

LEONARDO IGNACIO ESPINOSA CARMONA

**“CONSUMO INSTANTÁNEO DE POTENCIA DE UN
AUTOMÓVIL ELÉCTRICO EN MEDIO URBANO
MEDIANTE ALGORITMO BASADO EN
INFORMACIÓN TOPOGRÁFICA”**

UTFSM

DEPARTAMENTO DE ELECTRÓNICA

MAYO 2021

Agradecimientos

Quiero agradecer a todas las personas que hicieron posible que llegara hasta acá. En primer lugar a mis padres, que siempre fueron (y continúan siendo) un apoyo fundamental para mi vida en muchos aspectos, y me dieron la posibilidad de estudiar gracias a su esfuerzo y dedicación. Junto con ellos, agradezco a sus familias, a mis abuelas, tías y tíos, que me enseñaron algo en cada etapa de la vida. En especial, le dedico este trabajo a mi viejita linda, que sé que está feliz en el cielo de que el niño al cual le enseñó a leer con el silabario a los 4 años, sea por fin ingeniero. Tía Pitita, este era tu anhelo y no sabes cómo me gustaría tenerte aquí para compartir tu felicidad. De todas formas la llevo y la siento siempre en mi corazón.

También agradezco a todos los amigos con los que compartí y crecí durante esta linda etapa universitaria. Fueron ellos los que hicieron de esta etapa algo feliz para mí. Gracias a Marco, Eduardo y Matías por iniciar este camino juntos. Gracias a Jaime, Pedro, José, Carlos y Alexis por seguir siendo partners desde el inicio hasta hoy.

También a Gonzalo y Juan Pablo que se sumaron en el camino.

Agradezco especialmente a Christian, Amaro, Cristobal, Anibal, Salem y Víctor, por haber sido compañeros de aventuras durante tantos años hasta hoy. También a César, Guillermo, Jorge, Felipe, Rodrigo, Sebastián, Germán y Alejandro, por abrirme las puertas de un mundo que cambió mi forma de ver el mundo (valga la redundancia) y conocer un talento y vocación nuevos en mí, buscando ponerlo al servicio de otros.

También agradecer a aquellos profesores cuya vocación ayudó a mantener viva la llama de la curiosidad y el amor por la ciencia y el conocimiento, en particular a

Mario Salgado y Milan Derpich.

A Sebastián y Javier por estar siempre. A Constanza, Alejandra y Paula, por su linda compañía en los años que pasé por la Universidad.

Resumen

Muchos de los esfuerzos gubernamentales en países desarrollados están puestos en el uso de tecnología verde, para seguir disminuyendo la huella de carbono y la dependencia del petróleo. En este contexto, los vehículos urbanos eléctricos (EVs) surgen como una solución parcial al problema descrito, y como una integración de las tecnologías de la información y de la comunicación para mejorar los sistemas inteligentes de transporte. Sin embargo, el problema de la autonomía, desde una perspectiva energética, se mantiene para los EVs en comparación a los vehículos de combustión. Este trabajo apunta a abordar parte del problema descrito, suministrando una metodología para modelar el consumo instantáneo de potencia (IPC) en EVs.

Para estos fines, se utiliza información topográfica de imagen satelital, combinada con un modelo fenomenológico de IPC previamente validado, para obtener el IPC esperado en ciudades. En el presente trabajo, se prueba la metodología en Valparaíso (Chile), y se extiende a Sao Paulo (Brasil), Madrid (España) y Berlín (Alemania). Los resultados obtenidos y la metodología utilizada pueden usarse para liderar decisiones estratégicas para el posicionamiento de estaciones de carga y decisiones operacionales para planificación de EVs en transporte público.

Abstract

Many of governmental efforts in developed countries are invested in green technology use, in order to reduce the carbon footprint and oil dependence. In this context, urban electric vehicles (EVs) rise as a partial solution to the described problem, and as an integration between information and communication technologies in order to improve intelligent transportation systems. However, from an energy perspective, the autonomy problem persists for EVs, when compared to internal combustion engine vehicles (ICEV). This thesis work is aimed to a part of the described problem, providing a methodology to model instantaneous power consumption (IPC) in EVs.

To achieve this, satellite topographic data is used, combined with a previously-validated IPC phenomenological model, in order to calculate expected IPC in cities. In the present work, our methodology is tested in Valparaiso (Chile), and then extended to Sao Paulo (Brazil), Madrid (Spain), and Berlin (Germany). The results and methodology can be used to lead strategic decisions in charging station placement and operational decisions for EV planning in public transport.

Índice de figuras

2.1. Cantidad global de EVs en la última década. Fuente: https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020	10
2.2. Ventas globales mensuales de EVs de 2015 a 2018. Fuente: plataforma de información global Marklines.	20
3.1. Cuadro 1: Evolución de vehículos en circulación, a 10 años, según región. Fuente: INE.	36
4.1. Diagrama de la solución planteada	47
4.2. Intersecciones. Se extrae la información de rutas de la zona de Sao Paulo desde OSM.	48
5.1. Vehículo eléctrico Twizy (de Renault) usado en este trabajo.	54
5.2. Mapa de consumo para un viaje único entre origen y destino.	56
5.3. Mapa de consumo para un sector completo de la ciudad de Valparaíso.	57
5.4. Mapa de consumo invertido para un sector completo de la ciudad de Valparaíso.	58

5.5. Pruebas de campo del enfoque de estimación de IPC. (a) muestra diez pruebas diferentes realizadas en el mapa mostrado en la Fig. 5.3, donde las barras moradas representan el IPC real medido desde las baterías del EV; las barras naranjas corresponden al IPC estimado por nuestro enfoque y las barras cian, corresponden al IPC según las especificaciones del fabricante. (b) muestra la media y la varianza de 40 pruebas realizadas. 59

5.6. Resultados de capitales mundiales: (a) Sao Paulo, (b) Berlin, (c) Madrid. La información topográfica se extrajo desde Google Maps. 60

Índice de cuadros

5.1. Características del Twizy EV	55
---	----

Índice general

1. Introducción	5
1.1. Objetivos	6
1.1.1. Objetivo General	6
1.1.2. Objetivos Específicos	7
2. Marco Teórico	9
2.1. Uso de automóviles eléctricos	9
2.1.1. Tipos de EVs	10
2.2. Consumo instantáneo de potencia	13
2.3. Marco legal y comercial	14
3. Estado del Arte	29
3.1. Consumo energético en vehículos eléctricos	29
3.1.1. Investigaciones nacionales	31
3.1.2. Investigaciones internacionales	34
4. Desarrollo de la solución	45
4.1. Modelo para el consumo instantáneo de potencia	45
4.2. Estimación del IPC basada en Satélite	47
5. Resultados	53
5.1. Configuración experimental	53
5.2. Consumo energético para un tramo	55

5.3. Mapa de consumo	56
5.4. Casos de Sao Paulo, Berlin y Madrid	60
6. Conclusiones	61

Capítulo 1

Introducción

A lo largo de la última década, la manufactura y uso de vehículos eléctricos (EVs) ha sido impulsada tanto por la legislación pública, como la inversión privada, dada la necesidad global de reducir las emisiones de gases invernadero [1]. El aumento de la eficiencia energética y reducción de emisiones de CO_2 se han vuelto políticas necesarias en todo el mundo, debido a los efectos del cambio climático y el impacto de los combustibles fósiles. La necesidad de vehículos eléctricos y la promoción de combustibles no-fósiles están hoy bien establecidas y siguen en crecimiento. Diversas medidas han tenido lugar a escala global, tales como cargas impositivas y restricciones al uso de energía producida por combustibles fósiles [2].

En este escenario, se han desarrollado diversos estudios que evalúan positivamente el impacto de la introducción de vehículos eléctricos híbridos (HEVs) al sistema de transporte, aportando antecedentes favorables a la transición a vehículos puramente eléctricos (PEVs) [3].

El consumo energético de un automóvil eléctrico, durante su etapa de uso, es menor al de un automóvil convencional, sin agregar que, su impacto ecológico y ambiental, a lo largo de todo su ciclo de vida, es significativamente menor, tanto por la diferencia en emisión de gases durante su uso, como por la generación de energía para su carga. Otros factores, tales como la energía total utilizada en el proceso de manufactura, han

sido estudiados por otros autores [4].

Específicamente, el área de transporte urbano está sufriendo importantes transformaciones en su matriz de generación energética. Países como Chile, han aumentado su producción de energías renovables por sobre el 100 % [5][6]. Estos incentivos a la producción de energía limpia, replicados en todo el mundo, se complementan con el aumento de vehículos eléctricos en la flota de transporte público en diversos países [7]. Paralelamente, la industria de baterías eléctricas para automóviles presenta una alta competitividad e inversión, lo que plantea un escenario favorable [8].

En el contexto chileno, se vuelve relevante el aporte del presente trabajo, dado que el crecimiento de la matriz de energías renovables favorece la introducción de vehículos eléctricos al mercado, lo cual implica que se requieren herramientas aplicadas, que favorezcan el proceso de instalación de estaciones de carga, estimación de flujo vehicular, y autonomía esperada para las zonas donde se implementen este tipo de vehículos. En este contexto, modelos para medir y evaluar la eficiencia y consumo energético de vehículos eléctricos han sido propuestos por otros autores [9], sin embargo, en materia de conocimiento aplicado, aún existe una falta de herramientas que simplifiquen esta tarea y sean adaptables a escenarios urbanos globales.

1.1. Objetivos

1.1.1. Objetivo General

El objetivo de este trabajo de tesis consiste en el diseño, desarrollo y simulación de un algoritmo computacional que permita simular rutas de viaje para un automóvil eléctrico dentro de zonas urbanas reales, y estimar el consumo instantáneo de potencia (IPC) para todos los tramos de calle, implementando un modelo de consumo energético basado en la fuerza de tracción. Mediante dicho ruteo, se busca construir un mapa de consumo energético, obteniendo una prognosis del consumo para toda la ciudad, que permita estimar el costo energético para desplazarse a una zona determinada, así como

la potencia instantánea y energía total requerida para el desplazamiento del vehículo entre dos puntos cualesquiera de origen y destino.

1.1.2. Objetivos Específicos

- Modelar el consumo instantáneo de potencia de un automóvil eléctrico, basado en la fuerza de tracción y el gradiente de altura.
- Programar el modelo seleccionado en el primer objetivo en una plataforma o lenguaje que permita la conexión con datos públicos de topografía satelital.
- Simular el movimiento del vehículo entre todas las intersecciones de calles presentes en la zona seleccionada para la simulación.
- Graficar en el mapa el consumo de potencia obtenido mediante las simulaciones del objetivo anterior, basado en un gradiente de color que refleje el consumo en dicho tramo.
- Obtener el consumo energético total para distintas rutas y comparar con resultados experimentales.

Este documento se estructura de la siguiente forma: En el Capítulo 2, se describe el marco teórico y contexto mundial del desarrollo de automóviles eléctricos y su marco comercial y legal. En el Capítulo 3, se presentan las experiencias más importantes existentes en Chile y el mundo, describiendo los enfoques adoptados por otros autores. En el Capítulo 4, se presenta el modelo de desarrollo de la plataforma, arquitectura de la solución planteada y funciones implementadas. En el Capítulo 5, se presentan los resultados obtenidos, considerando los objetivos iniciales y aprendizajes adquiridos durante el desarrollo. Por último, en el Capítulo 6, se entregan las conclusiones respecto al modelo implementado y la metodología utilizada, así como el trabajo futuro propuesto.

Capítulo 2

Marco Teórico

2.1. Uso de automóviles eléctricos

Un automóvil eléctrico (EV por sus siglas en inglés) es un vehículo que utiliza uno más motores eléctricos para su propulsión. Los primeros automóviles eléctricos se crearon a mediados del siglo XIX, cuando la electricidad se encontraba entre los métodos preferidos para la propulsión de vehículos, alcanzando un nivel de confort y facilidad de operación que no podía ser alcanzado por automóviles de combustión interna. En el siglo XXI, los EVs han resurgido por una parte, debido al desarrollo tecnológico, y por otra, dado el aumento del interés en las energías renovables. A pesar de haber sido discontinuados por las principales empresas de manufactura durante los años 2000, su producción ha alcanzado niveles cada vez más relevantes a nivel mundial, alcanzando un stock total de 7.2 millones de automóviles eléctricos a fines de 2019, de los cuales 2.1 millones de ventas fueron durante el mismo año [10]. Los automóviles eléctricos, que representan un 2.6 % de la venta global de automóviles y alrededor del 1 % del stock global de automóviles en 2019, registraron un aumento anual del 40 % [10].

A medida que el progreso tecnológico en la electrificación de vehículos de dos o tres ruedas, buses y camiones, avanza y el mercado para ellos crece, los vehículos eléctricos

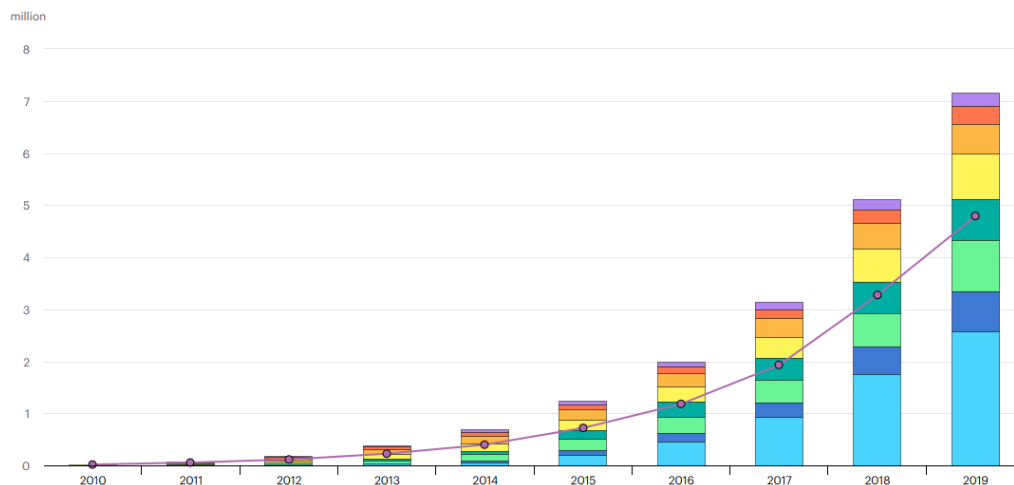


Figura 2.1: Cantidad global de EVs en la última década. Fuente: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2020>

se expanden significativamente. Ambiciosos anuncios políticos, han sido críticos para la estimulación del desarrollo de los vehículos eléctricos en los principales mercados automotrices en los años recientes. En 2019, surgen indicaciones de un giro continuo desde los subsidios directos hacia enfoques de normativas, que se basan más en medidas regulatorias y estructurales, incluyendo mandatos para vehículos de cero emisiones y estándares económicos para combustible. Han definido una clara señal de largo plazo para la industria automotriz y los consumidores que apoya la transición hacia una forma económicamente sustentable para los gobiernos. [10]

2.1.1. Tipos de EVs

Generalmente, según la tecnología utilizada en los vehículos eléctricos y el tipo de conexión a la red eléctrica, los vehículos eléctricos se clasifican en tres tipos principales:

- Vehículos totalmente eléctricos (EV)
- Vehículos eléctricos híbridos (HEV)

- Vehículos eléctricos enchufables (PEV)

Se predice que los vehículos eléctricos con la capacidad de conectarse a la red eléctrica tendrán un futuro mejor que otros. En esta parte, se explican en detalle diferentes tipos de vehículos eléctricos.

Vehículos totalmente eléctricos

Los vehículos totalmente eléctricos son la primera generación de vehículos eléctricos que utilizan la energía almacenada en las baterías, para alimentar motores eléctricos y proporcionar potencia de propulsión. La potencia de propulsión del vehículo la proporciona únicamente la energía eléctrica libre de contaminación y, por tanto, se les conoce como vehículos no contaminantes (contaminación cero). La primera generación de este EV, tenía una capacidad de batería limitada y no era capaz de recorrer largas distancias. Esto, junto con el alto costo de las baterías y la falta de posibilidad de que estos vehículos sean cargados por otras fuentes, hizo que los vehículos totalmente eléctricos fueran antieconómicos y los llevó a ser rechazados por los clientes. Recientemente, de acuerdo con las mejoras significativas en la tecnología de las baterías, los precios de estos vehículos han bajado sustancialmente, lo que propulso a que estos vehículos eléctricos recibieran una gran acogida por parte de los compradores. Hoy en día, los vehículos eléctricos se definen como vehículos eléctricos enchufables (PEV) y se pueden cargar a través de la red eléctrica en los hogares o en lugares públicos. Esta característica hace que el vehículo totalmente eléctrico sea una buena opción para los clientes y mejora la confiabilidad de su procedimiento de carga. Las principales ventajas de estos vehículos se definen a continuación:

- Los vehículos eléctricos son más eficientes que los vehículos de combustión interna, por lo que reducen el consumo de petróleo y, por tanto, la dependencia energética exterior.
- No emiten contaminantes durante su uso, lo que es especialmente beneficioso en

las ciudades. Incluso pueden evitar la emisión de CO₂ durante su operación si utilizan electricidad producida a partir de fuentes de energía renovables.

- Además, permiten una mejor integración de las energías renovables en el sistema eléctrico y una operación más eficiente y segura de las redes de distribución, gracias a la posibilidad de controlar el proceso de carga y descarga de los mismos. Igualmente, apenas tienen mantenimiento, la conducción es más sencilla al no necesitar embrague, disponen de un par motor mayor, producen muy poco ruido y el coste por kilómetro es mucho menor que el de los vehículos tradicionales (salvo por el precio de compra del vehículo).

Vehículos eléctricos híbridos

Estos vehículos tienen un motor de combustible (motor de combustión interna) y a su vez, un motor eléctrico con suficiente capacidad de batería para ahorrar energía del motor de combustible y los frenos. Las baterías son útiles cuando se necesitan para producir energía auxiliar, o a bajas velocidades, al apagar el motor de combustible para proporcionar la fuerza motriz. Aproximadamente 1,5 millones de HEV se han vendido en la última década. En los países desarrollados como Estados Unidos, alrededor del 3 % de los vehículos existentes son híbridos. Las desventajas de estos vehículos se enumeran a continuación:

- No se pueden cargar las baterías a través de la red.
- Dependencia del motor de consumo de combustibles fósiles.

Vehículos eléctricos enchufables

Los vehículos eléctricos híbridos enchufables (PHEV) son combinaciones de los dos tipos anteriores y han sido diseñados para eliminar las desventajas de los mismos. Como tienen capacidad de recarga por la red eléctrica, requieren baterías con más capacidad que los HEVs. La principal diferencia entre las baterías de estos dos tipos de

vehículos eléctricos (PHEV y HEV) es que la batería PHEV debe poder descargarse y recargarse rápidamente, mientras que las baterías HEV funcionan casi completamente cargadas y la descarga rara vez ocurre. Dado que los PHEV se pueden recargar con una red eléctrica en los hogares y en lugares públicos, el volumen de baterías utilizadas en los PHEV ha aumentado. Por lo tanto, es posible viajar distancias más largas que los HEV utilizando el modo no contaminante (modo eléctrico). La característica más importante de los PHEV o PEV es su capacidad para conectarse a la red eléctrica y la posibilidad de intercambio de energía bidireccional (red a vehículo y vehículo a red), que se conocen como G2V y V2G, respectivamente. Cabe señalar que con el creciente número de PHEV y PEV en el futuro, habrá un volumen significativo de almacenamiento de energía que puede ayudar al funcionamiento del sistema eléctrico proporcionando los servicios auxiliares [11].

2.2. Consumo instantáneo de potencia

Existen varios tipos de motores eléctricos utilizados en automóviles eléctricos, a saber:

- Motor DC Serie (Brushed)
- Motor DC “Brushless” (BLDC)
- Motor sincrónico de imán permanente (PMSM)
- Motores de inducción AC de tres fases
- Motores de reluctancia conmutada (SRM)

Al igual que en la industria de los motores de combustión, no existen un único tipo de motor que supere en todos los aspectos a los demás, por lo que el tipo de motor eléctrico utilizado dependerá de la aplicación y el contexto del vehículo. Por ejemplo, la mayoría de los automóviles híbridos del mercado (Toyota Prius, Chevrolet

Bolt EV, Ford Focus Electric, zero motorcycles S/SR, Nissan Leaf, Honda Accord, BMW i3, etc) utilizan motores PMSM, mientras que otros automóviles (como el Tesla S o la Mahindra Reva e2o) llevan motores de inducción, eliminando la dependencia de imanes permanentes. Afortunadamente, existen unidades comunes a todos los tipos de motores, las que se utilizan para reflejar la eficiencia total y las características del motor en variables matemáticas que representan la fuerza y la velocidad del motor.

El consumo instantáneo de potencia (IPC) puede ser obtenido como producto de las mediciones de voltaje y corriente provenientes del sistema de monitoreo de las baterías del vehículo. Adicionalmente, siguiendo el trabajo de Romero y Auat [12] (y sus referencias), el consumo instantáneo de potencia de un vehículo eléctrico puede ser estimado a través de un balance de fuerzas en sus ruedas. La fuerza de tracción total de un EV es una función de la resistencia a la rodadura, la topología del terreno, la aceleración del vehículo, el coeficiente de fricción aerodinámica, y otras resistencias, como se muestra en el capítulo 4. Para el caso de estudio de esta tesis, se utilizara el automóvil eléctrico Renault Twizy 80, el cual posee un motor de inducción de tres fases, cuyas especificaciones serán indicadas en el capítulo 4.

2.3. Marco legal y comercial

Los escenarios futuros de adopción de EVs son inciertos y dependen de estrategias que permitan fomentar la adopción de vehículos eléctricos. Por lo tanto, estimar las poblaciones futuras de vehículos eléctricos y las emisiones correspondientes, es difícil para los legisladores que intentan discernir qué beneficios pueden aportar los vehículos eléctricos. El desarrollo futuro de las cuotas de mercado de vehículos eléctricos depende en gran medida de la configuración del marco, como la evolución de los precios, los incentivos políticos y otros. Estos ajustes pueden reflejar desarrollos de parámetros conservadores, moderados o progresivos. Como consecuencia, se puede simular una amplia gama de posibles cuotas de mercado en función de diferentes supuestos marco [7].

No obstante, las emisiones de CO₂ han aumentado constantemente durante las últimas décadas. En el año 2018, el sector del transporte fue responsable de más de una cuarta parte de las emisiones totales de gases de efecto invernadero (GEI) en todo el mundo. Para enfrentar este desafío, se ha demostrado que los vehículos eléctricos (EV) son una alternativa más limpia, más silenciosa y más eficiente energéticamente que los vehículos con motor de combustión interna (ICEV) para combatir el cambio climático. Los impactos ambientales y económicos de los vehículos eléctricos son especialmente positivos cuando su consumo de electricidad proviene de fuentes de energía renovables (FER). Por ello, se convierten en una alternativa particularmente atractiva en el caso de países con un gran potencial de FER, como es el caso de Chile [13].

En esta misma línea, las ventajas en el uso de automóviles eléctricos han beneficiado la instauración de políticas y marcos regulatorios favorables a la movilidad eléctrica en todo el mundo. De hecho, el grado de adopción de los EVs es cada vez mayor en diversos segmentos de mercado, sin embargo, aún no se ha logrado su despliegue a gran escala. Hay principalmente dos barreras que limitan el despliegue del EV: a) su elevado coste de compra en comparación con los ICEV y b) la ansiedad de autonomía, es decir, el miedo de los potenciales compradores a quedarse sin batería. En efecto, la autonomía de los EVs es más limitada que la de los vehículos de combustión interna, tienen un menor espacio para los pasajeros y la carga (debido al tamaño de la batería) y aún no existe una red suficientemente amplia de puntos de recarga de acceso público. Sin embargo, se ha demostrado que la disponibilidad de una infraestructura de carga pública es una forma fiable de disminuir la ansiedad por la autonomía y aumentar las ventas de vehículos eléctricos. Debido a esto, las estrategias de implementación de la infraestructura de carga óptima se han estudiado a fondo [14], y a su vez, el desarrollo tecnológico está consiguiendo aumentar la densidad energética de las baterías, reduciendo su tamaño y/o aumentando su capacidad, pero el acceso público a la infraestructura de recarga sigue siendo de especial importancia para el cambio a la movilidad eléctrica.

Asimismo, los desafíos legales a los que se enfrenta la industria de los automóviles eléctricos en la actualidad se relacionan principalmente con el ciclo de carga y consu-

mo de baterías requerido para sustentar una cantidad significativa de EVs en su red de transporte. Adicionalmente, se debe mitigar el impacto que pueda generar la incorporación de EVs a la red eléctrica de cada zona. En estos aspectos, durante la última década, se han logrado avances en algunos puntos mencionados a continuación:

- **Legislación de Baterías:** Existen requerimientos legales para la autorización de mercado de baterías, tales como el registro y etiquetado de provisiones. Existen también, la obligación de retirar las baterías y asegurar un manejo adecuado hacia el fin de su uso en un EV. Normas adicionales regulan el manejo de baterías en relación a su reutilización posterior.
- **Degradación de baterías, rango, potencia y aceleración:** Es importante asegurar que la garantía del vehículo establezca claramente la cobertura únicamente para los defectos en los vehículos y no la degradación normal de las baterías en el tiempo.
- **Despliegue de estaciones de carga:** El operador de una red de carga de EVs (que también podría ser un fabricante de EVs) deberá ubicar los puntos de carga sujeto a las reglas generales de conexión a la red eléctrica, planificación legal y regulaciones de seguridad. Típicamente, el operador arrienda instalaciones y compra/provee la electricidad necesaria al punto de carga. En algunos países, el operador puede optar a subsidios por la instalación de infraestructura de carga de EVs de acceso público.
- **Reglas de protección de datos:** Los EVs conectados generan enormes volúmenes de datos. La GDPR Europea regula el procesamiento de “datos personales” i.e. cualquier información relacionada a un individuo identificado o identificable. Distintas piezas de información que recolectadas pueden llevar a la identificación de una persona en particular, también constituyen “datos personales”. Esto significa que cualquier o todo dato producido por o vinculado a un individuo (email, correspondencia, contratos, reportes) pueden ser considerados como “datos per-

sonales” del individuo incluso si, a simple vista, no contiene nada que pueda identificar a un individuo.

- Legislación de compatibilidad electromagnética: Los fabricantes de EVs deben asegurarse que los vehículos cumplan con todas las normas relevantes que regulan el uso del espectro electromagnético.

Según los datos de la Agencia Internacional de la Energía (IEA), la infraestructura para la carga de vehículos eléctricos continúa en expansión. En 2019, existían alrededor de 7.3 millones de cargadores a nivel mundial, de los cuales 6.5 millones corresponden a cargadores privados de formato ligero y carga lenta, en hogares, edificios de vivienda a múltiples y lugares de trabajo. Conveniencia, costo-efectividad y una variedad de políticas de soporte (tales como tasas preferenciales, incentivos de compra de equipamiento, y rebajas) son los principales factores de la prevalencia de la carga privada.

Durante la última década, las ventas anuales de automóviles de pasajeros han crecido alrededor de un 5 % en promedio, aunque se ha observado un mercado de automóviles en contracción desde 2018. La crisis de Covid-19, ha empeorado significativamente esta situación: en Europa, el cierre de fábricas de automóviles debido a la primera ola de la pandemia Covid-19 en el primer semestre de 2020 duró alrededor de 30 días en promedio, lo que provocó pérdidas de producción estimadas en 2,4 millones de vehículos.

El sector automotriz, también se encuentra hoy en un lugar diferente de lo que estaba en 2009 en muchos aspectos: la flota de vehículos de hoy tiene menos diésel e incluye más SUV. Al mismo tiempo, los vehículos eléctricos van en aumento. Al diseñar esquemas de apoyo para el sector del transporte en la actualidad, los responsables políticos deben considerar cómo ha evolucionado el mercado. Estos tres aspectos se analizan a continuación. Si bien la economía de combustible promedio de los vehículos continúa mejorando, la tasa de progreso se ha desacelerado en los últimos años. La desaceleración de las mejoras en la eficiencia del combustible se debe a dos factores principales: la disminución de las ventas de vehículos diésel (entre un 5 % y un 15 % en

los mercados más grandes de la UE) y el aumento de las ventas de SUV, que crecieron un 11 % desde 2014 y en 2017, que representa casi el 40 % del mercado mundial de vehículos ligeros.

Ambas tendencias apuntan a la necesidad de modular el desguace y los incentivos de compra para tener en cuenta la eficiencia del combustible, que varía según la tecnología del tren motriz y el tamaño del vehículo. Por el contrario, una tendencia que ha contribuido a mejorar la eficiencia del combustible de la flota, es el aumento de las ventas de automóviles eléctricos. Si bien eran prácticamente inexistentes en 2010, las ventas mundiales de automóviles eléctricos alcanzaron casi 2,1 millones en 2019, alcanzando una cuota de mercado del 2,6 %. Este patrón de crecimiento exponencial, ha sido respaldado por medidas de política fiscal y regulatoria, incluidos los mandatos de vehículos de cero emisiones y los estándares de eficiencia de combustible.

La incorporación de incentivos para el despliegue de vehículos con bajas emisiones de carbono en los paquetes de estímulo, puede brindar apoyo a corto plazo al sector automotriz y preparar la cadena de valor para la próxima década. A pesar de estas importantes evoluciones en el sector automotriz, los patrones de movilidad y la economía en general, los programas de estímulo anteriores aún pueden brindar lecciones útiles. En respuesta a la recesión de 2008-09, numerosos países lanzaron incentivos de compra y esquemas de desguace de vehículos con diferentes características de diseño y alcance:

- Bonificaciones fijas versus moduladas: China, Italia y Estados Unidos otorgaron subsidios escalonados según las características de los vehículos nuevos que se compran, incluido el tipo de vehículo (automóvil, vehículo comercial ligero), el tipo de compra (vehículo nuevo o usado), la eficiencia del combustible y las emisiones de GEI. En cambio, se proporcionaron subvenciones fijas en Francia, Alemania, España y el Reino Unido.
- Condiciones ambientales: China, Alemania, la Federación de Rusia (en adelante, Rusia”) y el Reino Unido no incluyeron las condiciones ambientales en sus programas de incentivos. Los países que incluyeron las condiciones ambientales

para los incentivos, los diseñaron como límites superiores de emisiones de CO₂ por kilómetro (por ejemplo, España, Francia) o como condiciones de eficiencia del combustible. Los criterios de eficiencia de combustible se expresaron alternativamente en términos absolutos (por ejemplo, en Japón, estándares de eficiencia de combustible de 2010 para automóviles de gasolina) o en términos relativos (por ejemplo, en los Estados Unidos, mejora de la eficiencia de combustible con respecto a vehículos desguazados).

- Requisitos de desguace: la mayoría de los esquemas de incentivos (China, Francia, Alemania, Rusia, España, Reino Unido, Estados Unidos) requerían desguazar un vehículo para ser elegible para una bonificación para comprar uno nuevo. Italia y Japón brindan dos excepciones, ya que entregaron bonificaciones de compra más bajas pero aún sustanciales, incluso sin requerir que los consumidores desechen su vehículo existente.
- Presupuesto y alcance: Los subsidios más generosos para el reemplazo de automóviles se otorgaron en Estados Unidos, oscilando entre USD 3 500 y USD 4 500 según el tipo de vehículo y la diferencia en eficiencia de combustible lograda con su reemplazo. Alemania dedicó el mayor presupuesto a los planes de desguace, con 5 000 millones de euros, mientras que Japón apoyó el mayor número de ventas, con 2,9 millones de vehículos.

Los paquetes de políticas destinados a incentivar la compra de vehículos de bajo consumo de combustible pueden basarse en una serie de medidas:

- Medidas fiscales como incentivos fiscales y sanciones para los consumidores, tanto en la compra de vehículos (impuestos diferenciados sobre los vehículos y tarifas que favorecen la neutralidad de los ingresos) como en el uso (impuestos a los combustibles, impuestos basados en la distancia) y la eliminación de incentivos contraproducentes (subsidios a los combustibles fósiles).

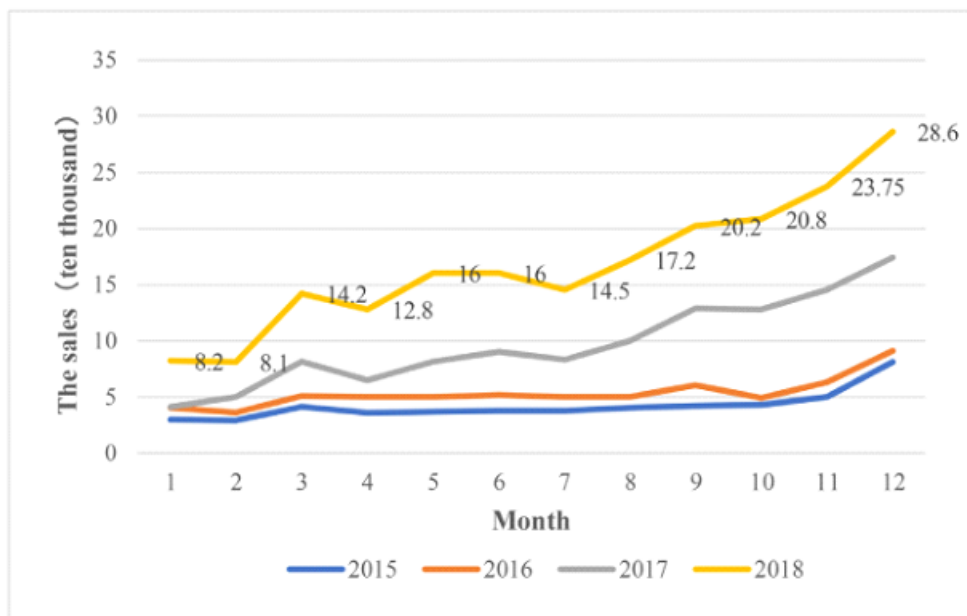


Figura 2.2: Ventas globales mensuales de EVs de 2015 a 2018. Fuente: plataforma de información global Marklines.

- Incentivos económicos para que los distribuidores y el personal de ventas aumenten los esfuerzos de ventas de vehículos de bajas y cero emisiones.
- Medidas regulatorias, tales como estándares de eficiencia de combustible y emisiones de carbono a nivel nacional, y zonas de bajas emisiones en áreas urbanas.
- Campañas de información y concienciación, incluso mediante etiquetas de eficiencia de combustible [15].

En la red social del mundo real, los principales participantes de la industria de vehículos eléctricos son: consumidores, empresas y gobiernos. Las políticas gubernamentales, el precio del petróleo y el precio de la electricidad son factores de influencia macro. Para las empresas y los consumidores, los fabricantes de empresas del lado del suministro también jugarán un juego dinámico entre empresas. Los consumidores del lado de la demanda, se ven afectados por sus propias características de consumo

además de los factores macro.

Desde la perspectiva del gobierno, la introducción por parte del gobierno de políticas de subsidio a la compra, políticas de reducción y exención de impuestos, políticas de construcción de infraestructura de carga y políticas sin restricciones de vehículos eléctricos, aumentará los beneficios económicos de los consumidores. La política de subsidio de compra reducirá directamente el costo de compra de vehículos eléctricos por parte de los consumidores. En comparación con los automóviles tradicionales, las políticas de exención y reducción de impuestos de los vehículos eléctricos ahorrarán costos y aumentarán la comodidad de los viajes.

Es menester advertir como en el caso de China, y producto de su deficiente infraestructura, la introducción de políticas de construcción de infraestructura de carga aumentará las expectativas psicológicas de los consumidores, percibirá los beneficios económicos futuros y aumentará su disposición a comprar vehículos eléctricos.

Por el lado de la oferta, es notable el efecto de los subsidios a la producción y las políticas de construcción de infraestructura, que pueden promover la difusión de vehículos eléctricos al 0,7. Con el aumento de los fabricantes de automóviles en la red, aumenta el grado de difusión al mismo nivel de política gubernamental. Los subsidios a la producción de los fabricantes tienen un mayor impacto en los vehículos eléctricos que los subsidios a la compra de los consumidores. Por el lado de la demanda, el efecto de la política de subsidio a la compra y la política de viajes restringidos, que puede promover la difusión de vehículos eléctricos a 0.6. Con la expansión continua de la escala de la red, la tasa de difusión de los vehículos eléctricos también se acelerará y se hará más estable. En el corto plazo, las restricciones a los vehículos de combustible y la política de subsidio a la compra pueden promover la preferencia de los consumidores por los vehículos eléctricos. Sin embargo, a largo plazo, el enfoque en los aspectos de sostenibilidad de la infraestructura de carga de vehículos eléctricos y la innovación de la tecnología central de la empresa, garantizará la sostenibilidad del desarrollo de vehículos eléctricos. Al mismo tiempo, los bajos precios de la electricidad y los altos precios del petróleo impulsarán la tasa de distribución de vehículos eléctricos al 60 % y

70 % respectivamente. Por lo tanto, estos también son factores en los que es necesario centrarse en el desarrollo de políticas futuras [16].

Es menester señalar, que no sólo China ha implementado políticas con respecto al incentivo de EVs, sino también la introducción en el mercado de BEVs (Battery electric vehicle) en Noruega desde la década de los 90, es una innovación del sector del transporte ambiental que se ha difundido en un mercado nacional a un ritmo sin precedentes.

A saber, desde 2003, hubo varios reveses con BEV, puesto que los fabricantes de automóviles franceses dejaron de producirlos. Las malas ventas, el cambio de prioridades y la prohibición prevista del cadmio en las baterías en la UE contribuyeron a esa decisión. Para 2003, todos los fabricantes de automóviles y la mayoría de los países habían abandonado los vehículos eléctricos. El período anterior, había demostrado que existía un potencial para el uso de BEV en Noruega, por lo que los políticos mantuvieron los incentivos estatales durante este período.

Con el argumento de que los BEV también deberían ser atractivos en las zonas rurales y costeras para ayudar a respaldar los objetivos de la política climática, y como una ayuda para la empresa THINK y Kewet, el gobierno redujo las tarifas de los BEV en los ferries nacionales de carreteras principales desde 2009 [17]. Las cosas empezaron a verse optimistas para los actores de BEV, aparte de los planes de los principales fabricantes de automóviles de introducir BEV en unos pocos años. El régimen de ICEV representado por la Asociación de Importadores de Vehículos, aparentemente estaba viendo una amenaza de los BEV, expresando su preocupación por la pérdida de ingresos fiscales debido a los incentivos de BEV en el informe de un grupo de recursos designado por el gobierno, encargado de buscar formas de mejorar el mercado de BEV. Los políticos ignoraron estas preocupaciones y se mantuvieron los incentivos. Por lo tanto, los objetivos políticos de BEV habían pasado de la contaminación local y el desarrollo industrial, a los objetivos de la política climática.

Después de la crisis financiera de 2008/2009, el gobierno noruego, influenciado por las ONG, introdujo un paquete de estímulo económico, que incluía seis millones

de euros para el establecimiento de estaciones de carga para BEV, para mantener la actividad de los electricistas, al mismo tiempo que se mejora la infraestructura BEV. Nissan obtuvo el apoyo del Reino Unido para las instalaciones de producción de Leaf BEV [18]. Al mismo tiempo, la UE había propuesto el objetivo de emisión media de CO₂ de 95 g / km para vehículos nuevos en 2020 [19], que indicaba la necesidad de una participación de vehículos electrificados en la mezcla de ventas para alcanzar el objetivo y así evitar multas. La industria de vehículos tradicionales volvió a entrar en la escena de los BEV en 2010, tras los avances en la tecnología de baterías de iones de litio y las reducciones de costos, como se muestra en [20], así como un enfoque global en las políticas y medidas climáticas.

Se propuso por primera vez una política específica de BEV en el libro blanco sobre política climática en 2012 [21], seguida de un acuerdo amplio sobre política climática en el Parlamento el mismo año [22]. En los dos documentos se presenta un objetivo para que los nuevos vehículos de pasajeros emitan una media de 85 g de CO₂ / km para 2020. Figenbaum ha demostrado que este objetivo se puede alcanzar si los BEV y los PHEV juntos logran una participación de mercado del 20-30 %. El acuerdo establece además que el sistema fiscal se utilizará en la ecologización de la flota de vehículos, y Noruega continuará a la vanguardia en la ecologización del sector del transporte, mientras que el gobierno contribuirá al establecimiento de infraestructura y permitirá que los vehículos eléctricos continúe usando el carril bus por el mayor tiempo posible. No se estableció ningún objetivo específico de volumen de BEV, aparte de que los incentivos permanecerían vigentes hasta 2017 o hasta 50.000 BEV en la carretera.

El avance final para los BEV se produjo cuando el actor líder del mercado, VW lanzó dos modelos en 2013/14. Los importadores sin BEV perdieron participación de mercado, aquellos con BEV ganaron participación de mercado y los nichos se expandieron en todo el país. La asociación BEV persuadió a los distribuidores de que regalaran un año de membresía gratis a todos los compradores de BEV, lo que rápidamente ganó importancia con el crecimiento de la membresía.

La participación total de BEV de vehículos de pasajeros nuevos alcanzó el 18 %

en 2015. La razón principal de la expansión durante el período anterior fue la mayor selección de modelos de más proveedores y concesionarios, y que el VW E-Golf salió al mercado. La participación de las ventas de la versión eléctrica del VW Golf, de las ventas totales del Golf, fue del 48 % en los primeros meses que estuvo disponible en 2014, y aumentó al 55 % en 2015. Tesla Model S fue el vehículo grande más vendido en Noruega en 2014 y 2015 y el número cinco de todos los vehículos vendidos en esos años.

Más del 80 % de los BEV son comprados por los consumidores, mientras que el 74 % de estos eran propiedad de hogares con varios vehículos según una encuesta de 2014 a propietarios de BEV. La mayoría de los usuarios de la encuesta dijeron que volverían a comprar un BEV, mientras que menos del 1 % dijo que no, lo que indica que la tecnología ha sido aceptada en el mercado. Los propietarios son más jóvenes que los propietarios de vehículos nuevos tradicionales. Si continúan comprando BEV, entonces el mercado se expandirá con el tiempo a través de un efecto de cohorte. Por otro lado, los municipios y las empresas han tardado en incluir BEV en sus flotas, lo que ha resultado en un mercado de flotas más débil. El arrendamiento, la forma preferida de propiedad de BEV, no estuvo exento del IVA hasta el verano de 2015.

El gobierno firmó un nuevo acuerdo en el parlamento en junio de 2015 con el principio general de que los BEV seguirán siendo una opción atractiva. Los BEV son ahora un componente esencial para cumplir con el objetivo de la política climática de reducir las emisiones promedio de los vehículos nuevos noruegos a 85 g / km. La política fiscal de vehículos se está ajustando gradualmente para impulsar las emisiones hacia ese objetivo, al tiempo que proporciona un marco económico predecible para los importadores de vehículos. Se prevé una eliminación gradual de los incentivos a medida que la tecnología mejore y los costos bajen, y todos los vehículos eventualmente serán gravados en función de los costos externos que imponen a la sociedad. El impuesto anual aumentará a la mitad de la tasa de los ICEV en 2018 y a la tasa completa en 2020. Se podría introducir una tasa baja para los BEV en las carreteras de peaje y se podría eliminar gradualmente la tasa reducida en los transbordadores. La exención del IVA

podría ser reemplazada por un esquema de subsidios que se reducirá gradualmente. El destino del carril bus y los incentivos de estacionamiento se decidirán localmente en el futuro.

Después de que se introdujeron incentivos destinados a crear oportunidades, siguió una oleada de actividades específicas. Debido a que estas actividades no lograron alcanzar volúmenes de ventas, se introdujeron nuevos incentivos, lo que llevó a nuevas actividades de nicho por parte de actores nuevos y existentes. La primera ventana de oportunidad se abrió cuando se importó el primer BEV a Noruega en 1990 sin que se aplicara un impuesto de registro. Veintiséis años después, el alto impuesto sobre los ICEV y la exención para los BEV se ha convertido en un requisito previo para la expansión del mercado de BEV. Otro requisito previo, es la exención del IVA, que se introdujo hace 16 años para reducir la desventaja de precio de BEV, pero en 2013 esto dio lugar a una ventaja de precio. El acceso al carril bus creó un nicho de mercado exitoso y se convirtió en una ventana de visualización, con BEV fácilmente identificables con sus matrículas específicas.

Sin embargo, no fue hasta que la tecnología maduró a un nivel en el que las baterías de iones de litio se podrían usar después de 2009, y los fabricantes de automóviles tradicionales lanzaron la producción de BEV, que se pudo aprovechar la ventana de oportunidad creada por todos estos incentivos introducidos previamente. Los incentivos que habían atraído a Norwegian a comprar BEV básicos bastante pequeños, demostraron ser mucho más potentes cuando los BEV, con el tamaño y la calidad a los que los compradores estaban acostumbrados de los ICEV, se ofrecieron a la venta en un suministro ilimitado de distribuidores de confianza.

El marco de análisis MLP ha demostrado ser útil para explicar la dinámica del marco de políticas para BEV a escala nacional. Sacar la red de gobernanza del nivel del régimen y posicionarla entre el panorama internacional y los niveles del régimen, hizo visible la dinámica política del caso. Los elevados impuestos sobre vehículos y combustibles han dado a la red de gobierno influencia sobre los tipos de vehículos importados y vendidos. El mercado de BEV en Noruega, se creó cuando la red de

gobernanza introdujo incentivos que permitieron a los actores del mercado de nicho aprovechar los desarrollos del paisaje, al tiempo que debilitaban el régimen de ICE.

Por otro lado, la debilidad del marco MLP es que no se centra en los mecanismos de difusión regional o en la decisión de adopción de un individuo. La dinámica en Noruega, que comenzó en los nichos de mercado iniciales se encuentra dispersa por todo el país en ciudades y en áreas donde los usuarios tenían grandes ahorros en los costos de las carreteras de peaje. Los BEV se extendieron alrededor de estas áreas iniciales y a nuevos lugares donde los incentivos locales se hicieron efectivos, cuando surgieron nuevas carreteras de peaje. Estos nichos de mercado eventualmente se extendieron a todo el país a medida que el mercado crecía radialmente desde las áreas iniciales, luego se superponía a regiones más grandes y finalmente a todo el país. Este hallazgo apoya la noción de que los nichos de mercado deben tener una escala geográfica. Los nichos surgen localmente, evolucionan regionalmente y crecen hasta convertirse en un mercado nacional antes de terminar potencialmente como un régimen. La perspectiva del sistema, que es fundamental para la teoría MLP, puede perderse cuando se utiliza una hipótesis específica para cada nivel.

En efecto, el éxito de los BEV en Noruega, es el resultado de una larga cadena de eventos que conducen a oportunidades que podrían explotarse de manera más eficiente con el tiempo. La presión y las oportunidades que surgen en el panorama mundial, como la tecnología mejorada de baterías y una mayor disponibilidad de BEV, se han visto amplificadas por las políticas e incentivos noruegos. Estos incentivos se han vuelto más eficientes con el tiempo y permanecieron vigentes durante tanto tiempo, que los usuarios y las empresas podrían aprovecharlos. Por ejemplo, el incentivo del IVA y del impuesto de registro redujo la desventaja de precio de los BEV hasta 2013, pero desde entonces ha proporcionado a los BEV una ventaja de precio. Los actores noruegos pudieron cerrar la brecha entre el final del desarrollo de BEV en 2003 y el reinicio global en 2009, mediante la importación de BEV de segunda mano que estuvieron disponibles cuando otros países abandonaron sus BEV. La posibilidad de ofrecer exenciones fiscales se ha visto facilitada por los impuestos muy elevados sobre los vehículos en

Noruega. Otros países sin impuestos sobre los vehículos, pueden usar sistemas de bonificación para lograr efectos similares o volver a esquemas de apoyo. Es poco probable que un mercado nacional de BEV exitoso, ahora un régimen de BEV emergente, haya salido de los nichos de mercado para 2016 sin que los grandes fabricantes de vehículos hayan lanzado BEV. Aprovechando la larga historia de BEV en Noruega y utilizando sus redes de servicio y distribuidores a nivel nacional, pudieron ir directamente a actividades de marketing masivo. Los consumidores en Noruega han demostrado tener la capacidad de utilizar BEV con un alcance limitado en su transporte diario, contrariamente a lo que se cree en otros países y en la industria automotriz que el alcance debe mejorar antes de que los consumidores los compren.

Noruega ha demostrado que los BEV se pueden comercializar con suficientes incentivos. Otros países pueden inspirarse en las políticas noruegas, pero no hay garantía de que la transición tenga éxito. Los nichos de mercado pueden no generar suficiente impulso o sufrir contratiempos, o las tensiones en los regímenes existentes pueden seguir siendo pequeñas de modo que no se materialicen las "ventanas de oportunidad" para las innovaciones de nicho. Otros países pueden necesitar seguir otros caminos a medida que se abren diferentes ventanas de oportunidades y la tecnología BEV se desarrolla aún más [23].

Actualmente, Noruega tiene la campaña nacional más larga y extensa para fomentar la adopción de vehículos eléctricos. Un estudio investigó los efectos de muchos de los incentivos en las ventas de vehículos eléctricos per cápita entre los municipios y regiones (condados) de Noruega. Se recopilaron datos económicos básicos y datos de infraestructura de vehículos eléctricos para estos municipios, junto con datos de ventas de vehículos eléctricos, agrupados por alcance y propietario del vehículo. Se realizaron regresiones lineales óptimas para ver qué variables eran más útiles para predecir las ventas de vehículos eléctricos per cápita. A nivel regional, se concluyó que el número de estaciones de carga tuvo el mayor efecto indicativo, aunque no necesariamente causal. A nivel municipal, se descubrió que los vehículos personales eran sensibles al ingreso familiar medio, mientras que los vehículos corporativos eran sensibles al

número de estaciones de carga. Además, se encontró que todas las ventas de vehículos eléctricos municipales eran sensibles a la presencia de las principales ciudades; posiblemente proporcionando un proxy para peajes, carriles exclusivos para autobuses de acceso, estaciones de carga o simplemente clientes que abandonan la ciudad principal vecina, para comprar sus vehículos eléctricos en otras áreas. También, se observaron diferencias entre los vehículos de corto y largo alcance, siendo los vehículos de corto alcance mucho más sensibles a las medidas económicas, específicamente los ingresos y el desempleo. Combinados, estos sugieren que los incentivos de precios y un mayor acceso a las estaciones de carga pueden ser las mejores políticas para aumentar las ventas de vehículos eléctricos [24].

En definitiva, mucho de estos estudios subrayan la importancia de la disminución de CO₂, y fomentan el uso de energías renovables, y además, otro punto importante a favor de los vehículos eléctricos es que su mecánica es más sencilla que la de los motores ICE. De hecho, incluyen menos componentes mecánicos y, por lo tanto, tienen costos de mantenimiento mucho más bajos a largo plazo [25]. En consecuencia de esto, muchos países están buscando y aplicando incentivos tanto políticos como comerciales para su difusión.

La infraestructura para la carga de vehículos eléctricos continúa en expansión. En 2019, existían alrededor de 7.3 millones de cargadores a nivel mundial, de los cuales 6.5 millones corresponden a cargadores privados de formato ligero y carga lenta, en hogares, edificios de vivienda múltiples y lugares de trabajo. Conveniencia, costo-efectividad y una variedad de políticas de soporte (tales como tasas preferenciales, incentivos de compra de equipamiento, y rebajas) son los principales factores de la prevaencia de la carga privada.

Capítulo 3

Estado del Arte

3.1. Consumo energético en vehículos eléctricos

Existen diversos estudios que evalúan el consumo energético y la producción de gases contaminantes, no solamente en la fase de uso de un automóvil eléctrico, sino que a lo largo de todo su ciclo de vida, lo que se conoce como Life Cycle Assessment (LCA) [4], demostrando las ventajas que ofrece la transición a dichos vehículos, siendo la principal, el menor consumo total de energía para las etapas de manufactura, uso, y desarme para chatarra o reutilización de sus partes.

Para estimar el consumo energético durante su uso, se han planteado variados modelos matemáticos a la fecha, los cuales ponen énfasis en distintos aspectos que afectan dicho consumo, tales como los esfuerzos de tracción, regeneración por frenado eléctrico, y consumo de elementos auxiliares [26][27]. Para el análisis a desarrollar en esta tesis, los esfuerzos de tracción son la componente principal del consumo energético calculado.

A pesar de modelar y evaluar con bastante precisión los factores mencionados, existen otros factores que no pueden ser evaluados a priori, pues se relacionan con eventos y condiciones que se dan al momento de la conducción. Dada esta complejidad para la estimación a priori, durante el último tiempo, otros autores han optado por basarse

principalmente en datos experimentales de conducción [9][28]. Esto ha permitido obtener regresiones y aproximaciones más exactas al consumo real del vehículo. En esta misma línea, se ha estudiado el impacto del gradiente de altura en el consumo eléctrico, mediante la combinación de datos de GPS con mapas de elevación digital [29]. Estos estudios muestran que la mayor parte de los modelos de consumo no consideran la energía inyectada por los sistemas de frenado regenerativo en tramos descendentes, evidenciando la necesidad de incorporar el impacto de la elevación en el consumo energético, siendo este un punto base para la estimación utilizada en el presente trabajo de tesis.

Los principales factores que producen discrepancias entre el rango de carga y descarga esperado para las baterías, y el rango real experimentado por los conductores, son: velocidad [30], agresividad de manejo [31], clima y temperatura [32], y condiciones de tráfico. Además, el uso de aire acondicionado puede aumentar el consumo energético hasta en un 20 % [33]. Debido a esto, más recientemente, se han considerado las condiciones de tráfico y el tipo de conducción como factores relevantes para el cálculo del consumo energético [34] [35].

Al incorporar estaciones de carga, se debe considerar cómo esto afectará a las condiciones de operación de la red eléctrica a la que se conectarán las cargas. A este nivel, se han realizado estudios del consumo total estimado y el impacto producido por la incorporación de una flota de vehículos eléctricos y estaciones de carga a una red urbana [36].

En los últimos años, han surgido propuestas que incorporan el uso de herramientas gráficas para optimizar el transporte de carga en vehículos convencionales [37]. También se han formulado estrategias para maximizar el rango eléctrico de los vehículos (All-Electric Range) [38].

Sin embargo, hasta donde se ha visto en la literatura, no se ha publicado una herramienta digital que permita visualizar gráficamente, en un mapa del mundo real, el consumo estimado del vehículo, independiente del modelo de consumo adoptado y los resultados experimentales. En ese sentido este trabajo permite acoplar distintas contri-

buciones en una nueva herramienta de visualización gráfica.

3.1.1. Investigaciones nacionales

El uso de EVs ya sea en industria o para fines personales, conlleva el desafío de resolver el problema de planificación de ruta (RPP), en el que el conductor planifica una ruta o un software para el vehículo, atravesado hasta llegar al punto de destino deseado previamente. Dicha tarea, implica algunas limitaciones métricas como el tiempo (por ejemplo, encontrar el camino más rápido) o la distancia (por ejemplo, encontrar el camino más corto). En general, el camino a recorrer tiene un impacto directo en el uso de energía del vehículo.

Modelar el consumo de energía de los vehículos eléctricos, se convierte en un desafío para resolver el problema de RPP. Se debe reducir a un solo modelo, en el que el consumo de potencia del vehículo es función de las diversas resistencias, como la resistencia aerodinámica, la resistencia a la rodadura (intrínsecamente relacionada con la relación rueda-terreno), la masa del vehículo, que puede variar según a la aplicación (como en minería o agricultura, al cargar o descargar material) y la topología del terreno, entre otros.

En [39] se presenta un análisis en el que se estudia el efecto de la temperatura sobre la eficiencia energética, también para aplicaciones urbanas. Tal trabajo mostró la no linealidad presente, cuando la diferencia entre el motor y la temperatura ambiente sobrepasa aproximadamente los 20 grados Celsius. Los resultados mostraron que, a pesar de utilizar el mismo modelo algebraico que el presentado en [40], [41] (y sus referencias), el consumo de energía se comporta como una variable aleatoria.

Esto último se debe a que, entre otras cosas, la topología del terreno y su naturaleza inciden directamente en el consumo de energía, como se indica en [42]. Además, en [41] también se propone la modelación del consumo de energía de los vehículos eléctricos, utilizando datos registrados, pero no se hace mención a la relación entre los resultados y la naturaleza del terreno. De hecho, conocer el terreno por el que atraviesa

el VE puede resultar útil para mejorar el pronóstico energético asociado al camino a seguir. Hasta la fecha, la literatura no informa un modelo de funcionamiento completo del consumo de energía en vehículos eléctricos, probado en diferentes condiciones de campo.

En la investigación [43], se efectúa un enfoque del problema para modelar la potencia y el consumo de energía de los EVs, utilizando información sobre la naturaleza del terreno y cómo se comporta el vehículo en dicho terreno, para mejorar el pronóstico de la energía del vehículo y baterías, y por lo tanto, del consumo instantáneo de potencia (IPC). Para ello, el estudio se acotó a cuatro tipos de terrenos, que son los más habituales en las actividades industriales: grava, arcilla, césped y pavimento. Para cada terreno, se construyó y validó estadísticamente un modelo de cómo se comporta el IPC. A saber, los ensayos de campo se realizaron en las instalaciones de la Universidad Técnica Federico Santa María, Valparaíso, Chile.

Las conclusiones de dicha investigación, fueron que la derivación analítica del consumo instantáneo de energía (IPC) y energía en un vehículo eléctrico, y su dependencia de la naturaleza del terreno. Las pruebas empíricas permitieron construir un modelo polinomial del IPC, que se utilizó para predecir el consumo de energía en diferentes pruebas de campo. En particular, se obtuvieron dos modelos por cada terreno: cuando el vehículo acelera y cuando atraviesa a velocidad constante. Lo último, se debió a que la resistencia a la rodadura se comporta de manera diferente en cada caso. Cabe señalar, que la implementación de un modelo polinomial del IPC fue el que dio el R^2 más alto. Sin embargo, el ajuste polinomial es muy sensible a los datos de entrada.

Los resultados mostrados en esa investigación, durante las pruebas de campo, el enfoque para predecir el consumo de energía en el vehículo eléctrico probado, demostró ser hasta un 95 % y un 60 % más preciso en comparación con la información proporcionada por el fabricante y otros enfoques publicados anteriormente, respectivamente [43].

Otro estudio realizado en la zona urbana de Chile [44], analizó los impactos de la electrificación masiva de vehículos en la planificación y operación de expansión del

sistema eléctrico para el año 2030. Para ello, se utiliza un modelo de co-optimización de expansión de generación y transmisión a largo plazo, que captura la dinámica operativa horaria del sistema mediante el uso de días representativos. El modelo propuesto en la investigación, considera la demanda de EV tanto pública como privada, la cual se implementa en la operación horaria del sistema. Los esquemas de carga inteligente permiten que el modelo aproveche mejor las particularidades del portafolio de generación resultante. Además, los beneficios se estudian en términos de costos totales, costos marginales y niveles de emisión, entre otros, y se utilizaron como insumo los patrones reales de viaje de vehículos en las áreas urbanas de Chile, junto con los pronósticos de demanda para cada bus de energía y los factores históricos de capacidad por hora de diferentes plantas de energía FER.

En el estudio [44], la demanda de vehículos eléctricos privados y públicos se considera a través de cinco escenarios principales, que difieren en la cantidad de vehículos eléctricos y las estrategias de carga utilizadas (es decir, carga a la llegada o carga inteligente). El análisis se ilustra utilizando la red eléctrica chilena y los resultados obtenidos a modo general, muestran que una penetración masiva de vehículos eléctricos en el sistema de generación de energía de Chile fomentará en gran medida las inversiones en capacidad de energía solar. En lo que respecta a lo particular obtenido del análisis, se sugiere que el uso de carga inteligente permite un aumento adicional en la energía solar instalada. Con esta energía solar adicional en la red chilena, la generación de energía solar a nivel nacional aumenta un 2.4 % y la generación basada en combustibles fósiles disminuye un 2.5 %, solo debido a la implementación de la carga inteligente. Esta complementariedad entre la carga inteligente y las inversiones en energía solar se explica por los cambios de carga observados desde las horas pico de carga hasta las horas del mediodía y las primeras horas de la mañana cuando se permite la carga inteligente y hay una gran penetración de la energía solar.

La principal conclusión de [44], es que el uso de la carga inteligente puede alterar significativamente el plan de expansión del sistema eléctrico. Sin embargo, para diferentes sistemas de energía, la carga inteligente puede alentar la instalación de diferentes

tecnologías de generación. En cualquier caso, la conclusión de que la carga inteligente puede alterar significativamente el plan de expansión del sistema eléctrico, sigue siendo válida.

Estos beneficios podrían cobrar mayor relevancia al trabajar con factores de capacidad estocástica para FER, ya que la flexibilidad se convierte en un beneficio real para el sistema en el tiempo de operación real. Ahora bien, la investigación presentada advierte que algunos temas interesantes son, por un parte, profundizar en el modelado con diferentes tipos de vehículos eléctricos en el sistema, con diferentes patrones de carga, capacidades de batería y disponibilidad, y por otra, la inclusión de tecnologías CSP (Concentración Solar de Potencia) también sería beneficiosa para un sistema como el chileno, dada la flexibilidad que podrían brindar. También, para este sistema específico, sería recomendable realizar un estudio similar, pero con un año objetivo más lejano, para permitir que la absorción de vehículos eléctricos alcance niveles de impacto significativos y más influyentes en la toma de decisiones de planificación de expansión [44].

3.1.2. Investigaciones internacionales

Una investigación que busca cuantificar los impactos de los EVs en toda la red, la cual se desarrolló en el modelo VT-CPEM, calcula el consumo de energía instantáneo de los vehículos eléctricos utilizando la potencia instantánea ejercida [27]. Desarrolló un modelo de consumo de energía de EVs simples y precisos, en el cual, se puede calibrar fácilmente para vehículos específicos e implementarlo en un software de simulación de transporte y aplicaciones de conducción y enrutamiento ecológico en vehículos. A saber, el modelo propuesto captura la regeneración de energía del frenado instantáneo en función del nivel de desaceleración del vehículo.

Un sistema de frenado regenerativo de los vehículos eléctricos, permite la recuperación de energía durante el frenado. Específicamente, el motor eléctrico funciona como un generador enviando energía desde las ruedas del vehículo al motor eléctrico, que

luego se almacena en el sistema de batería. Estudios anteriores encontraron que los vehículos eléctricos eran mucho más eficientes cuando se conducían en rutas urbanas “intermitentes”, en comparación con las autopistas ininterrumpidas, porque el sistema de frenado regenerativo es capaz de regenerar energía. Lo contrario ocurre en los vehículos ICEV, donde ejercen energía adicional en la conducción urbana debido al frenado y las pérdidas térmicas. Los estudios empíricos han demostrado que los vehículos eléctricos consumen menos energía mientras conducen en ciclos de conducción urbana y son capaces de recuperar energía al frenar.

Con respecto a los resultados obtenidos por esta investigación en el consumo de energía, el error promedio, calculado como la diferencia entre los datos de campo y los valores de consumo estimados, para el rango de baja velocidad es 11.87 %, mientras que para el rango de alta velocidad es 3.2 %. El error promedio relacionado con los resultados del rango de baja velocidad, es mayor que el error relacionado con el rango de alta velocidad. Es importante señalar, que la distancia recorrida para el rango de baja velocidad de cada ciclo de conducción analizado es significativamente menor en comparación con la distancia recorrida para el rango de alta velocidad. Estas distancias son los “pesos” en la evaluación del error relacionado con el consumo medio en todo el ciclo de conducción. Por este motivo, el error medio de los seis ciclos de conducción analizados es del 5,86 %, por lo que es inferior al 11,87 %.

Por otro lado, los vehículos eléctricos, al igual que los convencionales, tienen varios sistemas auxiliares. Algunos de ellos, como la dirección asistida y los frenos asistidos, tienen un impacto menor en el consumo de energía y la autonomía del vehículo. Sin embargo, los sistemas de calefacción y aire acondicionado pueden tener un impacto dramático en el consumo de energía y la autonomía de los vehículos eléctricos.

El impacto de los sistemas auxiliares en el consumo energético de un vehículo es un tema de gran interés en los últimos años. Además, la evaluación de este impacto es muy importante para calcular el rango de vehículos eléctricos. Específicamente, cuanto mayor es el impacto de la carga del sistema auxiliar, mayor es el consumo de energía [Wh / km] y menor es la distancia disponible que se puede conducir con el vehículo

Variación año 2019/2009	REGIONES															
	XV	I	II	III	IV	V	XIII	VI	VII	XVI (*)	VIII	IX	XIV	X	XI	XII
Var. %	94,2%	71,8%	51,7%	71,3%	102,8%	86,4%	68,1%	92,9%	112,5%	154,6%	45,9%	100,3%	114,2%	104,1%	122,6%	69,4%
Var. Abs. (miles)	43,7	59,4	60,3	41,7	122,1	279,3	903,0	157,3	218,5	97,6	147,6	128,7	61,1	138,9	24,2	32,8

(*) La región XVI se conformó como tal a partir del año 2018, por lo cual en el año 2017 era provincia de la región del Biobío.

FUENTE: Instituto Nacional de Estadísticas

Figura 3.1: Cuadro 1: Evolución de vehículos en circulación, a 10 años, según región. Fuente: INE.

eléctrico. Un estudio del Laboratorio Nacional de Energía Renovable (NREL), concluyó que era posible una reducción en el rango de EV de hasta un 38 %. El estudio investigó el impacto de los sistemas auxiliares en el Nissan Leaf, utilizando datos recopilados de un estudio anterior. Particularmente, los datos se recopilaron en 7375 viajes utilizando vehículos Nissan Leaf con temperaturas exteriores registradas. La carga total del sistema auxiliar considerada incluye: calefactor y ventilador de cabina, calefactores de componentes (es decir, calefactor de batería), faros, dirección asistida, radio, etc. Se estableció un rango de temperatura de confort entre 15 y 24 ° C en la cabina.

El modelo propuesto se puede integrar fácilmente en el software de simulación de tráfico microscópico y en las aplicaciones de conducción ecológica y enrutamiento ecológico de vehículos y teléfonos inteligentes dada su formulación. El modelo logra estimar con precisión el consumo de energía, produciendo un error promedio del 5,9 % en relación con los datos empíricos. Además, el estudio encontró que el consumo de energía del tanque a las ruedas del vehículo eléctrico (Nissan Leaf) es un 82,5 % más bajo que el de su homólogo de vehículo convencional (Nissan Versa). La diferencia máxima se observa para el ciclo de conducción LA92 con una diferencia de 90,9 % y la diferencia mínima se observa para el ciclo de alta velocidad con una diferencia de 70,1 %. Estos resultados demuestran que en los ciclos de conducción urbana, existe la posibilidad de recuperar más energía debido a la presencia de varios episodios de frenado no agresivo en el ciclo de conducción. El estudio, por consiguiente, confirmó que la ventaja energética de los vehículos eléctricos en la conducción urbana podría afectar significativamente las elecciones de ruta de las personas y sacudir aún más la base de las teorías convencionales de asignación de tráfico [27].

En el cuadro 3.1 se muestra el aumento de vehículos en circulación en Chile a lo largo de 10 años. El parque vehicular nacional totalizó 5.718.409 unidades, de las cuales 97,9 % de vehículos son motorizados, aumentando 4,0 % a un año; por su parte los No motorizados crecieron en 2.385 unidades, equivalentes al 2,1 % restante. El parque automotriz en circulación total es mayor en 219.514 vehículos (4,0 % más), respecto al año 2018. Como consecuencia de esto, una investigación chilena de la Pontificia Universidad Católica de Chile [45], demuestra que la tecnología de los vehículos eléctricos puede contribuir a una caída decisiva de la contaminación del aire en Santiago y podría tener un papel importante en impulsar al sector del transporte público hacia una mayor sostenibilidad. La investigación aborda una solución al problema mencionado, al estudiar la conversión de taxis y colectivos (taxis públicos con rutas definidas) en vehículos eléctricos para ser utilizados en el sector de transporte público chileno. En efecto, el estudio da a conocer las mejoras que se pueden implementar en el sector del transporte público chileno para reducir las emisiones de CO_2 . Modelando la conversión de un Nissan V16, el vehículo taxi más común, de ICEV convencional a EV, y luego el estudio comparó ambas versiones económica y ambientalmente.

En el artículo [45] se analizaron los beneficios ambientales de los dos vehículos en diferentes modelos experimentales. Se compararon las emisiones de CO_2 de un Nissan V16 de gasolina tradicional y el Nissan V16 propuesto con baterías de iones de litio en dos escenarios: cuando el automóvil eléctrico está completamente cargado desde la red nacional, y cuando se carga con energía solar fotovoltaica.

Los investigadores lograron mejorar el voltaje máximo de una celda solar de telururo de cadmio (CdTe). El proceso de deposición de cadmio para la producción de células solares es muy rápido, lo que reduce los costos de producción. Las células de silicio representan actualmente el 90 % del mercado de células solares fotovoltaicas, pero es difícil reducir su coste de fabricación; por lo tanto, usar CdTe puede ser una posible solución. Además, entre todas las tecnologías solares, el telururo de cadmio tiene la huella de carbono más baja. Sus rendimientos continúan mejorando y tienden a ser competitivos con los del silicio cristalino. Gracias a la investigación, la tecnología solar

fotovoltaica se está volviendo más eficiente y más barata que los combustibles fósiles. Para mejorar la generación de energía de la estación de carga solar, sería más eficiente utilizar células solares CdTe.

También se han producido mejoras en la tecnología de las baterías. Se ha desarrollado una nueva generación de baterías de carbono que se pueden recargar en unos pocos segundos. Estas utilizan electrodos de nanotubos de carbono y pueden soportar hasta un millón de ciclos de carga y descarga sin pérdida de rendimiento (NAWA Technologies, 2017). No solo son más eficientes y potentes que las baterías de litio, sino que también son más seguras y respetuosas con el medio ambiente. Por esta razón, resulta conveniente utilizarlos en la industria del transporte y el vehículo. Además, con una mayor duración de la batería, es aún más apropiado utilizar sistemas de frenado regenerativo instalados en las ruedas para recuperar la energía cinética del frenado. Dicho sistema, puede cargar la batería al frenar y proporcionar energía extra al acelerar. Esto también reducirá las emisiones de CO_2 del transporte público si se implementa en vehículos de servicio público.

Para ello, en la investigación se arrojó luz sobre la dimensión económica para obtener el costo por kilómetro recorrido, obteniendo un valor de 0,182 USD / km para el modelo ICV y de 0,0336 USD / km para el modelo EV. Con esos resultados, lograron inferir que los vehículos eléctricos son más baratos; no obstante, se debe tener en cuenta el valor de la inversión de cambiar el ICE a un sistema de baterías. Además, se debe considerar la fuente de energía del Nissan V16 eléctrico, porque el objetivo es resaltar el potencial de reducción de emisiones de CO_2 .

El segundo análisis planteado, evaluó las emisiones de CO_2 de las dos tecnologías diferentes, basándose en una distancia de 150 km. Para el Nissan V16 ICV, se obtuvieron emisiones de 39.674 kg de CO_2 . Para la versión eléctrica, son relevantes dos tipos de emisiones. Primero, se encontró que se emitían 45 kg de CO_2 a lo largo de la distancia de 150 km cuando se cargaba el EV en la red chilena. En segundo lugar, se encontró que solo 4.5 kg de emisiones de CO_2 recorrían la misma distancia en el caso cuando se carga el EV en una estación de carga solar. Por lo tanto, concluimos que los vehículos

eléctricos no ayudan a reducir las emisiones de CO_2 cuando sus baterías funcionan con la red eléctrica chilena. Esto se debe a que la red contiene energía derivada de la quema de combustibles fósiles. Sin embargo, cuando se cargan con energía solar fotovoltaica, los vehículos eléctricos exhiben una caída significativa en las emisiones. Por lo tanto, los estudios futuros deberían centrarse en soluciones de almacenamiento de electricidad en baterías para permitir el suministro de electricidad solar durante períodos de baja radiación (es decir, en días nublados, por la noche y / o durante el invierno) [45].

Ahora bien, dentro de las investigaciones internacionales, en [38] se detalla un conjunto de estrategias avanzadas de asistencia a la conducción para reducir el consumo de energía de los vehículos eléctricos y, por tanto, aumentar su autonomía.

El consumo de energía para un viaje determinado se calcula en función de la pendiente de la carretera, el perfil de velocidad y las características del vehículo. El perfil de velocidad, se mide para permitir la estrategia de entrenamiento ecológico o se predice para la estimación del rango de conducción y la ruta ecológica. La optimización combinatoria se utiliza en las estrategias predictivas para encontrar la mejor ruta (la “ruta ecológica”) entre el origen y el destino seleccionados por el conductor, una vez que se asignan los costos de energía y tiempo a cada segmento de la carretera. La optimización dinámica (control óptimo), se utiliza para encontrar el perfil de velocidad óptimo a lo largo de un segmento de la carretera, bajo las mismas restricciones de límites que el perfil de velocidad realmente seguido por el conductor. Estas dos tareas de optimización podrían realizarse en paralelo para proporcionar al conductor tanto la información sobre la ruta más eficiente energéticamente, como la mejor manera de conducir en la ruta sugerida para minimizar el gasto de energía. Se supone que el conductor es el responsable último de la implementación de eco-route y eco-drive, con la ayuda de una interfaz hombre-máquina dedicada.

La estimación del consumo de energía, es el núcleo de cualquier estrategia de predicción de rutas y autonomía de conducción energéticamente eficiente. La predicción precisa del consumo de energía podría ser aún más desafiante en las redes de carreteras urbanas donde es más probable que surjan fenómenos inciertos (es decir, congestión

del tráfico, señalización de carreteras, etc.). En la literatura, se pueden encontrar varios modelos de consumo de energía para diferentes tipos de sistemas de propulsión y diferentes niveles de detalles, y se presenta una comparación en [46]. En general, los modelos microscópicos se consideran más precisos porque toman como entrada velocidades y aceleraciones instantáneas, que son difíciles de obtener sin una gran flota de vehículos de sonda que proporcionen datos de automóviles flotantes. De hecho, basándose en este tipo de modelos, es necesario adquirir una gran cantidad de datos de conducción para poder predecir un coste estadístico en cada segmento de carretera. Por otro lado, los modelos macroscópicos toman como entrada velocidades medias, que suelen ser más fáciles de obtener a través de los servicios web geográficos existentes. En lo que se refiere a los aportes de esta investigación, vemos los siguientes puntos:

- Se propone un modelo para la predicción del perfil de velocidad con el fin de ser representativo en las condiciones urbanas y capturar el impacto de los elementos de la red de carreteras. El cálculo del consumo energético derivado y del tiempo de viaje se ha validado mediante una campaña experimental realizada con un vehículo eléctrico.
- Un problema de enrutamiento electrónico bi-objetivo se resuelve en un gráfico de enrutamiento grande con pesos negativos. El uso de un gráfico adjunto permite considerar correctamente el consumo de energía debido a aceleraciones y maniobras (por ejemplo, movimientos de giro en una intersección), sin sacrificar la escalabilidad.
- Se propone un nuevo algoritmo de búsqueda dicotómico, que es capaz de buscar en tiempo real las soluciones Pareto-eficientes.
- El método de cálculo de la autonomía de conducción propuesto busca las rutas energéticamente óptimas (es decir, rutas ecológicas). El campo de prácticas resultante es menos conservador y más preciso, en comparación con las técnicas más modernas. Además, la estrategia permite una representación más precisa de la

autonomía energética en un mapa de carreteras, identificando también las zonas inaccesibles.

- La estrategia de eco-coaching presentada ha sido implementada mediante una RNA aproximando la solución óptima calculada analíticamente, e implementada en una aplicación de teléfono inteligente para uso en tiempo real durante las pruebas de conducción experimentales.
- Se ha llevado a cabo una amplia campaña de validación experimental con el fin de evaluar el potencial de ahorro de energía y la extensión del campo de prácticas del sistema de asistencia a la conducción propuesto. El rendimiento medido demuestra un beneficio real en términos de relación kilómetros / energía.

Finalmente, el artículo presentado ha mostrado un enfoque unificado para mejorar la autonomía de conducción de los vehículos eléctricos utilizando sistemas avanzados de asistencia a la conducción. Se utiliza un modelado detallado único del vehículo y el tren motriz para resolver dos problemas de optimización diferentes: una optimización combinatoria, el eco-routing y una optimización dinámica, el eco-driving. La mejor ruta entre el origen y el destino seleccionados por el conductor se encuentra modelando la red de carreteras como un gráfico adjunto dirigido y atribuyendo ponderaciones de energía y tiempo a cada arco de ruta. Lo mismo se sigue de este enfoque para proporcionar una predicción en tiempo real del rango de conducción mediante la búsqueda de las rutas de energía óptima en el gráfico que emana de la posición actual del vehículo.

El enfoque basado en gráficos, a su vez, se puede utilizar para proporcionar una predicción en tiempo real del rango de conducción del vehículo, lo que permite tener en cuenta las condiciones del tráfico en tiempo real y el impacto de la infraestructura vial. La velocidad del vehículo utilizada para avisar al conductor se calcula para pequeñas secciones del viaje resolviendo un problema de control óptimo minimizando el consumo de energía respetando las limitaciones. Además, permite dar una retroalimentación dinámica al conductor durante el viaje y asegurar el mismo tiempo de viaje. Estas estrategias se han probado experimentalmente utilizando interfaces hombre-máquina

dedicadas. Ambos logran ahorros significativos en el consumo de energía y permiten ajustar la compensación entre energía y tiempo. Se espera que la cadena de estrategia propuesta revele todo su potencial con vehículos total o parcialmente automatizados. Las estrategias de enrutamiento ecológico y conducción ecológica presentadas en este artículo podrían extenderse fácilmente a vehículos no eléctricos reemplazando el modelo de vehículo [38].

Por último, en [47] se amplía el marco del modelo mesoscópico convencional basado en VSP para estimar el consumo de energía de los vehículos eléctricos en condiciones de conducción del mundo real, teniendo por objetivo principal ayudar en el servicio inteligente para vehículos eléctricos basado en las velocidades medias. En particular, se parte de un análisis de las características de consumo de energía, que resultan fundamentales para proporcionar información sobre la relación entre el consumo de energía y los parámetros de conducción del vehículo desde una vista estadística. Luego, con el fin de incluir una base física al marco del modelo, las demandas de potencia requeridas por los componentes principales del EV se analizan sobre la base de la teoría de la dinámica mecánica y se representan mediante la variable de Potencia Específica del Vehículo (VSP por sus siglas en inglés) para reflejar el efecto que tienen los diferentes niveles de velocidad de crucero y aceleración en el consumo de energía del vehículo. Basándose en un enfoque de agrupamiento, se desarrolla un marco de modelo mesoscópico, que se caracteriza por una mayor precisión y una menor intensidad de datos.

La plataforma experimental aplicada para obtener las mediciones de campo, consta de tres sistemas principales: vehículo probado, terminal de datos portátil y registrador de datos a bordo. Dichos sistemas se utilizaron para medir los parámetros de conducción del vehículo, información de posición, y estado de la batería, segundo por segundo. Específicamente, la tasa de consumo de energía instantánea se calculó como el producto de la corriente y el voltaje en tiempo real.

En la investigación, se utiliza un enfoque de regresión lineal múltiple para calibrar el propuesto modelo de factor de consumo de energía mesoscópico a través del software SPSS. El estudio tiene en cuenta las características de consumo de energía de los

vehículos eléctricos mediante la introducción del factor de frenado regenerativo.

Los resultados de la calibración del modelo propuesto indican que el consumo de energía de los vehículos eléctricos es sensible a la velocidad promedio de viaje, y una mejor condición del tráfico es significativa para reducir el consumo de energía de los vehículos eléctricos. Además, el modelo propuesto se valida con mediciones de campo. Los resultados de la validación conciden con los datos de consumo de energía medidos en condiciones reales de conducción.

El modelo propuesto hace que la práctica de modelado sea rentable y precisa, y hace posible estimar el consumo de energía a través de modelos tradicionales de cuatro pasos o sistemas de información de tráfico actuales, en los que la velocidad de viaje basada en enlaces está disponible. Más importante aún, el modelo propuesto puede proporcionar una base teórica y soporte técnico para la construcción de infraestructura relacionada con los vehículos eléctricos (por ejemplo, planificación del diseño de la infraestructura de carga), y puede incorporarse al sistema de servicio inteligente de vehículos eléctricos para proporcionar servicios de estimación de alcance de crucero, ruta ecológica, planificación y programación de carga. Los logros obtenidos en la investigación, pueden contribuir a la promoción de los vehículos eléctricos y realizar aún más el desarrollo sostenible del sistema de transporte urbano [47].

Capítulo 4

Desarrollo de la solución

4.1. Modelo para el consumo instantáneo de potencia

En el Capítulo 3, se ha podido corroborar la existencia de distintos factores relevantes a la hora de estimar el consumo energético de un automóvil eléctrico. Para incluir datos de topografía satelital, se debe elegir un modelo a priori, enfocado principalmente en el gradiente de altura que existe entre un punto de origen y destino del EV.

Para estos fines, se ha seleccionado el modelo planteado por Romero, Auat et al. [12] basado en la fuerza de tracción, el cual se describe a continuación.

La fuerza de tracción se calcula en base a la ecuación 4.1; donde m corresponde al peso del vehículo medido en el punto de contacto entre el terreno y la rueda; a es la aceleración; ρ el coeficiente de roce aerodinámico; g la aceleración gravitacional; v la velocidad de tracción del vehículo; f_{rl} el coeficiente de resistencia a la rodadura y θ el ángulo del terreno [12, 35]. Notar que la Ec. 4.1 aplica solamente a los EVs con dirección mecánica y ruedas no deformables. El consumo de potencia puede ser estimado como muestra la Ec. 4.2. La potencia drenada desde las baterías se puede calcular como $P_{out} = \eta P_{in}$, donde η es la eficiencia del motor y puede ser obtenida desde la Ec. 4.3, donde I es la corriente en Amperes y R es la resistencia asociada a todos los periféricos –e.g., luces, potencia para el computador a bordo y sensores– y la

disipación de potencia en los circuitos.

$$f_{tr} = ma + \rho v^2 + f_{rl}mg \cos \theta + mg \sin \theta \quad (4.1)$$

$$P_{out} = f_{tr}v \quad (4.2)$$

$$\eta = \frac{P_{in} - I^2R}{P_{in}} \quad (4.3)$$

Notar que m , a , θ y v son variantes en el tiempo. Considerando que el IPC es en realidad la corriente, I , por el voltaje, V , de la salida de las baterías, entonces:

$$\begin{aligned} \text{IPC} &= \eta f_{tr,t} v_t \\ &= \eta (m_t a_t + \rho_t v_t^2 + f_{rl,t} m_t g \cos \theta_t \\ &\quad + m_t g \sin \theta_t) v_t \\ &= V_t I_t \end{aligned} \quad (4.4)$$

donde el sufijo t representa el tiempo.

Adicionalmente, el término de eficiencia η puede variar en el tiempo, debido a su dependencia intrínseca a la temperatura. A pesar del hecho de que una formulación cerrada para el IPC puede ser alcanzada como se muestra en la Ec. 4.4 y en terreno, el IPC muestra un comportamiento con componentes estocásticos. Sin embargo, para este trabajo, se considerará una temperatura constante para enfatizar las diferencias en el gradiente de altura.

Como el foco de esta investigación es determinar el IPC utilizando solamente información de satélite, de la Ec. 4.4 podemos ver que la información de elevación obtenida desde satélite, puede ser utilizada para inferir θ , la elevación del terreno. Adicionalmente, vamos a restringir nuestro análisis solamente a calles pavimentadas y por lo tanto, f_{rl} puede ser calculado de antemano (ver [12]). Esto último, no contradice la hipótesis de este trabajo, dado que si se van a utilizar otros terrenos, la información de satélite puede proveer el tipo de terreno de la calle para el cálculo del IPC. Finalmente, como el IPC tiene relación directa con la velocidad del vehículo, se utiliza la velocidad esperada del EV para estimar el IPC (y por tanto, descartamos la aceleración en la Ec. 4.4).

Al descartar la aceleración, se asume una potencia constante entre intersecciones, que puede ser considerada la potencia promedio por tramo. Dicha potencia, se puede multiplicar por el tiempo de recorrido. Con esto, obtendremos una cuota superior para el consumo energético del vehículo. Finalmente, se asume g constante y m conocido.

El diagrama de funcionamiento del algoritmo desarrollado se presenta en la figura 4.1.

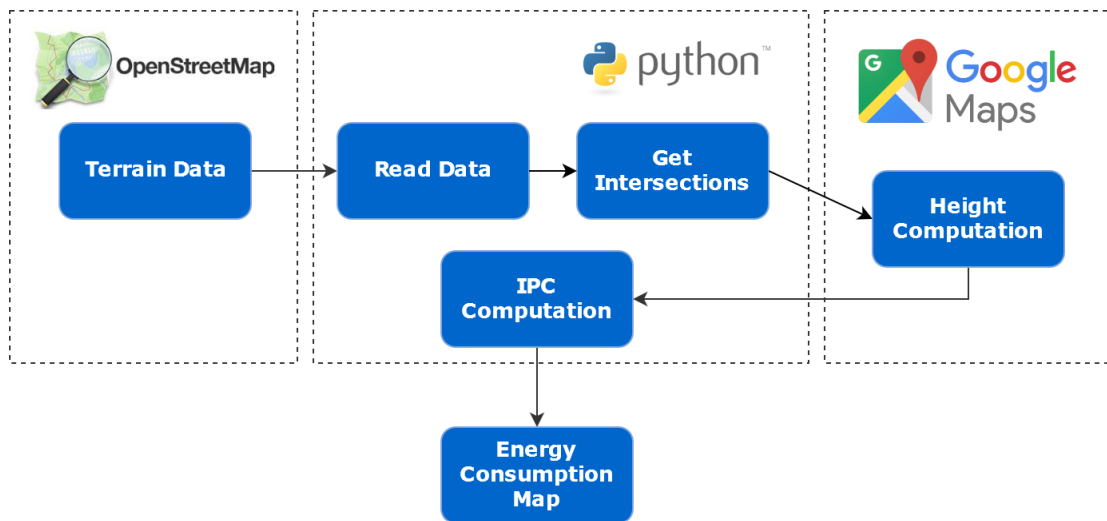


Figura 4.1: Diagrama de la solución planteada

4.2. Estimación del IPC basada en Satélite

En esta sección, se presenta la metodología para la estimación del IPC de un EV desde información satelital.

1. En primer lugar, se obtiene la información topográfica de una ciudad seleccionada a través de plataformas en línea (en nuestro caso, se utiliza GoogleMaps y OpenStreetMap), desde la cual, se puede extraer la información de posición y elevación de un punto dado. Se extrae la información de calles tal como se puede apreciar en la figura 4.2.
2. Luego, se determinan los cruces de calle, i.e. nodos. Después, se consulta la altura

de los puntos mediante una API. En este punto, cada nodo tiene tres atributos, x e y , su posición en el mapa 2D, y z , su elevación respecto al nivel del mar.

3. Dos nodos son consecutivos (o adyacentes), si pertenecen a la misma calle y son los más cercanos en esa calle. Para determinar la relación entre todos los nodos, i.e., su distancia, orientación respecto a los otros, y adyacencias, se ejecuta el Algoritmo 1, cuyo tiempo de ejecución es $O(n^2)$, donde n es el número de nodos considerados. El Algoritmo 1 otorga la distancia entre dos nodos cualesquiera pertenecientes a la misma calle, y marca como adyacentes a los dos nodos más cercanos de la calle (o 1 nodo consecutivo dependiendo de la orientación observada).
4. Una vez que se han calculado todas las distancias y adyacencias, se calcula el IPC esperado. Para esto, como se mencionó anteriormente, se asume la masa del vehículo (como constante), el coeficiente de resistencia a la rodadura del pavimento, y utilizamos la velocidad urbana máxima (en Chile, 50 Km/h), descartando la aceleración del EV.

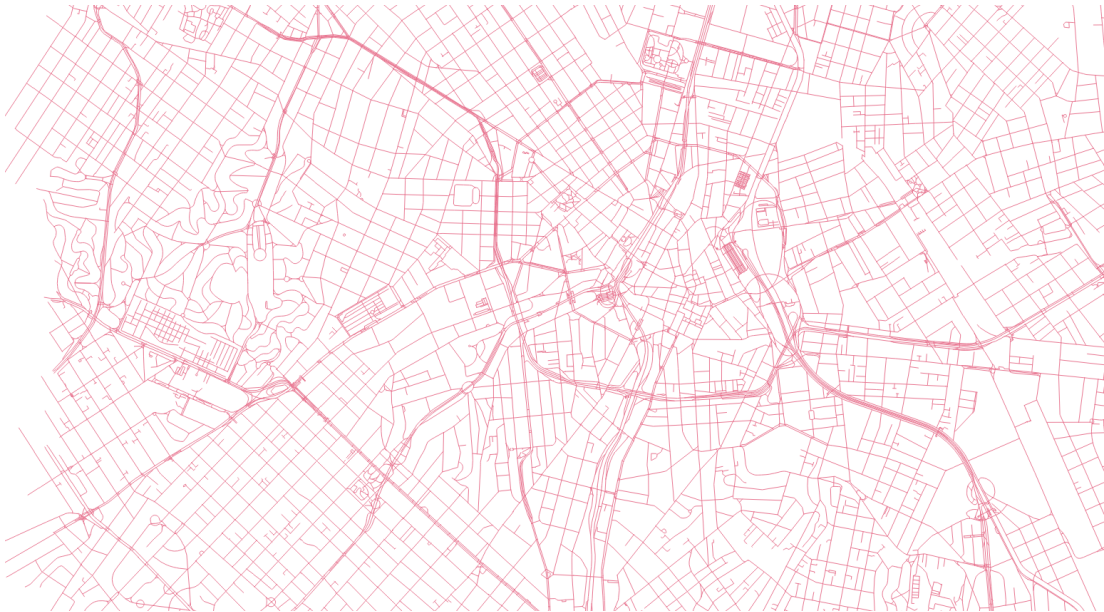


Figura 4.2: Intersecciones. Se extrae la información de rutas de la zona de Sao Paulo desde OSM.

Con el procedimiento anterior, se obtiene el mapa de consumo energético. El Algoritmo 1 a continuación muestra el enfoque utilizado para determinar las adyacencias y distancias desde un conjunto de nodos.

Algorithm 1 Algoritmo para el cálculo de distancia y adyacencia entre nodos.

Sea N el número de nodos a considerar. Cada nodo tiene tres atributos: x , y , z .

for $i = 1 : N$ **do**

Sea $W(n_i)$ el conjunto de calles que contienen al nodo n_i

Sea $AdjDict$ un diccionario (vacío) con todas las calles compartidas entre n_i and other nodes.

for $j = 1 : N$ **do**

if $i == j$ **then**

$D_{ij} = 0$ {Mismo Nodo}

$A_{ij} = 0$ {No es Adyacente}

else

$D_{ij} = \text{DistanciaSatelital}(n_i, n_j)$

Sea $W(n_j)$ el conjunto de calles de n_j

Sea $C = W(n_i) \cap W(n_j)$

if $C \neq \emptyset$ **then**

Sea S_{ij} la orientación de n_j respecto a n_i

for each $c \in C$ **do**

Append j , D_{ij} , S_{ij} to $AdjDict$ with key c

end for

else

$A_{ij} = 0$ {No es Adyacente}

end if

end if

end for

for each w in $AdjDict$ **do**

Sea $AdjNodes = 1$ si $S(w)$ son todos iguales, de lo contrario $AdjNodes = 2$.

Sea R_I el conjunto de índices "j" de los $AdjNodes$ nodo(s) más cercano(s) en la calle w .

$A_{i,R_I} = 1$ {Adyacente}

end for

50 **end for=0**

Sea N el número de nodos a considerar. El primer *for*-loop interno, en las líneas (5)-(22), realiza una comparación entre el nodo de origen i y todos los nodos de destino j , determinando la distancia satelital entre ellos, y añadiendo los nodos de destino a un diccionario de calles. De esta forma, en cada entrada del diccionario se encuentran los nodos compartidos para cada calle. El segundo *for*-loop interno, en las líneas (23)-(27), evalúa si los nodos que comparten una calle con el nodo de origen i tienen todos la misma orientación, en cuyo caso n_i tiene solo un nodo adyacente en la calle actual, debido a que corresponde a un nodo de fin de calle. Posteriormente, el algoritmo marca como adyacente a los nodos más cercanos que comparten esa misma calle. Una vez calculada la matriz de adyacencia, el consumo energético es estimado para viajes entre cada par de nodos adyacentes, utilizando el modelo definido en la Ec. 4.4. Para este cálculo, θ_t se calcula basado en la diferencia de altura y la distancia satelital entre dos nodos adyacentes:

$$\theta_t = \arctan \left(\frac{|H(n_j) - H(n_i)|}{D_{ij}} \right) \quad (4.5)$$

En los modelos utilizados, y para las ciudades analizadas, θ oscila entre 0 y 40°, por lo que $\cos \theta$ es cercano a 1. Utilizando esta información, y para poder visualizarlo en el mapa, se asigna un gradiente de color a cada sección de calle, indicando un nivel de potencia para cada tramo.

Capítulo 5

Resultados

A continuación, se muestra la configuración experimental utilizada en este trabajo y los experimentos llevados a cabo para validar nuestra propuesta. En particular, las pruebas se realizaron en Valparaiso, Chile. Una vez validada, probamos nuestra metodología utilizando la información topográfica de Madrid (España), Sao Paulo (Brasil) y Berlin (Alemania).

5.1. Configuración experimental

Para probar nuestro enfoque, utilizamos el automóvil eléctrico "Twizy", comercializado por Renault, como se muestra en la Fig. 5.1. El automóvil, posee sensores de voltaje y de corriente conectados directamente a sus baterías. Dichos sensores, son utilizados para validar la estimación del IPC (ver [48]). Adicionalmente, y con la intención de validar nuestros resultados, el auto posee un sistema de cinemática en tiempo real (RTK por sus siglas en inglés) en la parte superior, para geo-posicionamiento en tiempo real. Un computador a bordo registra la información de los sensores. La tabla 5.1 muestra las especificaciones técnicas del automóvil, los sensores y el sistema computacional embebido.



Figura 5.1: Vehículo eléctrico Twizy (de Renault) usado en este trabajo.

Cuadro 5.1: Características del Twizy EV

Name	Description
Twizy (by Renault)	
Motor	4kW
Max. Speed	80km/h
Autonomy	80-100 km
Navcom SF-3040	
Accuracy RTK (<40km)	Horizontal: 1cm + 0.5ppm Vertical: 2cm + 1ppm
Data Rate	Selectable between 1Hz, 5Hz and 10Hz
Communication	Serial port through USB
Voltage and Current Sensor	
Voltage Range	From 15V to 80V
Current Range	From -300A to 300A
Precision	12 bits ADC
Sampling Rate	800 Hz Average
Communication	Serial port through USB
Nvidia Jetson TX2	
GPU	NVIDIA Pascal™, 256 CUDA cores
CPU	HMP Dual Denver 2/2 MB L2 + Quad ARM® A57/2 MB L2
Memory	8 GB 128 bit LPDDR4 59.7 GB/s

5.2. Consumo energético para un tramo

En primer lugar, se programó el algoritmo para otorgar la elevación entre tramos para un solo viaje completo entre origen y destino. Como se puede apreciar en la figura 5.2, el algoritmo logra comunicarse correctamente con la API de GoogleMaps para obtener la información de elevación de cada esquina, y representarla gráficamente en un gradiente de color.

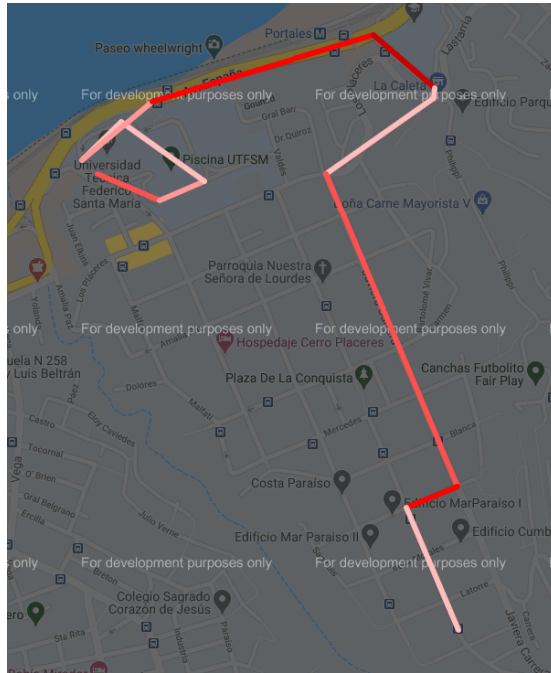


Figura 5.2: Mapa de consumo para un viaje único entre origen y destino.

5.3. Mapa de consumo

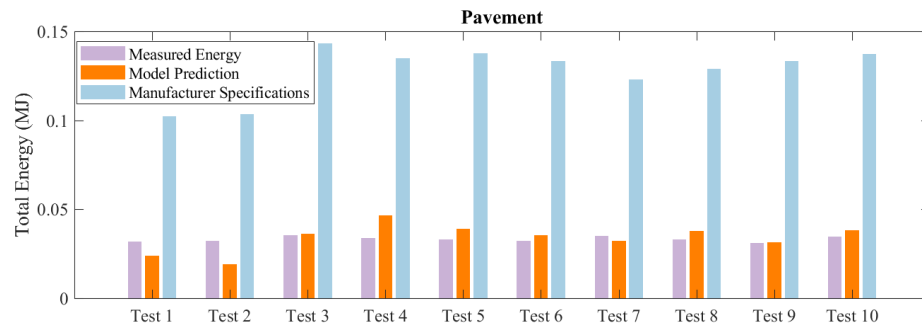
Para probar nuestro enfoque en la ciudad de Valparaíso, aplicamos el algoritmo 1 a la información topográfica otorgada por Google Maps de una porción de la ciudad, como se muestra en la Fig. 5.3, donde se muestra el mapa de consumo energético esperado, junto a la Fig. 5.4 en donde se han invertido los colores para apreciar mejor las diferencias de altura.

Luego, se recorrieron alrededor de 50 km (a través de las calles mostradas en la Fig. 5.3) y registrado el IPC directamente de las mediciones de las baterías del EV, utilizando sus sensores de corriente y voltaje, dividido en 40 pruebas distintas, con velocidades oscilando entre cero y la velocidad límite en la ciudad (40 Km/h). Fig. 5.5a muestra diez pruebas aleatorias con lo siguiente: la energía consumida por el vehículo, que se deriva del IPC medido directamente en las baterías (en morado), el IPC estimado por nuestro enfoque (en naranja), y el IPC de acuerdo a las especificaciones del fabricante (en cian). Como se puede ver, nuestro enfoque sigue más de cerca al IPC

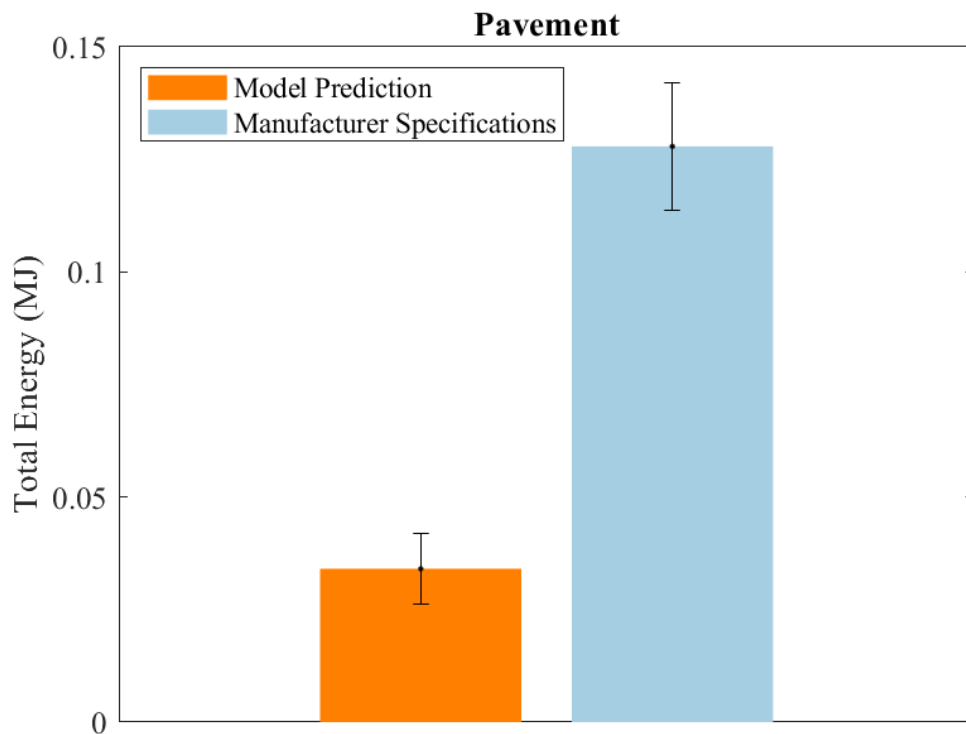
real, comparado con la información del fabricante. La Fig. 5.5b muestra la media y la varianza de las 40 pruebas. Es de interés notar que nuestro enfoque provee una estimación más precisa del IPC (utilizando los mapas de consumo) comparado a lo que provee el fabricante. En promedio, nuestro enfoque mostró ser aproximadamente 267 % más preciso que la estimación de IPC del fabricante. Este último resultado se obtuvo luego de los 40 km de pruebas.



Figura 5.3: Mapa de consumo para un sector completo de la ciudad de Valparaíso.



(a)



(b)

Figura 5.5: Pruebas de campo del enfoque de estimación de IPC. (a) muestra diez pruebas diferentes realizadas en el mapa mostrado en la Fig. 5.3, donde las barras moradas representan el IPC real medido desde las baterías del EV; las barras naranjas corresponden al IPC estimado por nuestro enfoque y las barras cian, corresponden al IPC según las especificaciones del fabricante. (b) muestra la media y la varianza de 40 pruebas realizadas.

5.4. Casos de Sao Paulo, Berlin y Madrid

Esta sección busca mostrar la aplicabilidad de nuestro enfoque a otras ciudades. Por lo tanto, se ha escogido Sao Paulo (Brasil) debido a sus características topográficas particulares. Adicionalmente, se han construido mapas de consumo para Berlín (Alemania) y Madrid (España) mostrados en la Fig. 5.6.

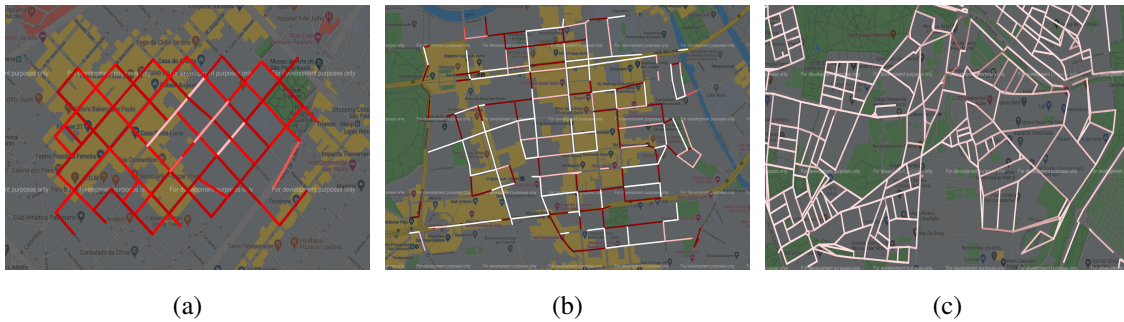


Figura 5.6: Resultados de capitales mundiales: (a) Sao Paulo, (b) Berlin, (c) Madrid. La información topográfica se extrajo desde Google Maps.

Como se puede apreciar, se ha aplicado la metodología para obtener los mapas de consumo energético de tres grandes capitales en el mundo, mostrando la factibilidad y aplicabilidad del enfoque adoptado.

Capítulo 6

Conclusiones

En este trabajo de tesis se presentó una metodología para la construcción de mapas de consumo energético para vehículos eléctricos, basado en la estimación de IPC a partir de información satelital. Para este fin, se utilizó el modelo de IPC combinado con información topográfica proveniente del satélite, y basado en la fuerza de tracción del motor y el gradiente de altura entre dos intersecciones de calles. En primera instancia, se probó y validó el modelo en la ciudad de Valparaíso (Chile) y posteriormente, se extendió el análisis a ciudades mundialmente conocidas como Sao Paulo (Brasil), Madrid (España) y Berlín (Alemania). Durante las pruebas de validación, el enfoque adoptado mostró ser hasta un 70 % más preciso en la estimación del IPC, comparado a la información provista por el fabricante, y utilizando sensores de corriente y voltaje como datos verdaderos.

Las dificultades presentes en la estimación del consumo energético de automóviles eléctricos, fueron estudiadas y comparadas, variando entre los distintos enfoques que se han adoptado a lo largo de las últimas décadas. El enfoque adoptado en esta tesis forma parte de los enfoques “a priori”, es decir, que realizan una prognosis del consumo a partir de un modelo teórico y no desde los datos experimentales. Teniendo esto en consideración, la existencia de factores no incluidos en el modelo, determina el nivel de precisión con que se predice el consumo. A pesar de no considerar dichos factores,

se logra una eficiencia considerablemente mayor a los enfoques experimentales.

Además de probar la contribución del trabajo realizado, se pudo apreciar durante el estudio del tema, que la incorporación de vehículos eléctricos a la flota de transporte global no depende únicamente de factores tecnológicos, sino que también han tenido un rol muy relevante los factores económicos y políticos que han propiciado un acelerado desarrollo en la última década, en comparación a la década anterior, en la cual su crecimiento fue notablemente inferior. Esto nos lleva a pensar que aún quedan muchos esfuerzos por hacer en cuanto a la educación y promoción de formas de transporte más económicas y amigables con el medioambiente. En esta línea, el estudio aquí realizado puede servir como un insumo relevante a la hora de tomar decisiones para la planificación urbana en el despliegue de estaciones de carga y su impacto en la red eléctrica. Para esto es necesario que los intereses de los usuarios se vean representados a la hora de establecer políticas de fomento y regulación de estos medios de transporte, de modo que permitan mejorar la autonomía final de los vehículos y reduzca los costos para proveedores y usuarios de este tipo de vehículos.

Sin duda este es un tema pendiente en nuestro país en el cual se debe seguir avanzando, tomando como ejemplo los casos de China y Noruega, entre otros, que han permitido acelerar el crecimiento de la planta automotriz eléctrica, con los subsecuentes beneficios para la población derivados de la reducción de la contaminación y efectos producidos por la emisión de gases contaminantes.

Como trabajo futuro, se propone utilizar el algoritmo como “backend” para desarrollar una interfaz o webapp que permita desplegar en tiempo real la prognosis de consumo en cierta área, camino, o ciudad, entregando una herramienta de uso libre que favorezca el uso de este tipo de automóviles.

Bibliografía

- [1] E. Baldwin S. Carley. Global expansion of renewable energy generation: An analysis of policy instruments. *Environmental and Resource Economics*, 68(2):397–440, 2017.
- [2] R. Narayan S. Anjum, A. Rai. Policy impact on generation of renewable energy. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 594, 2019.
- [3] H. C. Frey B. M. Graver. Quantifying the microscale activity, energy use, and emissions of a plug-in hybrid electric vehicle based on in-use data. *AWMA, Proceedings, 103rd Annual Conference and Exhibition, Air & Waste Management Association*, 2010.
- [4] Q. Wen P. Xiao. Environmental impact analysis of the whole life cycle of pure electric vehicles. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*, 300, 2019.
- [5] E. Iglesias. Demand response and renewable energy integration in the chilean electricity market. *Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile*, 2018.
- [6] L. Ramirez et al. Assessment of on-site steady electricity generation from hybrid renewable energy systems in chile. *Applied Energy*, 250:397–440, 2019.
- [7] J. F. Dunn S. I. Ehrenberger. An international dialogue about electric vehicle deployment to bring energy and greenhouse gas benefits through 2030 on a well-

- to-wheels basis. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 74:245–254, 2019.
- [8] K. Y. Hee. A global analysis and market strategy in the electric vehicle battery industry, 2014.
- [9] T. Uemura. Pre-estimation of electric vehicle energy consumption on unfamiliar roads and actual driving experiments. *Proceedings of the VLDB 2019 PhD Workshop*, 2019.
- [10] International Energy Agency. Global ev outlook 2020 - analysis.
- [11] Ali Elkamel Ahmadian, Behnam Mohammadi-ivatloo. *Electric vehicles in energy systems: Modelling, Integration, Analysis, and Optimization*. Ali, Springer Nature Switzerland, 2020.
- [12] F. Auat J. Romero Schmidt, J. Eguren. Profiling the instantaneous power consumption of electric machinery in agricultural environments: An algebraic approach. *MDPI Sustainability*, 11:21–46, 2019.
- [13] Ministerio de Energía. Estrategia nacional de electromovilidad un camino para los vehículos eléctricos, 2017.
- [14] Rajoo S Martinez-Botas R Esfahanian V Mahmoudzadeh A, Pesiridis A. A review of battery electric vehicle technology and readiness levels. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 78:414–430, 2017.
- [15] IEA. Promoting vehicle efficiency and electrification through stimulus packages, 2020.
- [16] Xuerong Li Yi Hu, Ziyi Wang. Impact of policies on electric vehicle diffusion: An evolutionary game of small world network analysis. *Journal of Cleaner Production*, 265, 2020.

- [17] Ministry of Transport and Communications. Gratis med elbil på riksvegferjer (in norwegian), 2008.
- [18] European Investment Bank. Eib to provide eur 220m to nissan for production of the 100 % electric nissan leaf and advanced lithium-ion batteries in sunderlan, 2011.
- [19] Commission of the European communities. Setting emission performance standards for new passenger cars as part of the community's integrated approach to reduce co2-emissions from light duty vehicles, 2007.
- [20] Nilsson M. Nykvist, B. Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. *Nature Climate Change*, 5:329–332, 2015.
- [21] Norwegian Climate Policy. Report no. 21 to the parliament (2011–2012), recommendation from the ministry of the environment, 2012.
- [22] Climate policy settlement in Parliament. Innstilling fra energi- og miljøkomiteen om norsk klimapolitikk, 2012.
- [23] Kolbenstvedt M. Figenbaum, E. Competitive electric town transport. main results from compett – an electromobility+ project. *TØI report 1422, Oslo, Transportøkonomisk institutt*, 2015.
- [24] Constantine Samaras-Zhen (Sean) Qian Avi Chaim Mersky, Frances Sprei. Effectiveness of incentives on electric vehicle adoption in norway. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 46:56–68, 2016.
- [25] T.Muneer M.L.Kolhe A.Doyle A.Girardand, F.Simon. Case study for chile: the electric vehicle penetration in chile. *Electric Vehicles: Prospects and Challenges*, pages 245–285, 2017.

- [26] P.H. Bauer Z. Yi. Energy consumption model and charging station placement for electric vehicles. *Proceedings of the 3rd International Conference on Smart Grids and Green IT Systems*, pages 150–156, 2014.
- [27] K. Ahn Ch. Fiori. Power-based electric vehicle energy consumption model: Model development and validation. *Applied Energy*, 168:257–268, 2016.
- [28] S. Etxebarria R. Milligan. Driven performance of electric vehicles in edinburgh and its environs. *MDPI Energies*, 2019.
- [29] T. Yamamoto K. Liu. Impact of road gradient on energy consumption of electric vehicles. *Transportation Research Part D*, 54:74–81, 2017.
- [30] Warren Vaz et al. Electric vehicle range prediction for constant speed trip using multi-objective optimization. *Journal of Power Sources*, 275:435–446, 2015.
- [31] Marco B.Luziab Margarida C.Coelhoa. Evaluating the energy performance of a suv hybrid electric vehicle. *Transportation Research Part D*, 15(8):443–450, 2010.
- [32] J. Wang K. Liu. Exploring the interactive effects of ambient temperature and vehicle auxiliary loads on electric vehicle energy consumption. *Applied Energy*, 227:324–331, 2018.
- [33] G.F. Naterer N. Javani, I. Dincer. Thermodynamic analysis of waste heat recovery for cooling systems in hybrid and electric vehicles. *Energy*, 46(1):109–116, 2012.
- [34] G. Wu X. Qi. Data-driven decomposition analysis and estimation of link-level electric vehicle energy consumption under real-world traffic conditions. *Transportation Research Part D*, 64:36–52, 2018.
- [35] R. Galvin. Energy consumption effects of speed and acceleration in electric vehicles: Laboratory case studies and implications for drivers and policymakers. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 53:234–248, 2017.

- [36] D. Zhao H. Wang. Network-level energy consumption estimation for electric vehicles considering vehicle and user heterogeneity. *Transportation Research Part A*, 132:30–46, 2020.
- [37] J. J Klemes Y. Van Fan. Minimising energy consumption and environmental burden of freight transport using a novel graphical decision-making tool. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 114:109–135, 2019.
- [38] A. Sciarretta L. Thibault, G. De Nunzio. A unified approach for electric vehicles range maximization via eco-routing, eco-driving, and energy consumption prediction. *IEEE Transactions on Intelligent Vehicles*, 3(4), 2018.
- [39] Yamamoto T-Morikawa T. bo Wang J, Liu K. Improving estimation accuracy for electric vehicle energy consumption considering the effects of ambient temperature. *Energy Procedia 2017;105:2904–9 . 8th International Conference on Applied Energy, ICAE, Beijing, 2016.*
- [40] Cabrera A Kitch WA Wu X, Freese D. Electric vehicles’ energy consumption measurement and estimation. *Transportation Research Part D*, 78:52–67, 2014.
- [41] Fukunaga K Nakajima M Yamada H Moriguchi M Yano J, Nishimura S. Estimation of ev power consumption and route planning using probe data. *Transportation Research Part D*, 34:52–67, 2015.
- [42] Jazar R. *Advanced dynamics*. Wiley, 2011.
- [43] F. Auat J. Romero Schmidt. Prognosis of the energy and instantaneous power consumption in electric vehicles enhanced by visual terrain classification. *Computers Electrical Engineering*, 78:120–131, 2019.
- [44] José Aguado Sebastián de la Torre Javier Contreras Francisco Manríquez, Enzo Sauma. The impact of electric vehicle charging schemes in power system expansion planning. *Applied Energy*, 262, 2020.

- [45] François Simon Javier Ordoñez Aymeric Girard, Claudio Roberts. Solar electricity production and taxi electrical vehicle conversion in Chile. *Journal of Cleaner Production*, 210:1261–1269, 2019.
- [46] O. Andersen C. S. Jensen K. Torp C. Guo, B. Yang. Ecomark 2.0: Empowering eco-routing with vehicular environmental models and actual vehicle fuel consumption data. *Geoinformatica*, 19:567–599, 2015.
- [47] Enjian Yao Rui Zhang. Mesoscopic model framework for estimating electric vehicles' energy consumption. *Sustainable Cities and Society*, 47, 2019.
- [48] M. Michałek J. Prado and F. Auat. Machine-learning based approaches for self-tuning trajectory tracking controllers under terrain changes in repetitive tasks. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 67:63–80, 2018.