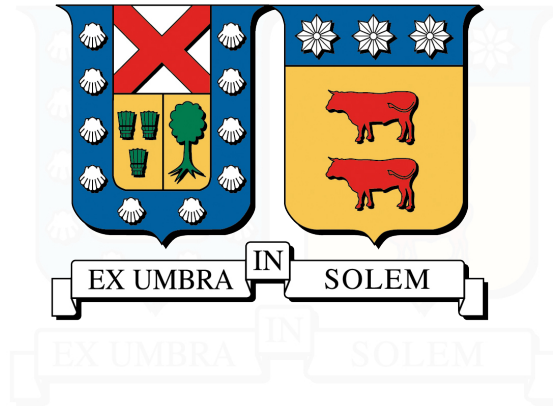


UNIVERSIDAD TÉCNICA FEDERICO SANTA MARÍA
DEPARTAMENTO DE INDUSTRIAS
VALPARAÍSO - CHILE



**EVALUACIÓN TÉCNICA Y FINANCIERA EN LA COMUNA DE
VALPARAISO PARA EL CAMBIO DEL TRANSPORTE PUBLICO DE
LOS BUSES A COMBUSTIÓN POR BUSES ELÉCTRICOS**

GONZALO ESTEBAN ARAYA MUJICA

TESIS PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL INDUSTRIAL

PROFESOR GUÍA : Dr. RODRIGO DEMARCO - UTFSM
PROFESOR CORREFERENTE : MSc. IGNACIO VERDUGO - UTFSM
PROFESOR CORREFERENTE : Dr. PABLO ESCALONA - UTFSM

OCTUBRE 2024



AGRADECIMIENTOS

Pensé que este instante por un momento nunca llegaría, darme un tiempo de expresar mis sentimientos a las personas que dentro de estos ya casi cuatro años de intensa lucha y esfuerzo por fin podre dar término a mi carrera de Civil por la Universidad que gran cariño y amor siento por ella, puesto esta será ya la tercera carrera que obtengo de ella.

En primer lugar, agradecer a mis padres, Jose Araya y Erika Mujica, por haber confiado en mí ya a estas alturas de mi vida y darme la oportunidad de seguir estudiando, siempre han sido una fuente de inspiración a seguir, llenos de amor y sabiduría. Desde el primer momento que me inicié en este nuevo camino por la Universidad me han apoyado incondicionalmente, alentándome y dando las fuerzas para poder llegar al final del camino, gracias por la motivación y por los valores entregado, les quería decir que los amo infinitamente.

Quería agradecer a mis hermanos, Paola, Andrea y Víctor por el apoyo prestado en este proceso, les quería decir que siempre estarán en mi memoria y corazón.

Agradecer en especial a mi actual pareja Stiphany ♡, en el cual ya son más de 5 años juntos, apoyándome incondicionalmente y entregándome fuerzas para seguir, acompañándome en cada locura, inclusive llegando conmigo a la punta de los cerros, porque de verdad amo las montañas y continuaré explorando todos los lugares agrestes de nuestro bello Chile, te amo mi niña.

Agradecer a mis hijos, Catalina, José, María de los Ángeles, que con tan solo un abrazo o un te quiero papá me entregan más que energía suficiente para terminar esta etapa de mi vida.

A mi profesor guía Rodrigo Demarco, aun recuerdo como si fuera ayer las tardes de reuniones, de alegres conversaciones, solo haciendo lluvias de ideas hasta que nació el proyecto que a continuación se presentara, a mi profesor correferente Ignacio Verdugo, que con gran entusiasmo y determinación me guio en cada momento buscando siempre la perfección, a mi profesor correferente Pablo Escalona por la paciencia prestada orientando hasta poder encontrar el modelo matemático correcto.

Sí, papá tendrás a un hijo Civil, un sueño para ti y también para mí.

RESUMEN EJECUTIVO

El gran uso de los combustibles fósiles ha mermado actualmente la calidad de vida en nuestro planeta, con el consiguiente cambio climático, sumado a un aumento de las temperaturas, alcanzando niveles alarmantes en grandes ciudades, la mala calidad de su aire a generando problemas respiratorios en las personas que ahí la habitan y gran contaminación acústica siendo esta última generada en un 70 % por el transporte [1]. Es por esta razón que se necesita un cambio a energías limpias, como es el caso de la eléctrica. Chile se ha propuesto para el año 2050 ser un país carbono neutral [2].

Valparaíso ha sido pionera en electro movilidad desde los años 50 junto a los trolebuses, ascensores, metro, todos estos eléctricos, pero actualmente cuenta con una gran cantidad de líneas de buses a combustión interna, las cuales generan gases, efecto invernadero contaminando nuestro planeta, la ciudad y a sus habitantes, en donde el año 2018 la región de Valparaíso emitió directamente 14.170 kt CO₂ representando un 12.6 % del total de emisiones de GEI nacionales [3].

Recientemente, el ministerio de Energía lanzó la Estrategia Nacional de Electromovilidad, que tiene como meta que al 2035 el 100 % de las ventas de vehículos livianos medianos, de transporte público [4], la cual fomenta al cambio eléctrico. En la siguiente investigación existirán varios temas de carácter a analizar, ¿Cuál es el análisis de los gases de efecto invernadero del transporte público actual de Valparaíso y cómo se contrasta con el caso propuesto para minimizarlos?, ¿Cómo se puede demostrar, utilizando datos científicos, que el ser humano es el responsable del calentamiento global durante el último siglo?, ¿Cuáles son los distintos modelos matemáticos de localización de instalaciones que se pueden analizar y cuál podría ser el más adecuado para el caso propuesto?, ¿Cuáles son los factores clave que se deben identificar en la búsqueda de la localización de instalaciones con el fin de elegir el lugar geográfico entre varios para llevar a cabo las operaciones?, ¿Cómo se puede determinar la cantidad máxima de energía que deben utilizar los buses eléctricos para poder regresar al punto de carga?, ¿Cuáles podrían ser las posibles limitaciones operativas de la nueva flota de buses eléctricos después de ser analizada e identificada?.

Actualmente, el Ministerio de Energía de Chile busca acelerar la electromovilidad, transformando el parque vehicular con foco en el transporte público, flotas comerciales y vehículos de alto recorrido en general [5]. Los vehículos eléctricos son cero emisión, no producen emisiones de gases ni partículas, no emiten ruido, no requieren lubricantes y filtros mejorando el manejo de residuos, recuperan energía gracias al sistema de frenos regenerativos, la meta al 2050 de tener un 40 % de vehículos eléctricos livianos, se estima que se evitarían 11 millones de toneladas de CO₂ al año, lo que equivale a reducir el gasto en energéticos del país en más de USD 3.300 millones anuales, equivalente a cerca del 1.5 por ciento del PIB del año 2016 [5].

RESULTADOS OBTENIDOS

Resulta ser inequívoco que el aumento de CO_2 , metano y óxido nitroso en la atmósfera durante la era industrial es el resultado de las actividades humanas y que la influencia humana es el principal impulsor de muchos cambios observados en la atmósfera, el océano, la criósfera y la biosfera [6], en donde es improbable que el Sol haya causado la tendencia de calentamiento global observada durante el último medio siglo [6]. El 73.2 % de las emisiones mundiales corresponden a la de generación de energía, en donde el 16.2 % corresponde al transporte [7], se hace más que necesario el cambio a tecnologías limpias en donde la electromovilidad podría jugar un papel crucial. Es importante eliminar la dependencia de las energías fósiles, concluyendo que existe una correlación en la producción de petróleo con las emisiones de CO_2 .

Nuestro océano global cubre más del 70 % de la superficie de la Tierra y tiene una capacidad calorífica muy alta. Ha absorbido el 90 % del calentamiento que se ha producido en las últimas décadas debido al aumento de los GEI, y los pocos metros superiores del océano almacenan tanto calor como toda la atmósfera de la Tierra. Los efectos del calentamiento de los océanos incluyen el aumento del nivel del mar debido a la expansión térmica, la decoloración de los corales, el derretimiento acelerado de las principales capas de hielo de la Tierra, la intensificación de los huracanes y los cambios en la salud y la bioquímica de los océanos[8].

En este trabajo, se utilizó la heurística método del barrido o método de la regla descrito por Ronal Ballou [9] en vista que al intentar localizar el electroterminal en Valparaíso con modelo TSP se generaban infinitas combinaciones posibles, quedando problema sin solución matemática, logrando de esta forma entregar un candidato de localización que sería siendo en este caso el t_4 .

Los buses eléctricos necesitan menos mantenimiento al existir menos piezas sometidas a desgaste, entregando como resultado una operación y mantenimiento mucho más sencillo, de hecho los costos de operación son entre un 30 % y un 50 % menores al de los buses a combustión. Los valores de la energía eléctrica son más estable en comparación a los de la energía fósil, no afectados por las fluctuaciones de los mercados [10], siendo los costos aproximados de los buses a combustión = \$500 x km (dependiendo de tarifa de combustible y tamaño del bus) y costo aproximando los buses eléctricos = \$90 x km (dependiendo de tarifa eléctrica y tamaño del bus) [10].

Al hacer la estimación de las emisiones contaminantes de la actual flota de buses del transvalparaíso se utiliza como caso base el bus Mercedes - Benz Lo 915 y como caso propuesto el bus eléctrico de la empresa BYD. Si el caso propuesto se energiza desde SEN entonces los GEI disminuirían en un 56.2 %, en donde la unidad de negocio número 1 es la que más contamina anualmente, el caso propuesto baja las emisiones, pero no logra ser 0 puesto actualmente Chile tiene un $FE = 0.3 \text{ tCO}_2\text{eq/mWh}$ como lo muestra la Figura 8.4, se recomendaría energizar terminal con paneles fotovoltaicos y así llegar a 0 emisiones, se descarta generación eólica por nula generación.

De las 97 líneas de buses, existen 23 líneas de buses eléctricos mencionadas en la Tabla 8.6 de las cuales no alcanzan a dar sus 4 vueltas diarias, se recomendaría en estas líneas aumentar la dotación de buses para así poder cumplir la demanda.

Para el electroterminal de Valparaíso se podrían usar como modelo los valores de costos obtenidos por la estación, el conquistador de US\$ 8.5 millones, que es la más grande de sudamérica, para así tener una idea aproximada de cuáles serían de forma aproximada los costos asociados a replicar un terminal de iguales envergaduras en la V región. Si analizamos en RETScreen Expert bajo los datos de inversión de este electroterminal simulando de esta forma la recuperación de la inversión, nos entrega que esta se recupera al año 20, en donde las horas de no uso el electroterminal podría técnicamente energizar a SEN.

Si no logramos como civilización, la disminución de los GEI nos enfrentaremos a consecuencias potencialmente devastadoras como resultados catastróficos del cambio climático, en un artículo de la BBC [11] se habla de la extinción humana, siendo este el peor escenario producto de no tomar medidas en la reducción de los GEI. Actualmente, el incremento de temperatura se acerca a los 1.5 °C, sigue requiriendo una reducción drástica del 45% en las emisiones de CO_2 o dióxido de carbono de 45% para 2030, por qué 2030 es la fecha límite de la humanidad para evitar una catástrofe global [12], según los últimos informes de IPCC vamos camino a un aumento de 3 °C, muy por encima del máximo de 2 °C contemplado por los Acuerdos de París sobre cambio climático.

ABSTRACT

The great use of fossil fuels has currently diminished the quality of life on our planet, with the consequent climate change added to an increase in temperatures, reaching alarming levels in large cities, the poor quality of its air generating respiratory problems in the people who live there and great noise pollution, the latter being generated in 70 percent by transportation [1]. It is for this reason that a change to clean energies such as electricity is needed. Chile has proposed to be a carbon neutral country by 2050 [2].

Valparaiso has been a pioneer in electro mobility since the 50's with trolleybuses, elevators, subways, all electric, but currently has a large number of internal combustion bus lines which generate greenhouse gases polluting our planet, the city and its inhabitants, where in 2018 the Valparaiso region directly emitted 14.170 kt CO₂ representing 12.6 percent of total national GHG emissions [3].

Recently, the Ministry of Energy launched the National Electromobility Strategy, which Its goal is that by 2035, 100 % of sales of light-medium vehicles, transportation public [4], which encourages electrical change. In the following investigation there will be several themes of character to analyze, ¿What is the analysis of greenhouse gases from public transportation current situation of Valparaíso and how does it contrast with the proposed case to minimize them?, ¿How can demonstrate, using scientific data, that humans are responsible for global warming during the last century?, ¿What are the different mathematical models for the location of facilities that can be analyzed and which could be the most appropriate for the proposed case?, ¿What are the key factors that must be identified when searching for the location of facilities in order to choose the geographical location among several to carry out operations?, ¿How can you determine the maximum amount of energy that electric buses must use to be able to return to the starting point load?, ¿What could be the possible operational limitations of the new fleet of electric buses after being analyzed and identified?.

The Chilean Ministry of Energy is currently seeking to accelerate electric mobility by transforming the vehicle fleet with a focus on public transportation, commercial fleets and high-distance vehicles in general [5]. Electric vehicles are zero emission, do not produce gas emissions or particles, do not emit noise, do not require lubricants and filters improving waste management, recover energy thanks to the regenerative braking system, the 2050 goal of having 40 percent of light electric vehicles, it is estimated that 11 million tons of CO₂ per year would be avoided, which is equivalent to reducing the country's energy expenditure by more than USD 3.3 billion annually, equivalent to about 1.5 percent of GDP in 2016 [5].

RESULTS OBTAINED

It is unequivocal that the increase of CO₂, methane and nitrous oxide in the atmosphere during the industrial era is the result of human activities, and that human influence is the primary industrial era is the result of human activities and that human influence is the main driver of many observed changes in the atmosphere, ocean, cryosphere and biosphere [6], where it is unlikely that the Sun has the Sun is unlikely to have caused the global warming trend observed over the past half century [6]. half century [6]. 73.2 % of global emissions correspond to energy generation, where 16.2 % corresponds to transportation [7], The change to clean technologies is more than necessary, where electromobility could play a crucial role. It is important to eliminate dependency of fossil energies concluding that there is a correlation in oil production with CO₂ emissions.

Our global ocean covers more than 70 % of the Earth's surface and has a very high heat capacity. It has absorbed 90 % of the warming that has occurred in recent decades due to increased GHGs, and the top few meters of the ocean store as much heat as the Earth's entire atmosphere. The effects of ocean warming include sea level rise due to thermal expansion, coral bleaching, accelerated melting of the Earth's major ice sheets, intensification of hurricanes, and changes in the health and biochemistry of the oceans[8].

In this work, the heuristic sweep method or rule method described by [9] was used since when trying to locate the electroterminal in Valparaíso with the TSP model, infinite restrictions, leaving the problem without a mathematical solution, thus managing to deliver a location candidate that would be, in this case, terminal t_4 .

Electric buses require less maintenance as there are fewer parts subject to wear, resulting in much simpler operation and maintenance, in fact the costs of operation are between 30 % and 50 % lower than that of combustion buses. The values of electric energy are more stable compared to those of fossil energy, not affected by market fluctuations [10], with the approximate costs of combustion buses = \$500 x km (depending on fuel rate and bus size) and cost approximating electric buses = \$90 x km (depending on electric rate and bus size) [10].

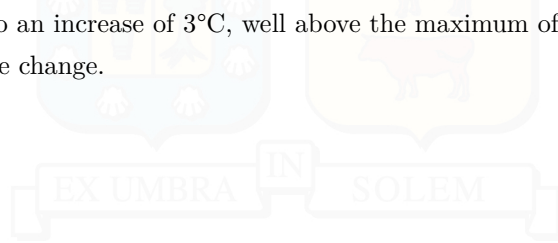
When estimating the polluting emissions of the current transvalparaiso bus fleet, the Mercedes - Benz Lo 915 bus is used as a base case and the electric bus as a proposed case. from BYD company. If the proposed case is energized from SEN then the GHG would decrease by 56.2 %, where business unit number 1 is the one that pollutes the most annually, the proposed case lowers emissions but fails to be 0 since Chile currently has a FE = 0.3 tCO₂eq/mWh as shown in Figure 8.4, it is recommended to energize the terminal with photovoltaic panels and thus reach 0 emission, wind generation is ruled out due to zero generation

Of the 97 bus lines, there are 23 electric bus lines mentioned in table 8.6, of which they are not able to make their 4 daily trips. It will be recommended on these lines to increase the number of buses in order to meet the demand.

For the Valparaíso electroterminal, the cost values obtained by the US\$ 8.5 million El Conquistador station, which is the largest in South America, could be used as a model, in order to have an

approximate idea of what the costs associated with replicating a terminal of equal size in the V region would be. If we analyze in RETScreen Expert under the investment data of this electroterminal, thus simulating the recovery of the investment, gives us that this is recovered in the year 20, where the hours of non-use the electroterminal could technically energize to SEN.

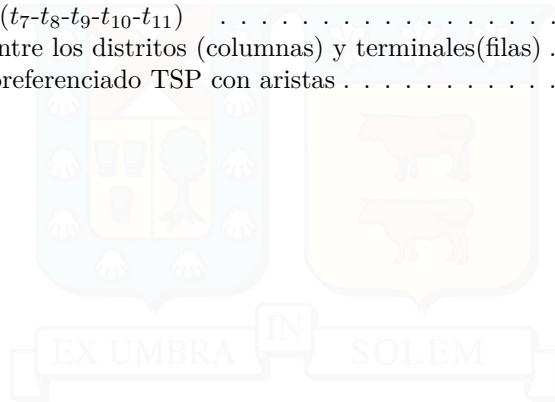
If we fail as a civilization to reduce GHGs we will face potentially devastating consequences as catastrophic results of climate change, a BBC [11] article talks about human extinction being the worst case scenario if no action is taken to reduce GHGs. Currently, the temperature increase is close to 1.5 °C, it still requires a drastic reduction of 45 % in emissions of CO_2 or carbon dioxide of 45 % by 2030, why 2030 is the deadline for humanity to avoid a global catastrophe [12], according to the latest IPCC reports we are on the way to an increase of 3°C, well above the maximum of 2°C contemplated by the Paris Agreements on climate change.



Índice de Contenidos

1. Objetivo General	1
1.1. Objetivos Específicos	1
2. Marco teórico	2
2.1. Antecedentes Históricos	2
3. Visión a Futuro	4
3.1. Influencia Humana en el Cambio Climático	4
3.2. Calentamiento del océano	5
3.3. Contribuciones de GEI según sus Actividades	7
3.4. Consumo de Petróleo y su proyección	8
3.5. Conferencia de las Partes (COP)	10
3.6. Escenario mundial	11
4. Generación de Energía	14
4.1. Generación de energía en Chile	14
4.2. Glosario de Tipos de Vehículos	16
4.3. Escenario chileno	17
4.4. Sistema transporte público del Gran Valparaíso	18
4.5. Infraestructura transporté Publico en Valparaíso	19
4.6. Oferta de buses en ejes troncales	20
5. Pendientes en Valparaíso	21
5.1. Nuevo estándar de transporte público en Santiago	21
5.2. Antigüedad de los buses en Valparaíso	23
5.3. Terminales de buses en el Gran Valparaíso	24
5.4. Buses Eléctricos en el Gran Valparaíso	25
6. Localización	26
6.1. Método Branch and Bound	26
6.2. Método Cortes de Gomory	27
6.3. Traveling Salesman Problem (TSP)	28
6.4. Vehicle Routing Problem (VRP)	30
7. Marco Metodológico	33
7.1. Análisis Matemático	33
7.2. Búsqueda de terrenos para Electroterminal	35
7.3. Cálculo de las distancias Manhattan	37
7.4. Elección del modelo VRP o TSP	40
7.5. Método de la regla	41
8. Análisis Energético	45
8.1. Carga y descarga de las baterías	45
8.2. Estimación de las Emisiones de Contaminantes	47
8.3. Energía Renovable para el Electroterminal	53
8.4. Análisis Eólico	53
8.5. Análisis Fotovoltaico	54

9. Conclusiones	58
10. Anexos	60
10.1. Python Grafo TSP	60
10.2. Python Gráfico de Calor para GEI	61
10.3. Matriz de distancias entre distritos	62
10.4. Python tabla TSP ($t_1-t_2-t_3-t_4-t_5-t_6$)	64
10.5. Python tabla TSP ($t_7-t_8-t_9-t_{10}-t_{11}$)	68
10.6. Distancias en km entre los distritos (columnas) y terminales(filas)	71
10.7. Python Gráfico georeferenciado TSP con aristas	72
Bibliografía	74



Índice de Tablas

4.1. Glosario de distintas tecnologías utilizadas en vehículos eléctricos [13].	16
4.2. Distribución de Ventas por tipo de Vehículo [13].	18
7.1. Ubicaciones de centroides de distritos (Fuente Elaboración Propia).	34
7.2. Ubicaciones posibles de Terminales Eléctricos (Fuente Elaboración Propia).	36
7.3. Información eléctrica del terreno t_4 localizado [14].	44
8.1. Caso Base Bus Diesel Mercedes - Benz Lo 915(Fuente Elaboración Propia).	49
8.2. Caso Propuesto Bus Eléctrico BYD [15].	49
8.3. Unidades de negocios GEI diarios y anuales (Fuente Elaboración Propia).	50
8.4. Distintas unidades de negocios en Valparaíso [16] Cálculos de GEI(Fuente elaboración propia).	51
8.5. Resumen Totales GEI Caso Base v/s Caso Propuesto (Fuente elaboración propia).	51
8.6. Distintas unidades de negocios buses eléctricos en Valparaíso que no alcanzan a dar sus 4 vueltas diarias (Fuente elaboración propia).	52

Índice de Figuras

2.1. Carros de Sangre, Estación Central, Santiago de Chile hacia 1890 [17].	2
2.2. Carros de Sangre, Portal Fernández Concha, 1914 [17].	3
3.1. Temperatura v/s Actividad Solar [6].	4
3.2. Cambios en el contenido de calor del océano desde 1955, Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) [8].	6
3.3. Cambios en el contenido de calor del océano desde 1992, National Aeronautics and Space Administration (NASA) [8].	6
3.4. Emisiones de GEI por actividad [7].	7
3.5. Cifras equivalentes a millones de barriles de petróleo al día [18].	8
3.6. Producción de Petróleo y prevista [19].	9
3.7. Emisiones mundiales de GEI y proyección a 2030 [20].	9
3.8. COP 28 Noticias ONU Cambio Climático Dubai, 13 de diciembre de 2023 [21].	10
3.9. Parque mundial de vehículos eléctricos en regiones seleccionadas [18].	11
3.10. Ventas mensuales de vehículos eléctricos nuevos en China 2020-2023 [18].	12
3.11. Ventas anuales de vehículos eléctricos en el Mundo, China, Europa y Estados Unidos 2018-2022 [18].	12
3.12. Ventas anuales de vehículos eléctricos en el Noruega, Suecia, Países Bajos y Alemania 2018-2022 [18].	12
3.13. Ventas anuales de vehículos eléctricos en Reino Unido, Francia, Canadá, Corea del Sur y Japón 2018-2022 [18].	13
4.1. Participación relativa por fuente de generación entre 1996-2022 [22].	15
4.2. Volumen de energía generada por fuente GWh [22].	15
4.3. Capacidad instalada por fuente mW [22].	16
4.4. Distribución de Ventas por tipo de Vehículo [13].	17
4.5. Flota de buses eléctricos división Codelco Chuquicamata [23].	18
4.6. Distribución rutas del transporte público del gran Valparaíso [23].	19
4.7. Concentración de oferta buses en ejes centrales [24].	20
4.8. Frecuencia de buses Gran Valparaíso, día laboral [24].	20
5.1. Pendientes en Gran Valparaíso [24].	21
5.2. Bus Eléctrico BYD K9FE usado en RED Santiago [15].	22
5.3. Bus Eléctrico BYD K9FE usado en RED Santiago, máxima pendiente [15].	22
5.4. Bus Eléctrico BYD K9FE usado en RED Santiago [15].	23
5.5. Antigüedad promedio buses comuna de Valparaíso [24].	23
5.6. Terminales en el gran Valparaíso por unidad de negocio [24].	24
5.7. Aprobación 44 Buses Eléctricos en el Gran Valparaíso [25].	25
6.1. Branch-and-bound W.L. Eastman’s 1958 Ph.D. thesis [26].	26
6.2. Método Cortes de Gomory [27].	27
7.1. Plano de distritos y sus centroides (Fuente Elaboración Propia).	34
7.2. Plan Regulador Comunal para Valparaíso (PRC) [28].	35
7.3. Localización de 11 posibles terminales en terrenos libres (Fuente Elaboración Propia).	36
7.4. Cálculo de las distancias Manhattan (Fuente elaboración propia).	37
7.5. Mapa Calor en Python - Distancias en km entre los distritos (Fuente Elaboración Propia).	38

7.6. Mapa Calor en Python - Distancias en km entre los posibles terminales (Fuente elaboración propia).	38
7.7. Mapa Calor en Python - Distancias en km entre los distritos (filas) y terminales(columnas) (Fuente Elaboración Propia).	39
7.8. Mapa Calor en Python - TSP en km para cada posible terminal (Fuente Elaboración Propia).	40
7.9. Mapa Calor en Python - TSP en km para cada posible terminal (Fuente Elaboración Propia).	41
7.10. Gráfico en Python georeferenciado para hacer TSP por cada terminal (Fuente Elaboración Propia).	42
7.11. Gráfico en Python, conexiones de nodos TSP para t_4 elegido por método de la regla (Fuente Elaboración Propia).	43
7.12. Terreno localizado para t_4 elegido (Fuente Elaboración Propia).	44
7.13. Información eléctrica del terreno terminal t_4 localizado [14].	44
8.1. Carga y descarga de batería (Fuente elaboración propia).	45
8.2. Principales componentes de los buses eléctricos [10].	46
8.3. Los 3 principales clasificaciones para los cargadores eléctricos admitidos en Chile [10].	46
8.4. Factor de Emisión del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) [29].	52
8.5. Gráfico en Python, mapa de calor GEI Caso Base v/s Caso Propuesto (Fuente elaboración propia).	52
8.6. Velocidad del viento en Valparaíso [30].	53
8.7. RETScreen Expert análisis generación de parque eólico Valparaíso [31].	54
8.8. Electroterminal El Conquistador [32].	54
8.9. Ingresos Anuales (Fuente elaboración Propia).	55
8.10. Recuperación de la inversión en el año 19 de operación (Fuente elaboración Propia).	55
8.11. Vialidad Financiera (Fuente elaboración Propia).	56
8.12. Vialidad Financiera (Fuente elaboración Propia).	57
8.13. Recuperación de la inversión en el año 11 de operación (Fuente elaboración Propia).	57

1 | Objetivo General

Evaluar la factibilidad técnica y financiera de llevar a cabo el cambio del transporte público de los buses a combustión por buses eléctricos en la comuna de Valparaíso, con el fin de minimizar los gases de efectos invernadero, consumo energético y operación de esta.

1.1. Objetivos Específicos

- Analizar los gases efectos invernaderos del transporte público de Valparaíso actuales y contrastarlo con el caso propuesto con el objetivo de la minimización de estos.
- Demostrar con datos científicos que es el ser humano el causante del calentamiento global en el último siglo.
- Analizar distintos modelos matemáticos de localización de instalaciones y elegir cuál podría ser el más correcto, para el caso propuesto.
- Identificar los factores clave en la búsqueda de la localización de las instalaciones con el objetivo de elegir el lugar geográfico entre varios para la realización de las operaciones.
- Determinar la cantidad de energía máxima a utilizar por los buses eléctricos con el objetivo que puedan volver al punto de carga.
- Analizar nueva flota de buses eléctricos he identificar cuáles serán las posibles limitaciones de operaciones que esta tendrá.

2 | Marco teórico

2.1. Antecedentes Históricos

Hasta mediados del siglo XIX, Santiago no requirió de un sistema de transporte público, ya que todavía era posible recorrer a pie, una ciudad que mantenía un ritmo cansino y pre moderno. No obstante, su progresiva expansión demográfica y económica demandó la implementación de una red de transporte capaz de relacionar lo más rápido posible las distintas áreas de la ciudad. Así, en 1858 se inauguró en la Alameda una línea de carros de sangre, el primer medio de transporte público capitalino [17].

Para cubrir toda el área urbana de Santiago se desarrolló en pocos años, una red de carros tirados por caballos, conocidos como carros de sangre. Los primeros que existieron en la capital circularon por las calles Ahumada y Estado hasta el mercado y favorecieron al comercio. Pronto la red creció hacia el sur por Arturo Prat y San Diego, hacia el poniente hasta Estación Central y también por calle Catedral, Rosas y San Pablo, trayectos que eran realizados por más de 200 carros de sangre y una dotación de mil caballos. En 1896 sus servicios se volvieron a ampliar y su cobertura alcanzó a Plaza Ñuñoa, Apoquindo con Tobalaba y Llano Subercaseaux [17].



Figura 2.1: Carros de Sangre, Estación Central, Santiago de Chile hacia 1890 [17].

A pesar de los avances alcanzados por la red de transporte a sangre, los habitantes de Santiago se hallaban disgustados por el servicio prestado por la "Empresa del Ferrocarril Urbano". La falta de puntualidad en el cumplimiento de los horarios, aglomeraciones, carros sucios y desvencijados, caballos viejos y cansados y recorridos poco eficientes eran algunas de las críticas que circulaban en aquel

tiempo, a lo que se le sumaba la inexistencia de organismos técnicos que regularan la cobertura y el funcionamiento del servicio. La Plaza de Armas y las calles que la flanqueaban se convirtieron en un gran terminal y en un peligro para los peatones. El 29 de mayo de 1895, el periódico *El Chileno*, publicó: "... los carros desvencijados, sucios e incómodos, manejados de modo que jamás llegan a los desvíos, arrastrados con caballos que no sirven, provocando atropellos y desrielamientos a cada instante y guiados por cocheros y conductores temibles por su mala educación" [17].

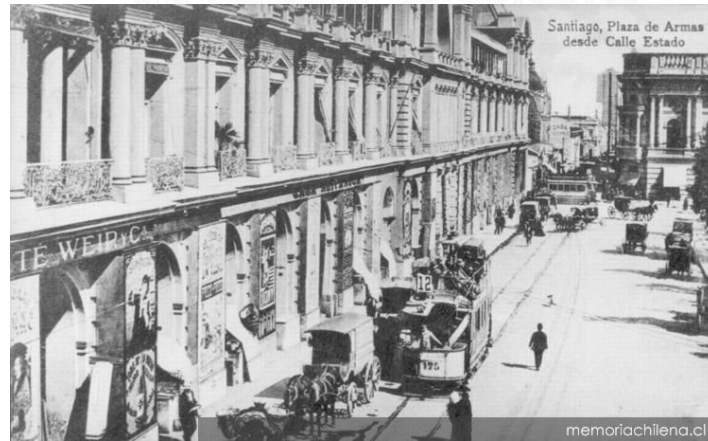


Figura 2.2: Carros de Sangre, Portal Fernández Concha, 1914 [17].

Rudolf Christian Karl Diesel (1858-1913) era un inventor e ingeniero mecánico alemán, Diesel era consciente de que los motores a vapor desperdiciaban un 90% de la energía que potencialmente podía generarse a partir del combustible usado en aquel entonces, el carbón mineral, por eso se propuso diseñar una tecnología mucho más eficiente y, luego de mucha experimentación, obtuvo en 1898 una patente para su novedoso diseño, que al principio estaba pensado para ayudar a pequeños negocios y artesanos, no a industrias [33].

El crecimiento exponencial del parque automotor a nivel mundial representa un aumento significativo en la cantidad de los gases tóxicos hacia el medio ambiente. Es por ello que se necesita buscar soluciones que reduzcan el nivel de toxicidad de los residuos contaminantes generados por los vehículos motorizados [34].

3 | Visión a Futuro

Lamentablemente, el futuro no se ve muy alentador para las próximas generaciones, principalmente debido al cambio climático (CC) aunque este es un fenómeno natural que ha ocurrido a lo largo de la historia de la tierra debido a los ciclos orbitales de esta alrededor del sol, variaciones en la radiación solar, grandes erupciones volcánicas, ciclos oceánicos con sus cambios de corrientes, pero desde el siglo XIX, las actividades humanas han sido el principal motor del cambio climático, debido principalmente a la quema de combustibles fósiles como el carbón, el petróleo y el gas [35].

Durante el último siglo, la quema de combustibles fósiles como carbón y petróleo ha aumentado la concentración de dióxido de carbono CO_2 atmosférico. Este aumento se debe a que el proceso de quema de carbón o petróleo combina el carbono con el oxígeno del aire para producir CO_2 . En menor medida, la limpieza de tierras para la agricultura, la industria y otras actividades humanas ha aumentado las concentraciones de gases efecto invernadero (GEI) [6].

3.1. Influencia Humana en el Cambio Climático

En su Sexto Informe de Evaluación, el Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC), compuesto por expertos científicos de países de todo el mundo, concluyó que es inequívoco que el aumento de CO_2 , metano y óxido nitroso en la atmósfera durante la era industrial es el resultado de las actividades humanas y que la influencia humana es el principal impulsor de muchos cambios observados en la atmósfera, el océano, la criósfera y la biosfera [6].

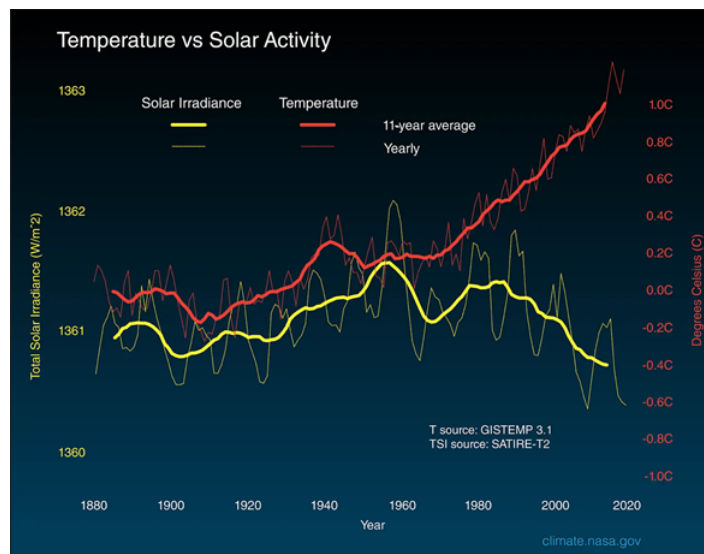


Figura 3.1: Temperatura v/s Actividad Solar [6].

Los científicos utilizan una métrica llamada irradiancia solar total (TSI) para medir los cambios en la energía que la Tierra recibe del Sol. TSI incorpora el ciclo solar de 11 años y las erupciones/tormentas solares de la superficie del Sol. El gráfico anterior compara los cambios globales en la temperatura de la superficie (línea roja) y la energía del Sol que recibe la Tierra (línea amarilla) en watt, unidades de energía recibida por unidad de tiempo, (o potencia) por metro cuadrado desde 1880. Las líneas más claras/delgadas muestran los niveles anuales, mientras que las líneas más gruesas muestran las tendencias promedio de 11 años. Se utilizan promedios de once años para reducir el ruido natural de un año a otro en los datos, haciendo que las tendencias subyacentes sean más obvias, la cantidad de energía solar que recibe la Tierra ha seguido el ciclo natural de 11 años de pequeños altibajos del Sol sin ningún aumento neto desde 1880. Durante el mismo período, la temperatura global ha aumentado notablemente. Por lo tanto, es extremadamente improbable que el Sol haya causado la tendencia de calentamiento global observada durante el último medio siglo [6].

Pero varias líneas de evidencia muestran que el calentamiento global actual no puede explicarse por cambios en la energía del Sol:

Desde 1750, la cantidad media de energía solar se mantuvo constante o disminuyó ligeramente, si un Sol más activo provocará el calentamiento, los científicos esperarían temperaturas más cálidas en todas las capas de la atmósfera. En cambio, han observado un enfriamiento en la atmósfera superior y un calentamiento en la superficie y las partes inferiores de la atmósfera. Esto se debe a que los gases de efecto invernadero están frenando la pérdida de calor desde la atmósfera inferior. Los modelos climáticos que incluyen cambios en la irradiancia solar no pueden reproducir la tendencia de temperatura observada durante el último siglo o más sin incluir un aumento de los GEI [6].

3.2. Calentamiento del océano

Nuestro océano global cubre más del 70 % de la superficie de la Tierra y tiene una capacidad calorífica muy alta. El 90 % del calentamiento global está ocurriendo en el océano producto de los GEI, lo que hace que el calor interno del agua aumente desde que comenzaron los registros modernos en 1955, como se muestra en la Figura 3.2. (La región sombreada en azul indica el margen de incertidumbre del 95 %). Este gráfico muestra estimaciones anuales para los primeros 2000 metros de profundidad del océano, cada punto de datos en el gráfico representa un promedio de cinco años. Por ejemplo, el valor de 2018 representa el cambio promedio en el contenido de calor del océano (desde 1955) para los años 2016 hasta 2021 inclusive [8].

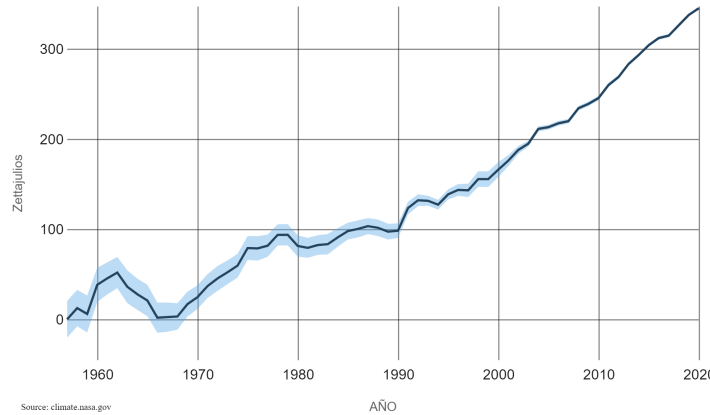


Figura 3.2: Cambios en el contenido de calor del océano desde 1955, Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA) [8].

El gráfico de la Figura 3.3 rastrea los cambios mensuales en el contenido de calor del océano para toda la columna de agua (desde la parte superior hasta la parte inferior del océano) desde 1992 hasta 2019, integrando observaciones de satélites, instrumentos en el agua y modelos de computadora. El calor almacenado en el océano hace que su agua se expanda, lo que es responsable de un tercio a la mitad del aumento global del nivel del mar. La mayor parte de la energía añadida se almacena en la superficie, a una profundidad de cero a 700 metros. Los últimos 10 años fueron la década más cálida del océano desde al menos el siglo XIX. El año 2021 fue el año más cálido registrado en el océano y vio el nivel del mar mundial más alto [8].

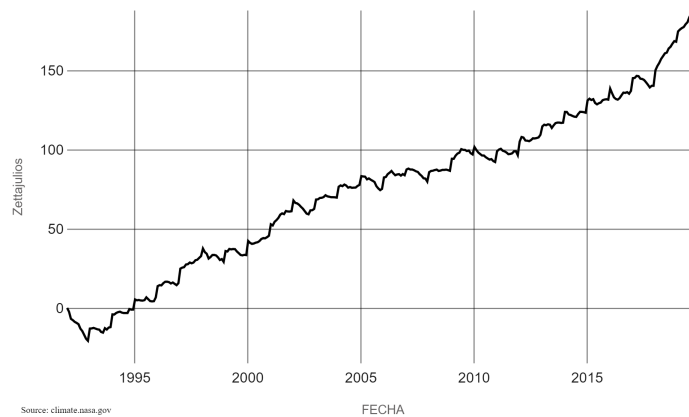


Figura 3.3: Cambios en el contenido de calor del océano desde 1992, National Aeronautics and Space Administration (NASA) [8].

3.3. Contribuciones de GEI según sus Actividades

En vista a los resultados obtenidos en donde revelan que es la actividad humana la responsable de los GEI nace la pregunta ¿Cuáles son las Actividades que más contaminan? ¿Cuántos años más quedan de Petróleo?, es necesario saber donde provienen estas emisiones para poder mitigarlas.

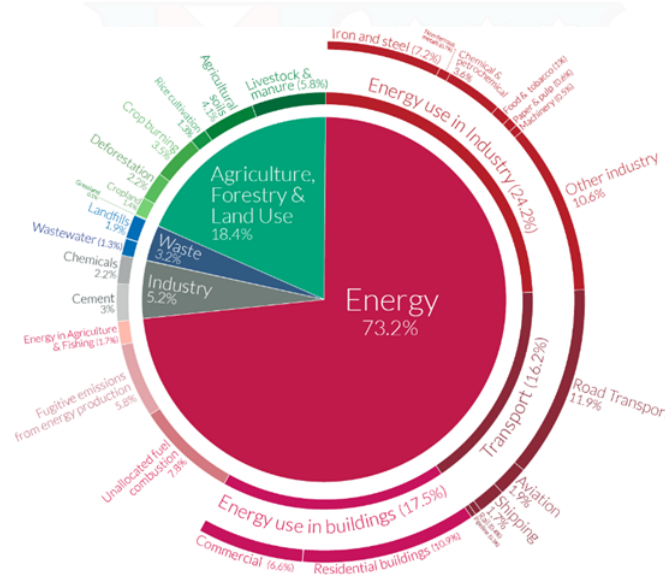


Figura 3.4: Emisiones de GEI por actividad [7].

De este desglose se desprende claramente que una variedad de sectores y procesos contribuyen a las emisiones globales. Esto significa que no existe una solución única o sencilla para abordar el cambio climático. Centrarse únicamente en la electricidad, el transporte, los alimentos o la deforestación es insuficiente. Incluso dentro del sector energético, que representa casi las tres cuartas partes de las emisiones, no existe una solución sencilla. Incluso si pudiéramos descarbonizar completamente nuestro suministro de electricidad, también necesitaríamos electrificar toda nuestra calefacción y transporte por carreteras. Y todavía tendríamos que lidiar con las emisiones del transporte marítimo y la aviación, para las cuales aún no contamos con tecnologías bajas en carbono [6].

El 73.2% de las emisiones mundiales corresponden a la de generación de energía, en donde el 16.2% corresponde al transporte [7], se hace más que necesario el cambio a tecnologías limpias en donde la electromovilidad podría jugar un papel crucial.

3.4. Consumo de Petróleo y su proyección

Alcanzar el tope de consumo de petróleo no es suficiente para revertir el cambio climático y el nivel al que llegaremos al final de esta década todavía quedará muy lejos del necesario para mantener el aumento de la temperatura global dentro de límites seguros [18].

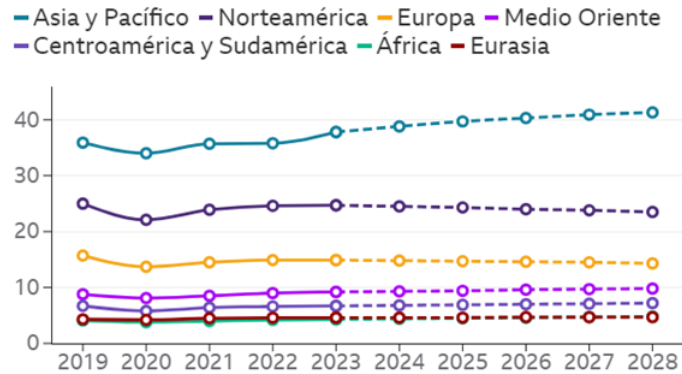


Figura 3.5: Cifras equivalentes a millones de barriles de petróleo al día [18].

De hecho, la Global EV Data Explorer [18] señaló con anterioridad que, para alcanzar el cero neto de emisiones de GEI en el sector energético en 2050, imprescindible para limitar el aumento de la temperatura global a 1.5°C sobre los niveles preindustriales, es necesario detener de inmediato la apertura de nuevas explotaciones de carbón, petróleo y gas. En todo caso, sería importante que la transición de los combustibles fósiles a las energías renovables se produzca a escala global. La Global EV Data Explorer [18] no es el único organismo que ha anunciado el fin del aumento de la demanda de crudo. Compañías petroleras como BP también creen que está disminuyendo. Entonces, ¿Qué hay detrás de estas cifras y qué impide un descenso más pronunciado? [36].

Hasta principios de la década de 2010, los debates sobre el "tope del petróleo" se referían casi exclusivamente a las preocupaciones sobre el momento en el que se alcance la capacidad máxima de producción, a lo que seguirá una disminución irreversible. Esta era una fuente de preocupación para los expertos en energía, que veían una creciente dependencia mundial del petróleo, si bien nunca se cumplieron las predicciones de una llegada, a veces, se decía, inminente del nivel máximo de producción. Una de las principales razones por las que el mundo no ha alcanzado este tope en los últimos años es la irrupción de fuentes de crudo no convencionales, como el petróleo de esquisto bituminoso y las arenas bituminosas, así como los descubrimientos de grandes yacimientos de petróleo convencionales en países como Guyana, Namibia y Brasil [36].

Con lo que se concluye que existe una correlación en la producción de petróleo con las emisiones de GEI y de ahí la importancia de intentar predecir cuando ocurrirá su pick máximo de producción, aunque como se mencionó anteriormente son varios los sectores que emiten GEI.

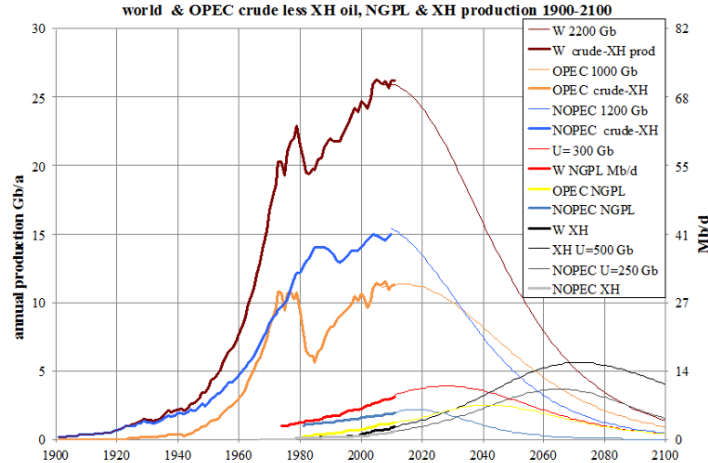


Figura 3.6: Producción de Petróleo y prevista [19].

En la Figura 3.6 la línea en café oscuro indica la producción de Petróleo mundial y la prevista, se espera que a penas se desarrollen nuevas tecnologías, así como aumento la producción de petróleo, esta caerá.

El Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC) es un organismo científico de las Naciones Unidas, en donde su función es evaluar la ciencia global relacionada con el cambio climático. Según su informe número sexto, que entrega información detallada de los impactos y riesgos asociados con el calentamiento global de 1.5°C por encima de los niveles preindustriales, así como las posibles vías para limitar el calentamiento global a ese nivel [20].

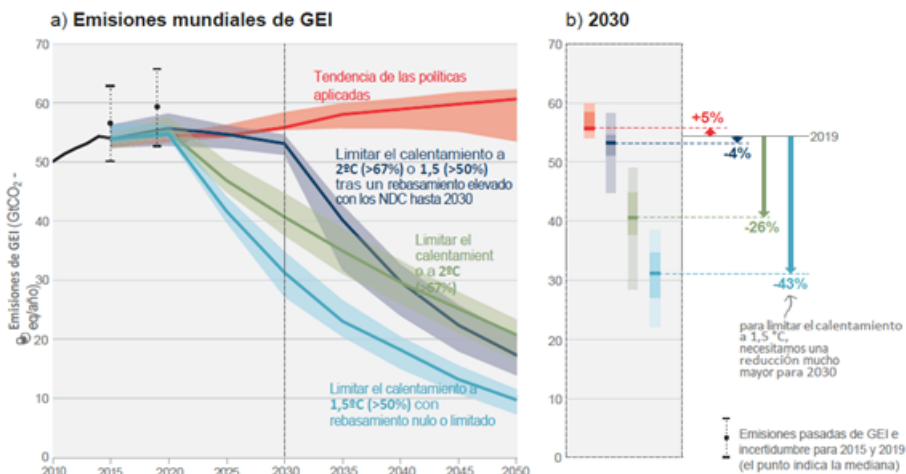


Figura 3.7: Emisiones mundiales de GEI y proyección a 2030 [20].

En la Figura 3.7 muestra las emisiones globales de GEI en 2030 implícitas en las contribuciones determinadas a nivel nacional (NDC) anunciadas en octubre de 2021, hacen probable que el calentamiento supere los 1.5°C ($> 50\%$ de probabilidad) durante el siglo XXI y dificultan limitar el calentamiento por debajo de 2°C ($> 60\%$ de probabilidad). Existen brechas entre las emisiones proyectadas de las

políticas implementadas y las de las NDC y los flujos financieros no alcanzan los niveles necesarios para cumplir los objetivos climáticos en todos los sectores y regiones [20].

Cabe señalar que las Contribuciones Determinadas a Nivel Nacional (NDC) son los compromisos que los países asumen voluntariamente como parte del Acuerdo de París, un acuerdo internacional adoptado en 2015 en el marco de la Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático (CMNUCC) y sin este no será posible la reducción de los GEI, en donde los países revisan y actualizan sus NDC periódicamente para intensificar sus esfuerzos y reflejar nuevos avances tecnológicos.

3.5. Conferencia de las Partes (COP)

El 13 de diciembre del 2023, se celebró la COP28, señala el "principio del fin" de la era de los combustibles fósiles, al sentar las bases para una transición rápida, justa y equitativa, respaldado por profundos recortes de emisiones y una mayor financiación. El balance global se considera el resultado central de la COP28, ya que contiene todos los elementos que estaban bajo negociación y ahora pueden ser utilizados por los países para desarrollar planes de acción climática más sólidos previstos para 2025 [21].



Figura 3.8: COP 28 Noticias ONU Cambio Climático Dubai, 13 de diciembre de 2023 [21].

El balance reconoce la ciencia que indica que es necesario reducir las emisiones globales de gases de efecto invernadero, se reducirá un 43 % para 2030, en comparación con los niveles de 2019, para limitar el calentamiento global a 1.5°C. Pero señala que las Partes están desviadas en lo que respecta al cumplimiento de los objetivos del Acuerdo de París. El balance insta a las Partes a tomar medidas para lograr, a escala global, triplicar la capacidad de energía renovable y duplicar las mejoras en la eficiencia energética para 2030. La lista también incluye acelerar los esfuerzos hacia la eliminación gradual de la energía incesante a base de carbón, la eliminación gradual de energías fósiles ineficientes, subsidios a los combustibles y otras medidas que impulsen la transición para alejarse de los combustibles fósiles en los sistemas energéticos, de manera justa, ordenada y equitativa, con los países desarrollados continuando a la cabeza. A corto plazo, se alienta a las Partes a presentar objetivos ambiciosos de reducción de emisiones para toda la economía, que abarquen todos los GEI, sectores y categorías y estén alineados con el límite de 1.5°C en su próxima ronda de planes de acción climática para 2025 [21].

3.6. Escenario mundial

Como una manera de mitigar los gases de efectos invernaderos producidos por los motores a combustión, es que nace la opción de vehículos eléctricos. Los mercados de vehículos eléctricos experimentaron un crecimiento exponencial, ya que las ventas superaron los 10 millones en 2022. Un total del 14 % de todos los vehículos vendidos en 2022, frente alrededor del 9 % en 2021 y menos del 5 % en 2021 y menos del 5 % en 2022. China se situó a la cabeza una vez más, con cerca del 60 % de las ventas mundiales de vehículos eléctricos [18].

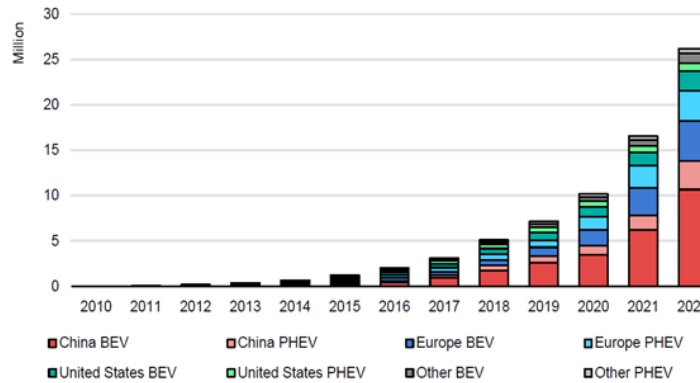


Figura 3.9: Parque mundial de vehículos eléctricos en regiones seleccionadas [18].

Más de la mitad de los vehículos eléctricos que circulan por las carreteras de todo el mundo están ahora en China y el país ya ha superado su objetivo de ventas de vehículos de nueva energía para 2025. En Europa, el segundo mayor mercado, las ventas de vehículos eléctricos aumentaron más de un 15 % en 2022, lo que significa que más de uno de cada cinco vehículos vendidos era eléctrico. Las ventas de vehículos eléctricos en Estados Unidos, el tercer mayor mercado, aumentaron en un 55 % en 2022, alcanzando una cuota de ventas de 8 % [18].

Más de 26 millones de vehículos eléctricos circulaban en 2022, un 60 % más que en 2021 y más de cinco veces el parque de 2018. Todos los indicadores apuntan a un mayor crecimiento para China, aspirando a alcanzar una cuota de ventas del 50 % de aquí a 2030 en las llamadas regiones claves de control de contaminación atmosférica y del 40 % en todo el país de aquí a 2030 para apoyar el plan de acción nacional de reducción de las emisiones de carbono. Si se mantienen las tendencias recientes del mercado, es posible que los objetivos chinos para 2030 se alcancen antes de lo previsto [18].

Los elevados precios de la energía en 2022 tuvieron un impacto desigual en la competitividad de los vehículos eléctricos frente a los vehículos a combustión interna. Los precios del petróleo y gasolina subieron, pero las tarifas eléctricas residenciales también aumentaron en algunos casos. Los precios más altos de la electricidad y el gas también aumentaron, los costos de fabricación tanto de vehículos con motor a combustión interna como de los vehículos eléctricos, y algunos fabricantes de automóviles argumentaron que los altos precios de la energía podrían restringir la inversión futura en nuevas capacidades de fabricación de baterías [18].

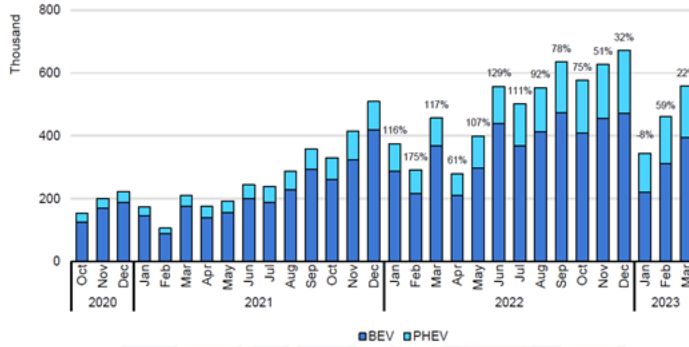


Figura 3.10: Ventas mensuales de vehículos eléctricos nuevos en China 2020-2023 [18].

Europa siguió siendo el segundo mercado mundial de vehículos eléctricos después de China en 2022, con el 25 % de todas las ventas de vehículos eléctricos y el 30 % del stock mundial.

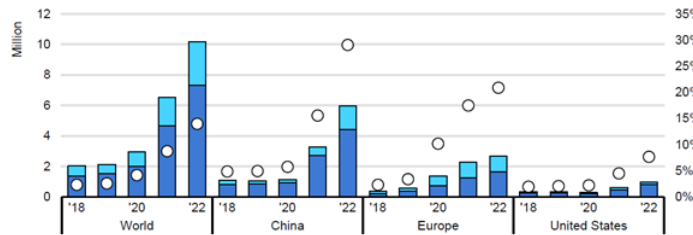


Figura 3.11: Ventas anuales de vehículos eléctricos en el Mundo, China, Europa y Estados Unidos 2018-2022 [18].

La cuota de ventas de vehículos eléctricos alcanzó el 21 %, frente al 18 % en 2021, el 10 % en 2020 y menos del 3 % antes de 2019. Los países europeos siguen ocupando los primeros puestos en la cuota de ventas de vehículos eléctricos, encabezados por Alemania con un 88 %, Noruega con un 54 %, Países Bajos con un 35 %, Suecia con un 31 %, Reino Unido con un 23 % y Francia con un 21 % en 2022 [18].

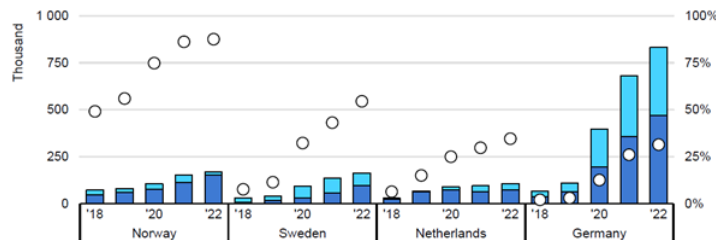


Figura 3.12: Ventas anuales de vehículos eléctricos en el Noruega, Suecia, Países Bajos y Alemania 2018-2022 [18].

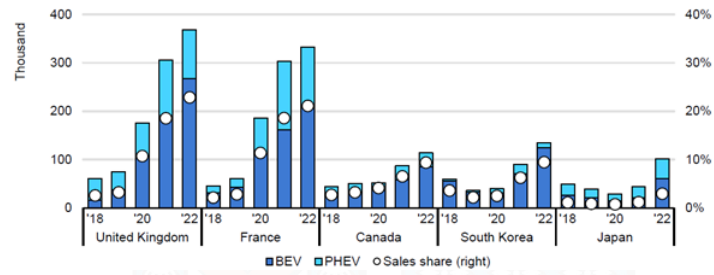


Figura 3.13: Ventas anuales de vehículos eléctricos en Reino Unido, Francia, Canadá, Corea del Sur y Japón 2018-2022 [18].

4 | Generación de Energía

La energía es la capacidad de una fuerza de generar una acción o un trabajo. El término proviene del vocablo griego energía, que significa actividad, y se usa en diversas áreas del conocimiento como son la física y la química. Toda fuerza que realiza un trabajo sobre un objeto provocará un cambio de energía en él. Existe un principio fundamental en física que se conoce como el principio de conservación de la energía, que establece que la energía no puede crearse ni destruirse, sino que solo puede transformarse. La energía también puede almacenarse para ser usada cuando se la requiere, las pilas o baterías son elementos que almacenan energía química y la transforman en energía eléctrica [37].

En Chile, al igual que el resto del mundo, la generación proviene de distintas fuentes, conservando el mismo principio de generación, transformación de la energía mecánica a eléctrica.

Las Energías Renovables son aquellas que provienen de fuentes consideradas inagotables, y que se caracterizan porque en sus procesos de transformación y aprovechamiento no se consumen a escala humana, ya sea por la inmensa cantidad de energía que contienen o porque son capaces de regenerarse en el tiempo. Entre estas fuentes de energía se consideran la hidráulica, la solar, la eólica y la de los océanos. De igual forma, dependiendo de su modo de explotación, también pueden ser catalogadas como renovables la energía proveniente de la biomasa, la energía geotérmica y los biocombustibles [37]. Mientras que las no renovable se acaban por el uso, haciendo de interés el mencionar y analizar como Chile realiza el proceso de generación de energía.

4.1. Generación de energía en Chile

En vista de que el estudio en cuestión hace referencia a las capacidades energéticas de cada uno de los países anteriormente mencionados, nace la pregunta ¿Está Chile preparado energéticamente para solventar este nuevo parque automotriz eléctrico?. El mercado eléctrico en Chile está compuesto por tres sectores cuyas actividades hacen posible la disposición de la energía eléctrica en los distintos puntos del mercado. La interconexión física de los componentes de cada uno de estos sectores se denomina sistema eléctrico, contemplando la: generación, transmisión y distribución. El mercado eléctrico chileno está compuesto por tres sistemas independientes. Sistema Eléctrico Nacional (SEN): sistema compuesto por los antiguos sistemas Interconectado Central (SIC) he Interconectado del Norte Grande (SING) [22]. Estas actividades son desarrolladas por completo por empresas privadas, las que realizan las inversiones necesarias dentro de la normativa específica que rige para cada uno de estos sectores. Así, los sectores de transmisión y distribución se desarrollan dentro de un esquema de sectores regulados, por la característica de monopolio que tienen ambos sectores, mientras que Generación lo hace bajo reglas de libre competencia. A diciembre de 2022 cuenta con una capacidad instalada de 33.218 MW. El 62 % de la capacidad instalada corresponde a fuentes renovables (22.3 % hidráulica;

24.1 % solar; 13 % eólico; 2,3 % biomasa; y 0.3 % geotérmica) mientras que el 38 % corresponde a fuentes térmicas (13.0 % carbón, 15.1 % gas natural y 9.8 % petróleo) [22].

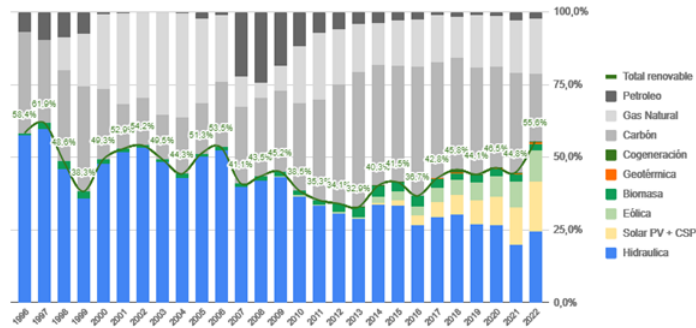


Figura 4.1: Participación relativa por fuente de generación entre 1996-2022 [22].

El aumento de la generación renovable ha sido importante en los últimos años, llegando a un 55.6 % de generación renovable en 2022. El mayor aumento lo han tenido las tecnologías solar, fotovoltaicas y eólica, que han aumentado drásticamente, pasando en conjunto de un 0.5 % en 2011 a un 28 % en 2022 [22]. Sistema de Aysén (SEA): sistema que produce electricidad para abastecer la Región de Aysén del General Carlos Ibáñez del Campo. A diciembre de 2022 posee una capacidad instalada neta de 69.8 MW, con un 56 % diésel, 37.2 % hidráulica, 4.2 % solar y 2.6 % eólica [22]. Sistema de Magallanes (SEM): sistema que produce electricidad para abastecer la Región de Magallanes y de la Antártica Chilena. A marzo de 2022 posee una capacidad instalada neta de 129.3 MW, con un 75.2 % gas natural, 14.8 % diésel, y 10 % eólica [22].

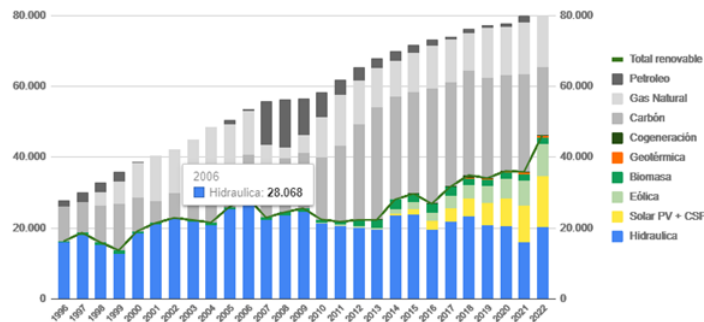


Figura 4.2: Volumen de energía generada por fuente GWh [22].

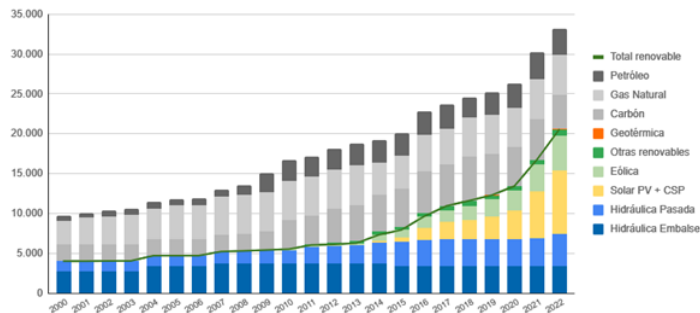


Figura 4.3: Capacidad instalada por fuente mW [22].

4.2. Glosario de Tipos de Vehículos

Para la comprensión del texto se adjunta el glosario de términos que se usará en cada una de las tecnologías motorizadas existentes tipo cero emisiones existentes en Chile.

Tabla 4.1: Glosario de distintas tecnologías utilizadas en vehículos eléctricos [13].

Tecnología	Descripción
HEV (Vehículo Híbrido Convencional)	Vehículo que combina dos fuentes de potencia, con un motor principal a combustión y una batería y motor eléctrico que sirven de apoyo en diversas situaciones.
BEV (Vehículo Eléctrico)	Vehículos que solo funcionan con baterías y se recargan conectándolos a la red eléctrica.
PHEV (Vehículo Híbrido Enchufable)	Vehículo que combina un motor de combustión con un motor eléctrico y baterías de mayor capacidad, que se recargan enchufando el vehículo a la red eléctrica.
MHEV (Vehículo Microhíbrido)	Vehículo microhíbrido o de hibridación ligera que combina el motor a combustión con un pequeño motor eléctrico, que asiste a la conducción en momentos puntuales y sirve también como motor de arranque.
EREV (Vehículo Eléctrico de Rango Extendido)	Vehículo impulsado exclusivamente por uno o más motores eléctricos, y que cuenta con un motor de combustión interna para proveer de energía eléctrica al sistema de almacenamiento o batería.
Hidrógeno o FCEV (Vehículo Eléctrico a Celdas de Combustible)	Vehículo que utiliza el hidrógeno como principal fuente de energía para mover el vehículo. Se trata de vehículos eléctricos, livianos o medianos, con una pila de combustible y una máquina eléctrica

4.3. Escenario chileno

Pese a que el mercado automotor general ha experimentado una desaceleración en los primeros meses de 2023, las inscripciones de vehículos propulsados con tecnologías de cero y bajas emisiones continúan creciendo, registrando un aumento acumulado de 32.3% durante el primer trimestre del año, con respecto al mismo período de 2022. Así, se han vendido 1.631 unidades en lo que va de este 2023.

Durante marzo se comercializaron 541 vehículos nuevos con este tipo de motorizaciones, sea HEV, MHEV, PHEV o BEV, con un alza de 3.2% comparado con el mismo mes del año pasado. Esto demuestra que cada vez hay más consumidores, pymes y empresas que han decidido apostar por una movilidad más eficiente y para contribuir a reducir las emisiones del país [13].

De acuerdo con cifras de la Asociación Nacional Automotriz de Chile (ANAC) [13], el mercado de buses eléctricos acumuló 740 unidades vendidas durante el primer trimestre de este año, siendo relevante para alcanzar este crecimiento la incorporación de unidades eléctricas al sistema RED, que explican el 89% de dicha cifra (657 unidades) [13].

El mercado de vehículos de cero y bajas emisiones en Chile en que se incluye a modelos híbridos convencionales, microhíbridos, híbridos enchufables y eléctricos 100%, además de las recientes incorporaciones de modelos eléctricos de rango extendido y vehículos con propulsión a hidrógeno forman parte de las nuevas tecnologías que cada vez se tornan más relevantes en el país. Ya en 2022 se lograron batir todos los récords en ventas de vehículos sostenibles, llegando a las 6.904 unidades, de las cuales 5.135 fueron híbridos, convencionales y microhíbridos, mientras que 1.769 fueron 100% eléctricos y también híbridos enchufables. Este último segmento de vehículos con recarga exterior, en la actualidad supera los 3.500 vehículos en circulación del parque automotriz nacional [13].

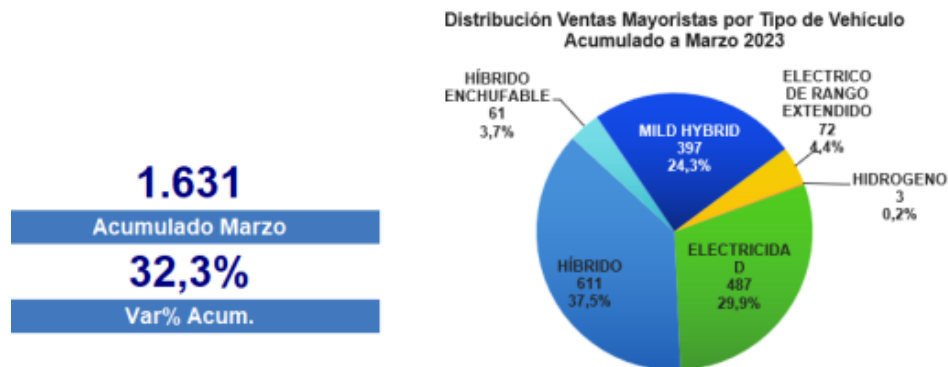


Figura 4.4: Distribución de Ventas por tipo de Vehículo [13].

Tabla 4.2: Distribución de Ventas por tipo de Vehículo [13].

	Acum a Marzo	Var % Acum	Marzo	Var % Mes
HÍBRIDO	611	41.4 %	202	-10.6 %
ELECTRICIDAD	487	166.1 %	112	160.5 %
MILD HYBRID	397	-14.3 %	139	-31.5 %
ELECTRICO DE RANGO EXTENDIDO	72		62	
HÍBRIDO ENCHUFABLE	61	-60.6 %	26	-50 %
HIDROGENO	3			
TOTAL	1.631	32.3 %	541	3.2 %

La división de Codelco Chuquicamata no se queda atrás en electromovilidad y este año incorporó una flota de 40 buses eléctricos, cada unidad contribuirá a la reducción de emisiones de CO_2 que van entre 30 y 50 toneladas al año. Además, tienen una autonomía de operación de cerca de 300 kilómetros y pueden llegar a desarrollar una capacidad de potencia máxima de motor de 370 kWh [23].

**Figura 4.5:** Flota de buses eléctricos división Codelco Chuquicamata [23].

4.4. Sistema transporte público del Gran Valparaíso

El sistema de transporte urbano, de la conurbación del Gran Valparaíso, está compuesto por buses, trolebuses, taxis colectivos, tren urbano (Metro Valparaíso) y ascensores. El sistema de buses urbanos que opera en el Gran Valparaíso está constituido por 9 Unidades de Negocio o empresas, sin embargo, hasta el año 2019, se contaba con 10 Unidades de Negocio. La flota total es de 2067 de buses, servicios que se encuentran actualmente licitados. En el caso de los trolebuses, se cuenta con una flota de 21 vehículos. En relación con los taxis colectivos, el Gran Valparaíso cuenta con un total de 127 líneas de taxis colectivos urbanos, sumando una flota total, de 5038 vehículos, según información actualizada al 2019 [24].



Figura 4.6: Distribución rutas del transporte público del gran Valparaíso [23].

4.5. Infraestructura transporté Publico en Valparaíso

Un factor relevante en la falta de infraestructura en el Gran Valparaíso corresponde a la topografía de los sectores altos de la conurbación, cuyas altas pendientes complican la conectividad. Si bien, lo anterior es una dificultad a la hora de implementar vías especializadas para transporte público, existen importantes ejes centrales de las comunas que podrían reducir sus altos niveles de congestión, especialmente en períodos punta, mediana este tipo de solución. Otro aspecto tiene que ver con la deficiencia de infraestructura en los actuales terminales de buses, la inexistencia de terminales públicos y la no correspondencia entre disponibilidad de terrenos y la necesidad de localización de terminales [24].

En la infraestructura cercana a los terminales existentes se observa que no existen las condiciones adecuadas, ni en los puntos de retorno que deben realizarse en su mayoría en la vía pública, muchas veces en calles estrechas, con inexistencia de prestaciones para los conductores. Respecto a la vialidad en el Gran Valparaíso, existen ejes más locales por los que circula transporte público, donde el pavimento se encuentra en estado regular o malo. Finalmente, se requiere una infraestructura adecuada en términos de inter modalidad, con estaciones de metro con capacidades suficientes para acoger un potencial aumento de demanda producto de una futura integración [24].

4.6. Oferta de buses en ejes troncales

En el Gran Valparaíso la oferta de buses no se encuentra distribuida de forma homogénea, concentrándose en los ejes troncales, no siempre en equilibrio con la demanda [24].

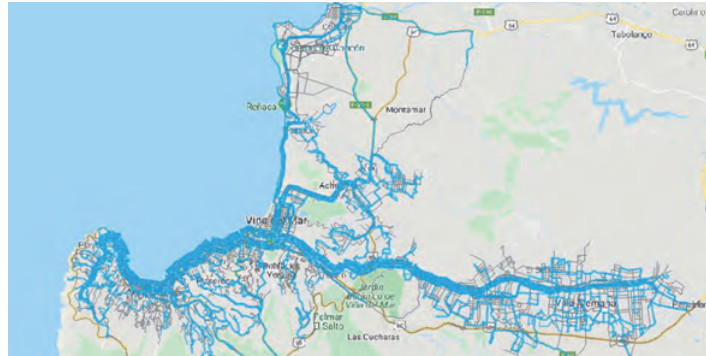


Figura 4.7: Concentración de oferta buses en ejes centrales [24].

En la Figura 4.7, se muestra el flujo de buses en todos los ejes del Gran Valparaíso, para la hora más cargada del período punta mañana, el cual corresponde al horario entre 7:30 y 8:30 h. Se puede observar que, para los ejes troncales de la conurbación, la comuna de Valparaíso es la que presenta las mayores frecuencias, seguida de Viña del Mar y Quilpué. En particular se puede destacar el eje troncal que las atraviesa y pasa por los centros de dichas comunas; en el caso de la comuna de Concón, es la que tiene las menores frecuencias de la conurbación. En el caso de Valparaíso, se puede apreciar que el eje troncal Av. España – Av. Errázuriz presenta una importante oferta de buses, la cual, para ciertos períodos del día, supera los 300 buses/h [24]. La demanda por buses no tiene el mismo comportamiento homogéneo a lo largo de un día laboral en el gran Valparaíso, en donde ya a las 21:00 h la frecuencia disminuye con respecto al resto del día.

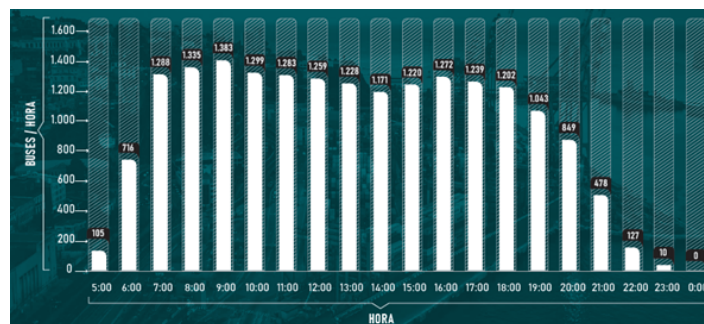


Figura 4.8: Frecuencia de buses Gran Valparaíso, día laboral [24].

5 | Pendientes en Valparaíso

Una de las principales características topográficas del Gran Valparaíso corresponde a la presencia de un terreno sinuoso y de fuertes pendientes y quebradas en ciertos sectores de la conurbación, lo que dificulta de manera importante el desarrollo de infraestructura para el transporte público, acrecienta los problemas de conectividad, dificulta la generación de nuevas rutas y tiende a concentrar la oferta, lo que en su conjunto complica la accesibilidad y movilidad de las personas [24].

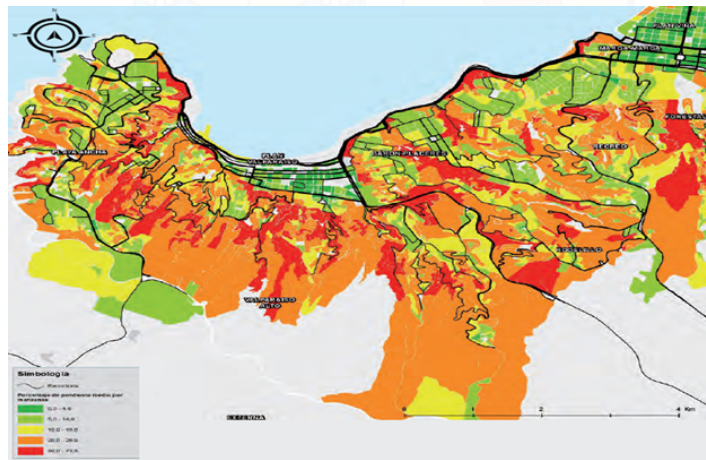


Figura 5.1: Pendientes en Gran Valparaíso [24].

En la Figura 5.1, se presenta los porcentajes de pendiente media por manzanas, estimados para parte de la comuna de Valparaíso con los recorridos de servicios de buses existentes. Esta comuna presenta las mayores pendientes en la conurbación, superando incluso el 30 % de pendiente en algunos ejes viales de los cerros, siendo imposible en algunos sectores, generar vialidad o ingresar servicios de transporte público. En sectores de Rodelillo, Playa Ancha y Barón-Placeres también existen importantes pendientes que dificultan la cobertura de transporte público, no pudiendo acceder siempre a todos los hogares producto de la poca continuidad vial [24].

En vista de la información obtenida nace la pregunta ¿La nueva flota de buses eléctrica presenta alguna limitación de pendiente para su funcionamiento? O solo se podrán utilizar en el plan del gran Valparaíso.

5.1. Nuevo estándar de transporte público en Santiago

Bajo el programa "Avanzamos Contigo", desde diciembre de 2022 hasta mayo 2023 se desarrolló la implementación de la licitación del 40 % del sistema de buses. Esta transformación trae consigo los cambios más grandes a realizar al sistema de transporte público de Santiago en 16 años al incorporar

1.640 buses nuevos al sistema (992 eléctricos y 648 ecológicos de baja emisión diésel euro VI), que se suman a las 2.559 máquinas ecológicas y eléctricas que se encuentran en operación. Con ello, 2 de cada 3 buses del sistema (60 % de la flota) son estándar RED, sustentables, con acceso universal, aire acondicionado, puertos USB, entre otras características que permiten una experiencia de movilidad de mayor calidad y comodidad [38].

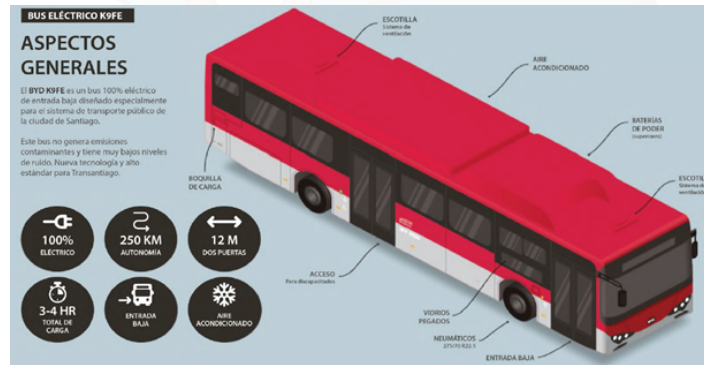


Figura 5.2: Bus Eléctrico BYD K9FE usado en RED Santiago [15].

Licitación para gran Valparaíso, por primera vez en el país, se licitará un sistema completo de transporte a nivel regional. El proyecto contempla el desarrollo de las bases de licitación con instancias de participación, y se espera que esté implementado en 2025 [38]. En vista de los excelentes resultados obtenidos en Santiago, MTT proyectará realizar este mismo estándar a regiones, cabe señalar que en el gran Valparaíso existen características topográficas aún más complejas que en Santiago con pendientes de más del 30 %.



Figura 5.3: Bus Eléctrico BYD K9FE usado en RED Santiago, máxima pendiente [15].

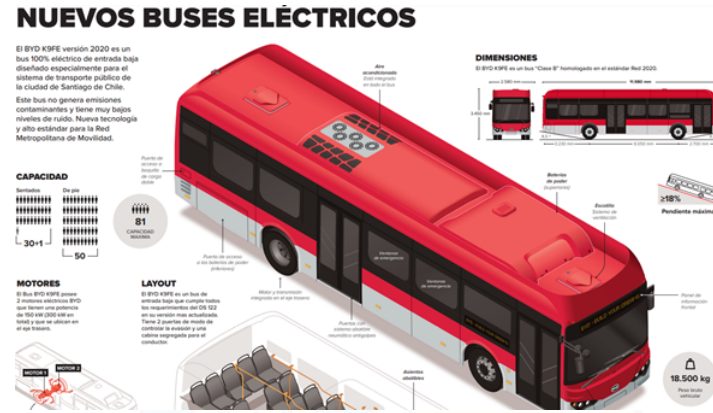


Figura 5.4: Bus Eléctrico BYD K9FE usado en RED Santiago [15].

Lo que sugiere que por lo menos este tipo de buses no podrá llegar a todos los sectores del gran Valparaíso por limitación de pendiente máxima, quedando limitados a circular por pendientes máximas de 18%. Algunas de las alternativas a esta problemática sería dejar temporalmente las zonas más altas a los buses a combustión a espera de una mejora tecnológica, la cual no tenga limitación de pendientes.

5.2. Antigüedad de los buses en Valparaíso

El sistema de buses urbanos del Gran Valparaíso está compuesto por un total de 2.067 buses, con una antigüedad promedio de 5.7 años. En relación con el resto del país, la conurbación es la que presenta mayor cantidad de buses, después de la Región Metropolitana, y con el menor promedio de edad. En la Figura 5.5 se muestra, para Valparaíso, la información de antigüedad promedio de los servicios de buses que circulan por los diferentes ejes del Gran Valparaíso [24].

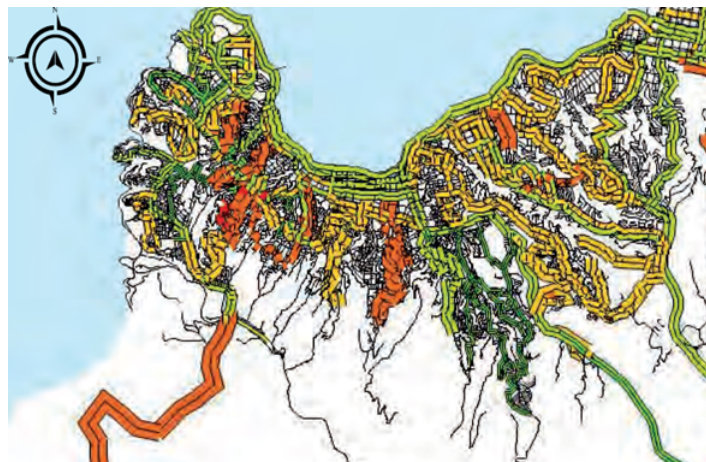


Figura 5.5: Antigüedad promedio buses comuna de Valparaíso [24].

En la Figura 5.5, se presenta la edad promedio para los servicios de buses en la comuna de

Valparaíso.

La mayoría de los servicios que circulan por el Plan de Valparaíso y Playa Ancha no tienen más de 6 años de antigüedad, los únicos ejes que tienen buses con más de 8 años son tramos del eje Uruguay, José Tomás Ramos e Ignacio Carrera Pinto. Las macrozonas de Rodelillo y Barón Placeres, en su mayoría, tienen servicios con una edad entre 6 y 8 años. En tanto, se puede observar que, si bien, la mayoría de los ejes con servicios con una antigüedad superior a los 8 años se encuentran en el sector de Valparaíso Alto, esta macrozona, además, presenta algunos sectores con servicios con baja antigüedad, por lo que el promedio de esta macrozona alcanza solo los 5.45 años promedio. La macrozona Placilla Curauma es la que presenta la menor antigüedad promedio de la comuna, con solo 3.98 años promedio [24].

5.3. Terminales de buses en el Gran Valparaíso

Actualmente, en el Gran Valparaíso existen 44 terminales que sirven a los diferentes servicios de buses urbanos, los que se ubican principalmente en las comunas de Valparaíso, Viña del Mar y Villa Alemana [24].

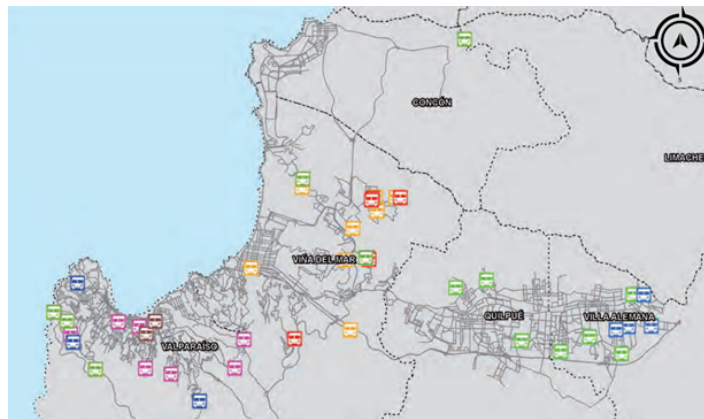


Figura 5.6: Terminales en el gran Valparaíso por unidad de negocio [24].

En la Figura 5.6, se presenta la localización de todos ellos, diferenciándolos por Unidad de Negocio, y se aprecia que en la comuna de Villa Alemana y Quilpué están los terminales de las unidades de negocio 1 y 3, en la comuna de Viña del Mar se ubican los terminales de las unidades de negocio 2, 4 y 6, en la comuna de Valparaíso se ubican los terminales de las unidades de negocio 5, 6, 7, 8 y 9, y finalmente, en la comuna de Concón solo existe un terminal de la unidad de negocio 6. Dado que Quilpué Sur está en constante desarrollo inmobiliario, sería un buen sector para poder instalar nuevos terminales que puedan atender también aquellos servicios que salen del sector. La mayoría de los terminales sirven a servicios de una unidad de negocio, sin embargo, existen tres terminales que son utilizados por servicios de diferentes unidades de negocio. Estos corresponden a los terminales ubicados en la Villa Independencia y en la Población Puerto Aysén de Viña del Mar y al terminal ubicado en calle Las Acacias en Villa Alemana. Los dos primeros atienden servicios de las unidades de negocio 2 y

4 y el tercero, ubicado en Villa Alemana, es usado por servicios de las unidades de negocio 1 y 3. En relación con la infraestructura, se puede advertir que el estado de la carpeta, tanto en los terminales como en sus accesos o en la vialidad colindante, se encuentra en estado regular o malo. Por otra parte, en la mayoría no existe refugio peatonal cercano, ni espacio disponible de detención para buses en la vialidad colindante, así como tampoco señalización aledaña al terminal [24]. Lo que sugiere que sería recomendable para el terminal de carga de la flota nueva eléctrica de buses para el gran Valparaíso, pudiera ser idealmente localizado en Quilpué, en donde un criterio de elección del terreno será el valor de estos, los metrajes disponibles, la factibilidad técnica dentro del plan regulador comunal (PRC), la demanda de los clientes, zona geográficas sin pendientes.

5.4. Buses Eléctricos en el Gran Valparaíso

La Contraloría General de la República ha dado luz verde al contrato entre el Ministerio de Transporte y Telecomunicaciones y Trolebuses Chile S.A. para implementar un sistema de buses con motor eléctrico en el Gran Valparaíso [25].

El contrato incluye la incorporación de 44 buses eléctricos de alto estándar con accesibilidad universal, destacando 38 buses de 9 metros y 6 de 10,5 metros. Estos vehículos estarán equipados con comodidades modernas como aire acondicionado, wifi y cargadores. El enfoque de estos buses será cubrir tres servicios en Valparaíso, priorizando áreas identificadas con una mayor necesidad de fortalecimiento del transporte público, como los sectores de Placilla y Rodelillo, en donde la construcción de un centro de carga estará en Placilla para 36 buses y otro punto de carga en la zona de Barón para ocho buses [25].



Figura 5.7: Aprobación 44 Buses Eléctricos en el Gran Valparaíso [25].

6 | Localización

Cabe señalar que dentro de los modelos matemáticos de localización existe todo un mundo del cual el siguiente texto no tiene la intención de abordar, pero sí dar una visión general de los modelos que podrían ser utilizados como base para la resolución de la problemática que consistirá en la localización de un terminal de buses eléctricos para Valparaíso. A continuación, se describen los dos principales métodos de resolución para problemas de optimización combinatoria en programación entera con búsqueda exhaustiva.

6.1. Método Branch and Bound

El algoritmo (B&B) como su nombre lo indica, resuelve ramificando y acotando, de forma iterativa comúnmente usada para resolver problemas de programación entera, realizando una búsqueda exhaustiva, explorando todas las combinatorias posibles hasta encontrar la solución óptima, su estructura es semejante a un grafo de tipo binario formulado por Land y Doing en 1960.

El método Branch and Bound se basa en la idea de dividir el conjunto de soluciones posibles (llamado espacio de búsqueda) en subconjuntos más pequeños y luego utilizar reglas específicas para explorar y descartar algunos de estos subconjuntos. El proceso se realiza de manera recursiva hasta que se encuentra una solución óptima o se determina que no hay solución mejor que la encontrada hasta ese momento. Un ejemplo práctico en el modelo TSP, sería la búsqueda de la ruta más corta entre 11 destinos distintos, se divide el problema en problemas más pequeños, al tener la matriz de las distancias entre los 11 destinos, se realizaría una búsqueda en profundidad desde el destino 1 hacia los otros 10 destinos restantes, explorando las diferentes rutas posibles desde el destino 1. Las rutas más largas se descartan como solución, proceso se repite de forma iterativa con los demás destinos, explorando todas las posibles rutas o arcos, hasta encontrar la ruta más corta.

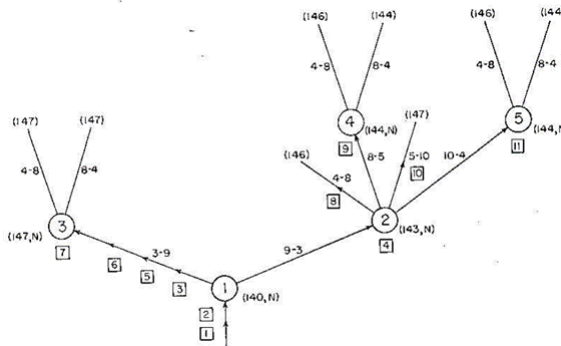


Figura 6.1: Branch-and-bound W.L. Eastman's 1958 Ph.D. thesis [26].

6.2. Método Cortes de Gomory

El algoritmo de planos de cortes de Gomory generalmente se usa en combinación con (B&B), propuesto por el matemático Ralph E. Gomory en 1958, generando cortes para llegar a la solución óptima, es un proceso iterativo usado en programación entera, estos cortes son restricciones adicionales que se agregan al problema para eliminar soluciones fraccionarias en el problema relajado, obteniendo como resultado soluciones enteras óptimas.

Estos planos se derivan de las restricciones del problema y son utilizados para acotar la región factible hasta llegar a la solución óptima, es un proceso iterativo y se basa en la generación de nuevas restricciones (planos cortantes) que reducen la región factible hasta que se alcance la solución óptima.

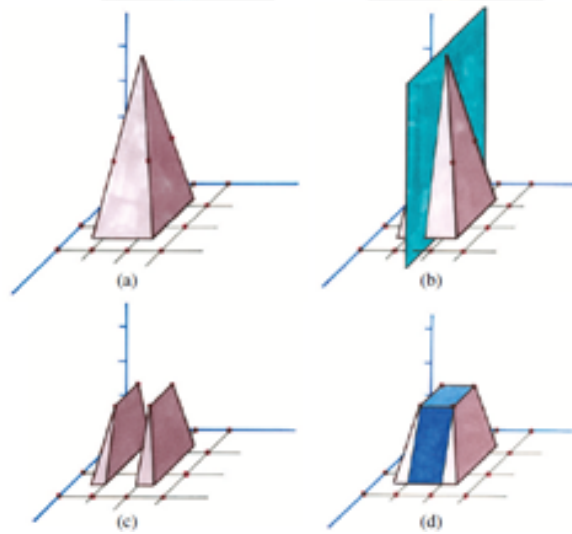


Figura 6.2: Método Cortes de Gomory [27].

Para la correcta y precisa ubicación del electroterminal de buses eléctricos para Valparaíso será necesario abordar los modelos matemáticos como lo son el del problema del viajante (TSP) y el problema de ruta de vehículos (VRP).

6.3. Traveling Salesman Problem (TSP)

El problema del viajante TSP, como sus siglas lo indican, es un clásico dentro de los problemas de gestión de operaciones, en optimización implicara encontrar la ruta más corta del viajero dentro de un conjunto de nodos a visitar y regresando al punto de partida. Es considerado un problema NP-duro, no se ha encontrado un método de resolución capaz de resolver el problema en un tiempo polinomial, existiendo algoritmos aproximados y heurísticas que ayudan a dar una solución aproximada a este tipo de problemas.

En la restricción de Eliminación de Sub-Tur, se toma cualquier subconjunto \neq de N , en donde la cantidad de arcos activos tiene que ser igual a la cantidad de los subconjuntos - 1. Esto hace que no se produzca tele transportación del agente viajero y que finalmente sea solo el último nodo en cerrar los arcos. A continuación se describe el modelo matemático que lo rige [39]:

Formulación Modelo TSP

Conjuntos:

N : Conjunto de Nodos

A : Conjunto de Arcos

Parámetros:

C_{ij} : Costo de pasar por el arco (i,j) (6.1)

Variables:

$$X_{ij} : \begin{cases} 1, \text{ Se visita a "j" inmediatamente después de "i"} \\ 0, \sim \forall (i, j) \in A \end{cases} \quad (6.2)$$

Restricciones

Entro y salgo de todos los nodos (Si entro, debe salir)

$$\sum_{j \in N} X_{ij} - \sum_{j \in N} X_{ji} = 0 \quad \forall i \in N : j \neq i \quad (6.3)$$

Entro y salgo una vez de cada nodo

$$\text{Entro : } \sum_{j \in N} X_{ji} = 1 \quad \forall i \in N : j \neq i \quad (6.4)$$

$$\text{Salgo : } \sum_{j \in N} X_{ij} = 1 \quad \forall i \in N : j \neq i \quad (6.5)$$

Eliminación de Sub-Tur

$$\sum_{i,j \in S} X_{ij} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subsetneq N : 2 \leq |S| \leq |N| - 2 \quad j \neq i \quad (6.6)$$

Naturaleza de las Variables

$$X_{ij} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in A \quad (6.7)$$

Función Objetivo:

$$\text{Min } X \quad \sum_{i,j \in A} C_{ij} \cdot X_{ij} \quad \forall (i, j) \in A \quad (6.8)$$

6.4. Vehicle Routing Problem (VRP)

El modelo VRP es un problema de optimización usado en programación entera, el cual describe el diseño de un conjunto de rutas vehiculares intentando minimizar costos, en donde estas rutas comienzan y terminan no necesariamente en el punto de origen. A continuación se describe el modelo matemático que lo rige [39]:

Formulación Modelo VRP

Conjuntos:

- K : Conjuntos de vehículos
- D : Conjunto de clientes
- A : Conjunto de Arcos
- $\{0\}$: Terminal Eléctrico
- $V : D \cup \{0\}$ Conjunto de Nodos

Parámetros:

- Q_k : Capacidad del bus "K" $\forall k \in K$
- D_i : Demanda del cliente "i" $\forall i \in D$
- C_k : Costo "fijo" por el uso del vehículo "K" $\forall k \in K$
- C_{ijk} : Costo de visitar a "j" inmediatamente después de "i" con el vehículo "K" $\forall k \in K$

Variables:

$$X_{ijk} : \begin{cases} 1, & \text{Si visito a "j" inmediatamente después de "i" con el vehículo "k"} \\ 0, & \sim \forall (i, j) \in V : \forall k \in K \end{cases} \quad (6.9)$$

Restricciones

No se puede sobrepasar la capacidad del vehículo "k" en su ruta

$$\sum X_{ijk} \cdot d_j \leq Q_k \quad \forall i \in V : \quad \forall k \in K : \quad \forall j \in D : \quad j \neq i \quad (6.10)$$

Para cada vehículo si está en un nodo debe salir de este, divergencia = 0

$$\sum_{j \in V} X_{ijk} - \sum_{j \in V} X_{jik} = 0 \quad \forall i \in V : \quad \forall k \in K \quad j \neq i \quad (6.11)$$

Cada cliente se visita solo una vez por algún vehículo "k"

$$\sum_{j \in V} X_{ijk} = 1 \quad \forall i \in D \quad \forall k \in K \quad j \neq i \quad (6.12)$$

Cada vehículo "k" sale máximo una vez del terminal

$$\sum_{j \in D} o_{jk} = 1 \quad \forall i \in D : \quad \forall k \in K \quad (6.13)$$

Eliminación de Sub-Tur

$$\sum_{i,j \in S} X_{ijk} \leq |S| - 1 \quad \forall S \subseteq U : \forall k \in K : 2 \leq |S| \leq |U| - 2 \quad j \neq i \quad (6.14)$$

Naturaleza de las Variables

$$X_{ijk} \in \{0, 1\} \quad \forall (i, j) \in U : \forall k \in K \quad (6.15)$$

Función Objetivo:

$$\text{Min } X \sum_{i,j \in V} C_{ijk} \cdot X_{ijk} + \sum_{k \in K} C_k \cdot \sum_{j \in D} 0_{jk} \quad \forall j \neq i \quad (6.16)$$

7 | Marco Metodológico

La persona que esté encargado de la logística para la empresa de los buses eléctricos intentará optimizar las rutas de estos en donde se entiende que los buses deben volver a su punto de origen para volver a cargarse, intentando minimizar sus tiempos de operación y distancias a recorrer, buscando la secuencia de nodos en la ruta a visitar.

El bus debe volver al terminal para volver a cargarse, lo que indica que el origen y destino son coincidentes "agente viajero", este es un problema ampliamente estudiado con distintas heurísticas que intentan resolverlo. Se resolverá el problema de la siguiente manera los puntos a visitar se relacionan de manera espacial, en donde un buen diseño de la ruta será en donde no exista cruce de sus caminos, por lo que se descarga desde INE [40] plano con manzanas y distritos para Valparaíso.

7.1. Análisis Matemático

La cantidad de manzanas en Valparaíso es de 3465 manzanas correspondientes al censo del 2017, mientras que los distritos dentro del PRC de Valparaíso pertenecen a la acumulación de manzanas del censo del 2017, corresponden a 26 distritos. Para los habitantes de Valparaíso sería muy cómodo y placentero que los buses eléctricos pasaran por su manzana y así ellos pudieran abordarlos, pero para la persona encargada de la logística y de hacer la ruta más corta matemáticamente se complica, sin solución por falta de capacidad de cómputo de nuestros equipos computacionales, según los modelos vistos anteriormente se generarían la siguiente cantidad de combinaciones en los modelos:

$$\frac{(n-1)!}{2} = \frac{(3465-1)!}{2} = \infty \quad (7.1)$$

Por lo que se descarta el análisis con cantidad de manzanas, se procede a usar datos de manzanas agrupadas por distritos, en el análisis se elimina distrito 24 el cual corresponde al Archipiélago Juan Fernández, a pesar de la eliminación de este distrito se generaran la siguiente cantidad de combinaciones:

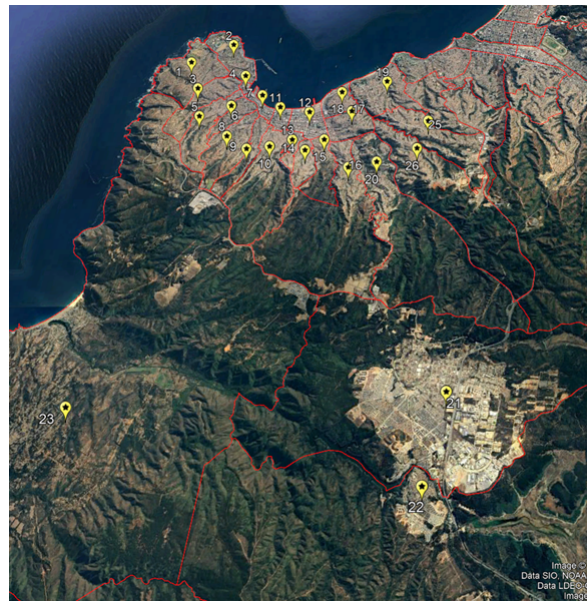
$$\frac{(n-1)!}{2} = \frac{(25-1)!}{2} = 3.10^{23} \quad (7.2)$$

A pesar de las relajaciones realizadas el problema continúa siendo computacionalmente complejo, una heurística lógica es comenzar a diseñar la ruta con el destino más lejano y desde ahí ir sumando paradas o distritos coincidentes en la ruta hacia el terminal de carga. Con los planos de los distritos, obtenidos desde INE [40] se procede por medio de QGIS Desktop 3.32.0 a ubicar sus centroides para obtener latitud y longitud de estos. Los datos obtenidos se visualizan en la Tabla 7.1.

Tabla 7.1: Ubicaciones de centroides de distritos (Fuente Elaboración Propia).

Distrito	Latitud°	Longitud°
1	-33.032310°	-71.646172°
2	-33.026753°	-71.634514°
3	-33.040535°	-71.642663°
4	-33.036723°	-71.629193°
5	-33.049087°	-71.640574°
6	-33.045970°	-71.631818°
7	-33.042832°	-71.623201°
8	-33.055109°	-71.631495°
9	-33.058869°	-71.625188°
10	-33.058234°	-71.618678°
11	-33.046499°	-71.617385°
12	-33.048056°	-71.608611°
13	-33.056307°	-71.612459°
14	-33.059392°	-71.608367°
15	-33.056322°	-71.603263°
16	-33.064417°	-71.595370°
17	-33.047865°	-71.596309°
18	-33.042007°	-71.599873°
19	-33.038760°	-71.586931°
20	-33.062902°	-71.587479°
21	-33.122350°	-71.563445°
22	-33.143311°	-71.567922°
23	-33.125314°	-71.659686°
25	-33.050922°	-71.573764°
26	-33.059041°	-71.576340°

Se carga los centroides de los distritos y plano de los distritos en Google Earth para visualizar como es que quedaría se muestra en la siguiente Figura 7.1:

**Figura 7.1:** Plano de distritos y sus centroides (Fuente Elaboración Propia).

7.2. Búsqueda de terrenos para Electroterminal

Se revisa el Plan Regulador Comunal (PRC) de Valparaíso con la ayuda de Google Earth, con el objetivo de encontrar terrenos libres para la localización del terminal de buses eléctricos, los terrenos definidos por el PRC actualizado al 21 de marzo 2005, el cual contiene las normas de uso de suelo y las condiciones de subdivisión predial, edificación, urbanización y vialidad que rigen dentro del área urbana de la comuna de Valparaíso. Se puede apreciar en el documento que en Artículo 24 de PRC Valparaíso presenta la ordenanza urbana dividiendo las siguientes zonas [28]:

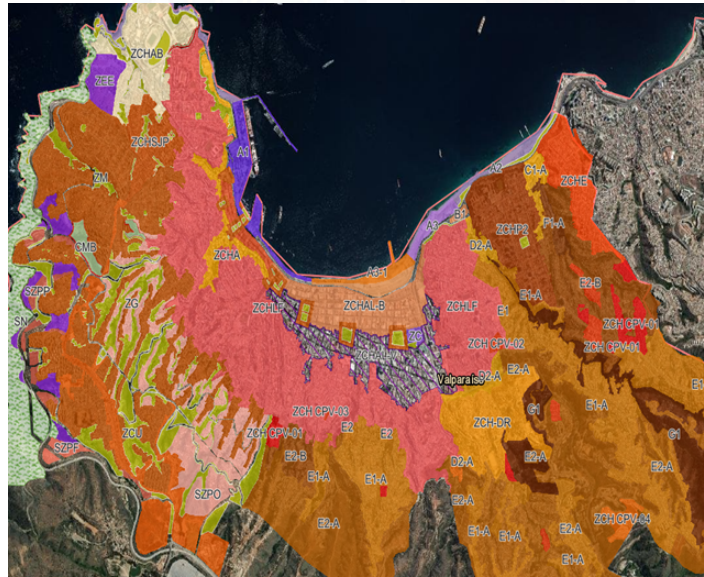


Figura 7.2: Plan Regulador Comunal para Valparaíso (PRC) [28].

Se revisa desde Google Earth el PRC de Valparaíso, encontrando 11 posibles terrenos para localizar el terminal de buses eléctricos, como se muestra en la Figura 7.3.



Figura 7.3: Localización de 11 posibles terminales en terrenos libres (Fuente Elaboración Propia).

Tabla 7.2: Ubicaciones posibles de Terminales Eléctricos (Fuente Elaboración Propia).

Terminal	Latitud °	Longitud°
t_1	-33.036368°	-71.599405°
t_2	-33.038180°	-71.602392°
t_3	-33.037734°	-71.599531°
t_4	-33.042796°	-71.606157°
t_5	-33.039403°	-71.596938°
t_6	-33.042421°	-71.593711°
t_7	-33.044378°	-71.592384°
t_8	-33.035105°	-71.587227°
t_9	-33.051549°	-71.584708°
t_{10}	-33.057095°	-71.582019°
t_{11}	-33.050980°	-71.591868°

Para poder entregar una solución al problema de la ruta y localización de terminal, se usará el método del barrido o método de la regla descrito por Ronal Ballou [9]. En este caso, localizando en una cuadrícula o mapa todos los distritos y terminales, se traza una línea recta en cualquier dirección, se hace girar esta línea en sentido contrario a las manecillas del reloj, hasta interceptar un punto centroide de distrito. Se procede a hacer girar la línea en sentido contrario a las manecillas del reloj, hasta interceptar otro punto centroide de distrito, de lo contrario se sigue girando la regla, a cada centroide que la regla toca se crea un arco de ruta entre los nodos del grafo, el proceso se repite hasta volver al punto de origen.

7.3. Cálculo de las distancias Manhattan

Se necesitará las distancias de todos los nodos involucrados, incluyendo las distancias entre distritos y terminales candidatos. Se procede por medio de Google Maps a calcular todas estas distancias involucradas.

Para este cálculo en Google Maps se ingresan los datos de latitud y longitud para un nodo y como destino se repite el procedimiento, a continuación se muestran distancias entre t_2 y t_3 de 1.6 km, Figura 7.4 en donde no siempre se pueden comunicar en línea recta debido al sentido de tránsito.

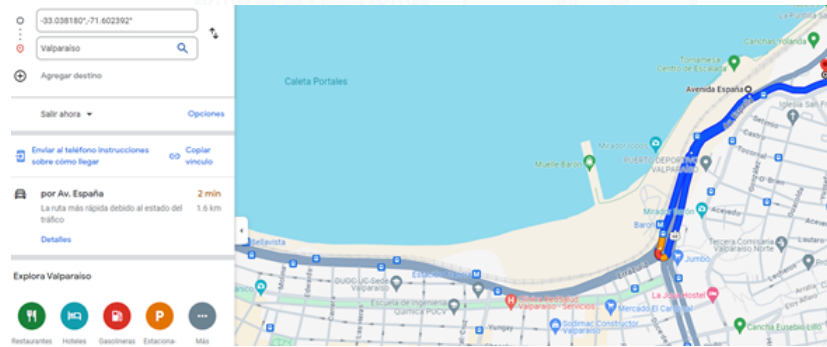


Figura 7.4: Cálculo de las distancias Manhattan (Fuente elaboración propia).

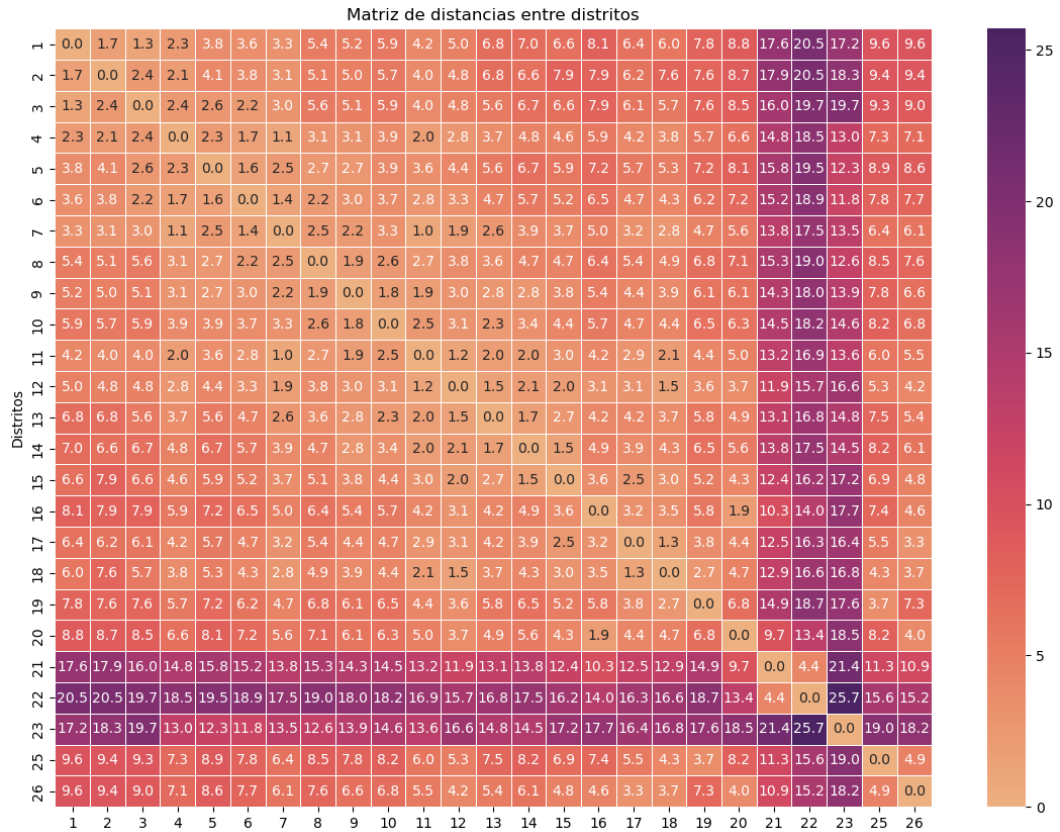


Figura 7.5: Mapa Calor en Python - Distancias en km entre los distritos (Fuente Elaboración Propia).

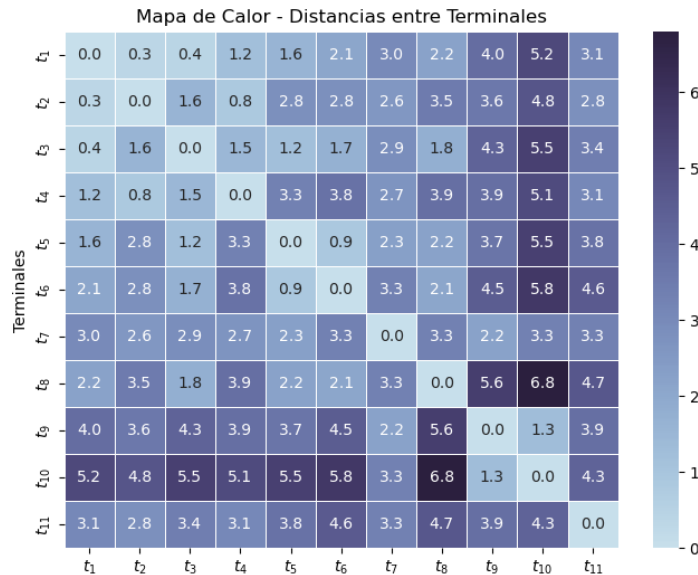


Figura 7.6: Mapa Calor en Python - Distancias en km entre los posibles terminales (Fuente elaboración propia).

Se calculan las distancias Manhattan de todos los nodos del grafo por medio Google Maps.

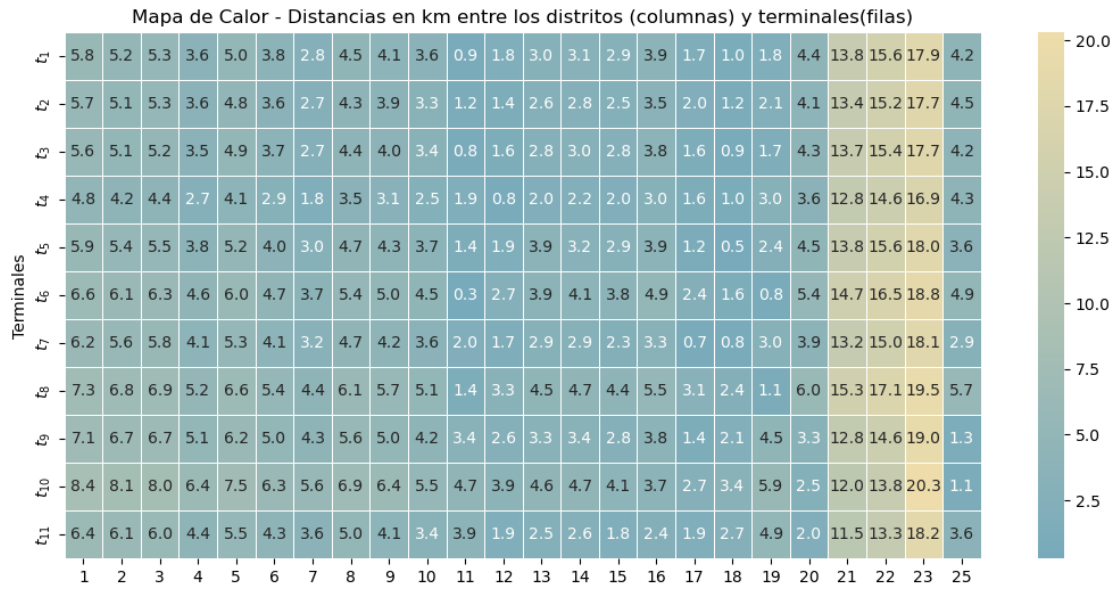


Figura 7.7: Mapa Calor en Python - Distancias en km entre los distritos (filas) y terminales(columnas) (Fuente Elaboración Propia).

7.4. Elección del modelo VRP o TSP

Entre los modelos vistos anteriormente VRP y TSP, se tendrá que elegir uno de estos para entregar una solución al problema planteado. Los buses pueden recorrer $250 \leq \text{kms}$ [15] según hoja de datos entregada por fabricante, se dejará un 20 % de energía equivalente a 50 km como margen de seguridad y así estos puedan volver a punto de carga. En vista de que destino y origen son coincidentes y que cada una de las rutas descritas por cada terminal candidato no supera los 200 km, el problema se asemeja al del, "agente viajero" por lo que se elige el modelo TSP.

Para el análisis se va integrando a cada terminal elegido como si fuera un nodo más en el grafo y se realiza TSP.

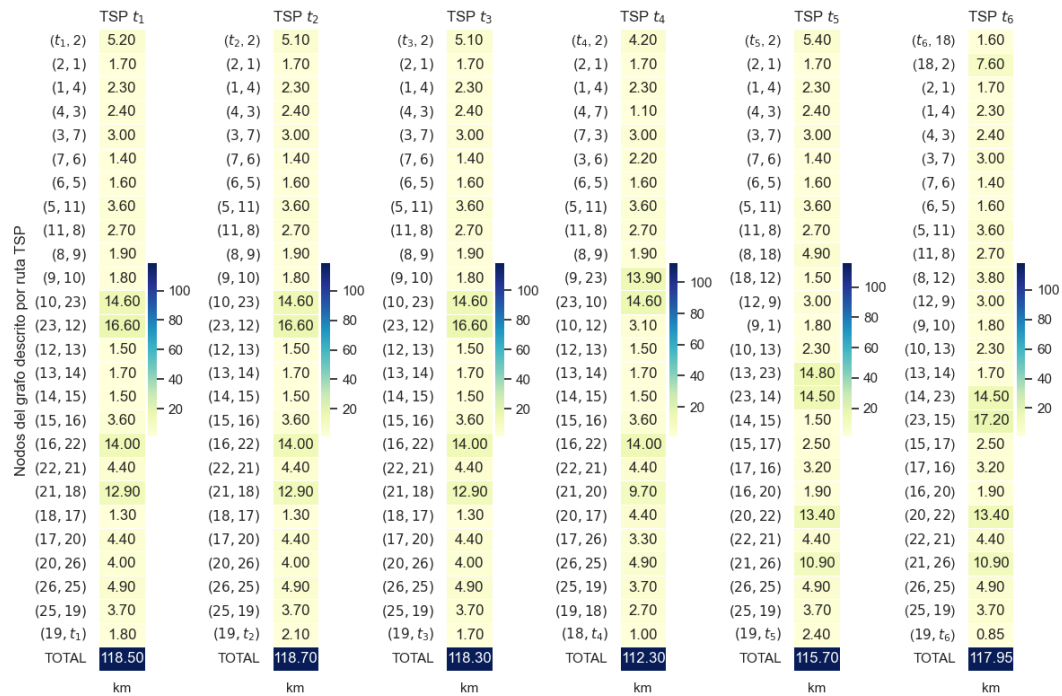


Figura 7.8: Mapa Calor en Python - TSP en km para cada posible terminal (Fuente Elaboración Propia).

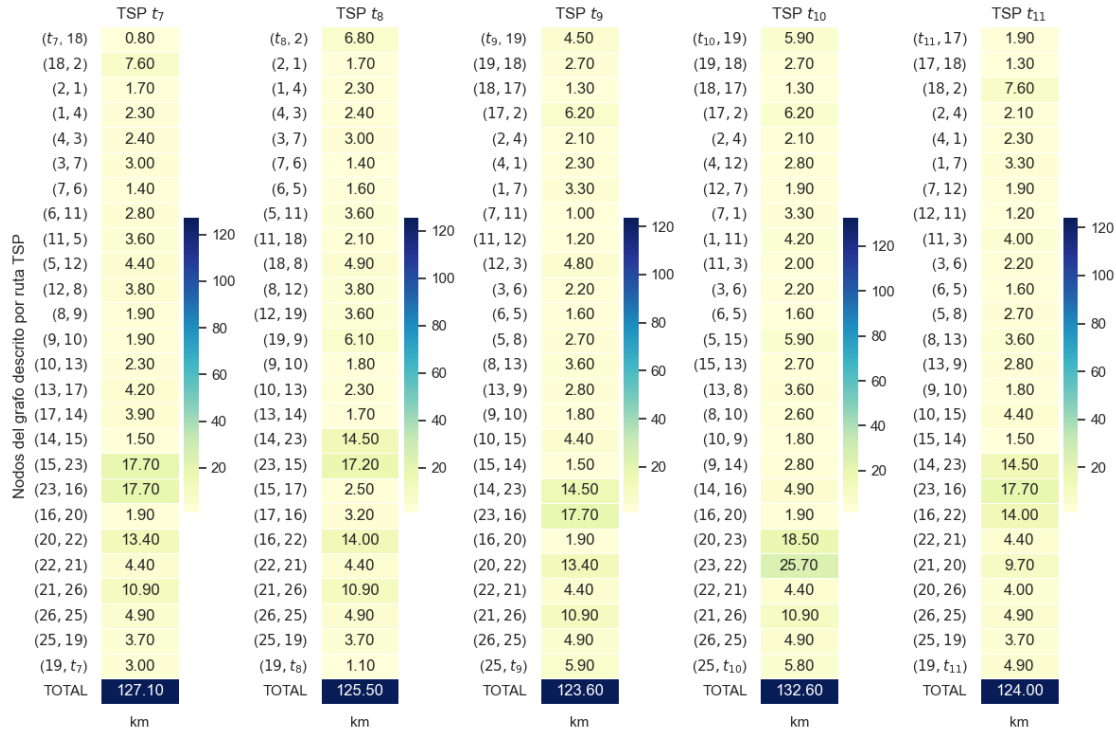


Figura 7.9: Mapa Calor en Python - TSP en km para cada posible terminal (Fuente Elaboración Propia).

7.5. Método de la regla

Con el fin de poder visualizar gráficamente el método del barrido o método de la regla descrito por Ronal Ballou [9], se programará en Python la solución encontrada con el fin de visualizar los resultados obtenidos.

Se programa en Python integrando terminal por terminal, con la ayuda de las librerías geopandas que se utiliza para trabajar con datos geospaciales-geográficos, en combinación con la librería networkx que se usa para el análisis de redes-grafos y Matplotlib para la creación del gráfico, se agregan los datos de todos los nodos involucrados, como lo muestra la Figura 7.10, agregando terminal por terminal y se realiza método de la regla descrito por Ronal Ballou [9].

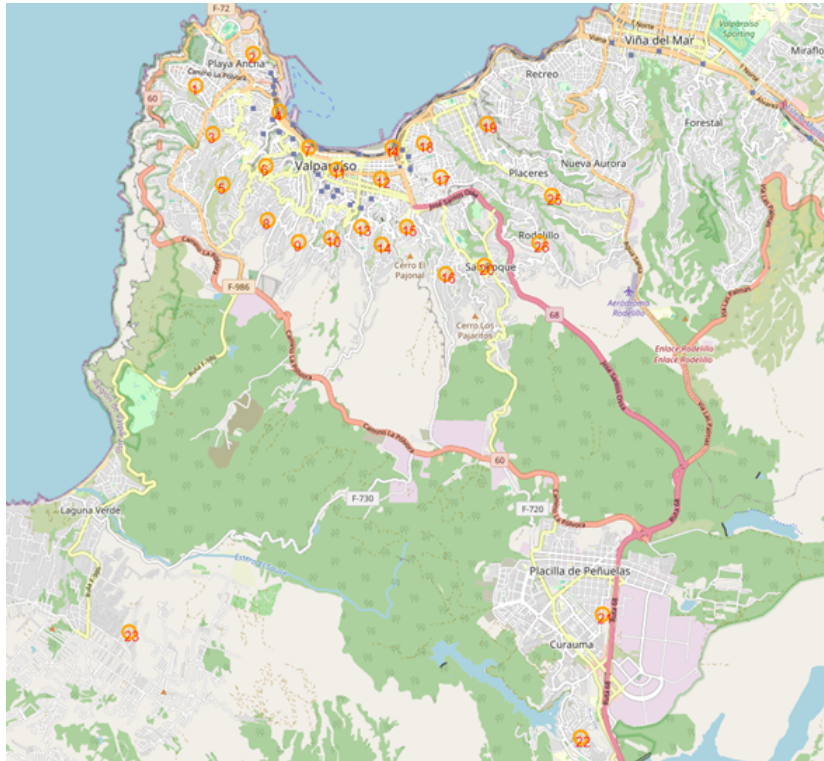


Figura 7.10: Gráfico en Python georeferenciado para hacer TSP por cada terminal (Fuente Elaboración Propia).

Este proceso se repite terminal por terminal candidato de forma independiente. Se concluye que t_4 es el de menor ruta con 112,3 km, por lo que es elegido como terminal para proyecto de buses eléctricos para Valparaíso. En donde los resultados obtenidos vienen de analizar las tablas entregadas anteriormente (Figuras 7.8 y 7.9)

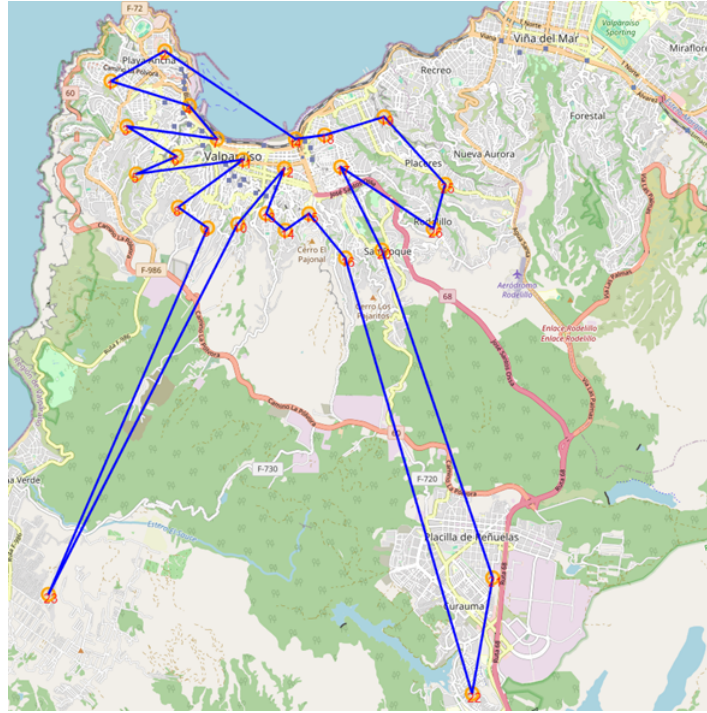


Figura 7.11: Gráfico en Python, conexiones de nodos TSP para t_4 elegido por método de la regla (Fuente Elaboración Propia).

En la Figura 7.11 se muestra t_4 elegido por heurística método de la regla en vista que la solución computacional sería muy costosa. Las líneas significan la ruta a seguir por el agente viajero (bus eléctrico), en este caso son las distancias en km que une el conjunto de distritos con t_4 las distancias entre cada par de ellas es el resultado del análisis TSP realizado.

La Figura 7.11 visualiza como se realizarían los arcos de los nodos involucrados por heurística, en donde no necesariamente signifique que físicamente será esa la ruta a seguir, como por ejemplo t_4 a distrito dos, la cual se visualiza por la bahía de Valparaíso. Las rutas serán vía terrestre de tipo Manhattan, en donde matemáticamente se indica que técnicamente la gente estaría localizada en los centroides a la espera del bus eléctrico, pero que no es así del todo, puesto dentro de la ruta existen paraderos.

La ruta obtenida se asemeja a una gota de agua, en donde la relación que existe con las coordenadas son sus distancias, se evita en el método cruce de líneas y se agrupan por sectores colindantes, minimizando el tiempo de viaje, así la gente podrá llegar a destino en un menor tiempo.



Figura 7.12: Terreno localizado para t_4 elegido (Fuente Elaboración Propia).

El terreno localizado para t_4 tiene un metraje de $63501 m^2$, no contemplado en t_4 el metraje de ex maestranza barón de $15000 m^2$, de la cual se desconoce su destino final.

El t_4 localizado cuenta con los siguientes datos de información eléctrica, lo cual hace que sea factible desde este punto de vista la instalación en este sector, no contemplado en este análisis el estudio mecánico de uso de suelo.

Tabla 7.3: Información eléctrica del terreno t_4 localizado [14].

Recuento	Cantidad
Medidores (a 10 m de la manzana)	5
Empalmes (a 10 m de la manzana)	4
Postes (a 25 m de la manzana)	9
Transformadores (a 100 m de la manzana)	8



Figura 7.13: Información eléctrica del terreno terminal t_4 localizado [14].

8 | Análisis Energético

Con el objetivo de contrastar la situación actual frente a la propuesta, se examinará manteniendo las rutas existentes de los recorridos de los autobuses del TransValparaíso.

8.1. Carga y descarga de las baterías

Para la flota de buses eléctricos será crucial el tiempo de carga y descarga de las baterías, este proceso se puede describir a través de distintos modelos matemáticos e inclusive de forma diferencial de la siguiente forma:

$$V(t) = V_0 + \int_0^t f(t)dt \quad (8.1)$$

V_0 : Voltaje inicial de carga de la batería

f_t : Función objetivo a determinar para el análisis en función del tiempo

V_t : Voltaje de carga y descarga de la batería en función del tiempo

Para la curva de carga y descarga, los modelos indican que las gráficas se ajustan de una manera más exacta a las de tipo Lorentziano, pero el presente texto no tiene la intención de profundizar en dicho estudio y se simplifica el análisis a una carga y descarga de tipo lineal, como lo muestra la siguiente figura.

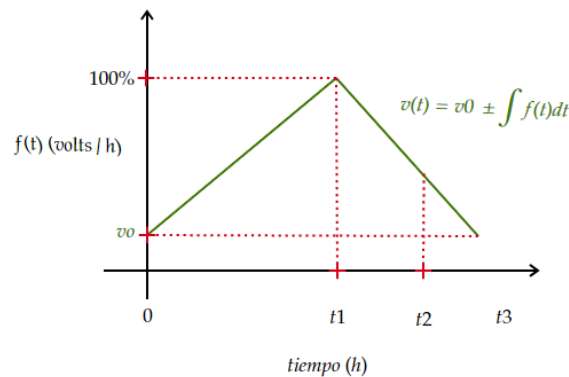


Figura 8.1: Carga y descarga de batería (Fuente elaboración propia).

Los tiempos de (h) entre 0 y t_1 corresponderán a la carga de batería, mientras que los tiempos de (h) entre t_1 y t_3 corresponderán a los tiempos de descarga de esta, transcurrido el 80% de (h) en t_2 se recomendará el retorno del vehículo al punto de carga y evitar de esta manera quedar detenido en carretera por falta de energía.

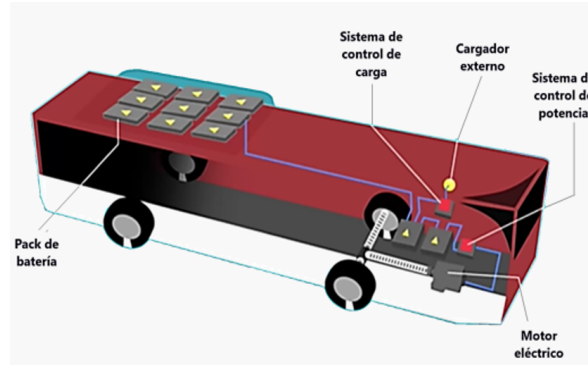


Figura 8.2: Principales componentes de los buses eléctricos [10].

Es natural que por ser una tecnología nueva existan dudas del cómo funcionan estos buses eléctricos y cuáles serán sus principales características, el motor eléctrico necesita menos mantenimiento al existir menos piezas sometidas a desgaste, entregando como resultado una operación y mantenimiento mucho más sencillo. En caso de accidente, las baterías se desconectan para evitar accidente de electrocución, en donde los mantenedores de estos tipos de buses indican que los costos son entre un 30% y un 50% menores al de los buses a combustión. Los valores de la energía eléctrica son más estable en comparación a los de la energía fósil, no afectados por las fluctuaciones de los mercados [10].

Los buses eléctricos no emiten ruidos mejorando la calidad de vida en las ciudades, en donde los costos aproximados de los bus a combustión = \$500 x km (dependiendo de tarifa de combustible y tamaño del bus) y costo aproximando bus eléctrico = \$90 x km (dependiendo de tarifa eléctrica y tamaño del bus) [10].



Figura 8.3: Los 3 principales clasificaciones para los cargadores eléctricos admitidos en Chile [10].

Los cargadores modo 2 son conocidos como “cable de viaje” y es más bien considerado como una solución temporal y de emergencia, sin aplicación práctica para buses (cargador lento de 3.7 kWh),

cargador modo 3 puede ser monofásico o trifásico (cargador semirrápido lento de 7.2 kWh), cargador modo 4 requiere sistema trifásico (carga rápida más de 50 kWh) [10].

8.2. Estimación de las Emisiones de Contaminantes

Para poder estimar las emisiones de contaminantes provenientes del TransValparaíso se debió recabar gran cantidad de información como la cantidad de vehículos de la flota, modelo actual operando, combustible utilizado, kilómetros de los recorridos, entre otros.

$$\text{Emisiones de GEI (t GEI)} = \text{Dato de actividad} \cdot \text{Factor de emisión} \quad (8.2)$$

- Dato de actividad: Medida cuantitativa de la actividad que produce una emisión. en este caso de las emisiones asociadas al consumo de combustibles, el dato de actividad será el combustible consumido.
- Factor de emisión (FE): Ratio que relaciona el dato de actividad con la emisión de GEI, expresado en toneladas de GEI /ud (dependiendo la unidad de las unidades del dato de actividad). Para cada combustible se produce una emisión específica de GEI que se encuentra íntimamente ligada al contenido en carbono del combustible en cuestión.

Para adecuar las unidades del dato de actividad a las unidades del factor de emisión disponible, es necesario utilizar factores de conversión tales como la densidad o el poder calorífico en el caso de los combustibles. Para utilizar una unidad común y poder comparar el impacto de cada uno, las emisiones de cada GEI se convierten a toneladas de CO_2 aplicando un nuevo factor llamado potencial de calentamiento global.

$$\text{Emisiones de GEI (t } CO_2) = \text{Dato de actividad} \cdot \text{Potencial de Calentamiento Global (GWP)} \quad (8.3)$$

GWP: Factor que describe el impacto sobre el cambio climático de cada tipo de GEI. Este factor se formula basándose en la unidad de referencia, el CO_2 , y por ello se expresa en toneladas de CO_2eq/t [41].

$$GEI_{ij} \text{ (t } CO_2) = \sum R_j \cdot FE_{ij} \cdot N_j \quad \forall i \in I: \quad \forall j \in J \quad (8.4)$$

R_j : Rendimiento de vehículo j en (km)

N_j : Número de vehículos del tipo j

FE_{ij} : Factor de emisión de i contaminante y j tipo vehículo (gr/km)

GEI_{ij} : Emisiones totales de i contaminante y j tipo vehículo

$$\text{Factor de Emisión Diesel (FE) [42]} = \frac{2.955 \text{ (kg CO}_2\text{)}}{l} \quad (8.5)$$

$$\text{Poder Calorífico Diesel (PC) [42]} = \frac{11.82 \text{ (kWh)}}{\text{kg}} \quad (8.6)$$

$$\text{Densidad Diesel [42]} = \frac{0.850 \text{ (kg)}}{l} \quad (8.7)$$

$$\text{PC} = \frac{11.82 \text{ (kWh)}}{\text{kg}} \cdot \frac{0.850 \text{ (kg)}}{l} = \frac{9.93 \text{ (kWh)}}{l} \quad (8.8)$$

$$\text{Rendimiento (R}_j\text{)} = \frac{6 \text{ (km)}}{l} \quad (8.9)$$

$$\text{(FE) energía} = \frac{2.955 \text{ (kg CO}_2\text{)}}{l} \cdot \frac{l}{9.93 \text{ (kWh)}} = \frac{0.3 \text{ (kgCO}_2\text{)}}{\text{kWh}} \quad (8.10)$$

Para el caso propuesto del vehículo eléctrico se utilizan los datos obtenidos desde la web, energía abierta para el dato de FE y desde la hoja de datos del bus eléctrico se obtiene su energía de batería y autonomía.

$$\text{(FE) Vehículo Eléctrico} = \frac{0.3 \text{ (t CO}_2\text{)}}{\text{mWh}} \quad (8.11)$$

$$\text{Energía Batería (R}_j\text{) [15]} = 276.5 \text{ (kWh)} \quad (8.12)$$

$$\text{Autonomía Vehículo Eléctrico [15]} = 250 \text{ (km)} \quad (8.13)$$

$$\text{Rendimiento (R}_j\text{)} = \frac{276.5 \text{ (kWh)}}{250 \text{ (km)}} = \frac{1.11 \text{ (kWh)}}{\text{(km)}} \quad (8.14)$$

Después de un tiempo determinado de conducción se recomendará volver al punto de carga, se deberá calcular el tiempo que estarán los buses detenidos por no operación producto de encontrarse en proceso de carga.

Tabla 8.1: Caso Base Bus Diesel Mercedes - Benz Lo 915(Fuente Elaboración Propia).

Caso Base Bus Diesel Mercedes - Benz Lo 915	Unidad
FE	2.96
FE energía	0.30
PC	11.82
PC	9.93
Densidad	0.84
Rendimiento	6
Tiempo	60
Vel. Max	50

Como caso base se utiliza el bus Mercedes Benz Lo 915, que es uno de los tipos de buses que se utilizan en el Transvalparaiso, los datos obtenidos se contrastan con caso propuesto bus eléctrico BYD.

Tabla 8.2: Caso Propuesto Bus Eléctrico BYD [15].

Caso Propuesto Bus Eléctrico BYD	Unidad
Autonomía	250
Energía Batería	276.5
Rendimiento	1.11
km para retorno	50

Con los valores obtenidos de las Tablas 8.1 y 8.2 se analiza cuanto contamina en CO_2 cada unidad de negocio, en donde en el caso base los buses Diesel realizan 4 vueltas diarias, se detecta que existen unidades de negocio de buses eléctricos que no alcanzan a realizar sus 4 vueltas diarias, lo que sugiere que para estas líneas se necesitaran más buses para poder cumplir la demanda.

Tabla 8.3: Unidades de negocios GEI diarios y anuales (Fuente Elaboración Propia).

Recorrido	Inicio	Fin	Caso Base Bus Diesel Mercedes LO 915				Caso Propuesto Bus Eléctrico BYD				
			min	km	Nº vueltas	CO ₂ - 1 día	CO ₂ - 1 año	vueltas	km	CO ₂ - 1 día	CO ₂ - 1 año
101	Belloto Norte	Aduana	39	32,5	4	0,06	23,37	4	130	0,04	15,74
102	Huanhuai	Aduana	38	31,7	4	0,06	22,77	4	127	0,04	15,34
103	Peumo	Aduana	66	55,0	4	0,11	39,55	3	165	0,05	19,98
104	Villa Olímpica	Aduana	51	42,5	4	0,08	30,56	4	170	0,06	20,59
105	Peñablanca	Plaza Victoria	56	46,7	4	0,09	33,56	3	140	0,05	16,95
106	Ojos de Agua	Playa Ancha	62	51,7	4	0,10	37,15	3	155	0,05	18,77
107	Troncos Viejos	Playa Ancha	57	47,5	4	0,09	34,15	3	143	0,05	17,26
108	Pompeya	Aduana	45	37,5	4	0,07	26,96	4	150	0,05	18,17
109	Nueva Porvenir	Playa Ancha	46	38,3	4	0,08	27,56	4	153	0,05	18,57
110	Peñablanca	Aduana	52	43,3	4	0,09	31,16	4	173	0,06	20,99
111	Los Pinos	Playa Ancha	45	37,5	4	0,07	26,96	4	150	0,05	18,17
112	Los Pinos	Playa Ancha	45	37,5	4	0,07	26,96	4	150	0,05	18,17
113	Belloto 2000	Playa Ancha	41	34,2	4	0,07	24,57	4	137	0,05	16,55
114	Belloto Norte	Aduana	38	31,7	4	0,06	22,77	4	127	0,04	15,34
115	Belloto Sur	Playa Ancha	46	38,3	4	0,08	27,56	4	153	0,05	18,57
116	Huanhuai	Maturana	15	12,5	4	0,02	8,99	4	50	0,02	6,06
117	El Retiro	Estación de Quilpué	18	15	4	0,03	10,79	4	60	0,02	7,27
119	Troncos Viejos	Pompeya	25	20,8	4	0,04	14,98	4	83	0,03	10,09
121	Belloto Sur	Canal Chacao	21	17,5	4	0,03	12,58	4	70	0,02	8,48
126	El Sol	Estación de Quilpué	12	10	4	0,02	7,19	4	40	0,01	4,84
201	Reñaca Alto - Santa Julia - Miraflores (Viña del Mar)	Aduana (Valparaíso)	54	45	4	0,09	32,36	4	180	0,06	21,80
202	Reñaca Alto - Glorias Navales - Miraflores (Viña del Mar)	Aduana (Valparaíso)	54	45,0	4	0,09	32,36	4	180	0,06	21,80
203	El Salto (Viña del Mar)	Colón - Aduana (Valparaíso)	35	29,2	4	0,06	20,97	4	117	0,04	14,13
204	Forestal (Viña del Mar)	Aduana (Valparaíso)	35	29,2	4	0,06	20,97	4	117	0,04	14,13
205	Villa Independencia - Miraflores (Viña del Mar)	Aduana (Valparaíso)	38	31,7	4	0,06	22,77	4	127	0,04	15,34
209	Miraflores (Viña del Mar)	Colón - Plaza Victoria (Valparaíso)	33	27,5	4	0,05	19,77	4	110	0,04	13,32
210	Reñaca Alto (Viña del Mar)	Aduana (Valparaíso)	49	40,8	4	0,08	29,36	4	163	0,05	19,78
212	Miraflores (Viña del Mar)	Aduana (Valparaíso)	26	21,7	4	0,04	15,58	4	87	0,03	10,50
213	Reñaca Alto (Viña del Mar)	Aduana (Valparaíso)	47	39,2	4	0,08	28,16	4	157	0,05	18,97
214	Santa Julia (Viña del Mar)	Aduana (Valparaíso)	47	39,2	4	0,08	28,16	4	157	0,05	18,97
215	Gomez Carreño (Viña del Mar)	Cerro Toro (Valparaíso)	43	35,8	4	0,07	25,77	4	143	0,05	17,36
301	Peñablanca - Belloto Norte - Las Americas (Villa Alemana)	Reñaca (Viña del Mar)	72	60,0	4	0,12	43,14	3	180	0,06	21,80
302	Peñablanca - Los Pinos (Villa Alemana)	Concón (Concón) - Sn. Expedito (Concón)	73	60,8	4	0,12	43,74	3	183	0,06	22,10
303	Peñablanca (Villa Alemana)	Concón (Concón)	73	60,8	4	0,12	43,74	3	183	0,06	22,10
304	Peñablanca (Villa Alemana)	Gómez Carreño (Viña del Mar)	28	23,3	4	0,05	16,78	4	93	0,03	11,30
305	Peñablanca (Villa Alemana)	Colmo (Concón)	108	90,0	4	0,18	64,71	1	90	0,03	10,90
306	Peñablanca - El Olivar (Villa Alemana)	Gomez Carreño (Viña del Mar)	49	40,8	4	0,08	29,36	4	163	0,05	19,78
307	Nueva Hipodromo-Huanhuai-Troncos Viejos (Villa Alemana)	Concón (Con Con)	74	61,7	4	0,12	44,34	2	123	0,04	14,94
308	Peñablanca (Villa Alemana)	Miraflores (Viña del Mar)	52	43,3	4	0,09	31,16	3	130	0,04	15,74
309	Peñablanca (Villa Alemana)	Placilla de Peñuelas (Valparaíso)	85	70,8	4	0,14	50,93	2	142	0,05	17,16
401	Santa Julia (Viña del Mar)	Placeres (Valparaíso)	33	27,5	4	0,05	19,77	4	110	0,04	13,32
402	Placilla de Peñuelas (Valparaíso)	Rotonda Concón (Concón)	87	72,5	4	0,14	52,13	2	145	0,05	17,56
403	Villa Independencia - El Olivar (Viña del Mar)	Las Palmas - La Laguna (Valparaíso)	63	52,5	4	0,10	37,75	3	158	0,05	19,07
404	Forestal (Viña del Mar)	Gómez Carreño (Viña del Mar)	23	19,2	4	0,04	13,78	4	77	0,03	9,28
405	Forestal (Viña del Mar)	Sta. Ines - Jardín del Mar (Viña del Mar)	19	15,8	4	0,03	11,38	4	63	0,02	7,67
406	Reñaca Alto - Glorias Navales (Viña del Mar)	Placilla de Peñuelas (Valparaíso)	87	72,5	4	0,14	52,13	2	145	0,05	17,56
407	Reñaca Alto (Viña del Mar)	Juan Pablo II (Valparaíso)	49	40,8	4	0,08	29,36	4	163	0,05	19,78
409	Plaza Vergara (Viña del Mar)	Chorrillos (Viña del Mar)	14	11,7	4	0,02	8,39	4	47	0,02	5,65
410	Reñaca Alto - Villa Linda (Viña del Mar)	Placeres (Valparaíso)	49	40,8	4	0,08	29,36	4	163	0,05	19,78
411	Reñaca Alto (Viña del Mar)	Quinta Vergara - Tranque Sur (Viña del Mar)	49	40,8	4	0,08	29,36	4	163	0,05	19,78
412	Reñaca alto (Viña del Mar)	Forestal (Viña del Mar)	36	30,0	4	0,06	21,57	4	120	0,04	14,53
501	Placeres (Valparaíso)	6º Sector (Valparaíso)	30	25,0	4	0,05	17,98	4	100	0,03	12,11
503	Placeres (Valparaíso)	Aduana (Valparaíso)	20	16,7	4	0,03	11,98	4	67	0,02	8,07
504	Recreo (Viña del Mar)	Pacifico (Valparaíso)	34	28,3	4	0,06	20,37	4	113	0,04	13,73
505	Esperanza (Viña del Mar)	Playa Ancha - Martina Mercante (Valparaíso)	56	46,7	4	0,09	33,56	4	187	0,06	22,61
506	Juan Pablo II - Rodellillo - Polanco (Valparaíso)	Gran Bretaña (Valparaíso)	18	15,0	4	0,03	10,79	4	60	0,02	7,27
507	Rodellillo - Cerro Barrón (Valparaíso)	Cementerio 3 (Valparaíso)	37	30,8	4	0,06	22,17	4	123	0,04	14,94
508	Rodellillo Alto - Tierras Rojas (Valparaíso)	Aduana (Valparaíso)	24	20,0	4	0,04	14,38	4	80	0,03	9,69
509	Rodellillo (Valparaíso)	Mall Marina Arauco (Viña del Mar)	35	29,2	4	0,06	20,97	4	117	0,04	14,13
510	Placeres (Valparaíso)	Porvenir (Valparaíso)	32	26,7	4	0,05	19,17	4	107	0,04	12,92
511	Ramaditas (Valparaíso)	Cementerio 3 (Valparaíso)	35	29,2	4	0,06	20,97	4	117	0,04	14,13
512	Ramaditas (Valparaíso)	Los Chonos (Valparaíso)	38	31,7	4	0,06	22,77	4	127	0,04	15,34
513	El Vergel (Valparaíso)2	Aduana (Valparaíso)	23	19,2	4	0,04	13,78	4	77	0,03	9,28
514	2º Sector - Pezoa Veliz (Valparaíso)	Portales (Valparaíso)	44	36,7	4	0,07	26,37	4	147	0,05	17,76
515	Plazuela Ecuador (Valparaíso)	Montedónico (Valparaíso)	16	13,3	4	0,03	9,59	4	53	0,02	6,46
516	Plaza Ecuador (Valparaíso)	San Juan de Dios (Valparaíso)	14	11,7	4	0,02	8,39	4	47	0,02	5,65
517	Avenida Francia (Valparaíso)	Cerro Mariposas (Valparaíso)	27	22,2	4	0,04	15,98	4	89	0,03	10,77
519	Plaza Ecuador (Valparaíso)	Cerro Yungay (Valparaíso)	16	13,3	4	0,03	9,59	4	53	0,02	6,46
520	Rodellillo (Valparaíso)	Laguna Verde (Valparaíso)	88	73,3	4	0,14	52,73	2	147	0,05	17,76
521	Ramaditas (Valparaíso)	Cerro Alegre (Valparaíso)	26	21,7	4	0,04	15,58	4	87	0,03	10,50
522	La Planchada (Valparaíso)	Aduana (Valparaíso)	15	12,5	4	0,02	8,99	4	50	0,02	6,06
601	Playa Ancha (Valparaíso)	Rotonda Concón (Concón)	59	49,2	4	0,10	35,35	3	148	0,05	17,86
602	Playa Ancha (Valparaíso)	Rotonda de Concón (Concón)	54	45,0	4	0,09	32,36	3	135	0,04	16,35
603	Gómez Carreño (Viña del Mar)	Montedónico (Valparaíso)	32	26,7	4	0,05	19,17	4	107	0,04	12,92
604	Gómez Carreño (Viña del Mar)	Placeres (Valparaíso)	13	10,8	4	0,02	7,79	4	43	0,01	5,25
605	Playa Ancha (Valparaíso)	Fuerte Aguayo (Concón)	84	70,0	4	0,14	50,33	2	140	0,05	16,95
606	Playa Ancha (Valparaíso)	Jardín Del Mar (Viña del Mar)	48	40,0	4	0,08	28,76	4	160	0,05	19,38
607	Cerro Alegre (Valparaíso)	Reñaca (Viña del Mar)	50	41,7	4	0,08	29,96	4	167	0,06	20,18
608	Sector Colmo (Concón)	Aduana (Valparaíso)	89	74,2	4	0,15	53,33	2	148	0,05	17,96
609	Sector Colmo (Concón)	Canal Chacao (Quilpué)	97	80,8	4	0,16	58,12	2	162	0,05	19,58
610	Villa Dulce (Viña del Mar)	Aduana (Valparaíso)	62	51,7	4	0,10	37,15	3	155	0,05	18,77
611	El Olivar (Viña del Mar)	Montedónico (Valparaíso)	78	65,0	4	0,13	46,74	2	130	0,04	15,74
612	Avenida Alemania (Valparaíso)	Limonares (Viña del Mar)	39	32,5	4	0,06	23,37	4	130	0,04	15,74
613	Villa Dulce (Viña del Mar)	Gómez Carreño (Viña del Mar)	35	29,2	4	0,06	20,97	4	117	0,04	14,13
614	Villa Independencia (Viña del Mar)	Centro de Viña del Mar (Viña del Mar)	38	31,7	4	0,06	22,77	4	127	0,04	15,34
701	Cordillera (Valparaíso)	Chilcetra (Valparaíso)	19	15,8	4	0,03	11,38	4	63	0,02	7,67
702	Cordillera (Valparaíso)	Rocuant (Valparaíso)	15	12,5	4	0,02	8,99	4	50	0,02	6,06
703	San Roque (Valparaíso)	Río Frio I (Valparaíso)	45	37,5	4	0,07	26,96	4	150	0,05	18,17
704	San Roque (Valparaíso)	Mall Marina Arauco (Viña del Mar)	26	21,7	4	0,04	15,58	4	87	0,03	10,50
705	Playa Ancha (Valparaíso)	Hospital Eduardo Pereira (Valparaíso)	35	29,2	4	0,06	20,97	4	117	0,04	14,13
706	Camino Viejo (Valparaíso)	Playa Aduana I (Valparaíso)	29	24,2	4	0,05	17,38	4	97	0,03	11,71
801	Av. Pedro Montt (Valparaíso)	Aduana (Valparaíso)	10	8,3	4	0,01	4,04	4	33	0,01	4,04
802	Av. Colón (Valparaíso)	Aduana (Valparaíso)	11	9,2	4	0,01	4,44	4	37	0,01	4,44
901	Placilla de Peñuelas (Valparaíso)	Playa Ancha (Valparaíso)	62	51,7	4	0,10	37,15	3	155	0,05	18,77
901n	Placilla de Peñuelas (Valparaíso)	Placilla de Peñuelas (Valparaíso)	50	41,7	4	0,08	29,96	4	167	0,06	20,18
902	Placilla Oriente (Valparaíso)	Valparaíso (Valparaíso)	22	18,3	4	0,04	13,18	4	73	0,02	8,88
903	Lomas de la Luz (Valparaíso)	Playa Ancha (Valparaíso)	54	45,0	4	0,09	32,36	4	180	0,06	21,80

Tabla 8.4: Distintas unidades de negocios en Valparaíso [16] Cálculos de GEI(Fuente elaboración propia).

Unidad	Empresa	Servicios Buses	km	Vehículos	GEI (t CO ₂) Caso Base	Total GEI (t CO ₂) Caso Base Anual	GEI (t CO ₂) Caso Propuesto	Total GEI (t CO ₂) Ca- so Propuesto Anual
1	Transportes Fenur S.A.	101 - 102 - 103 - 104 - 105 - 106 - 107 - 108 - 109 - 110 - 111 - 112 - 113 - 114 - 115 - 116 - 117 - 119 - 121 - 126	654.2	357	490.2	174984.4	301.05	107475.5
2	Transportes Viña Bus S.A.	201 - 202 - 203 - 204 - 205 - 209 - 210 - 212 - 213 - 214 - 215	339.2	349	296.01	103307.1	186.10	64949.3
3	Transportes Sol y Mar S.A.	301 - 302 - 303 - 304 - 305 - 306 - 307 - 308 - 309	390.8	232	367.91	85356.0	155.82	36151.2
4	Transportes Viña Bus S.A.	401 - 402 - 403 - 404 - 405 - 406 - 407 - 409 - 410 - 411 - 412	424.2	215	305.00	65574.4	164.00	35259.8
5	Buses del Gran Valpa- raíso S.A.	501 - 503 - 504 - 505 - 506 - 507 - 508 - 509 - 510 - 511 - 512 - 513 - 514 - 515 - 516 - 517 - 519 - 520 - 521 - 522	523.1	234	376.10	88008.1	235.62	55135.2
6	Buses del Gran Valpa- raíso S.A.	601 - 602 - 603 - 604 - 605 - 606 - 607 - 608 - 609 - 610 - 611 - 612 - 613 - 614	648.3	278	466.18	129599.2	226.17	62874.5
7	Transporte de Pasaje- ros	701 - 702 - 703 - 704 - 705 - 706	140.8	148	101.27	14987.4	68.22	10097.1
9	Buses del Gran Valpa- raíso S.A.	901 - 901n - 902 - 903	156.7	54	112.65	6083.2	69.64	3760.4
8	Trolebuses de Chile S.A.	801 - 802	17.5	30	8.48	254.3	8.48	254.3

Al hacer la sumatorio de la cantidad de GEI tanto para caso base como para caso propuesto se encuentra que:

Tabla 8.5: Resumen Totales GEI Caso Base v/s Caso Propuesto (Fuente elaboración propia).

Total GEI (kt CO ₂) Caso Base Anual	Total GEI (kt CO ₂) Caso Propuesto Anual
668.154	375.957

Si el caso propuesto se energiza desde SEN entonces los GEI disminuirían en un 56.2%, en donde la unidad de negocio número 1 es la que más contamina anualmente, el caso propuesto baja las emisiones, pero no logra ser 0 puestos, actualmente Chile tiene una FE = 0.3 tCO₂eq/MWh como lo muestra la Figura 8.4, se recomendara energizar terminal con paneles fotovoltaicos y así llegar a 0 emisiones.

La unidad de negocio número 8 pertenece a los trolebuses, estos son eléctricos, pero de igual forma contaminan, por lo que nace la pregunta ¿Hasta qué punto la electromovilidad será respetuosa con el medio ambiente?.

Existen 23 líneas de buses eléctricos mencionadas en la Tabla 8.6 de las cuales no alcanzan a dar sus 4 vueltas diarias, se recomendara en estas líneas aumentar la dotación de buses para así poder cumplir la demanda.

Al observar la Figura 8.5 se aprecia que las unidades de negocio número 1 y 6 son las que más contaminan tanto en el caso base, como en el caso propuesto. Para el caso propuesto se observa que las unidades 1 y 2 son las que más generan GEI, pero que sería 0 emisiones si t_4 se energiza a paneles fotovoltaicos.

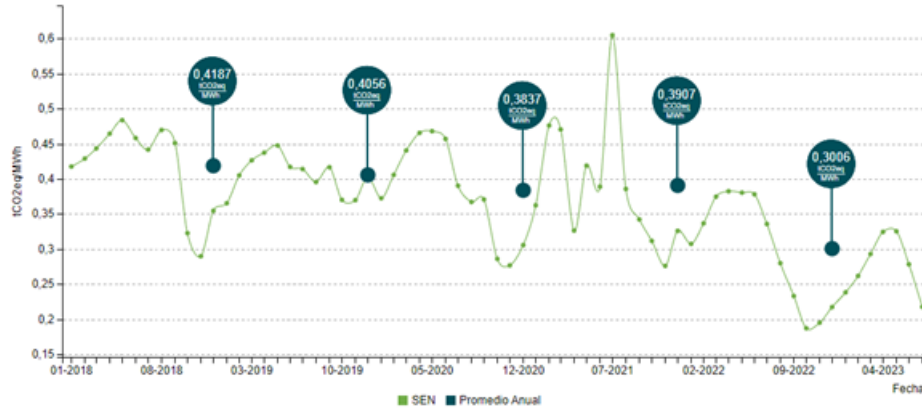


Figura 8.4: Factor de Emisión del Sistema Eléctrico Nacional (SEN) [29].

Tabla 8.6: Distintas unidades de negocios buses eléctricos en Valparaíso que no alcanzan a dar sus 4 vueltas diarias (Fuente elaboración propia).

Recorrido	Inicio	Fin	km	N° vueltas en 1 día Bus Diesel	N° vueltas en 1 día Bus Eléctrico	km - 1 día - Bus Eléctrico
103	Puñeno	Aduana	55.0	4	3	165
105	Peñablanca	Plaza Victoria	46.7	4	3	140
106	Ojos de Agua	Playa Ancha	51.7	4	3	155
107	Troncos Viejos	Playa Ancha	47.5	4	3	143
301	Peñablanca - Belloto Norte - Las Americas (Villa Alemana)	Reñaca (Viña del Mar)	60.0	4	3	180
302	Peñablanca - Los Pinos (Villa Alemana)	Concón (Costa)-Sn. Expedito (Concón)	60.8	4	3	183
303	Peñablanca (Villa Alemana)	Concón (Concón)	60.8	4	3	183
305	Peñablanca (Villa Alemana)	Colmo (Concón)	90.0	4	1	90
307	Nueva Hipodromo-Huanhuallí-Troncos Viejos (Villa Alemana)	Concón (Con Con)	61.7	4	2	123
308	Peñablanca (Villa Alemana)	Miraflores (Viña del Mar)	43.3	4	3	130
309	Peñablanca (Villa Alemana)	Placilla de Peñuelas (Valparaíso)	70.8	4	2	142
402	Placilla de Peñuelas (Valparaíso)	Rotonda Concón (Concón)	72.5	4	2	145
403	Villa Independencia - El Olivar (Viña del Mar)	Las Palmas - La Laguna (Valparaíso)	52.5	4	3	158
406	Reñaca Alto - Glorias Navales (Viña del Mar)	Placilla de Peñuelas (Valparaíso)	72.5	4	2	145
520	Rodelillo (Valparaíso)	Laguna Verde (Valparaíso)	73.3	4	2	147
601	Playa Ancha (Valparaíso)	Rotonda Concón (Concón)	49.2	4	3	148
602	Playa Ancha (Valparaíso)	Rotonda de Concón (Concón)	45.0	4	3	135
605	Playa Ancha (Valparaíso)	Fuerte Aguayo (Concón)	70.0	4	2	140
608	Sector Colmo (Concón)	Aduana (Valparaíso)	74.2	4	2	148
609	Sector Colmo (Concón)	Canal Chacao (Quilpué)	80.8	4	2	162
610	Villa Dulce (Viña del Mar)	Aduana (Valparaíso)	51.7	4	3	155
611	El Olivar (Viña del Mar)	Montedónico (Valparaíso)	65.0	4	2	130
901	Placilla de Peñuelas (Valparaíso)	Playa Ancha (Valparaíso)	51.7	4	3	155

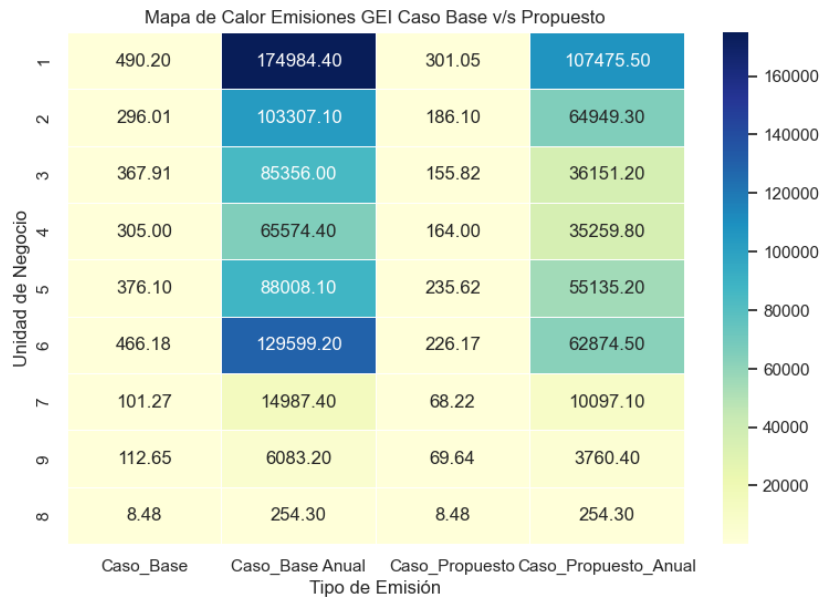


Figura 8.5: Gráfico en Python, mapa de calor GEI Caso Base v/s Caso Propuesto (Fuente elaboración propia).

8.3. Energía Renovable para el Electroterminal

Chile posee condiciones geográficas y climáticas que hacen especialmente atractivas las energías renovables, específicamente la eólica y la fotovoltaica, es por esta razón que se analizara con cuál de estas dos alternativas se podría energizar el electroterminal para Valparaíso.

8.4. Análisis Eólico

La energía eólica es una fuente de energía renovable, ya que aprovecha la energía cinética del viento para generar electricidad, esta fuente es inagotable. Por lo que se selecciona la ubicación para el t_4 obtenido en el análisis de localización. Al cargar su ubicación geográfica se obtienen los siguientes datos para las velocidades de viento de forma mensual.

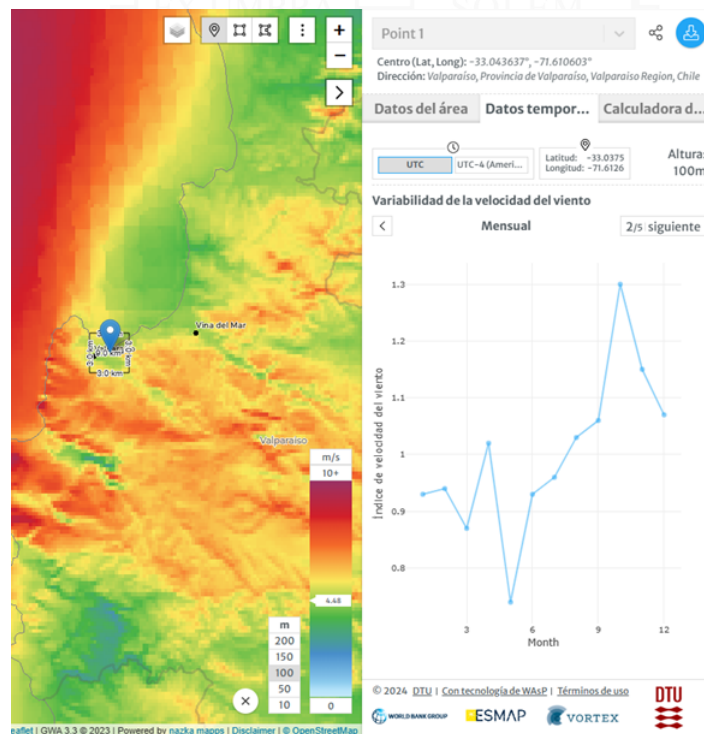


Figura 8.6: Velocidad del viento en Valparaíso [30].

Se carga las velocidades del viento obtenido desde [30], en RETScreen Expert en donde se evidencia la alerta del software por la nula generación que producirá este parque eólico, puesto estos equipos necesitan más de 3 m/s para que las aspas puedan salir de la inercia.

Considerando la nula exportación de energía a la red con la alternativa eólica se descarta energizar el terminal con este tipo de generación, se analizará con sistema fotovoltaico.

- Eólica - Nivel 3

Evaluación de recursos
Método de evaluación de los recursos

Velocidad del Viento

Presión atmosférica Temperatura del aire

Datos climatológicos Chile - Valparaíso

Tarifa de exportación de electricidad USD/kWh

Electricidad exportada a la red MWh

Mes	Velocidad del Viento			Temperatura del aire			Datos climatológicos Chile - Valparaíso			Tarifa de exportación de electricidad USD/kWh	Electricidad exportada a la red MWh
	m/s	kPa	°C	m/s	kPa	°C					
Enero	0,9	99,8	17,0	5,0	99,8	17,0	1				
Febrero	0,9	99,8	16,8	4,6	99,8	16,8	1				
Marzo	0,8	99,9	15,6	4,6	99,9	15,6	1				
Abril	1,0	100,0	14,2	4,5	100,0	14,2	1				
Mayo	0,7	100,1	13,3	4,3	100,1	13,3	1				
Junio	0,9	100,2	12,0	4,4	100,2	12,0	1				
Julio	0,9	100,3	11,4	4,5	100,3	11,4	1				
Agosto	0,9	100,3	11,7	4,5	100,3	11,7	1				
Setiembre	1,0	100,3	12,1	4,7	100,3	12,1	1				
Octubre	1,3	100,2	13,2	4,9	100,2	13,2	1				
Noviembre	1,1	100,0	14,7	5,2	100,0	14,7	1				
Diciembre	1,0	99,9	16,2	5,2	99,9	16,2	1				
Anual	1,0	100,1	14,0	4,7	100,1	14,0					

Figura 8.7: RETScreen Expert análisis generación de parque eólico Valparaíso [31].

8.5. Análisis Fotovoltaico

La energía fotovoltaica es cada vez más popular en todo el mundo y es que existen varias razones del porqué utilizarla, esta fuente de radiación es inagotable, prácticamente infinita, lo que nos ayudara a mitigar en el futuro la dependencia de los combustibles fósiles. Durante el proceso de generación eléctrica no emiten GEI por lo que ayudara a reducir estos nocivos gases. Esta tecnología, si bien sus costos son elevados, la recuperación de la inversión es de rápido plazo.

Como se explicaba anteriormente, si energizamos el terminal al SEN igualmente contaminaremos puesto Chile, actualmente si bien a mejorado los GEI en su matriz de generación energética con una creciente participación de las energías renovables, actualmente los GEI de SEN no son cero.

Chile cuenta con el electroterminal más grande de Sudamerica “La estación El Conquistador”, construida en Maipu, Santiago, con 15000 m², puede abastecer a 215 buses electricos, 57 cargadores Copec Voltex de 150 KW c/u alcanzando 8550 KW gracias a más de 1600 paneles fotovoltaicos de 622 kWp (kilowatt peak o kilowatt potencia) y generan poco más de 1 GWh/año, es un sistema de autogeneración 100 % renovable provisto por Flux Solar, filial de Copec [32].



Figura 8.8: Electroterminal El Conquistador [32].

La inversión para este electroterminal es de US\$ 8.5 millones y US\$ 80 millones para incluir los 215 buses [32]. Si analizamos en RETScreen Expert bajo los datos de inversión de este electroterminal simulando de esta forma la recuperación de la inversión, nos entrega los siguientes datos.

Ingresos anuales			
Ingresos por exportación de electricidad			
Electricidad exportada a la red	MWh		1,054
Tarifa de exportación de electricidad	USD/kWh		0,38
Ingresos por exportación de electricidad	USD		400.556
Tasa de escalamiento de exportación de electricidad	%		2%
Ingresos por reducción GEI			
Reducción bruta de GEI	tCO ₂ /año		465
Reducción bruta de GEI - 20 años	tCO ₂		9.306
Ingresos por reducción GEI	USD		0
Otros ingresos (costo) <input type="checkbox"/>			
Ingresos por producción de energía limpia (EL) <input type="checkbox"/>			

Figura 8.9: Ingresos Anuales (Fuente elaboración Propia).

Para el electroterminal de Valparaíso se podrían usar como modelo los valores de costos obtenidos por la estación el conquistador, para así tener una idea aproximada de cuáles serían de forma aproximada los costos asociados a replicar un terminal de iguales envergaduras en la V región. Si bien la función principal del electroterminal es energizar los buses eléctricos, este podría energizar a SEN también, se observa que podría generar 1054 MWh con una reducción de 9306 tCO₂ en 20 años de operación y suponiendo una tasa de exportación de 0.38 USD/kWh en el análisis del flujo de caja, se concluye que la inversión podría recuperarse eventualmente para el año 20, claro con un TIR y VPN negativo indicando que el proyecto está gastando más dinero del que está generando en ese momento, lo que puede ser una señal de problemas financieros si continúa de manera sostenida, aunque la función de esta no es producir una recuperación de inversión, desde este medio, sino que recuperar inversión por servicio de transporte de pasajeros, estudio que no se realiza en este trabajo.

Costos Ahorros Ingreso			Flujo de caja anuales		
Costos iniciales			Año	Antes-impuestos	Acumulado
Estudio de factibilidad	0,01%	USD 1.000	#	USD	USD
Desarrollo	60%	USD 5.100.000	0	-2.550.000	-2.550.000
Ingeniería	3,5%	USD 300.000	1	-1.042.583	-3.592.583
Sistema eléctrico de potencia	22%	USD 1.869.000	2	-1.034.411	-4.626.994
Balance del sistema y misceláneos	14,5%	USD 1.230.000	3	-1.026.076	-5.653.070
Costos iniciales totales	100%	USD 8.500.000	4	-1.017.575	-6.670.645
Flujo de caja anuales - Año 1			5	-1.008.904	-7.679.549
Costos anuales/pagos de deuda			6	451.091	-7.228.458
Pagos de la deuda - 5 años	USD	1.451.150	7	460.113	-6.768.345
Costos anuales totales	USD	1.451.150	8	469.315	-6.299.030
Ahorros e ingresos anuales			9	478.701	-5.820.329
Ingresos por exportación de electricidad	USD	400.556	10	488.275	-5.332.053
Ingresos por reducción GEI	USD	0	11	498.041	-4.834.012
Otros ingresos (costo)	USD	0	12	508.002	-4.326.010
Ingresos por producción de EL	USD	0	13	518.162	-3.807.849
Ingresos y ahorros anuales totales	USD	400.556	14	528.525	-3.279.324
Flujo de efectivo neto anual - Año 1	USD	-1.050.594	15	539.096	-2.740.228
			16	549.877	-2.190.351
			17	560.875	-1.629.476
			18	572.092	-1.057.383
			19	583.534	-473.849
			20	595.205	121.356

Figura 8.10: Recuperación de la inversión en el año 19 de operación (Fuente elaboración Propia).

En la Figura 8.11 se observa efectivamente TIR y VPN negativos en donde los costos de producción son superiores a los de la tarifa de exportación de electricidad fijada, una solución sería obtener mejores precios por la generación de electricidad exportada a SEN.

Viabilidad financiera		
TIR antes de impuestos - capital	%	0,14%
MTIR antes de impuestos - capital	%	4,2%
TIR antes de impuestos - activos	%	-4,3%
MTIR antes de impuestos - activos	%	0,85%
Pago simple de retorno del capital	año	21,2
Repago - capital	año	19,8
Valor Presente Neto (VPN)	USD	-3.905.323
Ahorros anuales en ciclo de vida	USD/año	-427.814
Relación Beneficio-Costo		-0,53
Cobertura - servicio de deuda		0,28
Costo de reducción de GEI	USD/tCO ₂	919
Cost. de produc. de energía.	USD/kWh	0,852

Figura 8.11: Viabilidad Financiera (Fuente elaboración Propia).

Si la tasa de exportación fuera en este caso el doble 0.76 USD/kWh en el análisis del flujo de caja, se observa que los indicadores TIR y VPN mejoran a indicadores positivos, lo que se concluye de la dependencia del proyecto ante el valor del precio de exportación. Como se observa en las Figuras 8.12 y 8.13, en donde la recuperación de la inversión en este caso sería en el año 11.

Costos Ahorros Ingreso				Flujo de caja anuales		
Costos iniciales				Año	Antes-impuestos	Acumulado
				#	USD	USD
Estudio de factibilidad	0,01%	USD	1.000	0	-2.550.000	-2.550.000
Desarrollo	60%	USD	5.100.000	1	-634.016	-3.184.016
Ingeniería	3,5%	USD	300.000	2	-617.673	-3.801.688
Sistema eléctrico de potencia	22%	USD	1.869.000	3	-601.003	-4.402.692
Balance del sistema y misceláneos	14,5%	USD	1.230.000	4	-584.000	-4.986.692
Costos iniciales totales	100%	USD	8.500.000	5	-566.657	-5.553.350
Flujo de caja anuales - Año 1						
Costos anuales/pagos de deuda						
Pagos de la deuda - 5 años		USD	1.451.150	6	902.182	-4.651.168
Costos anuales totales		USD	1.451.150	7	920.226	-3.730.942
Ahorros e ingresos anuales						
Ingresos por exportación de electricidad		USD	801.112	8	938.630	-2.792.312
Ingresos por reducción GEI		USD	0	9	957.403	-1.834.909
Otros ingresos (costo)		USD	0	10	976.551	-858.358
Ingresos por producción de EL		USD	0	11	996.082	137.724
Ingresos y ahorros anuales totales		USD	801.112	12	1.016.004	1.153.727
Flujo de efectivo neto anual - Año 1		USD	-650.038	13	1.036.324	2.190.051
				14	1.057.050	3.247.101
				15	1.078.191	4.325.292
				16	1.099.755	5.425.047
				17	1.121.750	6.546.797
				18	1.144.185	7.690.982
				19	1.167.069	8.858.051
				20	1.190.410	10.048.461

Figura 8.12: Vialidad Financiera (Fuente elaboración Propia).

Viabilidad financiera		
TIR antes de impuestos - capital	%	9,8%
MTIR antes de impuestos - capital	%	9,4%
TIR antes de impuestos - activos	%	2,5%
MTIR antes de impuestos - activos	%	5,2%
Pago simple de retorno del capital	año	10,6
Repago - capital	año	10,9
Valor Presente Neto (VPN)	USD	383.820
Ahorros anuales en ciclo de vida	USD/año	42.046
Relación Beneficio-Costo		1,2
Cobertura - servicio de deuda		0,56
Costo de reducción de GEI	USD/tCO ₂	-90,37
Cost. de produc. de energía.	USD/kWh	0,852

Figura 8.13: Recuperación de la inversión en el año 11 de operación (Fuente elaboración Propia).

9 | Conclusiones

En este trabajo, se utilizó la heurística método del barrido o método de la regla descrito por Ronal Ballou [9] en vista que al intentar localizar el electroterminal en Valparaíso con modelo TSP se generaban infinitas combinaciones posibles, quedando el problema sin solución matemática. Al relajar el problema, agrupando las manzanas involucradas en distritos y eliminando el distrito 24 por no estar cerca del continente, igualmente se generaban 3.10^{23} combinaciones de rutas posibles. Es por esta razón que se elige la heurística de Ronal Ballou [9] logrando de esta forma entregar un candidato de localización que sería siendo en este caso el t_4 .

Resulta ser inequívoco que el aumento de CO_2 , metano y óxido nitroso en la atmósfera durante la era industrial es el resultado de las actividades humanas y que la influencia humana es el principal impulsor de muchos cambios observados en la atmósfera, el océano, la criósfera y la biosfera [6], en donde es improbable que el Sol haya causado la tendencia de calentamiento global observada durante el último medio siglo [6].

Nuestro océano global cubre más del 70 % de la superficie de la Tierra y tiene una capacidad calorífica muy alta. Ha absorbido el 90 % del calentamiento que se ha producido en las últimas décadas debido al aumento de los GEI, y los pocos metros superiores del océano almacenan tanto calor como toda la atmósfera de la Tierra. Los efectos del calentamiento de los océanos incluyen el aumento del nivel del mar debido a la expansión térmica, la decoloración de los corales, el derretimiento acelerado de las principales capas de hielo de la Tierra, la intensificación de los huracanes y los cambios en la salud y la bioquímica de los océanos[8].

El 73.2 % de las emisiones mundiales corresponden a la de generación de energía, en donde el 16.2 % corresponde al transporte, se hace más que necesario el cambio a tecnologías limpias en donde la electromovilidad podría jugar un papel crucial. Es importante eliminar la dependencia de las energías fósiles, concluyendo que existe una correlación en la producción de petróleo con las emisiones de CO_2 y de ahí la importancia de intentar predecir cuando ocurrirá su pick máximo de producción, aunque como se mencionó anteriormente son varios los sectores que emiten GEI. Se espera que a penas se desarrollen nuevas tecnologías y así como aumento la producción de petróleo esta caerá. El 13 de diciembre del 2023, se celebró la COP28, señala el "principio del fin" de la era de los combustibles fósiles, al sentar las bases para una transición rápida, justa y equitativa, respaldado por profundos recortes de emisiones y una mayor financiación.

Se considera que es natural que por ser una tecnología nueva existan dudas del cómo funcionan estos buses eléctricos y cuáles serán sus principales características, el motor eléctrico necesita menos mantenimiento al existir menos piezas sometidas a desgaste, entregando como resultado una operación y mantenimiento mucho más sencillo, de hecho los costos de operación son entre un 30 % y un 50 % menores al de los buses a combustión. Los valores de la energía eléctrica son más estable en comparación a los de la energía fósil, no afectados por las fluctuaciones de los mercados [10], siendo los costos

aproximados de los buses a combustión = \$500 x km (dependiendo de tarifa de combustible y tamaño del bus) y costo aproximando los buses eléctricos = \$90 x km (dependiendo de tarifa eléctrica y tamaño del bus) [10].

La estimación de las emisiones contaminantes de la flota actual del Transvalparaiso indica que al cambiar a buses eléctricos, se prevé una reducción del 56.2%, siendo la única forma actual para lograr 0% de emisiones sería energizando el terminal con paneles fotovoltaicos.

De las 97 líneas de buses, existen 23 líneas de buses eléctricos mencionadas en la Tabla 8.6 de las cuales no alcanzan a dar sus 4 vueltas diarias, se recomendará en estas líneas aumentar la dotación de buses para así poder cumplir la demanda.

Para el electroterminal de Valparaíso se podrían usar como modelo los valores de costos obtenidos por la estación, el conquistador de US\$ 8.5 millones, que es la más grande de sudamérica, para así tener una idea aproximada de cuáles serían de forma aproximada los costos asociados a replicar un terminal de iguales envergaduras en la V región. Si analizamos en RETScreen Expert bajo los datos de inversión de este electroterminal simulando de esta forma la recuperación de la inversión, nos entrega que esta se recupera al año 19, en donde las horas de no uso el electroterminal podría técnicamente energizar a SEN.

Si no logramos como civilización, la disminución de los GEI nos enfrentaremos a consecuencias potencialmente devastadoras como resultados catastróficos del cambio climático, en un artículo de la BBC [11] se habla de la extinción humana, siendo este el peor escenario producto de no tomar medidas en la reducción de los GEI. Actualmente, el incremento de temperatura se acerca a los 1.5 °C, sigue requiriendo una reducción drástica del 45% en las emisiones de CO_2 o dióxido de carbono de 45% para 2030, por qué 2030 es la fecha límite de la humanidad para evitar una catástrofe global [12], según los últimos informes de IPCC vamos camino a un aumento de 3 °C, muy por encima del máximo de 2 °C contemplado por los Acuerdos de París sobre cambio climático.

10 | Anexos

A continuación se agregan los códigos de programación para las figuras creadas a partir de los datos obtenidos

10.1. Python Grafo TSP

Se incorpora código en Python en el cual se utilizó para realizar método de la regla [9], con el objetivo de localizar terminal de buses eléctricos para Valparaíso.

```

1 # Se importa librerías a usar
2
3 import geopandas as gpd
4 import networkx as nx
5 import folium
6
7 # Se crea un GeoDataFrame con datos georreferenciados
8 data = {'Node': ['t4', '2', '1', '4', '7', '3', '6', '5', '11', '8', '9', '23',
9               , '10', '12', '13', '14', '15', '16', '22', '21', '20', '17', '26', '25',
10              '19', '18'],
11         'Latitude': [-33.042796, -33.026753, -33.032310, -33.036723,
12                    -33.042832, -33.040535, -33.045970, -33.049087, -33.046499, -33.055109,
13                    -33.058869, -33.125314, -33.058234, -33.048056, -33.056307, -33.059392,
14                    -33.056322, -33.064417, -33.143311, -33.122350, -33.062902, -33.047865,
15                    -33.059041, -33.050922, -33.038760, -33.042007],
16         'Longitude': [-71.606157, -71.634514, -71.646172, -71.629193,
17                      -71.623201, -71.642663, -71.631818, -71.640574, -71.617385, -71.631495,
18                      -71.625188, -71.659686, -71.618678, -71.608611, -71.612459, -71.608367,
19                      -71.603263, -71.595370, -71.567922, -71.563445, -71.587479, -71.596309,
20                      -71.576340, -71.573764, -71.586931, -71.599873]}
21 gdf_nodes = gpd.GeoDataFrame(data, geometry=gpd.points_from_xy(data['Longitude'], data['Latitude']))
22
23 # Se establece la proyección como WGS 84
24 gdf_nodes.crs = 'EPSG:4326'
25
26 # Crear un grafo para distritos de Valparaíso según centroides de PRC
27 G = nx.Graph()
28
29 # Se agrega nodos al grafo desde el GeoDataFrame
30 for i, row in gdf_nodes.iterrows():

```

```

21     G.add_node(row['Node'], pos=(row['Longitude'], row['Latitude']))
22
23 # Conexiones entre los nodos
24 edges = [('t4', '2'), ('2', '1'), ('1', '4'), ('4', '7'), ('7', '3'), ('3', '6
        '), ('6', '5'), ('5', '11'), ('11', '8'), ('8', '9'), ('9', '23'), ('23',
        '10'), ('10', '12'), ('12', '13'), ('13', '14'), ('14', '15'), ('15', '16'
        ), ('16', '22'), ('22', '21'), ('21', '20'), ('20', '17'), ('17', '26'), (
        '26', '25'), ('25', '19'), ('19', '18'), ('18', 't4')]
25 G.add_edges_from(edges)
26
27 # Mapa interactivo con folium
28 m = folium.Map(location=[-33.05, -71.62], zoom_start=13)
29
30 # Nodos al mapa con n meros y color naranja
31 for node, (x, y) in nx.get_node_attributes(G, 'pos').items():
32     folium.CircleMarker(location=[y, x], radius=8, color='orange', fill=True,
        fill_color='orange').add_to(m)
33     folium.Marker(location=[y, x], icon=folium.DivIcon(html=f'<div style="font
        -size: 12pt; color: red;">{node}</div>')).add_to(m)
34
35 # Mapa en un archivo HTML
36 m.save("mapa_tsp_valpo.html")
37
38 # Mostrar el mapa interactivo
39 m

```

Listing 10.1: Código en Python para crear grafo con GeoPandas y NetworkX

10.2. Python Gráfico de Calor para GEI

Se incorpora código en Python en el cual se utilizó para poder visualizar acumulado anuales de GEI de las distintas unidades de negocio del transvalparaiso.

```

1
2 # Importar las bibliotecas necesarias
3
4 import matplotlib.pyplot as plt
5 import seaborn as sns
6 import pandas as pd
7
8 # Se crea un DataFrame con los nuevos datos proporcionados de GEI unidad de
    negocio transvalparaiso.
9 data = {
10     'Unidad': [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 9, 8],

```

```

11     'Caso_Base': [490.2, 296.01, 367.91, 305.00, 376.10, 466.18, 101.27,
12                112.65, 8.48],
13     'Caso_Base Anual': [174984.4, 103307.1, 85356.0, 65574.4, 88008.1,
14                        129599.2, 14987.4, 6083.2, 254.3],
15     'Caso_Propuesto': [301.05, 186.10, 155.82, 164.00, 235.62, 226.17, 68.22,
16                        69.64, 8.48],
17     'Caso_Propuesto_Anual': [107475.5, 64949.3, 36151.2, 35259.8, 55135.2,
18                              62874.5, 10097.1, 3760.4, 254.3]
19 }
20
21 # Se crea un DataFrame a partir de los datos
22 df = pd.DataFrame(data)
23
24 # Configurar el estilo de seaborn para mejorar la est tica del gr fico
25 sns.set_theme()
26
27 # Se crea un mapa de calor con los valores num ricos en cada celda del
28   DataFrame
29 f, ax = plt.subplots(figsize=(9, 6))
30 sns.heatmap(df.set_index('Unidad'), annot=True, fmt=".2f", linewidths=.5, ax=
31              ax, cmap="YlGnBu")
32
33 # Se configurara el grafico
34 plt.title('Mapa de Calor de Emisiones de GEI (Caso Base y Propuesto)') #
35   T tulo del gr fico
36 plt.xlabel('Tipo de Emisi n') # Etiqueta del eje x
37 plt.ylabel('Unidad') # Etiqueta del eje y
38
39 # Se muestra el grafico de caso base vs caso propuesto
40 plt.show()

```

Listing 10.2: Código en Python para crear grafico de calor GEI

10.3. Matriz de distancias entre distritos

Se incorpora código en Python, el cual se utilizó para realizar los cálculos de localización del terminal de buses eléctricos.

```

1 # Se importa librerias a usar
2
3 import pandas as pd
4 import seaborn as sns
5 import matplotlib.pyplot as plt
6
7 # Datos de la tabla

```

```

8 data = {
9   'Distritos': [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17,
10  18, 19, 20, 21, 22, 23, 25, 26],
11  1: [0, 1.7, 1.3, 2.3, 3.8, 3.6, 3.3, 5.4, 5.2, 5.9, 4.2, 5, 6.8, 7, 6.6,
12  8.1, 6.4, 6, 7.8, 8.8, 17.6, 20.5, 17.2, 9.6, 9.6],
13  2: [1.7, 0, 2.4, 2.1, 4.1, 3.8, 3.1, 5.1, 5, 5.7, 4, 4.8, 6.8, 6.6, 7.9,
14  7.9, 6.2, 7.6, 7.6, 8.7, 17.9, 20.5, 18.3, 9.4, 9.4],
15  3: [1.3, 2.4, 0, 2.4, 2.6, 2.2, 3, 5.6, 5.1, 5.9, 4, 4.8, 5.6, 6.7, 6.6,
16  7.9, 6.1, 5.7, 7.6, 8.5, 16, 19.7, 19.7, 9.3, 9],
17  4: [2.3, 2.1, 2.4, 0, 2.3, 1.7, 1.1, 3.1, 3.1, 3.9, 2, 2.8, 3.7, 4.8, 4.6,
18  5.9, 4.2, 3.8, 5.7, 6.6, 14.8, 18.5, 13, 7.3, 7.1],
19  5: [3.8, 4.1, 2.6, 2.3, 0, 1.6, 2.5, 2.7, 2.7, 3.9, 3.6, 4.4, 5.6, 6.7,
20  5.9, 7.2, 5.7, 5.3, 7.2, 8.1, 15.8, 19.5, 12.3, 8.9, 8.6],
21  6: [3.6, 3.8, 2.2, 1.7, 1.6, 0, 1.4, 2.2, 3, 3.7, 2.8, 3.3, 4.7, 5.7, 5.2,
22  6.5, 4.7, 4.3, 6.2, 7.2, 15.2, 18.9, 11.8, 7.8, 7.7],
23  7: [3.3, 3.1, 3, 1.1, 2.5, 1.4, 0, 2.5, 2.2, 3.3, 1, 1.9, 2.6, 3.9, 3.7,
24  5, 3.2, 2.8, 4.7, 5.6, 13.8, 17.5, 13.5, 6.4, 6.1],
25  8: [5.4, 5.1, 5.6, 3.1, 2.7, 2.2, 2.5, 0, 1.9, 2.6, 2.7, 3.8, 3.6, 4.7,
26  5.1, 6.4, 5.4, 4.9, 6.8, 7.1, 15.3, 19, 12.6, 8.5, 7.6],
27  9: [5.2, 5, 5.1, 3.1, 2.7, 3, 2.2, 1.9, 0, 1.8, 1.9, 3, 2.8, 2.8, 3.8,
28  5.4, 4.4, 3.9, 6.1, 6.1, 14.3, 18, 13.9, 7.8, 6.6],
29  10: [5.9, 5.7, 5.9, 3.9, 3.9, 3.7, 3.3, 2.6, 1.8, 0, 2.5, 3.1, 2.3, 3.4,
30  4.4, 5.7, 4.7, 4.4, 6.5, 6.3, 14.5, 18.2, 14.6, 8.2, 6.8],
  11: [4.2, 4, 4, 2, 3.6, 2.8, 1, 2.7, 1.9, 2.5, 0, 1.2, 2, 2, 3, 4.2, 2.9,
  2.1, 4.4, 5, 13.2, 16.9, 13.6, 6, 5.5],
  12: [5, 4.8, 4.8, 2.8, 4.4, 3.3, 1.9, 3.8, 3, 3.1, 1.2, 0, 1.5, 2.1, 2,
  3.1, 3.1, 1.5, 3.6, 3.7, 11.9, 15.7, 16.6, 5.3, 4.2],
  13: [6.8, 6.8, 5.6, 3.7, 5.6, 4.7, 2.6, 3.6, 2.8, 2.3, 2, 1.5, 0, 1.7,
  2.7, 4.2, 4.2, 3.7, 5.8, 4.9, 13.1, 16.8, 14.8, 7.5, 5.4],
  14: [7, 6.6, 6.7, 4.8, 6.7, 5.7, 3.9, 4.7, 2.8, 3.4, 2, 2.1, 1.7, 0, 1.5,
  4.9, 3.9, 4.3, 6.5, 5.6, 13.8, 17.5, 14.5, 8.2, 6.1],
  15: [6.6, 7.9, 6.6, 4.6, 5.9, 5.2, 3.7, 4.7, 3.8, 4.4, 3, 2, 2.7, 1.5, 0,
  3.6, 2.5, 3, 5.2, 4.3, 12.4, 16.2, 17.2, 6.9, 4.8],
  16: [8.1, 7.9, 7.9, 5.9, 7.2, 6.5, 5, 6.4, 5.4, 5.7, 4.2, 3.1, 4.2, 4.9,
  3.6, 0, 3.2, 3.5, 5.8, 1.9, 10.3, 14, 17.7, 7.4, 4.6],
  17: [6.4, 6.2, 6.1, 4.2, 5.7, 4.7, 3.2, 5.4, 4.4, 4.7, 2.9, 3.1, 4.2, 3.9,
  2.5, 3.2, 0, 1.3, 3.8, 4.4, 12.5, 16.3, 16.4, 5.5, 3.3],
  18: [6, 7.6, 5.7, 3.8, 5.3, 4.3, 2.8, 4.9, 3.9, 4.4, 2.1, 1.5, 3.7, 4.3,
  3, 3.5, 1.3, 0, 2.7, 4.7, 12.9, 16.6, 16.8, 4.3, 3.7],
  19: [7.8, 7.6, 7.6, 5.7, 7.2, 6.2, 4.7, 6.8, 6.1, 6.5, 4.4, 3.6, 5.8, 6.5,
  5.2, 5.8, 3.8, 2.7, 0, 6.8, 14.9, 18.7, 17.6, 3.7, 7.3],
  20: [8.8, 8.7, 8.5, 6.6, 8.1, 7.2, 5.6, 7.1, 6.1, 6.3, 5, 3.7, 4.9, 5.6,
  4.3, 1.9, 4.4, 4.7, 6.8, 0, 9.7, 13.4, 18.5, 8.2, 4],
  21: [17.6, 17.9, 16, 14.8, 15.8, 15.2, 13.8, 15.3, 14.3, 14.5, 13.2, 11.9,
  13.1, 13.8, 12.4, 10.3, 12.5, 12.9, 14.9, 9.7, 0, 4.4, 21.4, 11.3, 10.9],

```

```

31     22: [20.5, 20.5, 19.7, 18.5, 19.5, 18.9, 17.5, 19, 18, 18.2, 16.9, 15.7,
32         16.8, 17.5, 16.2, 14, 16.3, 16.6, 18.7, 13.4, 4.4, 0, 25.7, 15.6, 15.2],
33     23: [17.2, 18.3, 19.7, 13, 12.3, 11.8, 13.5, 12.6, 13.9, 14.6, 13.6, 16.6,
34         14.8, 14.5, 17.2, 17.7, 16.4, 16.8, 17.6, 18.5, 21.4, 25.7, 0, 19, 18.2],
35     25: [9.6, 9.4, 9.3, 7.3, 8.9, 7.8, 6.4, 8.5, 7.8, 8.2, 6, 5.3, 7.5, 8.2,
36         6.9, 7.4, 5.5, 4.3, 3.7, 8.2, 11.3, 15.6, 19, 0, 4.9],
37     26: [9.6, 9.4, 9, 7.1, 8.6, 7.7, 6.1, 7.6, 6.6, 6.8, 5.5, 4.2, 5.4, 6.1,
38         4.8, 4.6, 3.3, 3.7, 7.3, 4, 10.9, 15.2, 18.2, 4.9, 0]
39 }
40
41 # Se crea un DataFrame
42 df = pd.DataFrame(data)
43 df.set_index('Distritos', inplace=True)
44
45 # Configuración de la paleta de colores
46 cmap = sns.light_palette("purple", as_cmap=True)
47
48 # Mapa de calor
49 plt.figure(figsize=(14, 10))
50 sns.heatmap(df, annot=True, cmap="flare", fmt=".1f", linewidths=.5)
51 plt.title("Matriz de distancias entre distritos")
52 plt.show()

```

Listing 10.3: Código en Python para crear tablas Matriz de distancias entre distritos

10.4. Python tabla TSP ($t_1-t_2-t_3-t_4-t_5-t_6$)

Se incorpora código en Python, el cual se utilizó para realizar los cálculos de las distancias TSP del agente viajero.

```

1 # Se importa librerías a usar
2
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import seaborn as sns
5 import pandas as pd
6
7 # Se crea un DataFrame con los nuevos datos proporcionados
8 data1 = {'TSP $t_1$': ['$(t_1$, 2)', '$(2, 1)$', '$(1, 4)$', '$(4, 3)$', '$
9         (3, 7)$', '$(7, 6)$',
10                '$(6, 5)$', '$(5, 11)$', '$(11, 8)$', '$(8, 9)$', '$(9, 10)$
11                ', '$(10, 23)$',
12                '$(23, 12)$', '$(12, 13)$', '$(13, 14)$', '$(14, 15)$', '$
13                (15, 16)$', '$(16, 22)$',
14                '$(22, 21)$', '$(21, 18)$', '$(18, 17)$', '$(17, 20)$', '$
15                (20, 26)$', '$(26, 25)$',

```

```

12         '$(25, 19)$', '$(19, t_1)$', 'TOTAL'],
13     'km': [5.2, 1.7, 2.3, 2.4, 3, 1.4, 1.6, 3.6, 2.7, 1.9, 1.8, 14.6, 16.6,
14           1.5, 1.7, 1.5, 3.6,
15           14, 4.4, 12.9, 1.3, 4.4, 4, 4.9, 3.7, 1.8, 118.5]
16 }
17 data2 = {
18     'TSP $t_2$': ['$t_2$, 2)', '$(2, 1)$', '$(1, 4)$', '$(4, 3)$', '$(3, 7)$',
19                 '$(7, 6)$',
20                 '$(6, 5)$', '$(5, 11)$', '$(11, 8)$', '$(8, 9)$', '$(9, 10)$',
21                 '$(10, 23)$',
22                 '$(23, 12)$', '$(12, 13)$', '$(13, 14)$', '$(14, 15)$', '$(15, 16)$', '$(16, 22)$',
23                 '$(22, 21)$', '$(21, 18)$', '$(18, 17)$', '$(17, 20)$', '$(20, 26)$', '$(26, 25)$',
24                 '$(25, 19)$', '$(19, t_2)$', 'TOTAL'],
25     'km': [5.1, 1.7, 2.3, 2.4, 3, 1.4, 1.6, 3.6, 2.7, 1.9, 1.8, 14.6, 16.6,
26           1.5, 1.7, 1.5, 3.6,
27           14, 4.4, 12.9, 1.3, 4.4, 4, 4.9, 3.7, 2.1, 118.7],
28 }
29 data3 = {
30     'TSP $t_3$': ['$t_3$, 2)', '$(2, 1)$', '$(1, 4)$', '$(4, 3)$', '$(3, 7)$',
31                 '$(7, 6)$',
32                 '$(6, 5)$', '$(5, 11)$', '$(11, 8)$', '$(8, 9)$', '$(9, 10)$',
33                 '$(10, 23)$',
34                 '$(23, 12)$', '$(12, 13)$', '$(13, 14)$', '$(14, 15)$', '$(15, 16)$', '$(16, 22)$',
35                 '$(22, 21)$', '$(21, 18)$', '$(18, 17)$', '$(17, 20)$', '$(20, 26)$', '$(26, 25)$',
36                 '$(25, 19)$', '$(19, t_3)$', 'TOTAL'],
37     'km': [5.1, 1.7, 2.3, 2.4, 3, 1.4, 1.6, 3.6, 2.7, 1.9, 1.8, 14.6, 16.6,
38           1.5, 1.7, 1.5, 3.6,
39           14, 4.4, 12.9, 1.3, 4.4, 4, 4.9, 3.7, 1.7, 118.3],
40 }
41 data4 = {
42     'TSP $t_4$': ['$t_4$, 2)', '$(2, 1)$', '$(1, 4)$', '$(4, 7)$', '$(7, 3)$',
43                 '$(3, 6)$',
44                 '$(6, 5)$', '$(5, 11)$', '$(11, 8)$', '$(8, 9)$', '$(9, 23)$',
45                 '$(23, 10)$',
46                 '$(10, 12)$', '$(12, 13)$', '$(13, 14)$', '$(14, 15)$', '$(15, 16)$', '$(16, 22)$',
47                 '$(22, 21)$', '$(21, 20)$', '$(20, 17)$', '$(17, 26)$', '$(26, 25)$', '$(25, 19)$',

```

```

42         '$(19, 18)$', '$(18, t_4)$', 'TOTAL'],
43     'km': [4.2, 1.7, 2.3, 1.1, 3, 2.2, 1.6, 3.6, 2.7, 1.9, 13.9, 14.6, 3.1,
44            1.5, 1.7, 1.5, 3.6,
45            14, 4.4, 9.7, 4.4, 3.3, 4.9, 3.7, 2.7, 1, 112.3],
46 }
47
48 data5 = {
49     'TSP $t_5$': ['$t_5$', 2)', '$(2, 1)$', '$(1, 4)$', '$(4, 3)$', '$(3, 7)$',
50                '$(7, 6)$',
51                '$(6, 5)$', '$(5, 11)$', '$(11, 8)$', '$(8, 18)$', '$(18,
52                12)$', '$(12, 9)$',
53                '$(9, 1)$', '$(10, 13)$', '$(13, 23)$', '$(23, 14)$', '$(14,
54                15)$', '$(15, 17)$',
55                '$(17, 16)$', '$(16, 20)$', '$(20, 22)$', '$(22, 21)$', '$
56                (21, 26)$', '$(26, 25)$',
57                '$(25, 19)$', '$(19, t_5)$', 'TOTAL'],
58     'km': [5.4, 1.7, 2.3, 2.4, 3, 1.4, 1.6, 3.6, 2.7, 4.9, 1.5, 3, 1.8, 2.3,
59            14.8, 14.5, 1.5, 2.5,
60            3.2, 1.9, 13.4, 4.4, 10.9, 4.9, 3.7, 2.4, 115.7],
61 }
62
63 data6 = { 'TSP $t_6$': ['$t_6$', 18)', '$(18, 2)$', '$(2, 1)$', '$(1, 4)$', '$(
64            $4, 3)$', '$(3, 7)$',
65            '$(7, 6)$', '$(6, 5)$', '$(5, 11)$', '$(11, 8)$', '$(8, 12)$
66            ', '$(12, 9)$',
67            '$(9, 10)$', '$(10, 13)$', '$(13, 14)$', '$(14, 23)$', '$(23
68            , 15)$', '$(15, 17)$',
69            '$(17, 16)$', '$(16, 20)$', '$(20, 22)$', '$(22, 21)$', '$(
70            $21, 26)$', '$(26, 25)$',
71            '$(25, 19)$', '$(19, t_6)$', 'TOTAL'],
72     'km': [1.6, 7.6, 1.7, 2.3, 2.4, 3, 1.4, 1.6, 3.6, 2.7, 3.8, 3, 1.8, 2.3,
73            1.7, 14.5, 17.2, 2.5,
74            3.2, 1.9, 13.4, 4.4, 10.9, 4.9, 3.7, 0.85, 117.95],
75 }
76
77 # Configurar el estilo de seaborn para mejorar la est tica del gr fico
78 sns.set_theme()
79
80 # Se crea una figura con una fila y cuatro columnas
81 fig, axs = plt.subplots(1, 6, figsize=(12, 8))
82
83 # Crear el primer mapa de calor en el primer subgr fico

```

```
76 df1 = pd.DataFrame(data1)
77 sns.heatmap(df1.set_index('TSP $t_1$'), annot=True, fmt=".2f", linewidths=.5,
78             ax=axes[0], cmap="YlGnBu")
79 axes[0].set_title('TSP $t_1$')
80 axes[0].set_ylabel('Nodos del grafo descrito por ruta TSP')
81
82 # Segundo mapa de calor en el segundo subgr fico
83 df2 = pd.DataFrame(data2)
84 sns.heatmap(df2.set_index('TSP $t_2$'), annot=True, fmt=".2f", linewidths=.5,
85             ax=axes[1], cmap="YlGnBu")
86 axes[1].set_title('TSP $t_2$')
87 axes[1].set_ylabel('')
88
89 # Tercer mapa de calor en el tercer subgr fico
90 df3 = pd.DataFrame(data3)
91 sns.heatmap(df3.set_index('TSP $t_3$'), annot=True, fmt=".2f", linewidths=.5,
92             ax=axes[2], cmap="YlGnBu")
93 axes[2].set_title('TSP $t_3$')
94 axes[2].set_ylabel('')
95
96 # Cuarto mapa de calor en el cuarto subgr fico
97 df4 = pd.DataFrame(data4)
98 sns.heatmap(df4.set_index('TSP $t_4$'), annot=True, fmt=".2f", linewidths=.5,
99             ax=axes[3], cmap="YlGnBu")
100 axes[3].set_title('TSP $t_4$')
101 axes[3].set_ylabel('')
102
103 # Quinto mapa de calor en el quinto subgr fico
104 df5 = pd.DataFrame(data5)
105 sns.heatmap(df5.set_index('TSP $t_5$'), annot=True, fmt=".2f", linewidths=.5,
106             ax=axes[4], cmap="YlGnBu")
107 axes[4].set_title('TSP $t_5$')
108 axes[4].set_ylabel('')
109
110 # Sexto mapa de calor en el sexto subgr fico
111 df6 = pd.DataFrame(data6)
112 sns.heatmap(df6.set_index('TSP $t_6$'), annot=True, fmt=".2f", linewidths=.5,
113             ax=axes[5], cmap="YlGnBu")
114 axes[5].set_title('TSP $t_6$')
115 axes[5].set_ylabel('')
116
117 # Ajustar el dise o para evitar solapamientos
118 plt.tight_layout()
119
```

```

115 # Mostrar la figura
116 plt.show()

```

Listing 10.4: Código en Python para crear tabla TSP

10.5. Python tabla TSP ($t_7-t_8-t_9-t_{10}-t_{11}$)

Se incorpora código en Python, el cual se utilizó para realizar los cálculos de las distancias TSP del agente viajero.

```

1 # Se importa librerías a usar
2
3 import matplotlib.pyplot as plt
4 import seaborn as sns
5 import pandas as pd
6
7 # DataFrame con los nuevos datos proporcionados
8 data7 = {'TSP $t_7$': ['($t_7$, 18)', '($18, 2$)', '($2, 1$)', '($1, 4$)', '($
9     $4, 3$)', '($3, 7$)',
10         '($7, 6$)', '($6, 11$)', '($11, 5$)', '($5, 12$)', '($12, 8$
11         )', '($8, 9$)',
12         '($9, 10$)', '($10, 13$)', '($13, 17$)', '($17, 14$)', '($14
13         , 15$)', '($15, 23$)',
14         '($23, 16$)', '($16, 20$)', '($20, 22$)', '($22, 21$)', '($
15         $21, 26$)', '($26, 25$)',
16         '($25, 19$)', '($19, t_7$)', 'TOTAL'],
17     'km': [0.8, 7.6, 1.7, 2.3, 2.4, 3, 1.4, 2.8, 3.6, 4.4, 3.8, 1.9, 1.9, 2.3,
18         4.2, 3.9, 1.5, 17.7,
19         17.7, 1.9, 13.4, 4.4, 10.9, 4.9, 3.7, 3, 127.1],
20 }
21
22 data8 = { 'TSP $t_8$': ['($t_8$, 2)', '($2, 1$)', '($1, 4$)', '($4, 3$)', '($3
23     , 7$)', '($7, 6$)',
24         '($6, 5$)', '($5, 11$)', '($11, 18$)', '($18, 8$)', '($8, 12
25         $)', '($12, 19$)',
26         '($19, 9$)', '($9, 10$)', '($10, 13$)', '($13, 14$)', '($14,
27         23$)', '($23, 15$)',
28         '($15, 17$)', '($17, 16$)', '($16, 22$)', '($22, 21$)', '($
29         $21, 26$)', '($26, 25$)',
30         '($25, 19$)', '($19, t_8$)', 'TOTAL'],
31     'km': [6.8, 1.7, 2.3, 2.4, 3, 1.4, 1.6, 3.6, 2.1, 4.9, 3.8, 3.6, 6.1, 1.8,
32         2.3, 1.7, 14.5, 17.2,
33         2.5, 3.2, 14, 4.4, 10.9, 4.9, 3.7, 1.1, 125.5],
34 }
35 }

```

```

26
27 data9 = { 'TSP $t_9$': ['($t_9$, 19)', '($19, 18$)', '($18, 17$)', '($17, 2$)'
28     , '($2, 4$)', '($4, 1$)',
29     '($1, 7$)', '($7, 11$)', '($11, 12$)', '($12, 3$)', '($3, 6$
30     )', '($6, 5$)',
31     '($5, 8$)', '($8, 13$)', '($13, 9$)', '($9, 10$)', '($10, 15
32     $)', '($15, 14$)',
33     '($14, 23$)', '($23, 16$)', '($16, 20$)', '($20, 22$)', '($
34     22, 21$)', '($21, 26$)',
35     '($26, 25$)', '($25, t_9$)', 'TOTAL'],
36
37     'km': [4.5, 2.7, 1.3, 6.2, 2.1, 2.3, 3.3, 1, 1.2, 4.8, 2.2, 1.6, 2.7, 3.6,
38     2.8, 1.8, 4.4, 1.5,
39     14.5, 17.7, 1.9, 13.4, 4.4, 10.9, 4.9, 5.9, 123.6],
40
41 }
42
43 data10 = { 'TSP $t_{10}$': ['($t_{10}, 19$)', '($19, 18$)', '($18, 17$)', '($
44     17, 2$)', '($2, 4$)', '($4, 12$)',
45     '($12, 7$)', '($7, 1$)', '($1, 11$)', '($11, 3$)', '($3,
46     6$)', '($6, 5$)', '($5, 15$)',
47     '($15, 13$)', '($13, 8$)', '($8, 10$)', '($10, 9$)', '($9
48     , 14$)', '($14, 16$)', '($16, 20$)',
49     '($20, 23$)', '($23, 22$)', '($22, 21$)', '($21, 26$)', '
50     ($26, 25$)', '($25, t_{10}$)', 'TOTAL'],
51
52     'km': [5.9, 2.7, 1.3, 6.2, 2.1, 2.8, 1.9, 3.3, 4.2, 2, 2.2, 1.6, 5.9, 2.7,
53     3.6, 2.6, 1.8, 2.8, 4.9,
54     1.9, 18.5, 25.7, 4.4, 10.9, 4.9, 5.8, 132.6],
55
56 }
57
58 data11 = { 'TSP $t_{11}$': ['($t_{11}, 17$)', '($17, 18$)', '($18, 2$)', '($2,
59     4$)', '($4, 1$)', '($1, 7$)',
60     '($7, 12$)', '($12, 11$)', '($11, 3$)', '($3, 6$)', '($6,
61     5$)', '($5, 8$)', '($8, 13$)',
62     '($13, 9$)', '($9, 10$)', '($10, 15$)', '($15, 14$)', '($
63     14, 23$)', '($23, 16$)', '($16, 22$)',
64     '($22, 21$)', '($21, 20$)', '($20, 26$)', '($26, 25$)', '
65     ($25, 19$)', '($19, t_{11}$)', 'TOTAL'],
66
67     'km': [1.9, 1.3, 7.6, 2.1, 2.3, 3.3, 1.9, 1.2, 4, 2.2, 1.6, 2.7, 3.6, 2.8,
68     1.8, 4.4, 1.5, 14.5, 17.7, 14,
69     4.4, 9.7, 4, 4.9, 3.7, 4.9, 124],
70
71 }

```

```

56 # Se configurar el estilo de seaborn para mejorar la est tica del gr fico
57 sns.set_theme()
58
59 # Figura con una fila y cuatro columnas
60 fig, axs = plt.subplots(1, 5, figsize=(12, 8))
61
62 # Crear el primer mapa de calor en el primer subgr fico
63 df7 = pd.DataFrame(data7)
64 sns.heatmap(df1.set_index('TSP $t_7$'), annot=True, fmt=".2f", linewidths=.5,
65             ax=axs[0], cmap="YlGnBu")
66 axs[0].set_title('TSP $t_7$')
67 axs[0].set_ylabel('Nodos del grafo descrito por ruta TSP')
68
69 # Se crea el segundo mapa de calor en el segundo subgr fico
70 df8 = pd.DataFrame(data8)
71 sns.heatmap(df8.set_index('TSP $t_8$'), annot=True, fmt=".2f", linewidths=.5,
72             ax=axs[1], cmap="YlGnBu")
73 axs[1].set_title('TSP $t_8$')
74 axs[1].set_ylabel('')
75
76 # Se crea el tercer mapa de calor en el tercer subgr fico
77 df9 = pd.DataFrame(data9)
78 sns.heatmap(df9.set_index('TSP $t_9$'), annot=True, fmt=".2f", linewidths=.5,
79             ax=axs[2], cmap="YlGnBu")
80 axs[2].set_title('TSP $t_9$')
81 axs[2].set_ylabel('')
82
83 # Se crea el cuarto mapa de calor en el cuarto subgr fico
84 df10 = pd.DataFrame(data10)
85 sns.heatmap(df10.set_index('TSP $t_{10}$'), annot=True, fmt=".2f", linewidths
86             =.5, ax=axs[3], cmap="YlGnBu")
87 axs[3].set_title('TSP $t_{10}$')
88 axs[3].set_ylabel('')
89
90 # Se crea el quinto mapa de calor en el quinto subgr fico
91 df11 = pd.DataFrame(data11)
92 sns.heatmap(df11.set_index('TSP $t_{11}$'), annot=True, fmt=".2f", linewidths
93             =.5, ax=axs[4], cmap="YlGnBu")
94 axs[4].set_title('TSP $t_{11}$')
95 axs[4].set_ylabel('')
96
97 # Dise o para evitar solapamientos
98 plt.tight_layout()
99
100 # Mostrar la figura

```

```
96 plt.show()
```

Listing 10.5: Código en Python para crear grafo con GeoPandas y NetworkX

10.6. Distancias en km entre los distritos (columnas) y terminales(filas)

Se incorpora código en Python el cual se utilizó para realizar cálculo de distancias entre distritos y posible terminal.

```
1 # Se importa librerías a usar
2
3 import pandas as pd
4 import seaborn as sns
5 import matplotlib.pyplot as plt
6
7 # Nueva matriz de distancias
8 data = {
9     'Terminales': ['$t_{1}$', '$t_{2}$', '$t_{3}$', '$t_{4}$', '$t_{5}$', '$t_{6}$', '$t_{7}$', '$t_{8}$', '$t_{9}$', '$t_{10}$', '$t_{11}$'],
10    1: [5.8, 5.7, 5.6, 4.8, 5.9, 6.6, 6.2, 7.3, 7.1, 8.4, 6.4],
11    2: [5.2, 5.1, 5.1, 4.2, 5.4, 6.1, 5.6, 6.8, 6.7, 8.1, 6.1],
12    3: [5.3, 5.3, 5.2, 4.4, 5.5, 6.3, 5.8, 6.9, 6.7, 8, 6],
13    4: [3.6, 3.6, 3.5, 2.7, 3.8, 4.6, 4.1, 5.2, 5.1, 6.4, 4.4],
14    5: [5, 4.8, 4.9, 4.1, 5.2, 6, 5.3, 6.6, 6.2, 7.5, 5.5],
15    6: [3.8, 3.6, 3.7, 2.9, 4, 4.7, 4.1, 5.4, 5, 6.3, 4.3],
16    7: [2.8, 2.7, 2.7, 1.8, 3, 3.7, 3.2, 4.4, 4.3, 5.6, 3.6],
17    8: [4.5, 4.3, 4.4, 3.5, 4.7, 5.4, 4.7, 6.1, 5.6, 6.9, 5],
18    9: [4.1, 3.9, 4, 3.1, 4.3, 5, 4.2, 5.7, 5, 6.4, 4.1],
19    10: [3.6, 3.3, 3.4, 2.5, 3.7, 4.5, 3.6, 5.1, 4.2, 5.5, 3.4],
20    11: [0.9, 1.2, 0.85, 1.9, 1.4, 0.28, 2, 1.4, 3.4, 4.7, 3.9],
21    12: [1.8, 1.4, 1.6, 0.8, 1.9, 2.7, 1.7, 3.3, 2.6, 3.9, 1.9],
22    13: [3, 2.6, 2.8, 2, 3.9, 3.9, 2.9, 4.5, 3.3, 4.6, 2.5],
23    14: [3.1, 2.8, 3, 2.2, 3.2, 4.1, 2.9, 4.7, 3.4, 4.7, 2.6],
24    15: [2.9, 2.5, 2.8, 2, 2.9, 3.8, 2.3, 4.4, 2.8, 4.1, 1.8],
25    16: [3.9, 3.5, 3.8, 3, 3.9, 4.9, 3.3, 5.5, 3.8, 3.7, 2.4],
26    17: [1.7, 2, 1.6, 1.6, 1.2, 2.4, 0.65, 3.1, 1.4, 2.7, 1.9],
27    18: [1, 1.2, 0.9, 1, 0.45, 1.6, 0.8, 2.4, 2.1, 3.4, 2.7],
28    19: [1.8, 2.1, 1.7, 3, 2.4, 0.85, 3, 1.1, 4.5, 5.9, 4.9],
29    20: [4.4, 4.1, 4.3, 3.6, 4.5, 5.4, 3.9, 6, 3.3, 2.5, 2],
30    21: [13.8, 13.4, 13.7, 12.8, 13.8, 14.7, 13.2, 15.3, 12.8, 12, 11.5],
31    22: [15.6, 15.2, 15.4, 14.6, 15.6, 16.5, 15, 17.1, 14.6, 13.8, 13.3],
32    23: [17.9, 17.7, 17.7, 16.9, 18, 18.8, 18.1, 19.5, 19, 20.3, 18.2],
33    25: [4.2, 4.5, 4.2, 4.3, 3.6, 4.9, 2.9, 5.7, 1.3, 1.1, 3.6],
```

```

34 }
35
36 df = pd.DataFrame(data)
37
38 # Configuración de la paleta de colores
39 cmap = sns.color_palette("blend:#7AB,#EDA", as_cmap=True)
40
41 # Se crea el mapa de calor
42 plt.figure(figsize=(13, 6))
43 sns.heatmap(df.set_index('Terminales'), annot=True, fmt=".1f", cmap=cmap,
44             linewidths=.5)
45 plt.title("Mapa de Calor - Distancias en km entre los distritos (columnas) y
46           terminales(filas)")
47 plt.show()

```

Listing 10.6: Código en Python para crear grafo con GeoPandas y NetworkX

10.7. Python Gráfico georeferenciado TSP con aristas

Se incorpora código en Python en el cual se utilizó para realizar método de la regla [9], con el objetivo de localizar terminal de buses eléctricos para Valparaíso.

```

1 # Se importa librerías a usar
2
3 import geopandas as gpd
4 import networkx as nx
5 import folium
6
7 # Crear un GeoDataFrame con datos georeferenciados
8 data = {'Node': ['t4', '2', '1', '4', '7', '3', '6', '5', '11', '8', '9', '23',
9                '10', '12', '13', '14', '15', '16', '22', '21', '20', '17', '26', '25',
10               '19', '18'],
11         'Latitude': [-33.042796, -33.026753, -33.032310, -33.036723,
12                    -33.042832, -33.040535, -33.045970, -33.049087, -33.046499, -33.055109,
13                    -33.058869, -33.125314, -33.058234, -33.048056, -33.056307, -33.059392,
14                    -33.056322, -33.064417, -33.143311, -33.122350, -33.062902, -33.047865,
15                    -33.059041, -33.050922, -33.038760, -33.042007],
16         'Longitude': [-71.606157, -71.634514, -71.646172, -71.629193,
17                      -71.623201, -71.642663, -71.631818, -71.640574, -71.617385, -71.631495,
18                      -71.625188, -71.659686, -71.618678, -71.608611, -71.612459, -71.608367,
19                      -71.603263, -71.595370, -71.567922, -71.563445, -71.587479, -71.596309,
20                      -71.576340, -71.573764, -71.586931, -71.599873]}
21 gdf_nodes = gpd.GeoDataFrame(data, geometry=gpd.points_from_xy(data['Longitude'],
22                                                                data['Latitude']))
23
24

```

```

13 # Se establece la proyección como WGS 84
14 gdf_nodes.crs = 'EPSG:4326'
15
16 # Grafo para distritos de Valparaíso según centroides de PRC
17 G = nx.Graph()
18
19 # Nodos al grafo desde el GeoDataFrame
20 for i, row in gdf_nodes.iterrows():
21     G.add_node(row['Node'], pos=(row['Longitude'], row['Latitude']))
22
23 # Conexiones entre los nodos
24 edges = [('t4', '2'), ('2', '1'), ('1', '4'), ('4', '7'), ('7', '3'), ('3', '6'),
25          ('6', '5'), ('5', '11'), ('11', '8'), ('8', '9'), ('9', '23'), ('23', '10'),
26          ('10', '12'), ('12', '13'), ('13', '14'), ('14', '15'), ('15', '16'),
27          ('16', '22'), ('22', '21'), ('21', '20'), ('20', '17'), ('17', '26'), ('26', '25'),
28          ('25', '19'), ('19', '18'), ('18', 't4')]
29 G.add_edges_from(edges)
30
31 # Crear mapa interactivo con folium
32 m = folium.Map(location=[-33.05, -71.62], zoom_start=13)
33
34 # Se agregan nodos al mapa con números y color naranja
35 for node, (x, y) in nx.get_node_attributes(G, 'pos').items():
36     folium.CircleMarker(location=[y, x], radius=8, color='orange', fill=True,
37                          fill_color='orange').add_to(m)
38     folium.Marker(location=[y, x], icon=folium.DivIcon(html=f'<div style="font-size: 12pt; color: red;">{node}</div>')).add_to(m)
39
40 # Se agregan aristas al mapa
41 for edge in G.edges():
42     x1, y1 = G.nodes[edge[0]]['pos']
43     x2, y2 = G.nodes[edge[1]]['pos']
44     folium.PolyLine(locations=[[y1, x1], (y2, x2)], color='blue').add_to(m)
45
46 # Guardar el mapa en un archivo HTML
47 m.save("mapa_tsp_valpo.html")
48
49 # Mostrar el mapa interactivo
50 m

```

Listing 10.7: Código en Python para crear grafo con GeoPandas, NetworkX y folium

Bibliografía

- [1] C Navas. La electromovilidad como estrategia para una nueva política de transporte público: el caso de Santiago de Chile. *La electromovilidad como estrategia para una nueva política de transporte público: el caso de Santiago de Chile.*, 2021. (document)
- [2] D. Escobar. Estrategia nacional de electromovilidad. *Estrategia Nacional de Electromovilidad*, 2018. (document)
- [3] Moreno M. Electromovilidad-en-valparaíso. *Electromovilidad-en-Valparaíso*, 2021. (document)
- [4] M. (29 de Diciembre de 2021) Energía. Invitan a conductores de taxis y colectivos del gran Valparaíso a sumarse a la electromovilidad. *Invitan a conductores de taxis y colectivos del Gran Valparaíso a sumarse a la Electromovilidad*, 2021. (document)
- [5] M. Energía. Plataforma electromovilidad. obtenido de plataforma electromovilidad. *Plataforma Electromovilidad. Obtenido de Plataforma Electromovilidad*, 2023. (document)
- [6] NASA/JPL-Caltech. Nasa cambio climático. *Desde un punto de vista único en el espacio, la NASA recopila observaciones críticas a largo plazo de nuestro cambiante planeta.*, 2023. (document), 3, 3.1, 3.1, 3.3, 9
- [7] Hannah Ritchie. Sector by sector: where do global greenhouse gas emissions come from? *Our World in Data*, 2020. <https://ourworldindata.org/ghg-emissions-by-sector>. (document), 3.4, 3.3
- [8] <https://climate.nasa.gov/>. Calentamiento del océano. 2022. (document), 3.2, 3.2, 3.3, 9
- [9] N. A. Fuchs. Logística administración de la cadena de suministro. *Logística Administración de la cadena de suministro*, 5(5):241–266, 2004. (document), 7.2, 7.5, 9, 10.1, 10.7
- [10] Por Andrés Ortiz Revista En Concreto. Operación y mantenimiento. <https://electrobuses.cl/operacion-y-mantenimiento/>, 2023. (document), 8.2, 8.1, 8.3, 8.1, 9
- [11] BBC News Mundo. La advertencia científica sobre el riesgo de la extinción humana por una catástrofe climática. *BBC News Mundo*, 2022. (document), 9
- [12] BBC News Mundo. Por qué 2030 es la fecha límite de la humanidad para evitar una catástrofe global. 2018. (document), 9
- [13] ANAC. (Marzo de 2023). Informe cero y bajas emisiones anac a.g. *INFORME CERO Y BAJAS EMISIONES ANAC A.G.*, 2023. (document), 4.1, 4.3, 4.4, 4.2
- [14] Ciudad solar, conoce el potencial fotovoltaico. *Potencial fotovoltaico estimado en la manzana*, 2017. (document), 7.3, 7.13
- [15] <https://www.bydchile.com>. Bus eléctrico K9FE. *BUS ELÉCTRICO K9FE*, 2020. (document), 5.2, 5.3, 5.4, 7.4, 8.12, 8.13, 8.2
- [16] Seremitt región de Valparaíso, unidades de negocio. *Seremitt Región de Valparaíso*, 2016. (document), 8.4
- [17] en: Los sistemas de transporte público en Santiago (1857-2007). Memoria Chilena BIBLIOTECA NACIONAL DE CHILE. "Carros de sangre". Biblioteca nacional de Chile. "carros de sangre". *BIBLIOTECA NACIONAL DE CHILE. Carros de sangre*, 2024. (document), 2.1, 2.1, 2.2

- [18] Global EV Data Explorer. Global ev data explorer. *Global EV Data Explorer*, 2023, 2023. (document), 3.4, 3.5, 3.4, 3.6, 3.9, 3.6, 3.10, 3.11, 3.6, 3.12, 3.13
- [19] Hannah Ritchie, Pablo Rosado, and Max Roser. Emissions by sector: where do greenhouse gases come from? *Our World in Data*, 2020. <https://ourworldindata.org/emissions-by-sector>. (document), 3.6
- [20] Hannah Ritchie, Pablo Rosado, and Max Roser. Climate change 2023 synthesis report. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/figures/figure-2-5>, 2023. COP26 sexto reporte GEI. (document), 3.4, 3.7, 3.4
- [21] 13 December 2023 UN Climate Change News. Cop28 agreement signals “beginning of the end” of the fossil fuel era. <https://unfccc.int/news/cop28-agreement-signals-beginning-of-the-end-of-the-fossil-fuel-era>, 2023. The United Nations Climate Change Conference (COP28). (document), 3.5, 3.8, 3.5
- [22] Generadoras de Chile. Generación eléctrica en Chile. *Generación Eléctrica en Chile*, 2023. (document), 4.1, 4.1, 4.2, 4.3
- [23] L. (30 de Mayo de 2023) Electricidad. Electricidad, la revista energetica de Chile. *Electricidad, La revista energetica de Chile*, 2023. (document), 4.3, 4.5, 4.6
- [24] SECTRA. (2021). Programa de vialidad y transporte urbano. *Programa de vialidad y Transporte Urbano*, 2021. (document), 4.4, 4.5, 4.6, 4.7, 4.6, 4.8, 5, 5.1, 5, 5.2, 5.5, 5.2, 5.3, 5.6, 5.3
- [25] Marga Marga TV Romina Benedetti. Gran Valparaíso: Contraloría autorizó el contrato para implementar 44 buses eléctricos. *Romina Benedetti*, 2023. (document), 5.4, 5.7
- [26] Michael J unger · Thomas Liebling · Denis Naddef · George Nemhauser · William Pulleyblank · Gerhard Reinelt · Giovanni Rinaldi · Laurence Wolsey. Branch-and-bound search tree from w.l. eastman’s 1958 ph.d. thesis. *50-years-of-integer-programming-19582008-2010*, (2009938839):396, 1958-2008. (document), 6.1
- [27] Michael J unger · Thomas Liebling · Denis Naddef · George Nemhauser · William Pulleyblank · Gerhard Reinelt · Giovanni Rinaldi · Laurence Wolsey. The four figures on the cover illustrate adding gomory mixed integer cuts to a polyhedron of dimension 3. *50-years-of-integer-programming-19582008-2010*, (2009938839):9, 1958-2008. (document), 6.2
- [28] Plan regulador comunal para Valparaíso (p.r.c. *Plan Regulador Comunal para Valparaíso (P.R.C.)*, 2005. (document), 7.2, 7.2
- [29] Factores de emisión. *Factores de Emisión - Ministerio de Energía*, 2023. (document), 8.4
- [30] Pau Casso [2] Neil Davis [1] Andrea Hahmann [1] Søren Bo Krohn Hansen [5] Brian Ohrbeck Hansen [1] Duncan Heathfield [6] Oliver James Knight [4] Oriol Lacave [2] Gil Lizcano [2] Albert Bosch i Mas [2] Niels Gylling Mortensen [1] Bjarke Tobias Olsen [1] Marko Onninen [6] Albertine Potter Van Loon [4] y Patrick Volker [1] con apoyo financiero del Programa de Asistencia para la Gestión del Sector de Energía (ESMAP) un fondo fiduciario de múltiples donantes administrado por el Banco Mundial. Esta versión 3.0 del Atlas Eólico Mundial fue preparada por un equipo formado por Jake Badger [1], Ides Bauwens [3]. Atlas eólico mundial. <https://globalwindatlas.info/es>, 2024. Atlas Eólico Mundial. (document), 8.6, 8.4
- [31] Canada. The retscreen® clean energy management software platform enables low-carbon planning, implementation, monitoring and reporting. <https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-and-publications/tools/modelling-tools/retscreen/7465>, 2016. RETScreen. (document), 8.7
- [32] Por Andrés Ortiz Revista En Concreto. Electroterminal el conquistador movilidad limpia para el gran Santiago. <https://www.revistaenconcreto.cl/grandes-obras-cchc/electroterminal-el-conquistador-movilidad-limpia-para-el-gran-santiago/>, 2020. (document), 8.5, 8.8, 8.5

- [33] M. Evans. Bbc new mundo. *BBC New Mundo.*, 2015, 2015. 2.1
- [34] G. Reyes. Revista científica y tecnológica upse. *Revista Científica y Tecnológica UPSE*, 5, 2018. 2.1
- [35] <https://www.un.org/es/>. ¿qué es el cambio climático? *Accion por el Clima*. 3
- [36] BBC FutureBBC Jocelyn Timperley. Petróleo: cuán cerca estamos de alcanzar el punto máximo de demanda de crudo (y qué significa esto). *BBC News Mundo*, 2023. <https://www.bbc.com/mundo/noticias-66367497>. 3.4
- [37] M. Energia. Qué son las energías renovables? obtenido de ¿qué son las energías renovables? *Qué son las Energías Renovables? Obtenido de ¿Qué son las Energías Renovables?*, 2023. 4
- [38] Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones MTT. Ministerio de transportes y telecomunicaciones. *Ministerio de Transportes y Telecomunicaciones*, 2022. 5.1, 5.1
- [39] Dr. Ing. P. Escalona MsC. Ing. I.Kauak. Decisiones de transporte Gestión de operaciones II ICN344. *Lec4Transporte_ICN344.pdf, pages1 – –67*, 2021. 6.3, 6.4
- [40] Geodatos abiertos. *División Político Administrativa y Censal 2017*, 2023. 7, 7.1
- [41] Gobierno de Chile. Subsecretaría de desarrollo regional y administrativo. *Inventario de emisiones de gases de efecto invernadero*. 8.2
- [42] Gobierno de Chile. Ministerio de medio ambiente. *Tablas Poder Calorífico*. 8.5, 8.6, 8.7