

Tabla 6: Dimensiones del tren Alstom Metrópolis 9000 [48].

Detalle	Motriz	Remolque
Cantidad de bogies	2	2
Cantidad de vagones	4	2
Cantidad de motores	4	0
Cantidad de ejes	16	8
Cantidad de ruedas	32	16
Cantidad de pastillo de freno	32	16
Distancia entre ejes [mm]	2 000	2 000
Diámetro de rueda nueva [mm]	840	840
Diámetro mínimo rueda [mm]	770	770
Ancho de vía (trocha) [mm]	1 435	1 485
Separación de ruedas [mm]	1 360	1 360
Longitud total [mm]	3 440	3 440
Ancho total [mm]	2 550	2 550

Detalle de inicio de tracción del tren Alstom Metrópolis 9000.

Estando en línea eleva el pantógrafo a través del compresor auxiliar, alimentando con tensión de 1 500 Vcc a los convertidores estáticos los cuales generan una tensión de 400 Vac, 220 Vac y 72 Vcc para poder alimentar los equipos del tren, tales como: el compresor principal (trabaja a 400 Vac) que genera una presión de 8 bar a 10 bar para alimentar de aire al sistema de frenado y suspensión; los sistemas de ventilación (trabaja

a 400 Vac) de los equipos electrónicos de potencia (marca ONIX); iluminación de coches 220 Vac, climatización 400 Vac, y carga batería 72 Vcc. Una vez alimentados los equipos con el convertidor estático y teniendo aire comprimido, se realiza el test de funcionamiento que consiste en una serie de pruebas en: puertas, iluminación, niveles de frenado, aire acondicionado, comunicación, etc. Si no se registra averías durante las pruebas de funcionamiento, el tren está en condiciones de recorrer la línea [48].

CAPÍTULO III: TECNOLOGÍAS DE ENERGÍAS RENOVABLES AFINES AL TRANSPORTE PÚBLICO

En el presente Capítulo III se describe las tecnologías renovables que se han implementado en el transporte masivo urbano descrito en el Capítulo II. Modelos matemáticos de las tecnologías renovables se muestran con la finalidad de facilitar al lector el desarrollo de las simulaciones con el programa RETScreen Expert que se explicarán en el Capítulo IV.

3.1. Energía eólica.

3.1.1. Definición de energía eólica.

La energía eólica es una fuente de energía limpia y renovable. En los últimos años, muchos sistemas de generación de turbinas eólicas (WTGS) se han instalado en muchos países. Además, es de bajo costo en comparación con otros sistemas de generación que utilizan energías renovables. La energía eléctrica generada y las pérdidas en WTGS cambian correspondiente a las variaciones de la velocidad del viento y, en consecuencia, la eficiencia y el factor de capacidad del sistema también cambian. Además, la característica de viento de cada área es diferente y, por lo tanto, el aerogenerador óptimo para cada área es diferente [57].

La potencia mecánica de salida se expresa según Ecuación (1) [57]:

$$P_m = C_p \left(\frac{1}{2} \rho A V^3 \right) = \frac{1}{2} \rho \pi R^2 V^3 C_p \quad (1)$$

donde:

R : Es el radio del aspa de la turbina de viento (m)

V : Es la velocidad del viento (m/s)

ρ : Es la densidad del aire (kg/m^3)

La densidad del aire es una función de la presión del aire y la temperatura del aire, los cuales ambos son funciones de la altura sobre el nivel del mar definido mediante la Ecuación (2) [58], donde:

$$\rho(z) = \frac{\rho_0}{RT} \exp\left(\frac{-gz}{RT}\right) \quad (2)$$

donde:

$\rho(z)$: Es la densidad de aire como una función de la altitud (kg/m^3).

ρ_0 : Es la densidad atmosférica estándar a nivel del mar ($1,225 \text{ kg}/\text{m}^3$).

R : Es la constante específica del gas para el aire ($287,05 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{K}}$).

g : Es la gravedad constante ($9,81 \text{ m}/\text{s}^2$).

T : Es la temperatura (K).

z : Es la altitud sobre el nivel del mar (m).

3.1.2. Recursos eólicos y sus características.

El conocimiento de las características del viento en un sitio en particular es relevante por los siguientes temas [59]:

- **Diseño de sistemas:** Requiere conocimiento del viento promedio representativo condiciones, así como información sobre la naturaleza turbulenta del viento y el viento extremo eventos. Esta información se utiliza en el diseño y selección de una turbina eólica destinada a un sitio en particular.
- **Evaluación del desempeño:** Requiere determinar la productividad energética y rentabilidad de un sistema de energía eólica en particular basado en el recurso eólico.
- **Ubicación:** Los requisitos de ubicación pueden incluir la evaluación o predicción de la conveniencia de emplazamientos candidatos para una o más turbinas eólicas.
- **Operaciones:** Los requisitos de operación incluyen la necesidad de información sobre el recurso eólico que se puede utilizar para la gestión de carga, procedimientos operativos (como arranque y apagado), y la predicción del mantenimiento o la vida útil del sistema [59].

3.1.3. Mecanismos del movimiento del viento.

En uno de los más simples modelos para los mecanismos de movimiento del

viento en la atmósfera, cuatro fuerzas atmosféricas son consideradas:

- Fuerzas de presión.
- La fuerza de Coriolis causada por la rotación de la Tierra.
- Fuerzas inerciales debido al movimiento circular a gran escala, y;
- Fuerzas de fricción con la superficie de la Tierra.

Ver en Figura 20 el patrón mundial de vientos superficiales.

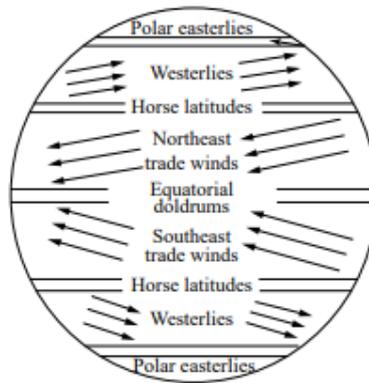


Figura 20: Patrón mundial de vientos superficiales [60].

La fuerza de la presión sobre el aire F_p está dada por la Ecuación (3):

$$F_p = -\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (3)$$

donde:

ρ : Es la densidad del aire.

n : Es la dirección normal a las líneas de presión constante.

Demostración:

$$\text{Si } \partial p = \frac{F_p}{A} \quad \rightarrow \quad F_p = -A \partial p$$

$$\text{Luego } F_p = -\frac{A \partial n}{m} * \frac{\partial P}{\partial n} * m = -\frac{1}{\rho} * \frac{\partial P}{\partial n} * m$$

$$\text{Si } m = 1 \rightarrow F_p = -\frac{1}{\rho} * \frac{\partial P}{\partial n}$$

La fuerza de Coriolis (por unidad de masa) F_c , es una fuerza de fricción causada por mediciones con respecto a un marco de referencia en rotación (la Tierra). Ver la Ecuación (4) y hallando f en Ecuación (5):

$$F_c = fU \quad (4)$$

$$f = 2\omega \text{sen}(\phi) \quad (5)$$

donde:

U : Es la velocidad del viento.

f : Es el parámetro de Coriolis.

ϕ : Es la latitud.

ω : Es la rotación angular de la Tierra.

- a) La magnitud de la F_c depende de la velocidad del viento y de la latitud.
- b) La dirección de la fuerza de Coriolis es perpendicular a la dirección del movimiento del aire.

La resultante de estas dos fuerzas es llamada: viento geostrófico U_g , tiene a ser paralelo a las isóbaras (ver Figura 21).

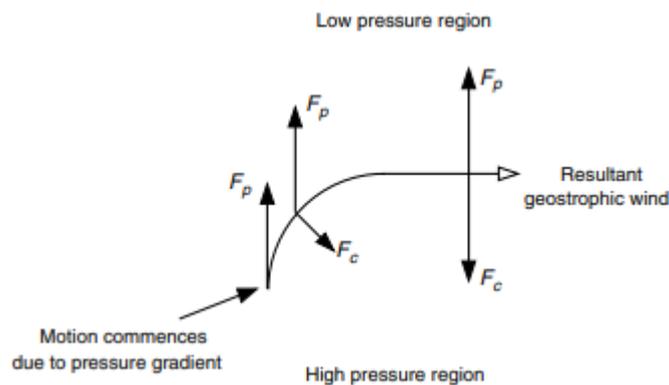


Figura 21: Viento geostrófico: F_p es la fuerza de presión en el aire; F_c es la fuerza de Coriolis [59].

La magnitud del viento geostrófico U_g es una función del balance de fuerzas, ver Ecuación (6):

$$U_g = -\frac{1}{f\rho} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (6)$$

Y que imponen una nueva fuerza sobre el viento: una fuerza centrífuga y el viento resultante se llama: viento gradiente U_{gr} , el cual es paralelo a las isóbaras y es el resultado del balance de fuerzas (Ver Figura 22).

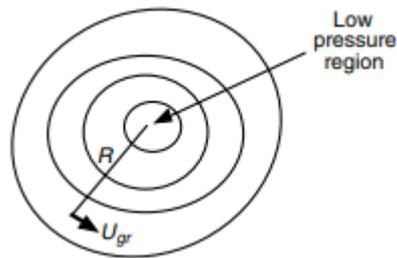


Figura 22: Gradiente de viento U_{gr} ; R, radio de curvatura [59].

3.1.4. Otros patrones de circulación atmosférica.

Variaciones en el tiempo del viento [59].

- a) Interanual.
- b) Anual.
- c) Diario.
- d) Corto tiempo (ráfagas y turbulencias).

Las variaciones de corto plazo generalmente significan variaciones en intervalos de tiempo de 10 minutos o menos. Los promedios de 10 minutos se determinan típicamente usando una frecuencia de muestreo de aprox. 1 segundo [59].

La turbulencia se puede considerar como fluctuaciones aleatorias de la velocidad del viento impuestas sobre la velocidad media del viento y ocurren en tres direcciones: longitudinal (en dirección del viento), lateral (perpendicular al viento promedio) y vertical [59].

Una ráfaga es un evento discreto dentro de un cambio de viento turbulento (Ver Figura 23). Una forma de caracterizar es determinar [59]:

- a) La amplitud.
- b) El tiempo de subida.
- c) Variación máxima de la ráfaga, y;
- d) El tiempo de lapso (lapse time).

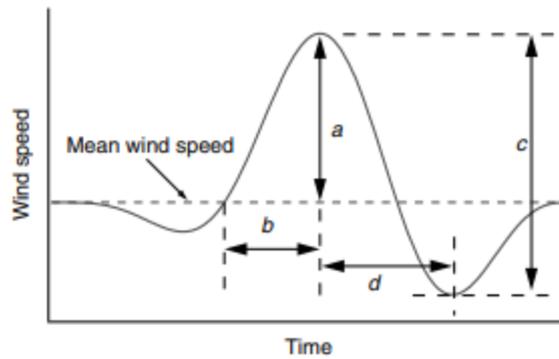


Figura 23: Evento de ráfaga discreta; a, amplitud; b, tiempo de subida; c, variación máxima de la ráfaga; lapso de tiempo d [59].

El flujo de masa de aire dm/dt a través de un disco rotor de área A es Figura 24 y ver Ecuación (7):

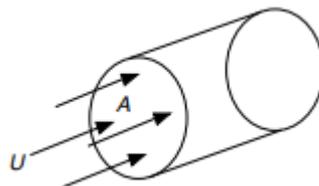


Figura 24: Flujo de aire a través de un disco de rotor; A es el área; U es la velocidad del viento [59].

$$\frac{dm}{dt} = \rho AU \tag{7}$$

La energía cinética por unidad de tiempo o potencia del flujo se define según la Ecuación (8):

$$P = \frac{1}{2} \frac{dm}{dt} U^2 = \frac{1}{2} \rho A U^3 \tag{8}$$

La potencia del viento por unidad de área o densidad de potencia del viento está representada en Ecuación (9):

$$\frac{P}{A} = \frac{1}{2} \rho U^3 \quad (9)$$

La densidad de la energía eólica ρ es proporcional a la densidad del aire. Para condiciones estándar (nivel del mar y 15 °C) la densidad del aire es 1,225 kg/m³.

A continuación se da una tabla de la potencia por unidad de área con viento estable (Ver Tabla 7). Hay que considerar que de ésta potencia disponible, la turbina capta sólo un porcentaje [59].

Tabla 7: Potencia por unidad de área disponible de viento constante (densidad de aire: 1,225 kg/m³) [59]

m/s	W/m ²
0	0
5	80
10	610
15	2 070
20	4 900
25	9 560
30	16 550

La densidad de potencia puede cuidadosamente estimarse, sus promedios horarios U_i están disponibles para un año, entonces la densidad de potencia de viento promedio \bar{P} es la Ecuación (10) [59]:

$$\frac{\bar{P}}{A} = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^3 k_e \quad (10)$$

donde:

\bar{U} : Es la velocidad de viento promedio anual.

k_e : Es el factor de patrón de energía.

$$k_e = \frac{1}{N\bar{U}^3} \sum_{i=1}^N U_i^3 \quad (11)$$

donde N es el número de horas en un año (son 8 760 horas en un año). Ver Ecuación (11).

Una valoración cualitativa del viento es:

$$\begin{aligned}\bar{P}/A < 100 \text{ W/m}^2 &\rightarrow \text{Baja} \\ \bar{P}/A \approx 400 \text{ W/m}^2 &\rightarrow \text{Buena} \\ \bar{P}/A > 700 \text{ W/m}^2 &\rightarrow \text{Grande}\end{aligned}$$

3.1.5. Estimación del recurso viento.

Es importante distinguir entre los diferentes tipos de potencial de energía eólica que se puede estimar a nivel local, regional o mundial. Lo clasificamos en cinco categorías [59]:

- a. **Potencial meteorológico:** Es equivalente al recurso eólico disponible.
- b. **Potencial del sitio:** Esto se basa sobre el potencial meteorológico, pero está restringido a aquellos sitios que son geográficamente disponibles para la producción (generación) de potencia.
- c. **Potencial técnico:** Es calculado desde el potencial del sitio tomando en cuenta la tecnología disponible.
- d. **Potencial económico:** Es el potencial técnico que se puede realizar económicamente.
- e. **Potencial de implementación:** Tiene en cuenta las restricciones e incentivos para evaluar la capacidad en turbinas eólicas que se puede implementar dentro de un cierto tiempo.

3.1.6. Características de la capa límite atmosférica.

- a. Conocida también como capa límite planetaria. Es la parte más baja de la atmósfera y sus características son directamente influenciadas por el contacto con la superficie de la Tierra.
- b. Cantidades físicas tales como la velocidad, temperatura y humedad relativa pueden cambiar rápidamente en espacio y tiempo.

c. **Perfil vertical de la velocidad del viento:** Es la variación de la velocidad del viento con la altura (desde cero a nivel del suelo). Éste es un importante parámetro de diseño porque [59]:

1. Determina directamente la productividad de una turbina de viento sobre una torre de cierta altura.
2. Puede influir fuertemente en la vida útil de un álabe (pala) de rotor de turbina.

d. Densidad y presión atmosférica.

En [59] la fuerza del viento es función de la densidad del aire. Densidad del aire, ρ , esta en función de la temperatura, T , y la presión, p , las cuales varían con la altura. La densidad del aire seco se puede determinar aplicando la ley de los gases ideales, que se puede expresar como Ecuación (12).

$$\rho = \frac{p}{RT} = 3,4837 \frac{p}{T} \quad (12)$$

donde:

ρ : Es la densidad del aire (kg/m^3).

p : Es la presión en kPa (kN/m^2).

T : Es la temperatura (K).

La atmósfera estándar internacional asume que la temperatura y la presión al nivel del mar son 288,15 K y 101,325 kPa, lo que da como resultado una densidad estándar al nivel del mar de 1,225 kg/m^3 . La presión del aire disminuye con la elevación sobre el nivel del mar. La presión en la atmósfera estándar internacional hasta una elevación de 5 000 m es aproximado por la Ecuación (13);

$$p = 101,29 - (0,011837)z + (4,793 \times 10^{-7})z^2 \quad (13)$$

donde:

p : Es la presión atmosférica en kPa (kN/m^2).

z : Es elevación en m.

e. Tasa de caída.

La tasa de caída de la atmósfera se define generalmente como la tasa de cambio de temperatura con altura. Como se mostrará en el siguiente análisis, es más fácil determinar la tasa de lapso calculando el cambio de presión con la altura y usando relaciones de termodinámica convencional. Si la atmósfera se aproxima a seca (no hay vapor de agua en la mezcla) gas ideal, la relación entre un cambio en la presión y un cambio en la elevación de un fluido en un campo gravitacional viene dado por la Ecuación (14) [59]:

$$dp = -\rho g dz \quad (14)$$

donde:

p : Es la presión atmosférica en kPa (kN/m^2).

z : Es elevación sobre el suelo en m.

ρ : Es densidad del aire.

g : Es la aceleración gravitacional local (aquí se asume constante).

El signo negativo resulta de la convención de que la altura, z , se mide positivamente hacia arriba, y que la presión, p , disminuye en la dirección z positiva. La primera ley de la termodinámica para un sistema cerrado de gas ideal de masa unitaria que experimenta el cambio de estado cuasi-estático viene dado por la Ecuación (15) [59]:

$$dq = du + pdv = dh - vdp = c_p dT - \frac{1}{\rho} d\rho \quad (15)$$

donde

T : Es temperatura.

q : Es calor transferido.

u : Es energía interna.

h : Es entalpía.

v : Es volumen específico.

c_p : Es calor específico de presión constante.

Para un proceso adiabático (sin transferencia de calor) $dq = 0$, y la Ecuación (16) se convierte en:

$$c_p dT = \frac{1}{\rho} d\rho \quad (16)$$

La sustitución de dp en la Ecuación (14) y el reordenamiento da la Ecuación (17):

$$\left(\frac{dT}{dz}\right)_{\text{Adiabático}} = g \frac{1}{c_p} \quad (17)$$

Si se supone que los cambios en g y c_p con la elevación son insignificantes, entonces el cambio en la temperatura, en condiciones adiabáticas, es una constante. Utilizando $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ y $c_p = 1,005 \text{ kJ/kg K}$ rinde Ecuación (18):

$$\left(\frac{dT}{dz}\right)_{\text{Adiabático}} = - \frac{0,0098^\circ\text{C}}{m} \quad (18)$$

Por lo tanto, la tasa a la que la temperatura disminuye con un aumento en la altura para un sistema sin calor la transferencia es de aproximadamente 1°C por 100 m y se conoce como la tasa de caída adiabática seca. Usando convencional nomenclatura, la tasa de caída, Γ , se define como el negativo del gradiente de temperatura en el atmósfera. Por lo tanto, la tasa de lapso adiabático seco está dada por la Ecuación (19) [59]:

$$\Gamma = - \left(\frac{dT}{dz}\right)_{\text{Adiabático}} \approx \frac{1^\circ\text{C}}{100 \text{ m}} \quad (19)$$

La tasa de lapso adiabático seco es extremadamente importante en los estudios meteorológicos ya que la comparación de su valor con la tasa de caída real en la atmósfera inferior es una medida de la estabilidad de la atmósfera. Para fines comparativos, la tasa de caída atmosférica estándar internacional, basada en datos meteorológicos, ha sido definida y adoptada. Específicamente, la

temperatura disminuye linealmente con la elevación hasta unos 10 000 m (para la definición propósitos 10,8 km). La temperatura promedio 288 K al nivel del mar y disminuye a 216,7 K a 10,8 km, dando el gradiente de temperatura estándar en la Ecuación (20) [59] .

$$\left(\frac{dT}{dz}\right)_{\text{Estandar}} = \frac{(216,7 - 288)^{\circ}\text{C}}{10\,800\text{ m}} = -\frac{0,0066^{\circ}\text{C}}{\text{m}} \quad (20)$$

Por lo tanto, la tasa de caída estándar, basada en la convención internacional, es de 0,66°C/100m. Los diferentes gradientes de temperatura crean diferentes estados de estabilidad en la atmósfera. La Figura 25 ilustra que los perfiles de temperatura cambian de día a noche debido al calentamiento de la superficie de la tierra. El perfil de temperatura antes del amanecer (la línea continua) disminuye con aumento de la altura cerca del suelo y se invierte después del amanecer (línea discontinua). El aire se calienta cerca el suelo, y el gradiente de temperatura cerca de la superficie de la tierra aumenta con la altura, hasta altura Z_i (llamada altura de inversión). La capa superficial de aire que se extiende hasta Z_i se llama capa convectiva o de mezcla. Por encima de Z_i , el perfil de temperatura se invierte. El concepto de estabilidad atmosférica se ilustra considerando el desplazamiento hacia arriba de un pequeño elemento de aire a una altitud con una presión ambiental más baja. Suponga la tasa estándar de 0,66 °C/100 m. El pequeño elemento de aire que se eleva en este ejemplo se enfriará al secarse [59].

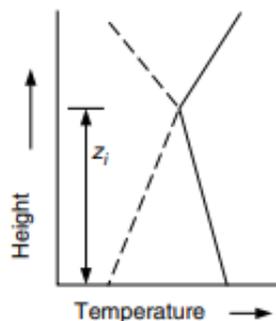


Figura 25: Perfil de temperatura sobre la superficie terrestre, antes (sólido) y después (discontinuo) del amanecer [59] .

Tasa de lapso adiabático (1 °C por 100 m). Si el elemento de prueba de aire

tuviera la misma temperatura que el aire circundante al principio, luego, después de haber sido elevado 100 m, se habría enfriado más rápido que el aire circundante y sería 0,34 °C más frío que su entorno. La muestra sería más denso y tendería a volver a su nivel original. Este estado atmosférico se llama estable. Para generalizar, cualquier atmósfera cuyo dT/dz sea mayor que $(dT/dz)_{Adiabático}$ es estable. Cabe señalar que la tasa de caída internacional estándar rara vez ocurre en la naturaleza. Esto explica la necesidad de realizar sondeos diarios de globos en los principales aeropuertos del mundo para determinar la tasa de lapso real. Además, para tener estabilidad, no es necesario realizar una inversión (aumentar de temperatura con altura) para existir. Cuando uno existe, sin embargo, la atmósfera es más estable [59].

f. Perfil vertical.

1. Perfil logarítmico:

La Ecuación (21) se conoce como perfil de viento logarítmico.

$$U_{(z)} = \frac{U^*}{k} \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) \quad (21)$$

La Ecuación (22) se conoce como la velocidad de fricción.

$$U^* = \sqrt{\frac{\tau_o}{\rho}} \quad (22)$$

donde:

z_0 : Es la longitud de rugosidad de superficie.

τ_o : Es el valor superficial del esfuerzo de corte.

ρ : Es la densidad.

k : Es la constante de Von Karman (con valor 0,4).

2. Perfil con ley de potencias:

La ley de potencia representa un modelo simple para el perfil de velocidad del viento vertical. Su forma básica es la Ecuación (23):

$$\frac{U_{(z)}}{U_{(z_r)}} = \left[\frac{z}{z_r} \right]^\alpha \quad (23)$$

donde:

$U_{(z)}$: Es la velocidad del viento a la altura z .

$U_{(z_r)}$: Es la velocidad del viento referencial a la altura z_r .

α : Es el exponente de la ley de potencia.

Algunos de los métodos empíricos más populares para determinar el exponente de la ley de potencias son:

Correlación para el exponente de la ley de potencia como función de la velocidad y la altura.

Justus (1978) propuso una forma de manejar este tipo de variación. Su expresión tiene la forma en la Ecuación (24) [59]:

$$\alpha = \frac{0,37 - 0,088 \ln(U_{ref})}{1 - 0,088 \ln\left(\frac{Z_{ref}}{10}\right)} \quad (24)$$

donde:

U_{ref} [m/s] : Es velocidad de viento referencial.

Z_{ref} [m] : Es rugosidad de superficie referencial.

Correlación dependiente de la rugosidad de la superficie.

Counihan (1975) propuso la siguiente forma, ver Ecuación (25) para este tipo de correlación [59]:

$$\alpha = 0,096 \log_{10} Z_0 + 0,016(\log_{10} Z_0)^2 + 0,24 \quad (25)$$

Para $0,001 \text{ m} < Z_0 < 10 \text{ m}$, donde Z_0 representa la rugosidad superficial.

3.1.7. Métodos directos de los análisis de datos, caracterización del recurso y productividad de turbina- Uso directo de datos.

Si se tiene una serie de N observaciones de velocidad de viento U_i que es el promedio sobre un intervalo de tiempo Δt . Se puede calcular los siguientes parámetros [59]:

La velocidad media del viento a largo plazo \bar{U} sobre el periodo total de datos recolectados, en Ecuación (26).

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i \quad (26)$$

La desviación estándar de la velocidad de viento promedio individual en Ecuación (27).

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (U_i - \bar{U})^2}$$
$$\sigma_U = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N U_i^2 - N\bar{U}^2} \quad (27)$$

La densidad de potencia de viento promedio \bar{P}/A dado por unidad de área en Ecuación (28).

$$\frac{\bar{P}}{A} = \left(\frac{1}{2}\right) \rho \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i^3 \quad (28)$$

Similarmente, la densidad de energía de viento por unidad de área para un periodo para un periodo de tiempo de extensión $N\Delta t$ es la Ecuación (29) :

$$\frac{\bar{E}}{A} = \frac{1}{2} \rho \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N U_i^3$$

$$\frac{\bar{E}}{A} = \frac{\bar{P}}{A} (N\Delta t) \quad (29)$$

La potencia promedio de la máquina de viento \bar{P}_w es la Ecuación (30), donde: $P_w(U_i)$ es la potencia de salida definida por la curva característica del aerogenerador.

$$\bar{P}_w = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N P_w(U_i) \quad (30)$$

La energía desde la máquina de viento E_w es la Ecuación (31):

$$E_w = \sum_{i=1}^N P_w(U_i) \Delta t \quad (31)$$

3.1.8. Métodos directos de los análisis de datos, caracterización del recurso y productividad de turbina- Método de Bins.

El método de Bins también proporciona una forma de resumir los datos del viento y determinar productividad de la turbina. Los datos primero deben ser separados dentro de intervalos de velocidad de viento o bins (lo más conveniente es un mismo tamaño de bins) [59].

Suponer que los datos son separados por N_B bins de ancho w_j con punto medio m_j y con f_j el número de ocurrencias en cada bin o frecuencia tal que en Ecuación (32):

$$N = \sum_{j=1}^{N_B} f_j \quad (32)$$

Los valores encontrados a partir de las Ecuaciones (26) - (28), (30) y (31) se pueden determinar a partir de lo siguiente:

$$\bar{U} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_B} m_j f_j \quad (33)$$

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N_B} m_j^2 f_j - N \bar{U}^2} \quad (34)$$

$$\sigma_U = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N_B} m_j^2 f_j - N \left(\frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_B} m_j f_j \right)^2} \quad (35)$$

$$\bar{P}/A = \frac{1}{2} \rho \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_B} m_j^3 f_j \quad (36)$$

$$\bar{P}_W = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^{N_B} P_W m_j f_j \quad (37)$$

$$E_W = \sum_{j=1}^{N_B} P_W (m_j) f_j \Delta t \quad (38)$$

3.1.9. Análisis estadístico de datos de viento.

a) Se tiene la función de distribución acumulativa F_U y la función de densidad de probabilidad $\rho_{(u)}$ [83].

b) Reglas:

El área total bajo la curva de la función de densidad de la probabilidad es representada en la Ecuación (39):

$$\int_0^{\infty} \rho_{(U)} dU = 1 \quad (39)$$

La función de densidad de probabilidad puede ser utilizada para expresar la probabilidad de que ocurra una velocidad del viento entre U_a y U_b , representada en la Ecuación (40):

$$\rho(U_a \leq U \leq U_b) = \int_{U_a}^{U_b} \rho(U) dU \quad (40)$$

Velocidad media del viento \bar{U} en la Ecuación (41) :

$$\bar{U} = \int_0^{\infty} U \rho(U) dU \quad (41)$$

Desviación estándar de la velocidad del viento σ_U en la Ecuación (42):

$$\sigma_U = \sqrt{\int_0^{\infty} (U - \bar{U})^2 \rho(U) dU} \quad (42)$$

Densidad media de energía eólica disponible \bar{P}/A en la Ecuación (43):

$$\bar{P}/A = \frac{1}{2} \rho \int_0^{\infty} U^3 \rho(U) dU = \frac{1}{2} \rho \bar{U}^3 \quad (43)$$

c) Distribución de Rayleigh:

Ésta es la distribución de probabilidad de velocidad más simple para representar el recurso eólico. Solo se requiere conocer \bar{U} . La función de densidad de probabilidad en Ecuación (44) y la función de distribución acumulativa en Ecuación (45) viene dada por [59]:

$$\rho(U) = \frac{\pi}{2} \left(\frac{U}{\bar{U}^2} \right) \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{U}{\bar{U}} \right)^2 \right] \quad (44)$$

$$F(U) = 1 - \exp \left[-\frac{\pi}{4} \left(\frac{U}{\bar{U}} \right)^2 \right] \quad (45)$$

d) Distribución de Weibull.

Requiere conocer dos parámetros.

k : Es factor de forma y

c : Es factor de escala.

Ambos parámetros son funciones de \bar{U} y σ_U . La función de densidad de probabilidad de Weibull en Ecuación (46) y la función de distribución acumulativa en Ecuación (47) vienen dadas por [59]:

$$\rho(U) = \frac{k}{c} \left(\frac{U}{c}\right)^{k-1} \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right] \quad (46)$$

$$F(U) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{U}{c}\right)^k\right] \quad (47)$$

Usando la Ecuación (48) para la distribución de Weibull, es posible determinar el promedio de velocidad de la siguiente manera:

$$\bar{U} = c \Gamma\left(1 + \frac{1}{k}\right) \quad (48)$$

donde:

$$\Gamma_{(x)} = \text{función gamma} = \int_0^{\infty} e^{-t} t^{x-1} dt$$

La función gamma puede aproximarse mediante (Jamil, 1994), en Ecuación (49) [59]:

$$\Gamma_{(x)} = (\sqrt{2\pi x})(x^{x-1})(e^{-x})\left(1 + \frac{1}{12x} + \frac{1}{288x^2} - \frac{139}{51840x^3} + \dots\right) \quad (49)$$

También se puede demostrar que para la distribución de Weibull usando la Ecuación (50) :

$$\sigma_U^2 = \bar{U}^2 \left[\frac{\Gamma(1 + 2/k)}{\Gamma^2(1 + 2/k)} - 1 \right] \quad (50)$$

No es un proceso sencillo obtener c y k en términos de \bar{U} y σ_U . Sin embargo, hay una serie de aproximaciones que se pueden utilizar. Por ejemplo [59]:

i) Analítica / empírica (Justus, 1978). En la Ecuación (51):

$$\text{Para } 1 < k < 10 \rightarrow k = \left(\frac{\sigma_U}{\bar{U}} \right)^{-1,086} \wedge c = \frac{\bar{U}}{\Gamma(1+1/k)} \quad (51)$$

ii) Empírica (Lysen, 1983). En la Ecuación (52):

$$\text{Si } k = \left(\frac{\sigma_U}{\bar{U}} \right)^{-1,086} \rightarrow c \text{ se puede calcular como:}$$

$$\frac{c}{\bar{U}} = (0,568 + 0,433/k)^{-1/k} \quad (52)$$

iii) Gráfica: Gráfico logarítmico-logarítmico (Rohatgi y Nelson, 1994).

En la Ecuación (53):

$$\bar{U}^3 = \int_0^{\infty} U^3 p(U) dU = c^3 \Gamma(1 + 3/k) \quad (53)$$

3.1.10. Velocidad de viento extrema.

- a) Es la más alta velocidad esperada sobre un periodo de tiempo, relativamente largo [83].
- b) Vientos extremos son normalmente descritos en términos de periodos de recurrencia son totalmente específicamente un viento externo es el valor de la más alta velocidad del viento promedio sobre algún intervalo de tiempo apropiado con una probabilidad anual de recurrencia de $1/N$ años.
- c) Requiere mediciones sobre un largo periodo de tiempo.
- d) La función de densidad de probabilidad para la distribución de Gumbel, se describe en la Ecuación (54) :

$$p(U_e) = \frac{1}{\beta} \exp\left(\frac{-(U_e - \mu)}{\beta}\right) \exp\left(-\exp\left(\frac{-(U_e - \mu)}{\beta}\right)\right) \quad (54)$$

donde:

U_e : Es viento extremo dentro de un período de tiempo aún no especificado.

$$\beta = \sigma_e \sqrt{6}/\pi$$

$$\mu = \bar{U}_e - 0,577\beta$$

\bar{U}_e : Es la media de un conjunto de valores extremos

σ_e : Es la desviación estándar de ese conjunto

Y la función de distribución acumulativa en Ecuación (55).

$$F_{(U_e)} = \exp\left(-\exp\left(\frac{-(U_e - \mu)}{\beta}\right)\right) \quad (55)$$

3.2. Energía solar fotovoltaica.

Varias importantes magnitudes: irradiancia espectral, irradiancia y radiación son definidas a continuación [61]:

- a. **Irradiancia espectral I_λ** .- Potencia recibida por unidad de área superficial en un diferencial de longitud de onda $d\lambda$, las unidades son $W/m^2\mu m$.
- b. **Irradiancia.**- La integral de la irradiancia espectral extendida a lo largo de la todas las longitudes de onda de interés. Las unidades son W/m^2 .
- c. **Radiación.**- Es la integral de la irradiación extendida sobre un período dado de tiempo, por consiguiente, las unidades de radiación son unidades de energía. Es común encontrar datos de radiación en J/m^2 -day, si un día es usado como período de integración, o más frecuentemente la energía está dado en kWh/m^2 -day, kWh/m^2 -mes ó kWh/m^2 -año dependiendo del tiempo usado para la integración de la irradiancia [61]

La radiación del Sol puede también aproximarse a la radiación de un cuerpo negro a 5 900 K. La Ley de Planck da el valor de la emisividad espectral E_λ , definido como la potencia radiada por unidad de área y por unidad de longitud de onda, como la Ecuación (56) [61]:

$$E_\lambda = \frac{2\pi h C_0^2}{\lambda^5 \left(e^{\frac{hc_0}{\lambda k T}} - 1 \right)} \left[\frac{W}{m^3} \right] \quad (56)$$

donde h es la constante de Planck ($h = 6,63 \times 10^{-34} J \cdot s$), y:

$$2\pi h C_0^2 = 3,74 \times 10^{-16} \quad W \, m^2 \quad (57)$$

$$\frac{hc_0}{k} = 0,0143 \quad m \, K \quad (58)$$

Son la primera (57) y segunda (58) constante de radiación de Planck.

El total de la energía radiada por unidad de área de un cuerpo negro para todos los valores de longitudes de onda está dado por la Ecuación (59) [61]:

$$\int_0^\infty E_\lambda \, d\lambda = \sigma T^4 = 5,66 \times 10^{-8} T^4 \left[\frac{W}{m^2} \right] \quad (59)$$

con la temperatura T en grados Kelvin.

Asumiendo que el cuerpo negro irradia isotrópicamente, la irradiancia espectral que se recibe desde el sol a una unidad astronómica de distancia (1 AU) puede ser descrito por la Ecuación (60) [61], donde S es la constante solar.

$$I_\lambda = E_\lambda \frac{S}{\int_0^\infty E_\lambda \, d\lambda} \quad (60)$$

Finalmente, I_λ puede escrito mediante la Ecuación (61) [61];

$$I_{\lambda} = \frac{8,925 \times 10^{-12}}{\lambda^5 \left[e^{\frac{0,0143}{\lambda T}} - 1 \right] T^4} \left[\frac{W}{m^2 \mu m} \right] \quad (61)$$

El nombre dado a estos espectros del Sol estándar viene de Air Mass (AM) y de un número el cual es 0 para el espectro fuera de la atmósfera terrestre y 1,5 para el espectro a nivel de piso. En general, se puede definir un espectro AM x con x dado por la Ecuación (62) [61], donde θ_z es el ángulo zenith del Sol [61].

$$x = \frac{1}{\cos \theta_z} \quad (62)$$

Cuando el Sol está localizado en el zenith del área receptora ($x = 1$), lo que genera que un espectro AM1 sea el espectro recibido a nivel de piso en un día claro con el Sol en el zenith. Pero es generalmente aceptado un espectro terrestre más realista para uso general y de referencia, el cual proviene de un ángulo zenith de 48,19 (el cual es equivalente a $x = 1,5$). El espectro recibido por una superficie inclinada 37° y de cara al Sol es llamado un espectro (global-tilt) y el valor de sus datos, son comúnmente usados en ingeniería PV [61].

La total irradiancia recibida por m² de una superficie normal a los rayos del Sol fuera de la atmósfera a una distancia igual a una unidad astronómica es llamada la Constante Solar S y su valor es la integral de la irradiancia espectral del AM0 [61].

Las células solares son hechas de un material semiconductor donde los siguientes principales fenómenos ocurren, cuando es expuesta a la luz: reflexión de fotones, absorción de fotones, generación de portadores libres de carga en el semiconductor, migración de la carga y finalmente separación de cargas por medio de un campo eléctrico. Las principales propiedades del semiconductor condicionan como efectivamente éste proceso es realizado en una célula solar fotovoltaica. Entre las propiedades más importantes tenemos [61]:

- El coeficiente de absorción α , el cual depende del valor de la banda prohibida del semiconductor y la naturaleza (directa o indirecta) de la banda prohibida.

- Reflectancia de la superficie del semiconductor, el cual depende del acabado de la superficie.

El coeficiente de absorción α depende del material del semiconductor usado y su valor es ampliamente disponible y tiene una enorme importancia en el diseño de células solares debido a que los fotones son absorbidos de acuerdo a la Ley de Lambert's (ver la Ecuación (63)) [61]:

$$\phi(x) = \phi(0)e^{-\alpha x} \quad (63)$$

Si el valor de α es alto, los fotones son absorbidos en una corta distancia desde la superficie, mientras si el valor de α es pequeño, los fotones pueden viajar mayores distancias dentro del material. En el caso extremo donde el valor de α es cero, los fotones pueden complemente atravesar el material, en éste caso se dice que el material es transparente en una particular longitud de onda [61].

Para mejorar éste confinamiento de fotones y la mayor eficiencia posible de las células solares, se ha recurrido a nuevos materiales y/o métodos de confinamiento que permiten lograr longitudes de trayectoria cada vez más optimizadas en costo, tiempo de producción y eficiencia [61].

Una célula solar tiene una curva característica de densidad de corriente vs voltaje, y está determinada por la Ecuación (64), en la que se escribe a la célula solar por la superposición de la respuesta del dispositivo a dos excitaciones: voltaje y luz [61].

$$J = J_{SC} - J_o \left(e^{\frac{v}{v_T}} - 1 \right) \quad (64)$$

En donde: J_{SC} es la densidad de corriente espectral de cortocircuito en A/cm^2 , J_o es conocido como densidad de corriente de saturación en A/cm^2 , v es el voltaje en los electrodos de la célula solar y v_T es el voltaje térmico de la célula solar, definido según la Ecuación (65) [61]:

$$v_T = \frac{kT}{q} \quad (65)$$

donde k es la constante de Boltzmann, q es la carga eléctrica del electrón y T es la temperatura absoluta de la célula solar; en donde, luego de reemplazar los valores de las constantes y de expresar la temperatura en grados Celsius queda expresada en la Ecuación (66) [61]:

$$v_T = 0,081615(t + 273,18) \text{ [mV]} \quad (66)$$

donde:

t : Es la temperatura en grados Celsius.

v_T : Está dado en milivoltios.

Según [61] para una célula solar con línea de base de silicio se tiene que $J_o = 1 \times 10^{-12} \text{ A/cm}^2$ y $J_{SC} = 31,188 \times 10^{-3} \text{ A/cm}^2$, de lo cual resulta la curva característica de V-J.

En la Ecuación (67) valor de la corriente generada por la célula solar está dada por [61]:

$$I = I_{SC} - I_o \left(e^{\frac{v}{v_T}} - 1 \right) \quad (67)$$

donde I_{SC} y I_o se relacionan con sus respectivas densidades de corriente J_{SC} y J_o como sigue [61], ver Ecuación (68) y (69):

$$I_{SC} = A J_{SC} \quad (68)$$

$$I_o = A J_o \quad (69)$$

La potencia de salida de una célula solar es el producto de la corriente de salida que fluye hacia la carga eléctrica y el voltaje generado entre los extremos de la célula. Es generalmente considerado que un signo positivo indica que potencia va hacia la carga y un signo negativo indica que la potencia viene del usuario y pasa a través de la célula solar. En la Ecuación (70) teniendo en cuenta estas definiciones de signo, la potencia para cualquier punto de la curva característica está dada por [61]:

$$P = V \times I = V \left[I_L - I_o \left(e^{\frac{v}{v_T}} - 1 \right) \right] \quad (70)$$

El modelo lineal basado en la irradiación solar y la temperatura de la célula es también adoptado en este estudio. La temperatura del medio ambiente es usada como una referencia para la temperatura del panel. La generación de potencia de la célula fotovoltaica puede ser usando la Ecuación (71) [62],

$$P_{PV} = P_{STC} \frac{G_{ING}}{G_{STC}} [1 - k (T_c - T_r)] \quad (71)$$

donde:

P_{PV} : Es la potencia generada por el panel solar fotovoltaico.

P_{STC} : Es la potencia nominal del panel solar fotovoltaico en condiciones de prueba estándar.

G_{ING} : Es la irradiancia solar instantánea.

G_{STC} : Es la irradiancia solar en condiciones de prueba estándar.

k : Es el coeficiente de temperatura del Si con que se fabrica la célula fotovoltaica.

T_r : Es la temperatura referencial de la célula.

T_c : Es la temperatura de la célula en condiciones de prueba estándar.

3.3. Almacenamiento eléctrico.

El almacenamiento de energía electroquímica crecerá drásticamente si la tecnología se puede mejorar lo suficiente, sus costos pueden reducirse o se pueden encontrar formas novedosas de utilizarlo. La fuerza impulsora es el inexorable aumento de la electricidad en la vida moderna [63]. Las baterías de litio se pueden clasificar por el material del ánodo (metal de litio, litio intercalado) y el sistema de electrolitos (líquido, polímero). Las baterías recargables de iones de litio (celdas secundarias) que contienen un electrodo negativo de intercalación no deben confundirse con las baterías primarias de litio no recargables (que contienen litio metálico). El rendimiento superior de las baterías de iones de litio (en Figura 26, la densidad de energía significa la cantidad de energía eléctrica almacenada por unidad de volumen de material. La energía específica se refiere

al peso unitario del material) las ha convertido en la principal fuente de energía para aplicaciones portátiles. También ofrecen atractivas ventajas de rendimiento para aplicaciones de energía automotriz y de reserva. Sin embargo, los ánodos de metal de litio plantean problemas de estabilidad y seguridad [63].

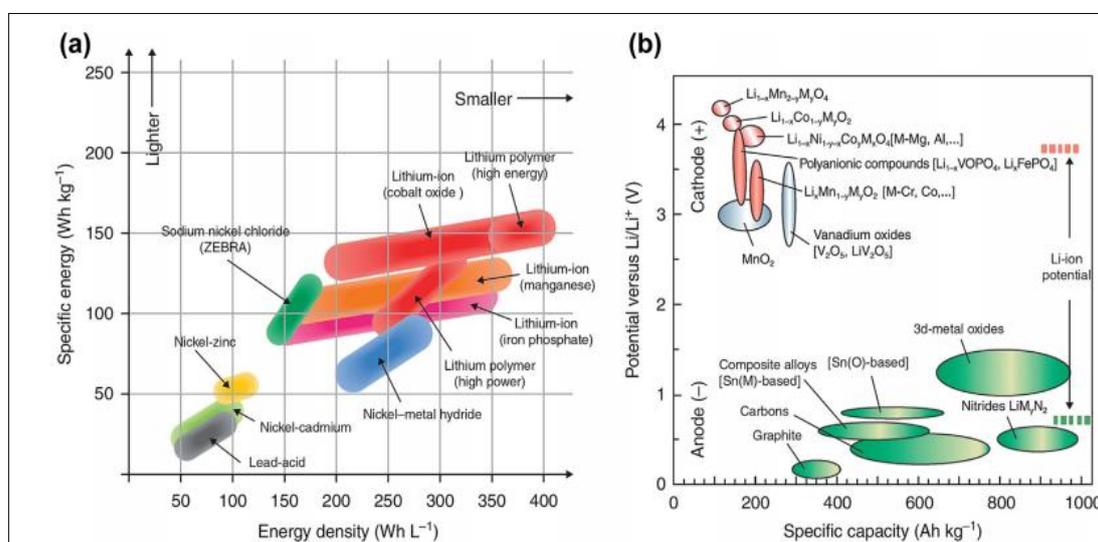


Figura 26: (a) Energía específica (en $Wh\ kg^{-1}$) y densidad de energía (en $Wh\ l^{-1}$) de diferentes tecnologías de baterías. (b) Diagrama de voltaje vs. capacidad para baterías de litio recargables basadas en diferentes materiales [64].

¿Qué es almacenamiento de energía?

El almacenamiento de energía media entre fuentes variables y cargas variables. Sin almacenamiento, la generación de energía puede ser igual al consumo de energía. El almacenamiento de energía trabaja movilizandoo energía a través del tiempo. La generación de energía en un tiempo puede ser usada en otro tiempo a través del almacenamiento [64].

Las baterías son usadas para el suministro de electricidad para cargas durante períodos de alta demanda y para absorber el exceso de electricidad desde generadores durante períodos de baja demanda para venderlo después. El primer sistema de almacenamiento de electricidad de gran escala de los Estados Unidos de América (EUA) fue de 31 MW de almacenamiento de bombeo en 1929 en la Planta Connecticut-Light & Power Rocky River. Hacia el 2011, 2,2 % de la electricidad es almacenada alrededor del mundo, usualmente en almacenamiento de bombeo [64].

En [64] menciona que un sistema de almacenamiento de electricidad (SAE) completo (que puede ser conectado a la red eléctrica u operador como un sistema aislado) comprende dos mayores subcomponentes: almacenamiento y la electrónica de conversión de potencia. Estos subsistemas son suplementados por otras componentes de balanceo de planta que incluye sistemas de control y de monitoreo que son esenciales para mantener la salud y la seguridad del sistema entero. Estos componentes de balanceo de planta incluye la construcción u otros sistemas encerrados, una miscelánea de interruptores, y hardware conectado a la red o a la carga usuaria. Un representación esquemática de un SEA completo se muestra en Figura 27 con un dispositivo de almacenamiento general que representa una fuente de almacenamiento de corriente continua (DC), tal como una batería o una volante de inercia [64].

En sistemas de almacenamiento de baterías y de volantes de inercia, los sistemas de conversión de potencia (SCP) es un dispositivo bidireccional que permite a la DC fluir a la carga después de ser convertida en corriente alterna (AC) y permite a la AC fluir en una dirección inversa después de su conversión a DC a cargar la batería o hacia la volante de inercia. Los subsistemas de monitoreo y control puede no ser cajas discretas, como se muestra en la Figura 27, pero también puede ser integrados dentro de su propio SCP [64].

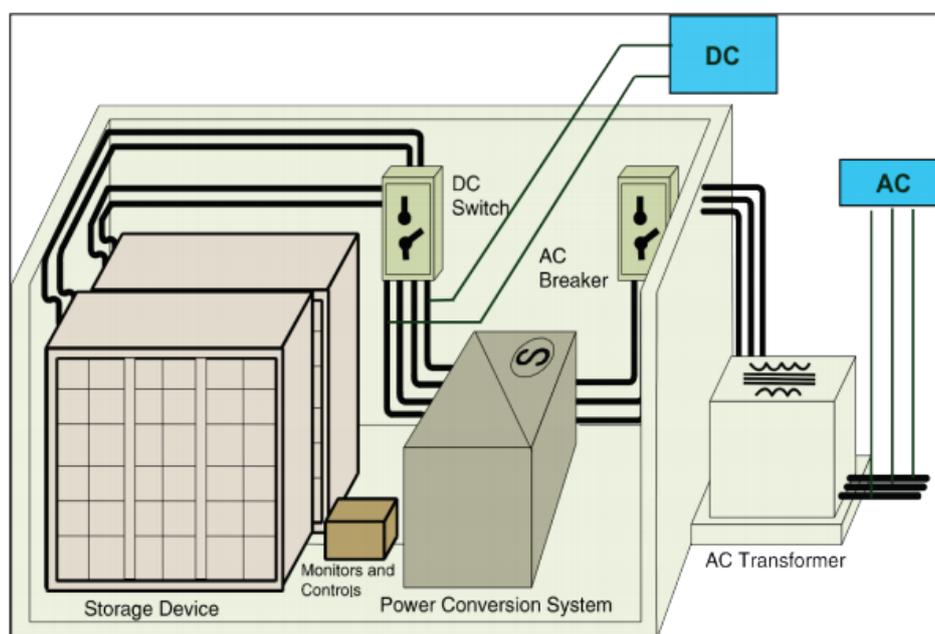


Figura 27: Esquema de un sistema de almacenamiento de energía por batería [64].

Los sistemas de almacenamiento de aire comprimido (SAAC) involucran aire a altas presiones en cavernas subterráneas o recipientes de almacenamiento sobre tierra (por ejemplo, tuberías de alta presión o tanques). En el almacenamiento de energía hidroeléctrica bombeada (AEHB), la energía es almacenada por bombeo de agua se eleva hacia un reservorio a una elevación más alta que el reservorio más bajo del sistema [64].

3.3.1. Servicios y beneficios del almacenamiento de electricidad.

Dos reportes de Sandia National Laboratories (SNL) a inicios de los 90's identificó y describió 13 servicios que estas emergentes tecnologías de almacenamiento puede proveer. Un más reciente reporte expande el rango de los servicios a la red y provee significativamente más detalles sobre 17 servicios y guías sobre estimación de los beneficios que dan estos servicios. Otros trabajos tienen también documentado casos de uso y servicios que el almacenamiento provee a la red. Más notablemente, el Smart Grid Resource Center Use Case Repository de EPRI contiene unos 130 documentos que discuten varios aspectos del almacenamiento. Similarmente, California Independent System Operator (CAISO) también describe ocho escenarios suplementados por diagramas de actividad para demostrar el uso del almacenamiento para operaciones y control de la red. En la presente tesis se tiene en consideración 18 servicios y aplicaciones en cinco grupos detallados en la Tabla 8 [64].

Tabla 8: Clasificación de servicios de almacenamiento de energía para la red eléctrica [64].

Servicios de energía a granel	
	Energía eléctrica según cambio de tiempo.
	Capacidad de suministro eléctrico.
Servicios auxiliares	
	Regulación.
	Reservas rotantes, no rotantes y suplementales.
	Soporte de voltaje.
	Black start.
	Otros usos relacionados.
Servicios a infraestructura de transmisión.	
	Aplazamiento de la actuación de la transmisión.
	Alivio de la congestión de la transmisión.
Servicios a infraestructura de distribución.	
	Aplazamiento de la actuación de la distribución.

	Soporte de voltaje.
	Servicios a la gestión de energía del usuario.
	Calidad de la energía.
	Fiabilidad de la energía.
	Turno de tiempo de energía eléctrica de minorista.
	Gestión al cambio de la demanda.

CAPÍTULO IV: DESARROLLO DEL PROCESO DE SIMULACIÓN

Se realizarán las simulaciones con el programa RETScreen Expert de implementación de tecnologías de energías renovables en el transporte público masivo con la finalidad de evaluar la viabilidad técnica-económica y la emisión de GEI, según tres escenarios de estudio. Además se realiza la simulación de la planta solar fotovoltaica “Rubí” ubicado en Moquegua.

4.1. Metodología.

La metodología a realizar durante el desarrollo de la presente tesis se basa en la recopilación de información, simulaciones, análisis y discusión de experiencias de implementación de energías renovables en transporte masivo (en específico trenes) con la finalidad de poder aplicar el uso de las energías renovables en los trenes Alstom Metrópolis 9000 de Lima a través del programa RETScreen Expert.

Paso 1: Recopilación de Información.

Se hará recopilación de información tanto en la academia como en la industria y las instituciones normativas, regulatorias y supervisoras. En la academia se hará desde lo que se tiene de información accesible en tesis, artículos, reportes a nivel nacional, y luego de manera similar en el mundo hispano y a nivel internacional. En la industria, los diferentes fabricantes y empresas a cargo de sistemas de transporte masivo que en ánimos de dar a conocer sus prestaciones, han dejado disponible información en congresos, eventos de difusión e Internet sobre sus experiencias e implementaciones. También se busca identificar países que aplicaron mejoras en la gestión o proceso de atención a los usuarios, en los metros (trenes) con la finalidad de atender la demanda de los usuarios y amortiguar las consecuencias del tráfico. Las instituciones normativas en diferentes países exigen el cumplimiento de criterios de diseño, seguridad y funcionamiento que se hace interesante conocer; así mismo las que regulan y supervisan el adecuado funcionamiento de los mismos.

Paso 2: Simulación.

Según la información disponible se procederá a simular los datos obtenidos mediante

software comercial y/o libre (según disponibilidad). Esto conllevará a comprender mejor las implementaciones realizadas y la información reportada en los diferentes medios citados en el Paso 1 con la finalidad de poder determinar si es viable técnica y económicamente, ejecutar un proyecto de energías renovables en la ubicación seleccionada.

Paso 3: Análisis y Discusión.

Se comparará las diferentes tecnologías y costos (según disponibilidad de información). Así mismo, se hará una o más propuestas de implementación en lugares donde potencialmente puede haber la necesidad de un sistema de transporte masivo con energías renovables. También se realizará la simulación de la planta solar fotovoltaica Rubí ubicada en Moquegua - Perú, con la finalidad de demostrar la aplicación del software RETScreen.

4.2. Análisis técnico - económico RETScreen Expert.

Para realizar el análisis técnico-económico (de factibilidad) del uso de las tecnologías de energías renovables (solar fotovoltaica y eólica) se procedió a utilizar el programa RETScreen Expert considerando los siguientes escenarios:

- Escenario 1: Planta eólica.
- Escenario 2: Planta solar fotovoltaica.
- Escenario 3: Planta eólica y solar fotovoltaica.

Se procedió a seleccionar la ubicación de instalación de la planta con energías renovables.

Como primera alternativa se selecciona los Humedales de Mamacona, cuya ubicación se muestra en Figura 28.



Figura 28: Ubicación de Humedales de Mamacona.

4.2.1. Escenario 1: Planta eólica.

Para el presente escenario se ha considerado 4 aerogeneradores con una potencia nominal de 1 MW por aerogenerador, que permiten obtener 4 MW en la planta eólica. Los aerogeneradores son del fabricante Vestas modelo NEDWIND NW55/2/1000-240-70m. Se considera 1 266 US\$/ kW como costo inicial según el Anexo 6, también los costos de operación y

mantenimiento de las instalaciones eólicas en áreas terrestres son 46 US\$/kW-año [65]. Para el factor de carga se considera 30 % según el Anexo 7. (Ver Figura 29).

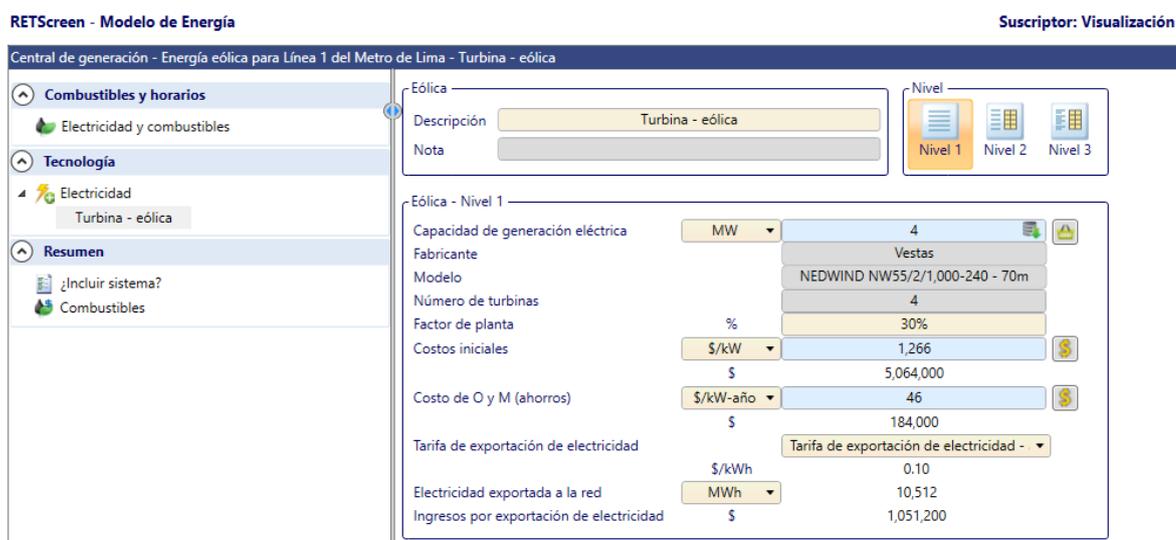


Figura 29: Características nominales y de costos del aerogenerador.

Realizando el análisis de emisión de GEI en el escenario 1, se obtiene una reducción de 3 125,9 T de CO₂ que equivale a 1 343 133,4 litros de gasol. (Ver Figura 30).

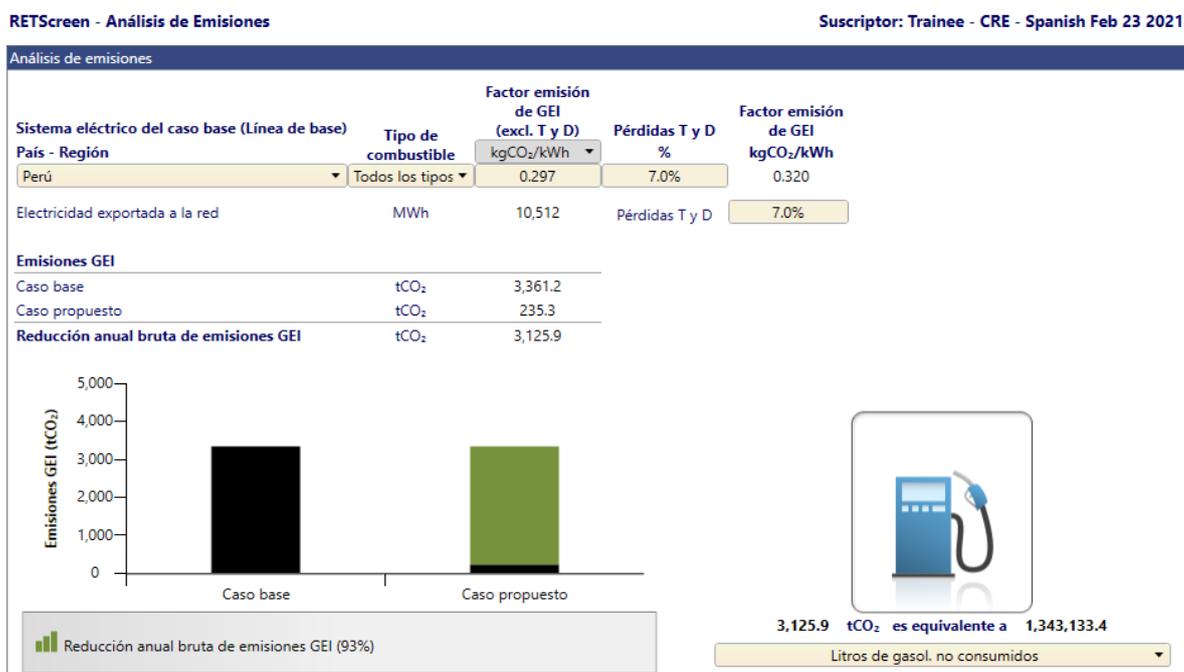


Figura 30: Análisis de emisión de GEI en planta de aerogeneradores.

Y del análisis económico se obtiene que el retorno de inversión suceda en el año 4, lo cual confirma que es una opción a considerar como propuesta de aplicación de la tecnología renovable, porque es un tiempo de retorno de inversión corto (ver Figura 31).

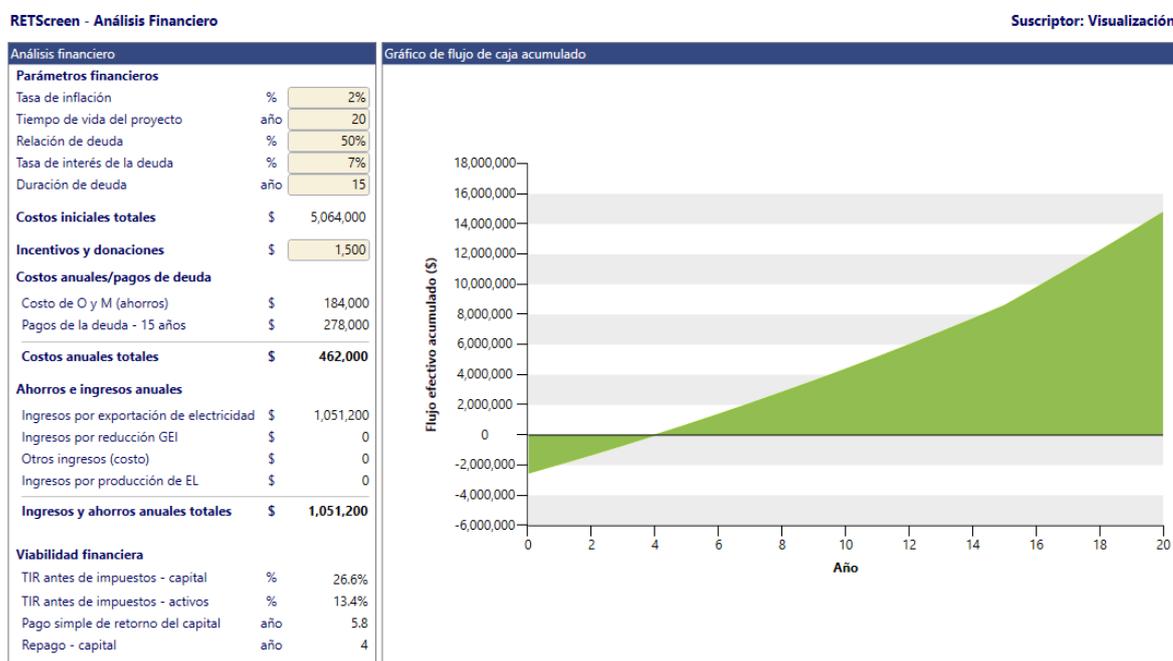


Figura 31: Análisis económico con planta de aerogeneradores.

Aplicando el software RETScreen Expert con una relación de deuda del 50 %, se puede obtener el retorno de la inversión a partir del año 4.

4.2.2. Escenario 2: Planta solar fotovoltaica.

Para el escenario 2 se considera 12 500 unidades de paneles solares fotovoltaicos de Mono-Si de 320 W, que permiten obtener 4 MW, del fabricante Sunpower con el modelo mono-Si - SPR-320E-WHT, según Anexo 6 se considera 871 US\$/ kW como costos iniciales, también los costes de operación y mantenimiento de las centrales fotovoltaicas con 25 US\$/ kW-año [65]. Para el factor de carga se considera 30 % según el Anexo 7. Ver mayor detalle de las características en la Figura 32 y Figura 33.

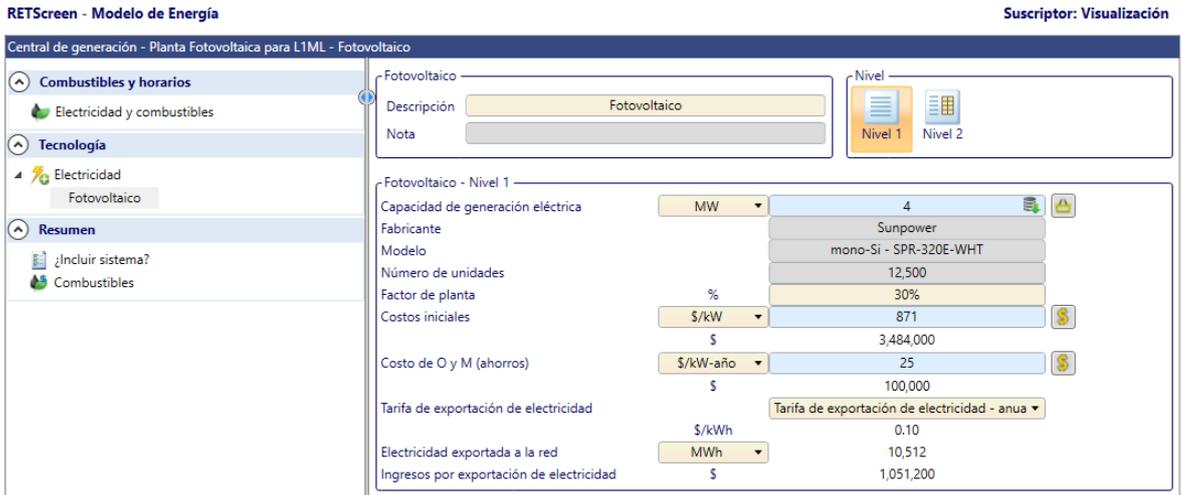


Figura 32: Características de panel solar fotovoltaico.

En el software RETScreen Expert podemos encontrar las marcas comerciales y sus respectivos modelos, para este escenario se optó por módulos fotovoltaicos tipo monocristalinos y con potencia de 320 W. (Ver la Figura 33).

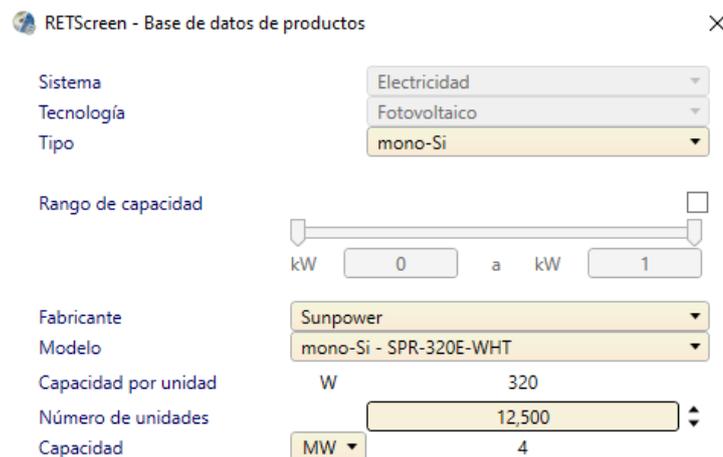


Figura 33: Selección de panel solar fotovoltaico.

Realizando el análisis de la cantidad de emisión de GEI que se generan en el escenario 2, se obtiene una reducción de 3 125,9 T de CO₂ que equivale a 1 343 133,4 litros de gasol (ver Figura 34).

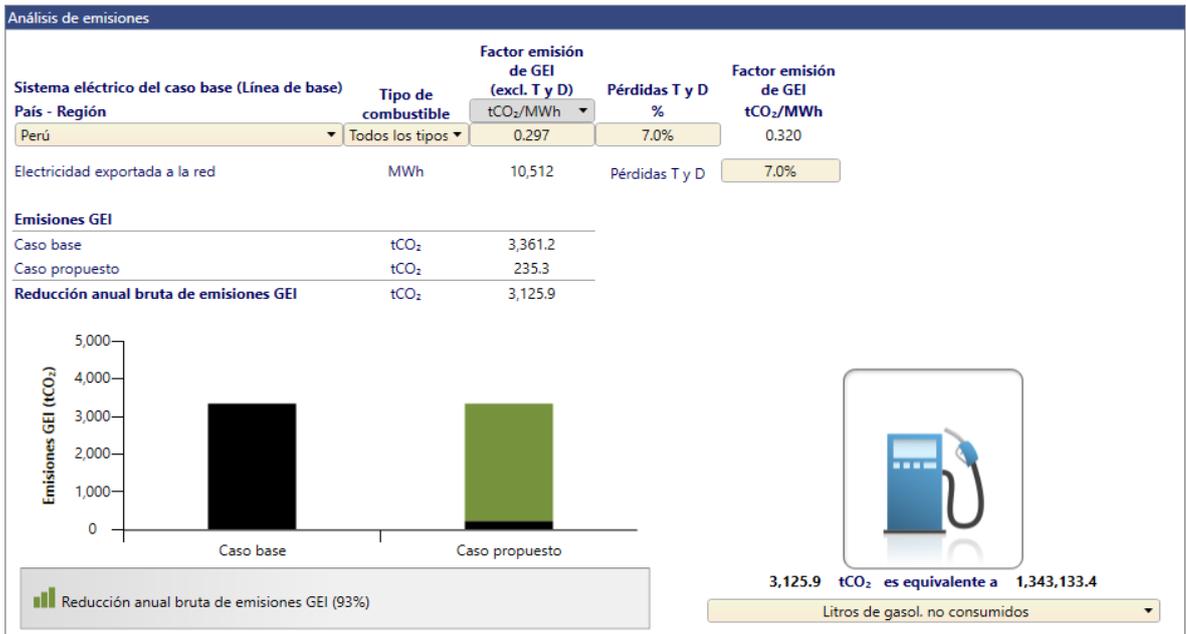


Figura 34: Análisis de GEI en planta solar fotovoltaica.

Y del análisis económico se obtiene un retorno de inversión aproximadamente al año 2 (Ver Figura 35); a más años, un mayor flujo de efectivo acumulado, es decir; más ganancias respecto al escenario 1. Por lo tanto, los paneles fotovoltaicos si son una opción a considerar como propuesta de aplicación de la tecnología renovable.

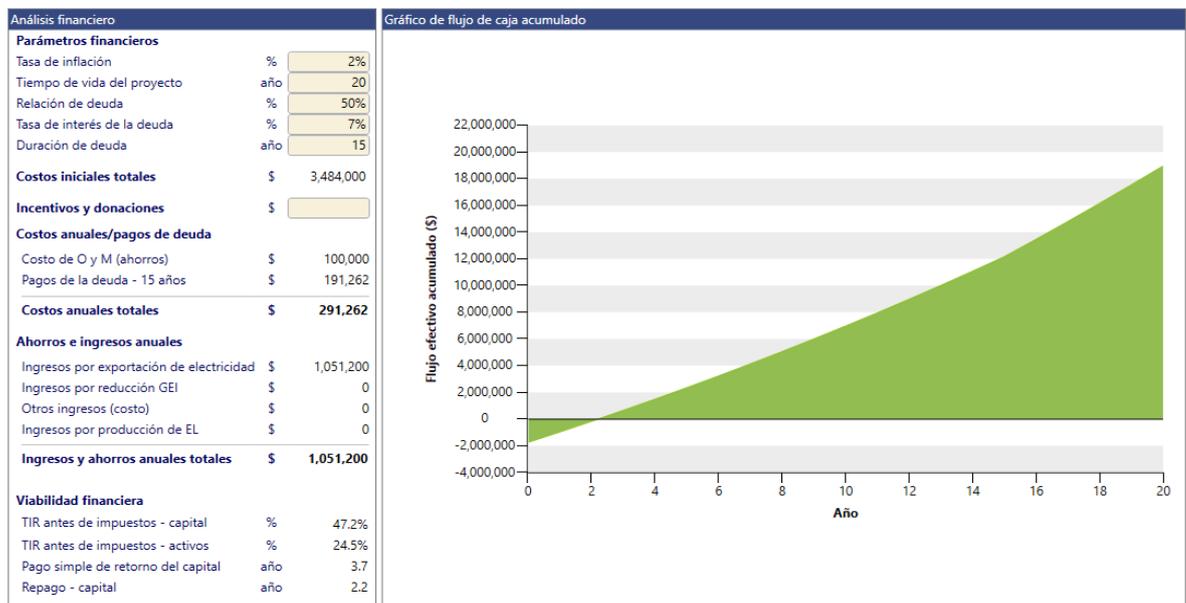


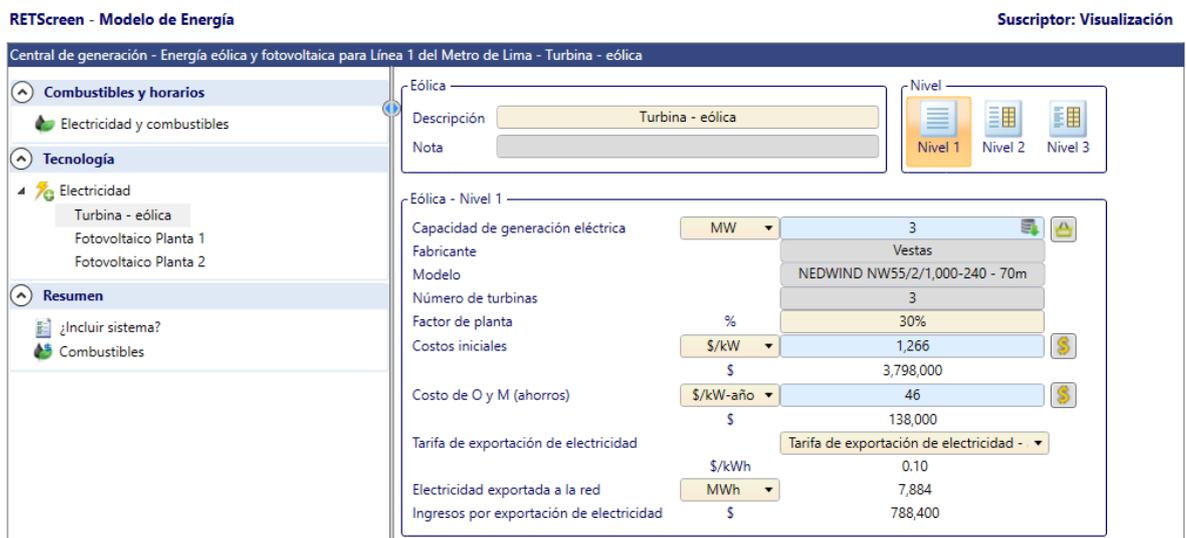
Figura 35: Análisis económico de planta solar fotovoltaica.

4.2.3. Escenario 3: Planta eólica - planta solar fotovoltaica.

Se considera 1 planta de aerogeneradores y dos plantas de paneles solares fotovoltaicas.

Planta de aerogeneradores: Se ha considerado 3 aerogeneradores con potencia nominal de 1 MW cada aerogenerador, del fabricante Vestas con modelo NEDWIND NW55/2/1000-240 - 70m, con 1 266 US\$/kW como costo iniciales y 46 US\$/kW-año por costos de operación y mantenimiento [65]. (Ver la Figura 36).

Planta de paneles solares fotovoltaicos: Para el escenario 3 se considera la cantidad de 1 563 unidades de paneles solares fotovoltaicos de Mono-Si de 320 W, para cada una de las plantas fotovoltaicas que permiten obtener un total de 1 MW, del fabricante Sunpower con el modelo mono-Si - SPR-320E-WHT, según Anexo 6 se considera 871 US\$/ kW como costos iniciales, también los costos de operación y mantenimiento de las centrales fotovoltaicas con 25 US\$/ kW-año [65]. Para el factor de carga se considera 30 % según el Anexo 7. Ver mayor detalle de las características en la Figura 37.



Central de generación - Energía eólica y fotovoltaica para Línea 1 del Metro de Lima - Turbina - eólica

Suscriptor: Visualización

Combustibles y horarios

- Electricidad y combustibles

Tecnología

- Electricidad
 - Turbina - eólica
 - Fotovoltaico Planta 1
 - Fotovoltaico Planta 2

Resumen

- ¿Incluir sistema?
- Combustibles

Eólica - Nivel 1

Capacidad de generación eléctrica	MW	3
Fabricante		Vestas
Modelo		NEDWIND NW55/2/1,000-240 - 70m
Número de turbinas		3
Factor de planta	%	30%
Costos iniciales	\$/kW	1,266
	\$	3,798,000
Costo de O y M (ahorros)	\$/kW-año	46
	\$	138,000
Tarifa de exportación de electricidad		Tarifa de exportación de electricidad -
	\$/kWh	0.10
Electricidad exportada a la red	MWh	7,884
Ingresos por exportación de electricidad	\$	788,400

Figura 36: Características de la planta de aerogeneradores.

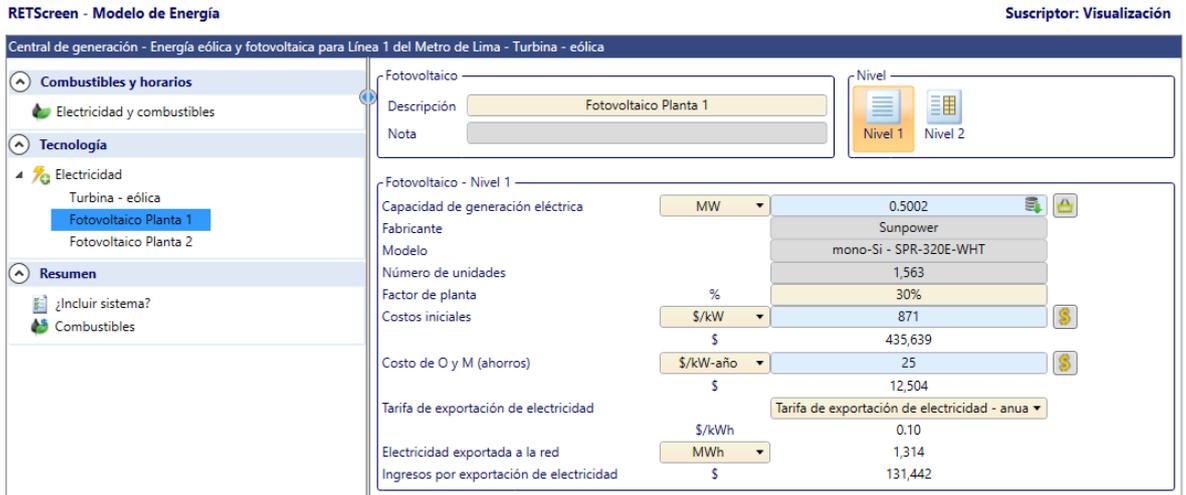


Figura 37: Características de planta solar fotovoltaica.

Realizando el análisis de la cantidad de emisión de GEI en el escenario 3, se obtiene una reducción de 3 126,2 T de CO₂ que equivale a 1 343 240,8 litros de gasol (Ver Figura 38).

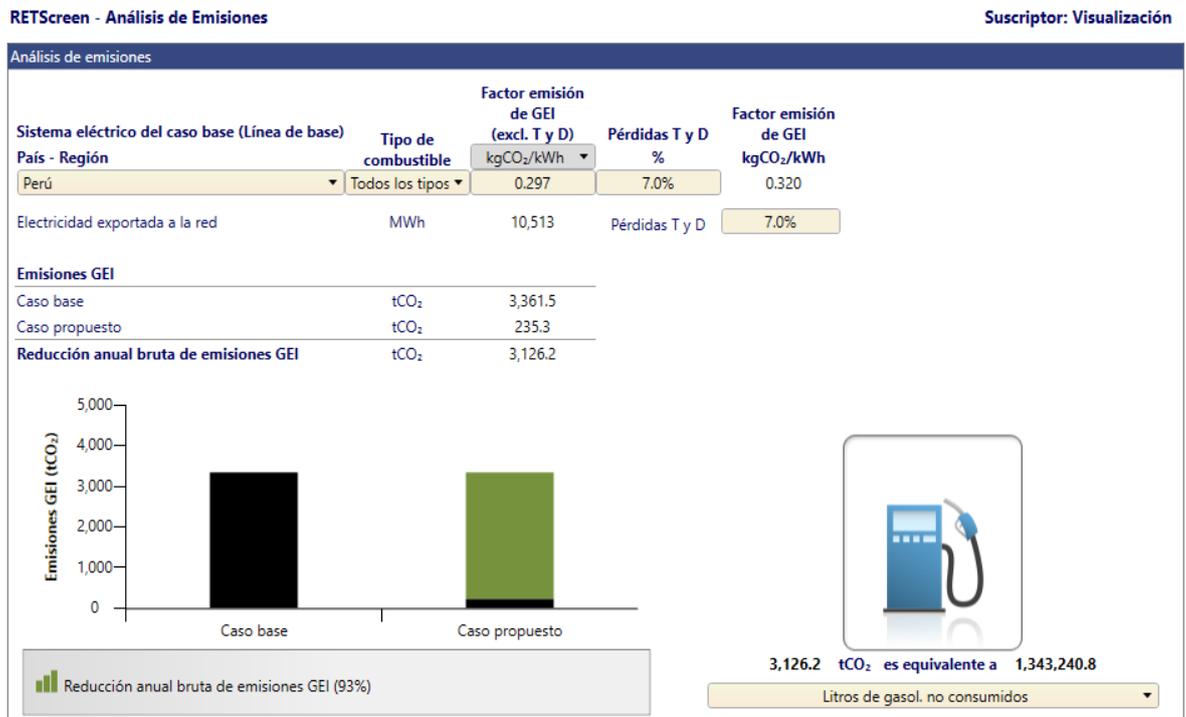


Figura 38: Análisis de GEI de planta de aerogenerador más dos plantas de paneles solares fotovoltaicos.

Y del análisis económico se obtiene un retorno de inversión en el año 3.5 (Ver la Figura 39), su retorno es similar al primer escenario, pero implica el doble de años comparado con el segundo escenario, una planta de aerogenerador

más dos plantas solares fotovoltaicas son una opción a considerar como propuesta de aplicación de la tecnología renovable, sin embargo comparado con el segundo escenario que permite un retorno de inversión más inmediata, es preferible considerar el segundo escenario.

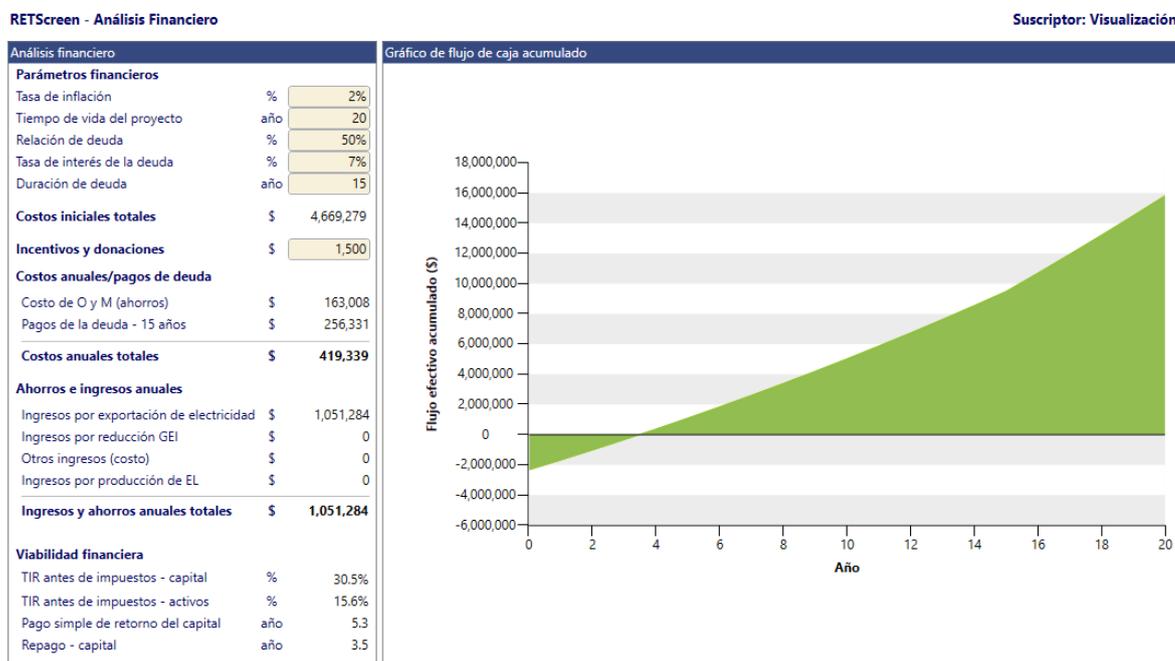


Figura 39: Análisis financiero de planta de aerogenerador más dos plantas de paneles solares fotovoltaicos.

Se puede determinar que el escenario 2 es más viable de manera técnica y económica según la simulación en el software RETScreen Expert,

El escenario 2 requiere US\$ 3 484 000 de costos iniciales, comparado con el escenario 1 (costos iniciales de US\$ 5 064 000) y escenario 3 (costos iniciales US\$ 4 669 279), económicamente es más factible el escenario 2.

En el análisis de la cantidad de emisión de los GEI se puede observar una ligera ventaja del escenario 3 con una reducción de 3 126,2 T de CO₂, respecto al escenario 1 y escenario 2 que indican una reducción de 3 125,9 T de CO₂.

4.3. Simulación de planta solar fotovoltaica Rubi - Moquegua - Perú.

La planta solar fotovoltaica Rubí está ubicada a una:

- Latitud -7.050° .
- Longitud -76.55° .

Se procedió a ingresar en el RETScreen Expert la ubicación de la planta solar fotovoltaica Rubí. (Ver en Figura 40).

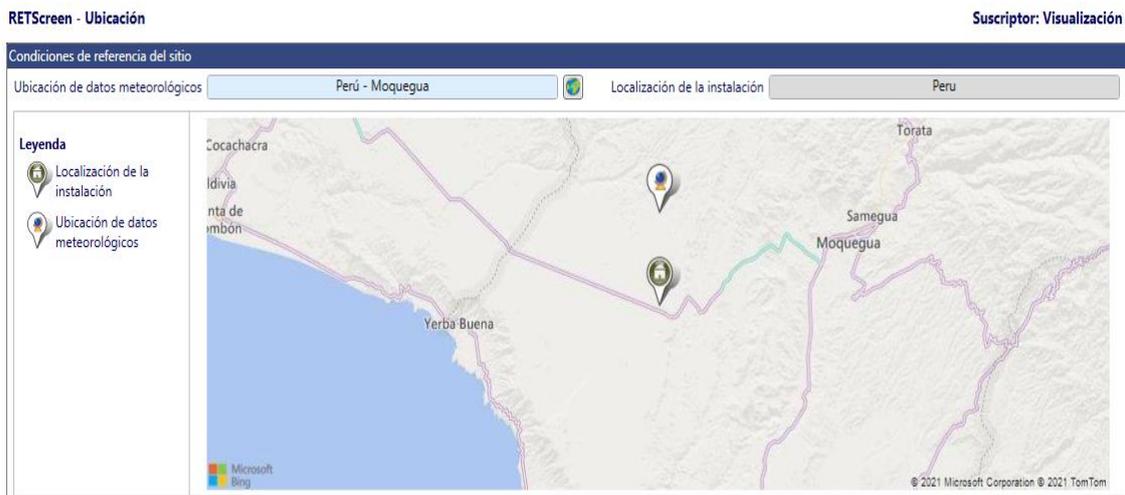


Figura 40: Ubicación de central solar fotovoltaica Rubí.

Se procedió a realizar la simulación en RETScreen Expert ingresando los datos técnicos. Ver Anexo 4 y Tabla 9.

Tabla 9: Detalle de central solar fotovoltaica Rubí [66].

Detalle	Unidad	Cantidad
Número de paneles	Und.	560 880
Potencia de panel	W	320
Potencia de la planta	MW	144,48
Energía eléctrica	GWh	440
Inversión en millones	US\$	165

Se descargó datos de la NASA [67] (ver Tabla 10) y se ingresó la radiación solar kWh/m²/día, en el software RETScreen Expert.

Tabla 10: Tabla de radiación solar diaria de la NASA [67]

AÑO	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Anual
2000	8,10	8,15	7,61	6,57	5,71	5,37	5,17	5,18	7,41	7,56	8,75	8,43	6,99
2001	7,84	7,95	7,31	6,22	5,66	5,17	4,55	5,40	7,30	7,98	8,67	8,56	6,88
2002	8,44	8,26	7,61	6,51	5,48	5,35	4,64	5,60	7,39	7,51	8,52	8,58	6,98
2003	8,15	8,20	7,58	6,66	5,80	5,43	5,54	6,12	7,37	8,30	8,75	8,55	7,20
2004	8,17	7,93	7,38	6,58	5,88	5,42	5,56	6,32	7,38	8,28	8,69	8,71	7,19
2005	8,38	8,12	7,64	6,63	5,86	5,50	5,60	6,47	7,40	8,30	8,70	8,62	7,26
2006	8,01	8,06	7,27	6,52	5,88	5,39	5,61	6,42	7,41	8,18	8,50	8,64	7,15
2007	8,11	8,15	7,39	6,76	5,82	5,38	5,61	6,42	7,31	8,22	8,80	8,87	7,23

Se procedió a seleccionar el tipo de módulos fotovoltaicos (para este escenario son policristalinos), se ingresó las cantidades de módulos fotovoltaicos, inversión inicial [68], factor de planta, costo de OPEX y mantenimiento. (Ver Figura 41 y Tabla 9).

Figura 41: Ingreso de datos de central fotovoltaica Rubí en RETScreen.

Se procedió a calcular factor de forma [69] a partir de los datos en Tabla 9:

Potencia de generación	144,48 MW.
Energía producida anual	440 000 MWh/año.
Horas al año	8 760 horas/año.
Factor de planta	34,76%

El software RETScreen permite ingresar el costo inicial y los costos de O&M (operación y mantenimiento). Se consideró costo inicial de US\$ 165 123 072 según Anexo 4 (Ver la Figura 42):

RETScreen - Análisis de Costos Suscriptor: Visualización

Costos iniciales (créditos)	Unidad	Cantidad	Costo unit.	Monto
Costo inicial				\$ 165,123,072
Mostrar datos				
Definido por el usuario	costo			\$ -
Costos iniciales totales				\$ 165,123,072
Costos anuales (créditos)	Unidad	Cantidad	Costo unit.	Monto
Costo de O y M (ahorros)	proyecto			\$ 3,230,669
Mostrar datos				
Definido por el usuario	costo			\$ -
Costos anuales totales				\$ 3,230,669
Ahorros anuales	Unidad	Cantidad	Costo unit.	Monto
Definido por el usuario	costo			\$ -
Ahorro total anual				\$ -

Figura 42: Análisis de costos CAPEX, OPEX y mantenimiento.

Realizando el análisis de la cantidad de emisión de los GEI, se obtiene una reducción de emisión de 162 517,6 T de CO₂ que equivale a 69 829 285,2 litros de gasol. (Ver la Figura 43).

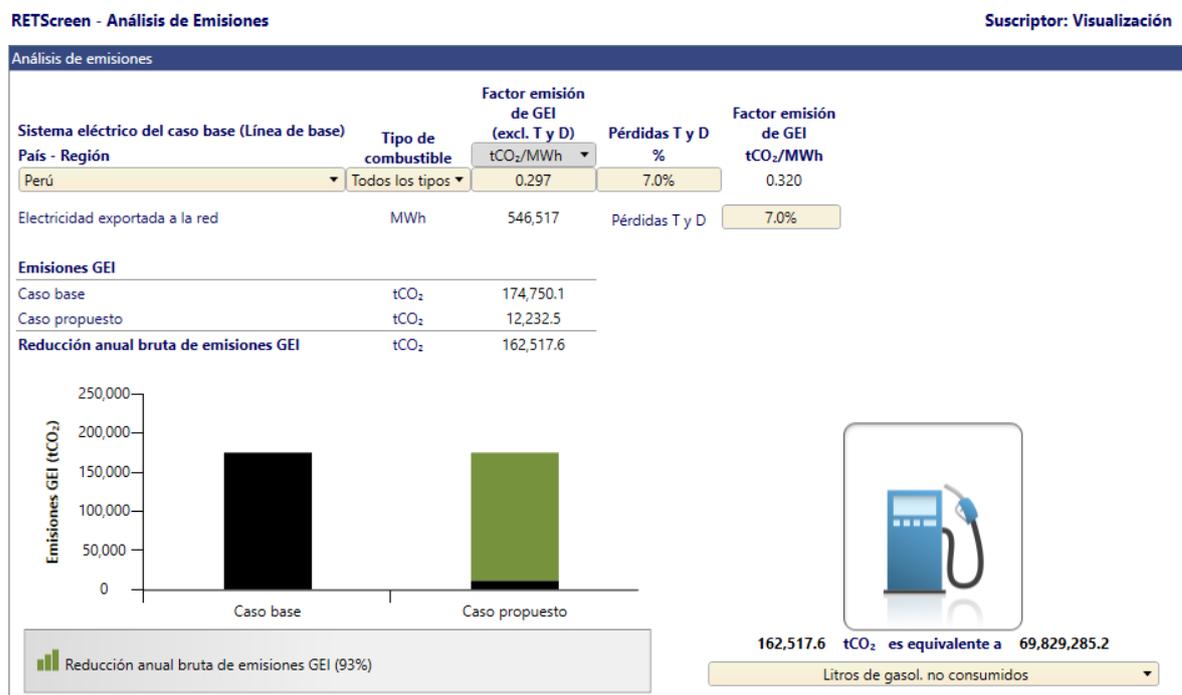


Figura 43: Análisis de emisiones de central fotovoltaica Rubí.

Podemos apreciar que la central fotovoltaica Rubí es viable técnica y económicamente, con un retorno de inversión en el año 2. (Ver la Figura 44).

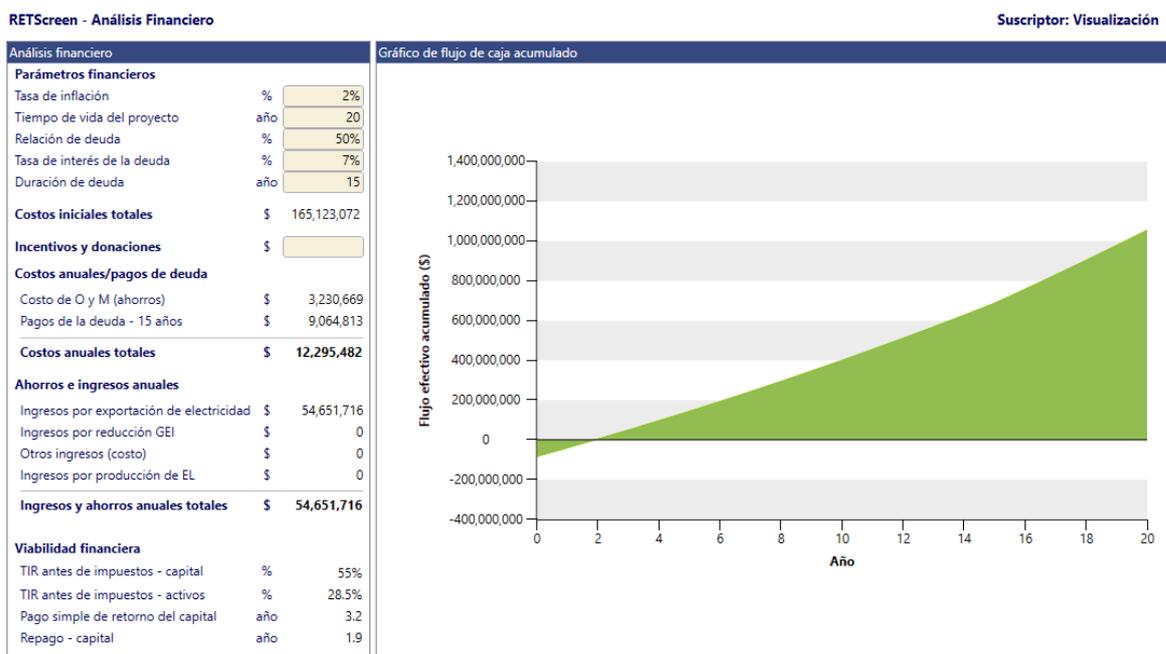


Figura 44: Análisis financiero con RETScreen.

4.4. Evolución futura de costos de las energías renovables.

Los precios de los módulos disminuyeron en el 2018, en gran medida debido a una débil demanda y un mercado mucho más competitivo en precios. Los nuevos cambios en la política de energía renovable de China empujarán al mercado global hacia un ciclo de sobreoferta. Esta sobreoferta tendrá un impacto sobre los precios de los módulos en los mercados de todos los países [70].

Debido a una intensificada presión de la sobreoferta, Wood Mackenzie estima que los precios de módulos de los principales proveedores caerán de 0,45 US\$/W en 2017 a 0,30 - 0,34 US\$/W en el 2019 para los monocristalinos, y de 0,38 US\$/W en 2017 a 0,28 US\$/W en el 2019 para los multicristalinos. Los costos de los módulos varían según el proveedor, región de producción y tecnología [70]. (Ver Figura 45).

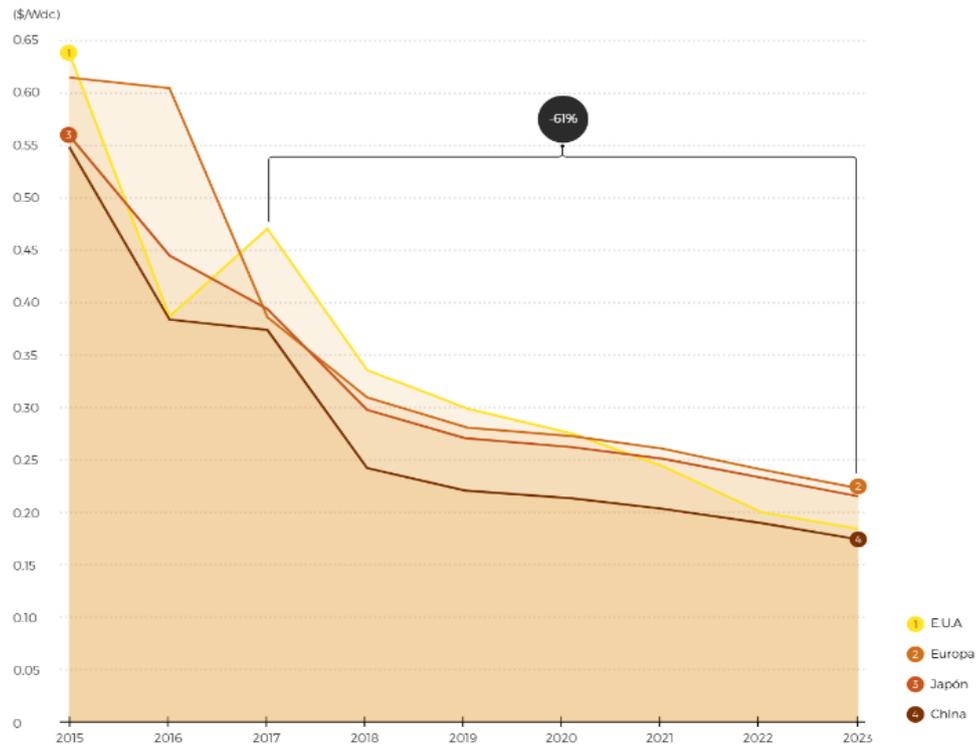


Figura 45: Precio de módulos solares fotovoltaicos en los principales mercados 2015-2023 (US\$/ Wdc) [70].

Sobre la energía solar fotovoltaica se tiene que el desembolso de instalación promedio ponderado para esta energía, cayó de 4 394 US\$/kW en 2010 a 1 388 US\$/kW en 2017 [71]. (Ver Figura 46).

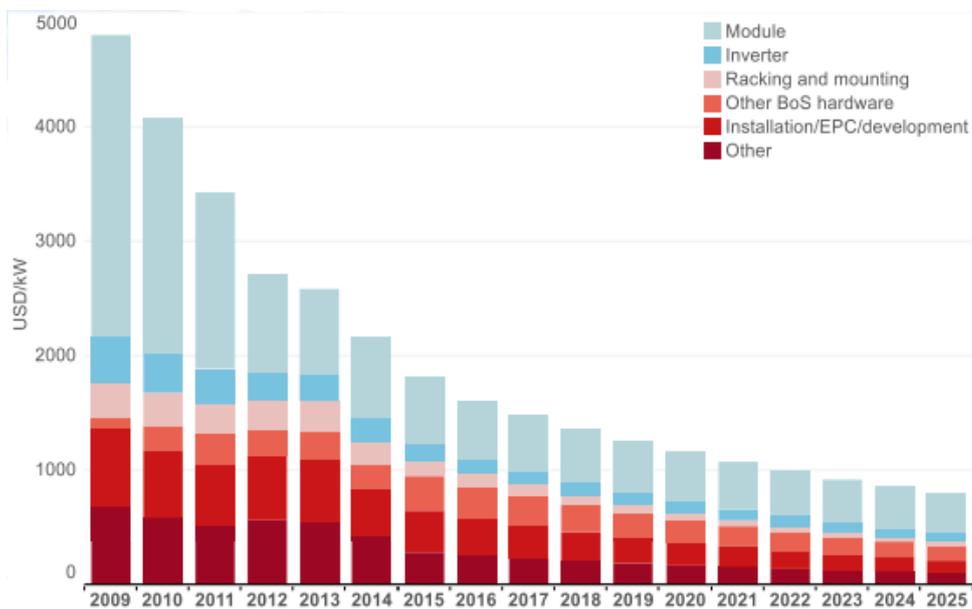


Figura 46: Costos de sistemas instalados a 2025 de planta solar fotovoltaica [72].

La energía solar fotovoltaica presenta mayor reducción del año 2010 al 2017 (menos 0,26 US\$/kWh) (Ver Figura 47) [72].

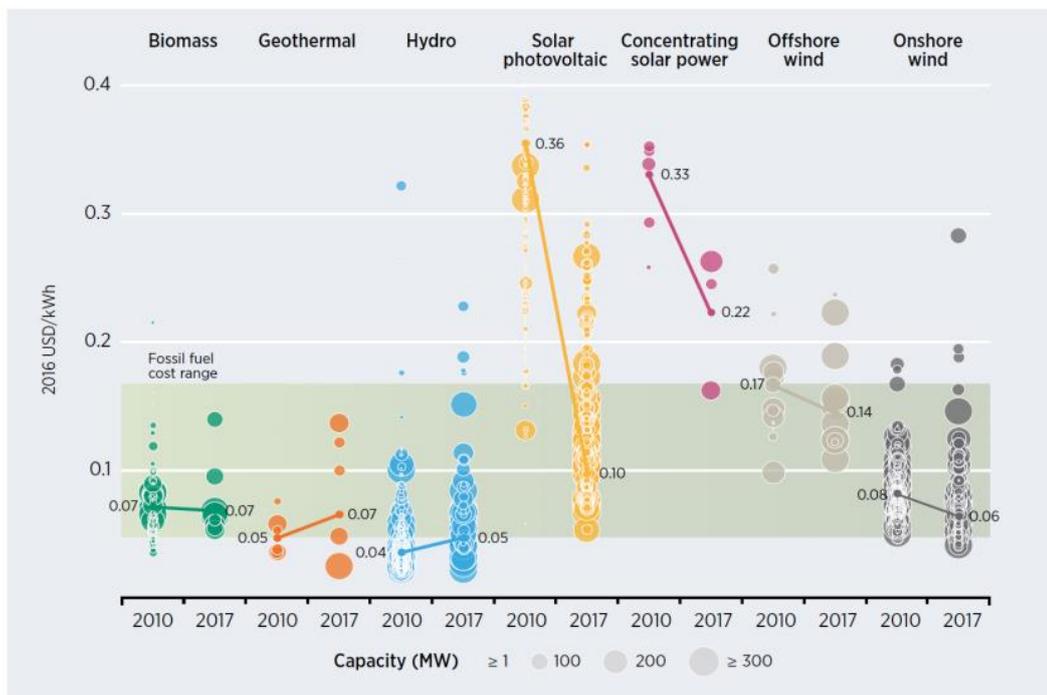


Figura 47: Evolución reciente de los costes [72].

La torre y las palas constituyen casi el 50 % del costo total del aerogenerador. Por lo tanto, los avances técnicos de estos dos componentes representan un importante factor potencial para reducciones en costos [70].

Existe también una apremiante necesidad de sistemas de control de pasos más confiables, debido al aumento en la longitud de las palas. Se espera que los precios se mantengan estables debido a que la calidad y fiabilidad se han vuelto más importantes que el precio mismo. Los defectos en los sistemas de control de paso pueden implicar costos significativos a los fabricantes por concepto de pagos y compensaciones por cumplimiento de garantías [70].

El cambio continuo a mayores potencias de aerogeneradores está reduciendo el costo por MW instalado, especialmente al analizar los costos BOP. A medida que se necesite construir un menor número de cimentaciones, los caminos y sistemas de recolección eléctrica pueden ser simplificados con menos unidades, y el CAPEX total del proyecto se verá automáticamente reducido. De otro lado, un mayor uso de palas más largas

requiere de una especial atención con el material a utilizar. Materiales como el H-glass, un tipo de fibra de vidrio se ha venido utilizando para disminuir el peso de las palas más largas, en lugar de fibra de carbono que tiene un mayor costo. La longitud de las palas es uno de los factores principales que permite una mayor reducción del Costo Nivelado de Electricidad (LCOE, por sus siglas en inglés), pero no del CAPEX en sí mismo. Las palas de mayor longitud necesitan más material y esto aumenta su masa total, lo cual hace muy complejo su transporte e instalación. No obstante, el resultante aumento en la generación de energía compensa los mayores costos [70].

La adopción de mayores potencias nominales de aerogeneradores representa una de las estrategias clave para los fabricantes del hemisferio occidental. Dicha tendencia permite ahorros en la cimentación y otros costos BOP. Aunque estos aerogeneradores son más pesados, necesitando por lo tanto cimentaciones más robustas, el número total de cimentaciones es menor si se compara con una planta eólica de capacidad total similar pero que utilice aerogeneradores más pequeños. El costo por MW tiende a disminuir considerando el aumento en la potencia nominal de la turbina [70]. Para una descripción de la contribución típica al costo de una turbina eólica de 3 MW, ver Figura 48.

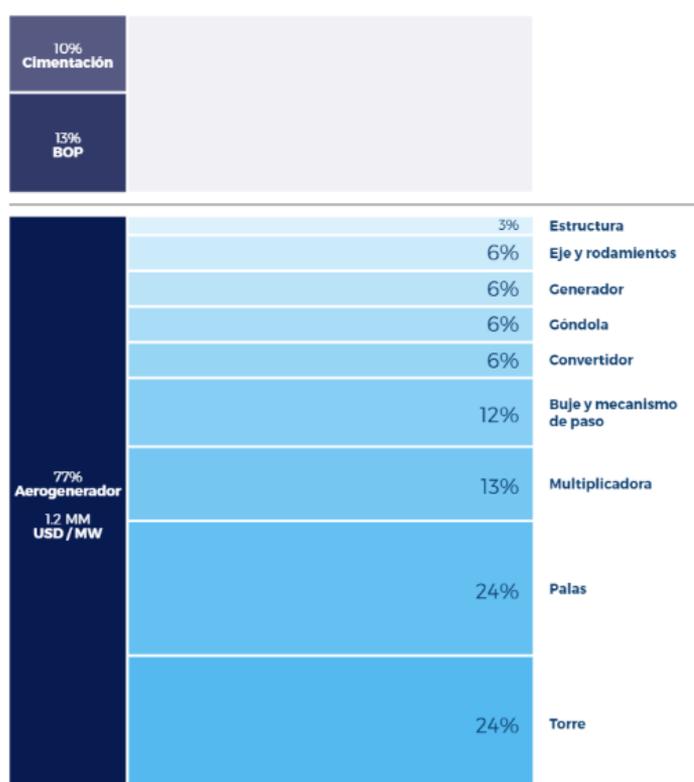


Figura 48: Contribución típica al costo de una turbina eólica de 3 MW [70].

En [73] nuevos datos muestran que el costo de operación y mantenimiento de la energía eólica terrestre y solar fotovoltaica mejoró considerablemente con el tiempo.

Los escenarios energéticos en línea con el Acuerdo de París sugieren inversiones masivas en turbinas eólicas y energía solar fotovoltaica. Por lo tanto, comprender su dinámica de reducción de costos es clave para detallar las vías de transición factibles e identificar las medidas de apoyo necesarias. Las investigaciones anteriores estudiaron principalmente el desarrollo de equipos y el costo de instalación. Sin embargo, otros componentes de los costos ganan en importancia. Aquí, estudiamos los costos de operación y mantenimiento (O&M) y entregamos una descripción cuantitativa y cualitativa de su dinámica [73].

En Anexo 5 se muestra el costo de operación y mantenimiento (O&M) y en las curvas de experiencia para la energía eólica terrestre, lo que muestra que los costos de mantenimiento y reparación por MWh son aproximadamente cinco veces más altos que los costos de operación. En resumen, el costo de operación y mantenimiento de la energía eólica disminuyó de un promedio de 1,75 EUR/kWh en 2005 a 1,32 EUR/kWh en 2017, una reducción del 25 % respecto al año 2017. Para la energía solar fotovoltaica se puede apreciar en resumen, que el costo de operación y mantenimiento disminuyó de un promedio de 47,60 EUR / kWh en 2005 a 7,05 EUR / kWh en 2017, es una reducción del 85 % respecto al año 2017 [73].

4.5. Análisis y discusión del transporte público y las energías renovables.

En el presente capítulo procederemos a analizar y discutir la información obtenida mediante la síntesis de lo mencionado líneas arriba:

- Actualmente el tráfico es un problema latente en nuestra capital, solo contamos con una Línea de Metro de Lima creado después del año 2000 a diferencia de todos los metros en Sudamérica, somos la segunda ciudad a nivel Sudamérica con el peor tráfico a pesar de que existen otras ciudades con mayor o similar cantidad de habitantes que nuestra capital.

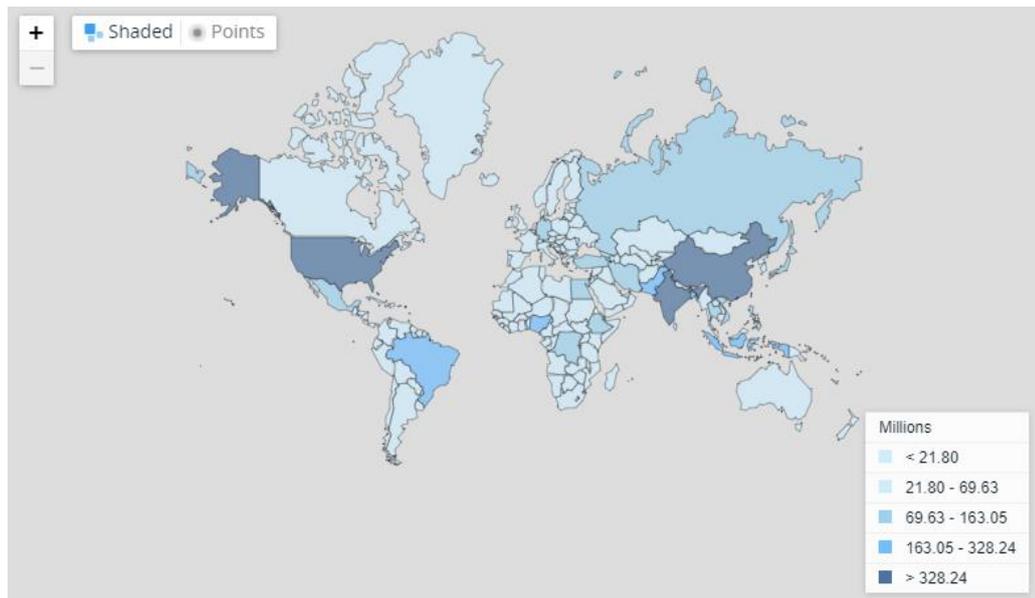


Figura 49: Población total por millones del año 2019 [74].

- Como apreciamos en la Tabla 11, Brasil tiene 211 049 527 de habitantes y en la Figura 49, es el país en Sudamérica con más habitantes, pero manifiesta una mejor gestión en su transporte según índice de tráfico TomTom.

Tabla 11: Población de Sudamérica en millones, año 2019 [74].

País	Habitantes total
Argentina	44 938 712
Bolivia	11 513 100
Brasil	211 049 527
Chile	18 952 038
Colombia	50 339 443
Ecuador	17 373 662
Guyana	782 766
Paraguay	7 044 636
Perú	32 510 453
Surinam	581 363
Uruguay	3 461 734
Venezuela	28 515 829

- Las condiciones deplorables en que se encuentra el transporte urbano de nuestra capital afectan la economía, retrasan el crecimiento de la industria, disminuyen la eficiencia y generan gastos al sector privado al provocar mayores costos de transacción y, sobre todo, afecta la calidad de vida de los ciudadanos al ofrecerles condiciones de movilidad poco dignas, ponerlos en riesgo de accidentes de tránsito,

limitar su acceso a servicios básicos (empleo, educación y salud) y penalizar la economía de los más pobres [75].

- Lima y Callao conforman la Metrópolis conurbada más poblada de nuestro país, con 10 381 949 habitantes que incluye a la población de Lima Metropolitana con la cantidad de 9 320 000 habitantes y 1 061 949 habitantes de la Provincia Constitucional del Callao; donde la zona norte continúa siendo la más poblada, conforme se aprecia en la Figura 50. Es necesario resaltar que de acuerdo al Informe del Censo 2017, San Juan de Lurigancho continúa como el distrito más poblado de la capital al totalizar 1 162 000 habitantes [75].

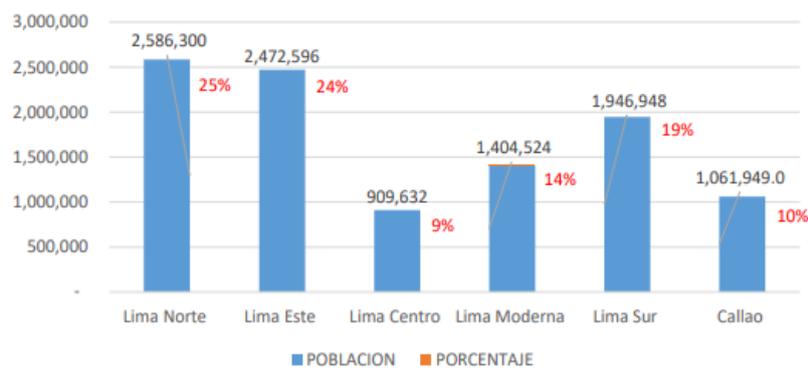


Figura 50: Población de Lima y Callao 2018 [75].

- Como se puede apreciar en la Figura 51, el número de viajes totales de Lima y Callao ha crecido en casi 20 % respecto del último reporte brindado por el JICA (2013); es decir, ha crecido a una tasa promedio anual de 3,30 %, que supera al de crecimiento de la población que tan solo llegó al 1,25 % [75].

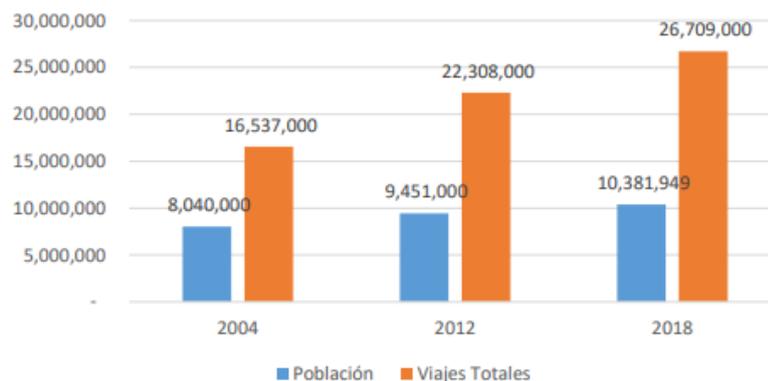


Figura 51: Crecimiento de viajes totales vs. población [75].

- De acuerdo a los estudios y fuentes revisadas los 26 709 000 viajes diarios se distribuyen de la siguiente manera [75] (ver Figura 52).



Figura 52: Distribución del total de viajes por modo de transporte [75].

Los diferentes aplicativos móviles que alertan sobre las avenidas con mayor tráfico en Lima ya no ayudan para evitar estar en las pistas sin moverse. Los policías de tránsito contradicen a los semáforos al tratar de agilizar el tránsito de hora punta.

Tabla 12: Viajes diarios en transporte público por modo [75].

Viajes diarios en transporte público por modo	15 990 000	100,00 %
Lima 1 Metro	370 000	2,31 %
Metropolitano	720 000	4,50 %
Corredores complementarios	511 472	3,20 %
Transporte regular (bus, combi, coaster, mototaxi)	9 388 528	58,71 %
Taxi	5 000 000	31,27 %
▪ Taxi formal	3 800 000	17,51 %
▪ Taxi colectivo e informal	2 200 000	13,76 %

- La infraestructura dañada (pistas irregulares), obligan a reducir velocidad o frenar. Los semáforos que no funcionan demanda la presencia de personal de municipalidad para que pueda alternar el paso de los vehículos, terminan perjudicando a los conductores que representa al 89,99 % de la Tabla 12 [75].
- Las energías renovables han demostrado ser una excelente alternativa en el transporte público pero queda mucho de estos casos en estudio y simulación, se debe ejecutar la acción y tomar medidas más inmediatas para reducir la emisión de GEI y aportar con los objetivos de mejorar la calidad de aire.

- En base al estado de arte realizado podemos coincidir en que tenemos la oportunidad de adquirir las mejores técnicas o tecnologías aplicadas al transporte masivo, por ejemplo: Usar una aplicación que nos permita saber la situación real del tráfico de todos los tipos de transporte de Lima (considerado el sistema ferroviario, el metropolitano y las rutas por parque automotor) para poder decidir de manera rápida y certera el recorrido a realizar. Usar una tarjeta de recarga universal que nos permita acceder a los diferentes tipos de transporte masivo y recargas por online y/o aplicativo que evite hacer colas (similar al metro de México). Acelerar los proyectos de transporte masivo mediante trenes. En las avenidas con mayor tráfico hacer un plan de acción donde se mejore la infraestructura y la señalización de transporte para reducir el tráfico. El metro de Bilbao es un ejemplo claro que la irregularidad demográfica no es límite o impedimento para apostar por el transporte masivo (trenes). Debido a la cantidad de habitantes en la capital limeña es necesario entender que la opción más adecuada para reducir el tráfico y mejorar la calidad de vida de los habitantes es el sistema ferroviario (trenes con una capacidad de 1 440 personas a más por tren y con una frecuencia ambiciosa de 90 segundos como las ciudades en Europa) que permitiría trasladar más personas de manera más inmediata. También debemos reconocer y estudiar a más los indicadores del metro de Moscú que supera los estándares de calidad, confiabilidad y tiempo, para implementarlo desde el inicio de las operaciones de las futuras líneas de metro de Lima, así como su aprovechamiento de las estaciones como museos de arte, siendo un Perú rico en cultura podría ser un espacio de aprendizaje de lo nuestro.
- En cuanto a las energías renovables podemos apreciar que las empresas han ido reduciendo el precio del kWh y a medida que pasa el tiempo se han presentado mejores ofertas en precio y un gran avance en tecnología (facilidad de instalación, software de factibilidad de proyectos de energías renovables, mayor personal capacitado, etc.). Por lo tanto debemos de iniciar con un análisis minucioso de las tecnologías renovables.

CAPÍTULO V: CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y CONTRIBUCIÓN

A continuación se presentan las conclusiones obtenidas de la recopilación de información del proyecto Línea 1 de Lima y la simulación en el programa RETScreen Expert donde se consideraron tres escenarios, los resultados se evaluarán en función de: tipo de tecnología de energía renovable, por la emisión de GEI y la viabilidad técnica-económica.

5.1. Conclusiones.

La presente tesis contribuye con un estudio de implementación de energías renovables en el transporte masivo urbano a través de la simulación con el programa RETScreen Expert (para un análisis técnico-económico) y así mejorar el servicio de transporte público, impactando de la siguiente manera:

- a. Se ha logrado desarrollar la simulación en RETScreen Expert de la integración de energías renovables en los trenes Alstom Metrópolis 9000 de Lima, considerando tres escenarios:
 - Escenario 1: Planta eólica.
 - Escenario 2: Planta solar fotovoltaica.
 - Escenario 3: Planta solar fotovoltaica más planta eólica (Planta híbrida).

Además previamente al estudio de los escenarios se realizó la simulación de la central fotovoltaica Rubí ubicada en Moquegua a través del RETScreen Expert, en el que se comprueba que es viable de manera técnica y financiera.

Los trenes son – en general – una alternativa de solución para mejorar el transporte público de las metrópolis. Pero debido a la situación actual en Lima del tráfico caótico y de contaminación; éstos se deben implementar en el corto plazo en el Perú con la consideración de que tecnologías de energías renovables sean parte del transporte público. Por lo tanto esta tesis busca promover la aplicación de las energías renovables en el transporte masivo urbano.

- b. El escenario 3 (planta eólica y dos plantas fotovoltaicas) representa la mejor opción desde el punto de vista del análisis de emisión de GEI, en el que se obtiene una

reducción de 3 126,2 T de CO₂ que equivale a 1 343 240,8 litros de gasol (Ver Figura 38).

Los trenes se complementan con alternativas de transporte como las ciclovías, dado que además de evitar la emisión del CO₂, hay estudios que lo califican como una solución a la salud pública, porque promueve el ejercicio.

Se concluye que el transporte masivo actual en Lima es muy desordenado e informal, “La Línea 1 del Metro de Lima” presenta una solución que además de ofrecer un servicio de calidad, aporta con la reducción de la emisión de los GEI, sin embargo a pesar de los viajes que se realizan diario, no es suficiente para la población de Lima. Por lo tanto, la presente tesis es una contribución más en la reducción de emisión de GEI al medioambiente y a la urgencia de adelantar la construcción de una mayor cantidad de líneas ferroviarias destinadas al transporte público masivo.

- c. Se realizó un cuadro comparativo de las tecnologías de transporte masivo (Trenes, tranvía) de Sudamérica, encontrándose que el Perú es el último país en utilizar un tren para transporte público (2011) así como el país con menos kilómetros de rieles, a pesar de tener una población superior a otros países (como Bolivia, Chile y Ecuador).

Se han desarrollado tres (03) escenarios de estudios: Escenario 1 consistente en una Planta de aerogeneradores de 4 MW; el Escenario 2 que consistente en una planta fotovoltaica de 4 MW, y el escenario 3 que consta de una planta de aerogeneradores más dos plantas fotovoltaicas. De ellos, se determina que es viable implementar el escenario 2, es decir una planta fotovoltaica de 4 MW que permitirá un retorno de inversión al año 2. Considerar que el escenario 1 (Planta de aerogeneradores) tiene un retorno de inversión en el año 4 y el escenario 3 (Planta de aerogeneradores más dos plantas fotovoltaicas) tiene un retorno de inversión en el año 3,5; es decir el escenario 2 es 50 % menos tiempo de retorno de inversión.

Se ha obtenido que el escenario 2 implica costos iniciales de US\$ 3 484 000, lo cual es inferior respecto al escenario 1 con US\$ 5 064 000 (-31,20 %) y al escenario 3

con US\$ 4 669 279 (- 25,38 %).

Se concluye - que para los casos de estudio en Perú - la implementación de una planta central fotovoltaica tiene una mejor factibilidad económica en su uso como fuente de energía eléctrica para el transporte público masivo. Sin embargo, en general, depende de la ubicación geográfica para determinar que tecnología renovable es más factible, para lo cual se ha desarrollado capacidades en el uso de software especializado para atender dichos casos de estudio. Con los resultados obtenidos es posible obtener una reducción del costo del transporte público, mediante el ahorro de energía eléctrica.

5.2. Recomendaciones.

- a. Se recomienda que se estudie la tecnología de frenos regenerativos en el sistema de transporte público como una aplicación de tecnología renovable.
- b. Se recomienda realizar un estudio de implementación de paneles fotovoltaicos, pero ubicadas en los techos de las estaciones del sistema de transporte público para que supla la demanda de los servicios auxiliares (luminarias y tomacorrientes) de las estaciones.
- c. Se recomienda formalizar los aproximadamente 2 200 000 vehículos, reparar la señalética y hacer estudios de proyecto de ejecución de líneas de tranvías (que permitan trasladar más personas que un bus y reducir la emisión de GEI) en especial para avenidas con mayor congestión vehicular.

GLOSARIO

CAPEX: Precio del aerogenerador instalado + balance de planta (BOP).

Catenaria: En ferrocarriles, se denomina catenaria a los cables aéreos de alimentación que transmiten energía eléctrica a las locomotoras u otro material motor.

Contaminante: Es cualquier sustancia y/o elemento químico, físico o biológico cuya concentración al exceder los niveles establecidos, es susceptible de causar efectos nocivos para la salud de las personas y/o el ambiente (OEFA).

Combustible: En una combustión es el agente reductor que cede o traspaesa electrones al agente oxidante. Normalmente las materias combustibles contienen cantidades apreciables de carbono e hidrógeno, que son elementos oxidables.

Conducción: Intercambio de calor que se produce de un punto a otro por contacto directo a través de un medio conductor. Ejemplo: Si se calienta el extremo de una barra metálica, al cabo de un rato el otro extremo también se habrá calentado.

Convección: Es transferencia de calor por movimiento de una masa de fluido de una región del espacio a otra. Como ejemplos conocidos tenemos los sistemas de calefacción domésticos de aire caliente y de agua caliente, el sistema de enfriamiento de un motor de combustión y el flujo de sangre en el cuerpo. Si el fluido circula impulsado por un ventilador o bomba, el proceso se llama convección forzada; si el flujo se debe a diferencias de densidad causadas por expansión térmica, como el ascenso de aire caliente, el proceso se llama convección natural o convección libre.

Electrolito: Sustancia que se descompone en iones (partículas cargadas de electricidad) cuando se disuelve en agua o los líquidos del cuerpo. Algunos de los ejemplos de iones son el sodio, el potasio, el calcio, el cloruro y el fosfato.

Factor de planta: También llamado factor de capacidad de una central eléctrica es el cociente entre la energía real generada por la central eléctrica durante un período (generalmente anual) y la energía generada si hubiera trabajado a plena carga durante ese

mismo período, conforme a los valores nominales de las placas de identificación de los equipos.

Fuentes fijas: Fuente de emisión que no se desplaza en forma autónoma en el tiempo. Ejemplo: chimeneas industriales.

Fuentes móviles: Fuente de emisión que puede desplazarse en forma autónoma, emitiendo contaminantes durante su trayectoria. Ejemplo: automóviles, camiones, aviones, entre otros.

Fuentes de área: Incluyen una o varias actividades distribuidas en un área determinada, cuyas emisiones particulares no pueden identificarse y evaluarse de forma precisa. Ejemplo: comercios, casas, entre otros.

Fuentes naturales: Son aquellas que no provienen directamente de actividades humanas. Pueden ser biogénicas (emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles - COV producidas por los bosques o cultivos, emisiones de NO_x provenientes del suelo) o geogénicas (fuentes de origen geológico: volcanes, manantiales de aguas sulfurosas, entre otras).

Hándicap: Condición o circunstancia que supone una desventaja en relación con otros o dificulta la realización o consecución de algo.

Material particulado: También denominado “partículas en suspensión”. Son fragmentos sólidos o gotas de líquido de tamaño pequeño que pueden tener composición química diversa. La concentración de partículas en aire se expresa en mg o µg (miligramo o microgramo) de partículas por m³ de aire. El diámetro mayor de las partículas es su propiedad más importante. Se denomina «PM-10» a las partículas de diámetros inferiores a 10 µm (micrómetros o micras), y «PM-2,5» a las de diámetros inferiores a 2,5 micras (µm).

RETScreen Expert: Es la versión más reciente del software y fue lanzada al mercado el 19 de septiembre de 2016. El software permite la identificación exhaustiva, la evaluación y la optimización de la viabilidad técnica y financiera de proyectos potenciales de energía renovable y de eficiencia energética; igualmente, permite la medición y verificación del rendimiento de instalaciones, así como la identificación de oportunidades de ahorros/producción energética.

Simulación. Es una herramienta de modelación probabilística. Es usada para el análisis de sistemas existentes y para la selección de sistemas hipotéticos.

Teoría de colas. Este concepto se refiere a la aglomeración que resulta en un sistema cuando la demanda supera la capacidad de proporcionar un servicio. Las colas (líneas de espera) son muy importantes para el desarrollo de modelos matemáticos para entender el comportamiento de los sistemas, que son procesos estocásticos y forma parte de la simulación.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] TomTom, «Ranking traffic congestion levels across 416 cities worldwide.», *Traffic congestion ranking | TomTom Traffic Index*. https://www.tomtom.com/en_gb/traffic-index/ranking/ (accedido mar. 07, 2021).
- [2] Organización de las Naciones Unidas, «Perspectivas de la Población Mundial 2019: Aspectos Destacados», Organización de las Naciones Unidas, New York, USA, 2019. [En línea]. Disponible en: https://population.un.org/wpp/Publications/Files/WPP2019_PressRelease_ES.pdf
- [3] Environmental Protection Agency, «Global Greenhouse Gas Emissions Data», ene. 12, 2016. <https://www.epa.gov/ghgemissions/global-greenhouse-gas-emissions-data> (accedido ago. 20, 2021).
- [4] Sociedad Alemana de Cooperación Internacional., «Opciones de transporte público masivo.», GTZ (GmbH), Alemania, Texto de Referencia para formuladores de políticas públicas en ciudades de desarrollo. Módulo 3^a, 2006. Accedido: may 08, 2020. [En línea]. Disponible en: https://www.sutp.org/files/contents/documents/resources/A_Sourcebook/SB3_Transit-Walking-and-Cycling/GIZ_SUTP_SB3a_Mass-Transit-Options_ES.pdf
- [5] C. Charles *et al.*, *Future of Urban Transportation Data. AID08: Committee on Urban Transportation Data and Information Systems. Southeastern Michigan. Michigan. USA.* [En línea]. Disponible en: https://www.researchgate.net/publication/252223235_The_Future_of_Urban_Transportation_Data_Transportation_in_the_New_Millennium_-_A_Look_Forward
- [6] International Energy Agency, «Emissions of Sulfur dioxide (SO₂) by sector and scenario, 2015 and 2040», *IEA*. <https://www.iea.org/search?q=so2> (accedido oct. 02, 2020).
- [7] International Energy Agency, «Average traffic congestion at peak hours in select cities in 2019 and during closures.», *IEA*. <https://www.iea.org/data-and-statistics/charts> (accedido oct. 09, 2021).
- [8] International Energy Agency, «Fuels & Technologies», *IEA*. <https://www.iea.org/fuels-and-technologies> (accedido mar. 27, 2021).
- [9] International Energy Agency, «Energy Technology Perspectives 2016: Towards Sustainable Urban Energy Systems», *IEA Publications*. <https://www.iea.org> (accedido oct. 09, 2021).

- [10] Ministerio de Transporte y Comunicaciones, «Totales de autos han disminuido desde el 2012 en un promedio del 6%, llegando a totalizar 168.522 unidades en el 2016». Accedido: oct. 01, 2020. [En línea]. Disponible en: https://apps.camaralima.org.pe/repositorioaps/0/0/par/r816_3/comercio%20exterior.pdf.
- [11] Consorcio de investigación económica y social, «Transporte Urbano: ¿Cómo resolver la movilidad en Lima y Callao?», en *2016*, 2016, p. 38. Accedido: jul. 18, 2021. [En línea]. Disponible en: https://www.cies.org.pe/sites/default/files/investigaciones/dp_transporte_urbano_sep.pdf
- [12] V. Thamizharasan, «Energy Conservation in Urban Transport. Indian Journal of Science and Technology», vol. 7, pp. 51-55, 2020, doi: 10.17485 / ijst / 2014 / v7sp5.6.
- [13] Agencia de Fomento de la Inversión Privada, «Línea 2 y Ramal Av. Faucett - Av. Gambetta de la Red Básica del Metro de Lima y Callao.», *Inversiones Estratégicas*. <https://www.proyectosapp.pe/modulos/JER/PlantillaProyecto.aspx?ARE=0&PFL=2&JER=5695&SEC=22> (accedido ago. 27, 2021).
- [14] Agencia de Fomento de la Inversión Privada, «Línea 3 del Metro de Lima y Callao», *Inversiones Estratégicas*. <https://www.proyectosapp.pe/modulos/JER/PlantillaProyecto.aspx?ARE=0&PFL=2&JER=8162> (accedido ago. 27, 2021).
- [15] Agencia de Fomento de la Inversión Privada, «Línea 4 del Metro de Lima y Callao», *Inversiones Estratégicas*. <https://www.proyectosapp.pe/modulos/JER/PlantillaProyecto.aspx?ARE=0&PFL=2&JER=8163> (accedido ago. 27, 2021).
- [16] Ministerio de Transportes y Comunicaciones del Perú., «Sistema Eléctrico de Transporte Masivo de Lima y Callao, Línea 1.» https://portal.mtc.gob.pe/transportes/concesiones/ferrovias/sistema_electrico_linea1.html (accedido ago. 27, 2021).
- [17] «Mapa del metro de Lima», *Mapa de Lima*, ene. 10, 2020. <https://www.mapadelima.com/mapa-del-metro-de-lima/> (accedido ago. 27, 2021).
- [18] E. Álvarez Pelegrý y J. Menéndez Sánchez, «Energías alternativas para el transporte de pasajeros.», p. 231, 2017.
- [19] R. Albisser Villegas, «9 reglas para elegir un sistema de transporte masivo», *LA.Network*, ene. 23, 2018. <https://la.network/reglas-elegir-transporte-masivo/>

(accedido mar. 28, 2020).

- [20] M. Bravo Montenegro y G. D. A. Wong Mau, «Desarrollo de la aplicación móvil “Routes & Transports” como guía interactiva para orientar el uso del transporte público masivo en la ciudad de Lima.», Universidad Señor de Sipán, Pimentel, Perú, 2013. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uss.edu.pe/handle/20.500.12802/381>
- [21] D. T. Bellido Chipana, G. De La Cruz Jo, J. A. Hidalgo Cajachagua, L. A. Ore Salvatierra, y L. A. Taype Enciso, «Análisis de la propuesta de incentivos para implementar buses eléctricos en el transporte público de Lima: Viabilidad normativa y económica desde el sector privado y público.», Tesis para la obtención del grado académico de Magister en Finanzas., ESAN, Lima, Perú, 2018. [En línea]. Disponible en:
https://repositorio.esan.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12640/1403/2018_MAF_16-1_03_T.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [22] F. I. Chira Cabrera, «Gestión de políticas públicas y su implementación para mejorar el transporte masivo vehicular de pasajeros reduciendo el impacto contaminante aéreo y sonoro en la ciudad de Trujillo.», Tesis de Maestria, Universidad Cesar Vallejo.
- [23] C. E. Calderon Carvajal, «Una evaluación del diseño institucional para la ejecución de proyectos de transporte urbano masivo de Lima.», Tesis para optar el grado de Magíster en Regulación de Servicios Públicos, Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima, Perú, 2016. Accedido: mar. 28, 2020. [En línea]. Disponible en: http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/20.500.12404/7788/CALDERON_CARVAJAL_CARLOS_ENRIQUE_EVALUACION.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- [24] «Subte | Buenos Aires Ciudad - Gobierno de la Ciudad Autónoma de Buenos Aires», *Metro de Buenos Aires*. <https://www.buenosaires.gov.ar/subte> (accedido oct. 08, 2021).
- [25] «Plano de Red - Tu Viaje», *Metro de Santiago*. <https://www.metro.cl> (accedido may 15, 2020).
- [26] «Historia del Metro de Medellín.», *Metro de Medellín*. <https://www.metrodemedellin.gov.co/qui%C3%A9nessomos/historia> (accedido oct. 08, 2021).
- [27] «Nuevo Récord de Pasajeros Transportados», 2019. <https://www.lineauno.pe/noticias/comunicado-22/> (accedido mar. 25, 2021).
- [28] H. Aguirre Castañeda, «Presupuesto de El Metropolitano se incrementó de US\$ 134 a 241 millones, informa Protransporte», Lima, Perú, oct. 21, 2008. Accedido: mar. 26,

2021. [En línea]. Disponible en: <https://andina.pe/agencia/noticia-presupuesto-de-metropolitano-se-incremento-134-a-241-millones-informa-protransporte-199829.aspx>
- [29] Directorio de Transporte Público Metropolitano, «Buses», *Buses Transantiago*. <https://www.dtpm.cl/index.php/sistema-transporte-publico-santiago/buses> (accedido jun. 27, 2021).
- [30] «Nuevo Récord de Pasajeros Transportados», *Línea 1 del Metro de Lima*. <https://www.lineauno.pe/noticias/comunicado-22/> (accedido jun. 27, 2021).
- [31] Protransporte, «Metropolitano». <http://www.metropolitano.gob.pe//conocenos/sistema/> (accedido mar. 25, 2021).
- [32] J. C. Silva Juárez, «“La ampliación del sistema de transporte colectivo-metro como solución a los problemas de transporte y vialidad de la zona Metropolitana de la Ciudad de México”. Universidad Nacional Autónoma de México, Ciudad Universitaria, México D.F., 2012», 2012, p. 207.
- [33] E. Espinoza, «La planeación en los sistemas de transporte público como base de la movilidad urbana: Caso de estudio del municipio de Zinacantepec, Estado de México, 2016.», Tesis para obtener título de Licenciado en Planeación Territorial., Universidad Autónoma del Estado de México, México, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://ri.uaemex.mx/bitstream/handle/20.500.11799/58738/UAEM-FAPUR-TESIS-ERNESTO%20ESPINOSA.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [34] G. M. Ramirez Javier, «Análisis de la demanda de la línea B del metro utilizando optimización y simulación.», Tesis de maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, México, 2016. [En línea]. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/10804/TESIS%20GABRIELA%20MARINA%20RAMIREZ%20JAVIER.pdf?sequence=1>
- [35] «Cifras de operación», *Metro CDMX*. <https://www.metro.cdmx.gob.mx/operacion/cifras-de-operacion> (accedido may 11, 2020).
- [36] Línea 1, «Informe de Sostenibilidad 2015 de la Línea 1 del Metro de Lima-Perú». 2015. [En línea]. Disponible en: https://www.lineauno.pe/wp-content/uploads/2019/06/Reporte-LINEA1-2015_ESP.pdf
- [37] «Windy: NO₂». <https://www.windy.com/es/-NO2-no2?cams,no2,-12.618,-91.450,5,m:dkkad1q> (accedido abr. 02, 2020).
- [38] Metro CDMX, «Plan Maestro 2018-2030», México, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://metro.cdmx.gob.mx/storage/app/media/Metro%20Acerca%20de/Mas%20infor>

macion/planmaestro18_30.pdf

- [39] E. S. Gómez, «El proyecto del metro de Bogotá», 2015, p. 39.
- [40] «Bilbao en metro | Metro Bilbao». <https://www.metrobilbao.eus/conociendo-bilbao> (accedido may 23, 2020).
- [41] Dancer, «Video: conocé el colectivo eléctrico hecho con con botellas recicladas», *Economía Sustentable*, may 22, 2020. <https://economiasustentable.com/noticias/video-conoce-el-colectivo-electrico-hecho-con-con-botellas-recicladas> (accedido may 24, 2020).
- [42] M. K. Darshana, K. Karnataki, G. Shankar, y K. R. Sheela, «A practical implementation of energy harvesting, monitoring and analysis system for solar photo voltaic terrestrial vehicles in Indian scenarios: A case of pilot implementation in the Indian Railways», en *2015 IEEE International WIE Conference on Electrical and Computer Engineering (WIECON-ECE)*, dic. 2015, pp. 542-545. doi: 10.1109/WIECON-ECE.2015.7443989.
- [43] V. H. Cardenas Pinto, «Propuesta técnica y económica para un sistema de transporte público en la ciudad de Arequipa con energía solar.», Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Mecánico., Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa, Arequipa Perú, 2018. [En línea]. Disponible en: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/6133/MEcapivh.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- [44] «Empresa Unitaria Estatal “Metro de Moscú”», *Metro de Moscú*. <http://gup.mosmetro.ru/o-metropolitene/> (accedido may 26, 2020).
- [45] R. F. Sotomayor Morales, «Tecnologías de transporte público urbano masivo para ciudades Megalopolis: caso área Metropolitana de Lima y Callao.», Universidad Nacional de Ingeniería., Perú, 2010. Accedido: mar. 29, 2020. [En línea]. Disponible en: <http://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/413863>
- [46] T. Mikhail, S. Tatyana, y S. Petr, «Usage efficiency of renewable energy sources for charging passenger electric transport», en *2018 Renewable Energies, Power Systems & Green Inclusive Economy (REPS-GIE)*, Casablanca, abr. 2018, pp. 1-5. doi: 10.1109/REPSGIE.2018.8488844.
- [47] National Geographic, «La nueva era de los trenes propulsados con energía solar», *viajes.nationalgeographic.com.es*, nov. 09, 2020. https://viajes.nationalgeographic.com.es/lifestyle/nueva-era-trenes-propulsados-energia-solar_16142 (accedido jun. 02, 2021).
- [48] Alstom, «Manual de generalidades», Lima, Perú, 2016.

- [49] V. M. Ruiz Castillo y H. F. Villacreses Novillo, «Análisis de los costos operativos entre el Sistema de Transporte Público Urbano y el Tranvía de la Ciudad de Cuenca en el 2014», Tesis para obtención de título en Ingeniería Mecánica Automotriz, Universidad Politécnica Salesiana Sede Cuenca, Cuenca, Ecuador, 2015. [En línea]. Disponible en: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/7762/1/UPS-CT004617.pdf>
- [50] H. Heineberg, «Las metrópolis en el proceso de globalización», *Biblio 3W, Revista Bibliográfica de Geografía y Ciencias Sociales*. <http://www.ub.edu/geocrit/b3w-563.htm> (accedido abr. 27, 2020).
- [51] H. Suzuki, R. Cervero, y K. Iuchi, *Transformando las ciudades con el transporte público: integración del transporte público y el uso del suelo para un desarrollo urbano sostenible*, Primera edición en español. Bogotá s.l. s.l. Washington, DC: Universidad de los Andes, 2014.
- [52] M. Murcia, M. J. Rivera, R. Akhavan-Tabatabaei, y O. L. Sarmiento, «A discrete-event simulation model to estimate the number of participants in the ciclovía program of Bogota», en *Proceedings of the Winter Simulation Conference 2014*, Savannah, GA, USA, dic. 2014, pp. 2860-2871. doi: 10.1109/WSC.2014.7020127.
- [53] Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental, «Instrumentos básicos para la fiscalización ambiental.» [En línea]. Disponible en: https://www.oefa.gob.pe/?wpfb_dl=13978.8
- [54] «Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú - SENAMHI». <https://www.gob.pe/senamhi> (accedido oct. 01, 2020).
- [55] M. Gámez Rojas, «Tesis de maestría : “Análisis de riesgo de incendio en el sistema de transporte colectivo metro.”», Tesis de maestría, Instituto Politécnico Nacional, México, D.F., 2010. [En línea]. Disponible en: <https://tesis.ipn.mx/jspui/bitstream/123456789/9723/1/214.pdf>
- [56] S. Vicente Torres, «Mejora del proceso de carga en vehículos eléctricos», Tesis presentada para la obtención del título de Doctor en Informática, Universidad Zaragoza, Teruel, España, 2018. Accedido: feb. 19, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://zaguan.unizar.es/record/76842/files/TESIS-2019-014.pdf>
- [57] S. M. Mueeen, *Stability Augmentation of a Grid-connected Wind Farm*. Kitami Institute of Technology. Abu Dhabi: Springer, 2009.
- [58] T. Ackermann, *Wind Power in Power Systems*. Stockholm: John Wiley & Sons, 2005.
- [59] JF Manguel y J. G. McGowan, *Energía Eólica Explicado Teoría, Diseño y Aplicación*, Segunda Edición. John Wiley & Sons Ltd, 2009.

- [60] Hiester y Pennell, *Patrón mundial de vientos superficiales*. 1981.
- [61] L. Castaner y S. Silvestre, “*Modelling Photovoltaic Systems using PSpice*”. Chichester, England: John Wiley & Sons Ltd.
- [62] A. Niinisto, «Simulation of the Management of a Micro Grid with Wind, Solar and Gas Generators.», Master’s Thesis of Engineering. Faculty of Electronics, Communications and Automation, School of Science and Technology. Aalto University, Espoo, 2019.
- [63] P. Moseley y J. Garche, *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2015.
- [64] A. Abbas, H. Georgianne, y B. Aileen, *DOE/EPRI Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA*. Sandia National Laboratories. Albuquerque, New Mexico, USA.: Sandia Report SAND2016-9180, 2016.
- [65] «Operación y Mantenimiento es fundamental para rentabilidad del negocio eléctrico», *Revistel*. <https://revistel.pe/operacion-y-mantenimiento-es-fundamental-para-rentabilidad-del-negocio-electrico/> (accedido jul. 21, 2021).
- [66] «Planta Solar Rubí: la nueva era de la energía llegó al Perú.», *Enel*, 2018. <https://www.enel.pe/content/enel-pe/es/megamenu/sostenibilidad/rubi-la-central-solar-de-enel-mas-grande-del-peru.html> (accedido jul. 10, 2021).
- [67] National Aeronautics and Space Administration, «POWER Data Access Viewer», *National Aeronautics and Space Administration*. <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/> (accedido jul. 10, 2021).
- [68] República Plurinacional de Bolivia Ministerio de Energías, «Estudio de determinación de Costos de Operación, Mantenimiento y Administración Fijos de Generación con base en Energías Alternativas». mar. 2018. [En línea]. Disponible en: https://energypedia.info/images/e/e2/Estudio_Costos_Fijos_OMA-Generacion_SOLAR_FV.pdf
- [69] J. P. G. Rojas Bismarck, «Diseño de una central solar fotovoltaica de 30MW, para su análisis técnico, operativo y económico en el SEIN; ubicada en Tacna - 2017», Universidad Señor de Sipan, Pimentel, Perú, 2018. Accedido: jul. 11, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://repositorio.uss.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12802/4873/Rojas%20Bismarck.pdf?sequence=1>
- [70] L. García de Fonseca, M. Parikh, y R. Manghani, «Evolución futura de costos de las energías renovables y almacenamiento en América Latina», Banco Interamericano de Desarrollo, Nota técnica, dic. 2019. Accedido: abr. 02, 2021. [En línea]. Disponible en:

https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Evoluci%C3%B3n_futura_de_costos_de_las_energ%C3%ADas_renovables_y_almacenamiento_en_Am%C3%A9rica_Latina_es.pdf

- [71] «Las energías renovables ganan eficiencia económica», *Factor CO2*. <https://www.factorco2.com/es/las-energias-renovables-ganan-eficiencia-economica/noticia/3368> (accedido jul. 12, 2021).
- [72] Irena International Renewable Energy Agency, «Energías renovables: los costos verdaderos», Vienna, Austria, nov. 07, 2018. [En línea]. Disponible en: <https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Costs/Videos-and-Webinar/02-IRCA-and-Coalition-WebinarSpanishUpload.pdf?la=en&hash=E9E62FA6D88ABFB5D047CE5543B182893BD828E9>
- [73] B. Steffen, M. Beuse, P. Tautorat, y T. S. Schmidt, «Experience Curves for Operations and Maintenance Costs of Renewable Energy Technologies», *Joule*, vol. 4, n.º 2, pp. 359-375, feb. 2020, doi: 10.1016/j.joule.2019.11.012.
- [74] «Dato de población total.», *Banco Mundial*. <https://datos.bancomundial.org/indicador/SP.POP.TOTL?view=map> (accedido abr. 02, 2021).
- [75] Fundación Transitemos., «Informe de Observancia : Situación de transporte urbano en Lima y Callao - 2018.», Fundación Transitemos, Perú, 2018. Accedido: jul. 20, 2021. [En línea]. Disponible en: <https://transitemos.org/propuestas/situacion-del-transporte-urbano-en-lima-y-callao/>
- [76] «Emisiones de gases de efecto invernadero totales (kt de equivalente de CO2) | Data», *Banco Mundial*. <https://datos.bancomundial.org/indicador/EN.ATM.GHGT.KT.CE> (accedido ago. 27, 2021).
- [77] «PIB (US\$ a precios actuales) Data», *Banco Mundial*. <https://datos.bancomundial.org/indicador/NY.GDP.MKTP.CD?end=2020&start=1960&view=chart> (accedido ago. 27, 2021).
- [78] Línea 1 del Metro de Lima, «Informe de sostenibilidad 2020», Línea 1, Lima, Perú, 2020. [En línea]. Disponible en: <https://www.lineauno.pe/wp-content/uploads/2021/07/Informe-de-sostenibilidad-2020.pdf>
- [79] División de Supervisión de Electricidad, «Proyectos relevantes de generación y transmisión de energía eléctrica en construcción.», OSINERGMIN, Lima, Perú, Técnico Ingeniería, 2018. Accedido: jul. 08, 2021. [En línea]. Disponible en:

<https://www.osinergmin.gob.pe/newweb/uploads/Publico/MapaSEIN/informes/proyectos/construccion/201801.pdf>

- [80] Comisión Nacional de Energía (CNE), «Informe anual Marzo 2020 Chile», Chile. [En línea]. Disponible en: <https://www.cne.cl/wp-content/uploads/2020/03/ICTG-Marzo-2020.pdf>
- [81] C. A. Fernández Vázquez y M. Fernández Fuentes, «Inventario, evaluación y proyección de las emisiones de carbono provenientes del sector eléctrico nacional Bolivia 2025.», *Acta Nova*, vol. 8, n.º 3, pp. 354-375, mar. 2018.

ANEXOS

Anexo 1: Emisiones de GEI en el año 2018 por país [76].

Ubicación (País)	Emisiones de GEI en 2018
Mundo	45873850
Asia oriental y el Pacífico	17659720
Asia oriental y el Pacífico (excluido altos ingresos)	14973700
Asia oriental y el Pacífico (BIRF y la AIF)	14932190
Miembros OCDE	14851080
China	12355240
Europa y Asia central	8425290
América del Norte	6748550
Estados Unidos	6023620
Europa y Asia central (BIRF y la AIF)	4885130
Europa y Asia central (excluido altos ingresos)	4472930
Asia meridional	4195430
Asia meridional (BIRF y la AIF)	4195430
Unión Europea	3567090
India	3374990
Oriente Medio y Norte de África	3305530
América Latina y el Caribe	3178850
América Latina y el Caribe (BIRF y la AIF)	3130560
América Latina y el Caribe (excluido altos ingresos)	2768270
Federación de Rusia	2543400
África al sur del Sahara	2360480
África al sur del Sahara (BIRF y la AIF)	2360480
África al sur del Sahara (excluido altos ingresos)	2359700
Frágiles y situaciones de conflicto afectados	2178820
Oriente Medio y Norte de África (excluido altos ingresos)	1970250
Oriente Medio y Norte de África (BIRF y la AIF)	1970250
Japón	1186770
Brasil	1032640
Indonesia	969580
Europa Central y del Báltico	864510
Irán, República Islámica del	828280
Alemania	806090
Canadá	724930
Corea, República de	718880
México	679880
Arabia Saudita	638120
Australia	615380
Sudáfrica	513440

Ubicación (País)	Emisiones de GEI en 2018
Turquía	502520
Reino Unido	452080
Pakistán	431220
Francia	423350
Tailandia	416950
Italia	399600
Polonia	389650
Viet Nam	376530
Argentina	365650
Egipto, República Árabe de	329220
España	326940
Nigeria	311450
Malasia	306670
Ucrania	274510
Kazajstán	274220
Emiratos Árabes Unidos	263240
Uzbekistán	235510
Venezuela	233920
Filipinas	232340
Argelia	218910
Iraq	215690
Bangladesh	198970
Colombia	184100
Países Bajos	178640
Etiopía	172230
Turkmenistán	125080
República Checa	122840
Myanmar	119650
Kuwait	112970
Sudán	109630
Chile	109590
Rumania	109010
Bélgica	108750
Tanzanía	105380
Libia	103040
Qatar	99830
Afganistán	98920
Perú	96280
Marruecos	94290
Camerún	89050

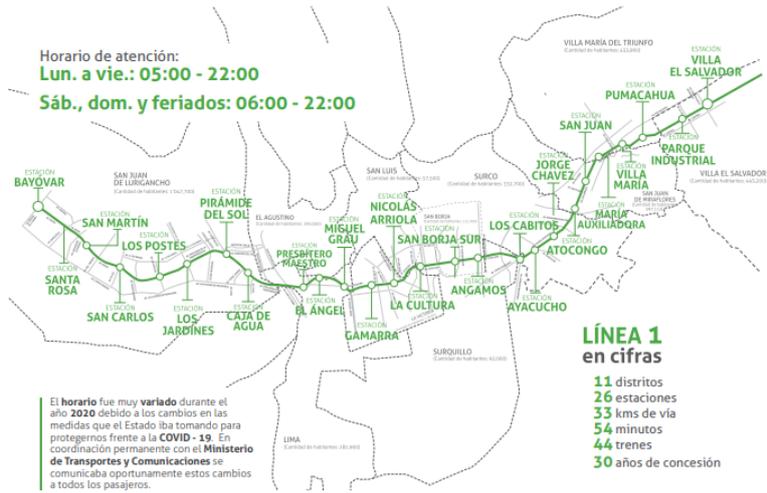
Ubicación	PBI 2020 EN USD
Mundo	\$84,705,425,882,119.00
Miembros OCDE	\$52,059,613,762,688.10
BIRF y la AIF	\$32,350,795,694,820.60
América del Norte	\$22,587,300,006,483.90
Europa y Asia central	\$21,960,949,545,194.90
Estados Unidos	\$20,936,600,000,000.00
Asia oriental y el Pacífico (excluido altos ingresos)	\$17,454,153,396,870.20
Asia oriental y el Pacífico (BIRF y la AIF)	\$17,420,835,248,019.90
Unión Europea	\$15,192,652,399,779.10
China	\$14,722,730,697,890.10
América Latina y el Caribe	\$4,838,097,985,061.95
América Latina y el Caribe (BIRF y la AIF)	\$4,611,107,748,612.96
América Latina y el Caribe (excluido altos ingresos)	\$4,007,837,786,207.94
Europa y Asia central (BIRF y la AIF)	\$3,868,307,068,397.35
Alemania	\$3,806,060,140,124.52
Asia meridional	\$3,351,519,770,520.79
Asia meridional (BIRF y la AIF)	\$3,351,519,770,520.79
Europa y Asia central (excluido altos ingresos)	\$3,217,679,452,264.09
Oriente Medio y Norte de África	\$3,098,531,138,329.19
Reino Unido	\$2,707,743,777,173.91
India	\$2,622,983,732,006.45
Francia	\$2,603,004,395,901.95
Italia	\$1,886,445,268,340.71
África al sur del Sahara (BIRF y la AIF)	\$1,685,631,629,892.34
África al sur del Sahara	\$1,685,631,629,892.34
África al sur del Sahara (excluido altos ingresos)	\$1,684,508,652,005.79
Europa Central y del Báltico	\$1,644,372,278,258.43
Canadá	\$1,643,407,977,068.93
Corea, República de	\$1,630,525,005,469.11
Federación de Rusia	\$1,483,497,784,867.60
Brasil	\$1,444,733,258,971.65
Australia	\$1,330,900,925,056.98
España	\$1,281,199,091,016.35
Oriente Medio y Norte de África (excluido altos ingresos)	\$1,214,678,560,587.73
Oriente Medio y Norte de África (BIRF y la AIF)	\$1,198,762,615,121.48
México	\$1,076,163,316,174.94
Indonesia	\$1,058,423,838,345.14
mezcla de la AIF	\$955,550,161,950.50
Países Bajos	\$912,242,335,119.07

Ubicación	PBI 2020 EN USD
Suiza	\$747,968,636,174.01
Turquía	\$720,101,212,394.11
Arabia Saudita	\$700,117,873,249.27
Polonia	\$594,164,690,894.94
Países de ingreso bajo	\$546,661,335,346.15
Suecia	\$537,609,865,719.02
Bélgica	\$515,332,499,627.86
Tailandia	\$501,794,961,925.24
Pequeños Estados	\$455,343,539,194.36
Nigeria	\$432,293,776,262.40
Austria	\$428,965,397,959.46
Irlanda	\$418,621,818,482.31
Israel	\$401,953,804,837.09
Argentina	\$383,066,977,653.56
Egipto, República Árabe de	\$363,069,245,165.32
Noruega	\$362,008,956,544.83
Filipinas	\$361,489,354,350.00
Dinamarca	\$355,184,024,841.25
Hong Kong, Región Administrativa Especial	\$346,585,881,503.64
Singapur	\$339,998,477,929.99
Malasia	\$336,664,444,247.04
Bangladesh	\$324,239,176,765.05
Sudáfrica	\$301,923,639,269.55
Colombia	\$271,346,896,626.42
Finlandia	\$271,233,883,403.89
Viet Nam	\$271,158,442,059.08
Pakistán	\$263,686,552,686.21
Chile	\$252,940,023,046.01
Rumania	\$248,715,551,366.64
República Checa	\$243,530,379,896.81
Portugal	\$231,255,587,276.74
Nueva Zelanda	\$212,482,013,605.05
Perú	\$202,014,363,787.23

Anexo 3: Red básica del metro de Lima [78] y [17]

Indicadores contractuales	Meta	Resultado
Disponibilidad (de cumplimiento en los viajes programados)	95%	99.76%
Regularidad (en puntualidad de acuerdo con los horarios programados)	85%	97.65%
Orden y Limpieza (en estaciones y trenes)	75%	93.39%
Fraude (en índice de viajes no pagados)	8%	0.05%

Valor económico directo generado y distribuido	
Valor económico directo generado	
Ingresos	S/ 345 258 292
Valor económico distribuido	
Costes operacionales	S/ 237 340 427,28
Inversiones en la comunidad (sostenibilidad)	S/ 494 493
Valor económico retenido	
Valor económico retenido (VER)	S/ 107 917 864,68
Valor económico retenido	
EBITDA Earnings Before Interests, Tax, Depreciation and Amortization	S/ 95 375 105



Anexo 4: Ficha técnica de central solar fotovoltaica Rubí (144,48 MW) [79].



CENTRAL SOLAR FOTOVOLTAICA RUBÍ (144,48 MW)

EMPRESA CONCESIONARIA	ENEL GREEN POWER PERU S.A.
DESCRIPCIÓN	La central tendrá una capacidad de 144,48 MW, que se obtendrá mediante la instalación de 560880 módulos fotovoltaicos de 320 W. La conexión al SEIN se realizará a través de la L.T. 220 kV S.E. Rubí - S.E. Montalvo, de simple circuito de 21,51 km.
UBICACIÓN	Departamento: Moquegua Provincia: Mariscal Nieto Distritos: Moquegua Altitud: 1 410 msnm
DATOS TÉCNICOS DE CENTRAL	Potencia Instalada: 144,48 MW Cantidad de Centros de Transformación: 41 Cantidad de Inversores: 164 Tensión de Salida a Inversores: 0,4 kV – AC Tipo: Solar Fotovoltaica
DATOS DE CONTRATO	Tipo de Contrato: Contrato de Concesión para el Suministro de Energía Renovable al SEIN (4ta Subasta RER) Firma de Contrato: 17.05.2016 Puesta en Operación Comercial (POC): 30.01.2018
INFORMACIÓN RELEVANTE	<ul style="list-style-type: none"> La DGAAE (Dirección General de Asuntos Ambientales Energéticos) aprobó la Declaración de Impacto Ambiental del proyecto. La Concesión Definitiva para desarrollar la actividad de generación eléctrica en la futura central de 144,48 MW, fue otorgada mediante R.M. N° 328-2017-MEM/DM del 02.08.2017. El 25.10.2017, el COES aprobó el Estudio de Operatividad de la central. El proyecto cuenta con CIRA aprobado. El 31.10.2017, el COES autorizó la Conexión para las Pruebas de Puesta en Servicio de la central. Durante pruebas, el 29.01.2018, generó 152,6 MW. El avance físico global es de 100%. El 29.01.2018, el COES aprobó la Puesta en Operación Comercial de la C.S. Rubí, con una potencia instalada nominal de 144,48 MW, a partir de las 00:00 horas del 30.01.2018. El monto de inversión aproximado fue de 165 MM US\$, según lo indicado por la Concesionaria.
COMENTARIOS	El proyecto se encuentra en operación comercial desde las 00:00 horas del 30.01.2018.



Vista de los Paneles Solares Fotovoltaicos

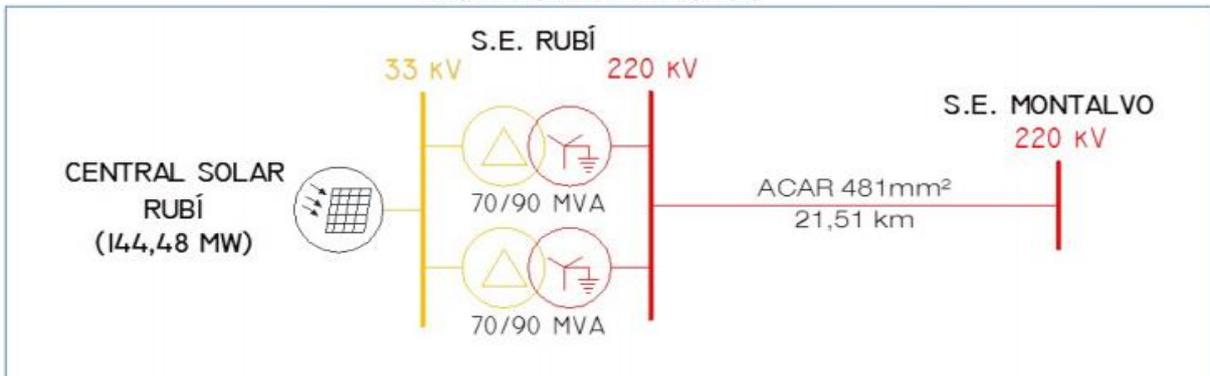


Caseta de Inversores y Transformadores



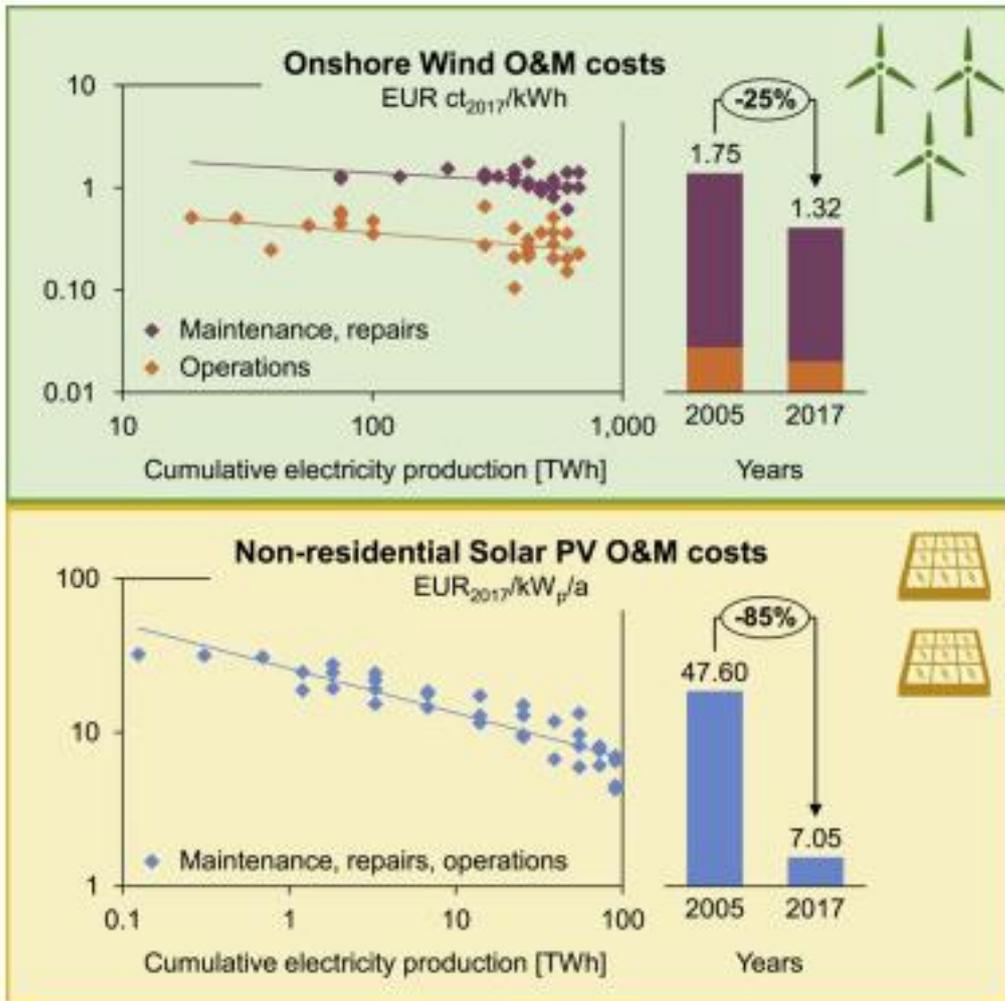
Subestación Eléctrica Rubí

DIAGRAMA UNIFILAR DEL PROYECTO



Anexo 5: Costos de O&M (Operación y Mantenimiento) en planta de aerogeneradores

terrestres y planta solar fotovoltaica [73].



Anexo 6: Costo de inversión unitario (US\$/kW) referenciales para cada una de las tecnologías de generación eléctrica [80].

Tecnología	Costo de inversión referencial [US\$/kW]
Térmica a gas natural (CA)	898
Térmica a gas natural (CC)	675
Conjunto motores a gas	894
Térmica diésel (GMG)	448
Eólica	1 266
Solar fotovoltaica	871
Solar térmica	5 282
Hidráulica de embalse	4 439
Hidráulica de pasada	3 923
Mini-hidráulica	3 263
Térmica a biomasa	3 170
Térmica a biogás	1 144
Geotérmica	4 394
Solar con almacenamiento	1 539
Eólica con almacenamiento	1 891

Anexo 7: Factor de Planta

Factores de Planta Estimados [81]

Tipo de Central	Factor de Planta
Solar fotovoltaica	0,25
Eólica	0,3 - 0,4
Biomasa	0,25 - 0,5
Hidroeléctrica	0,65
Térmica a Gas	0,7
Geotérmica	0,8
Ciclo combinado	0,8