



UNIVERSIDAD
DE PIURA

FACULTAD DE INGENIERÍA

Diseño e implementación de un modelo de demanda de energía de buses eléctricos para transporte público local

Tesis para optar el Título de
Ingeniero Mecánico - Eléctrico

**Josué Renato Gómez Saavedra
Yerson Miguel Ojeda Córdova**

**Asesor:
Mgtr. Ing. Marcoantonio Víctor Álamo Viera**

Piura, marzo de 2023

NOMBRE DEL TRABAJO

Tesis_Gómez_-_Ojeda_PTT_IME.pdf

AUTOR

Josué_Yerson Gómez_Ojeda

RECUENTO DE PALABRAS

12089 Words

RECUENTO DE CARACTERES

64623 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS

63 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO

2.2MB

FECHA DE ENTREGA

Mar 8, 2023 7:16 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME

Mar 8, 2023 7:17 PM GMT-5

● 5% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 4% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 2% Base de datos de trabajos entregados
- 1% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Coincidencia baja (menos de 10 palabras)
- Material citado



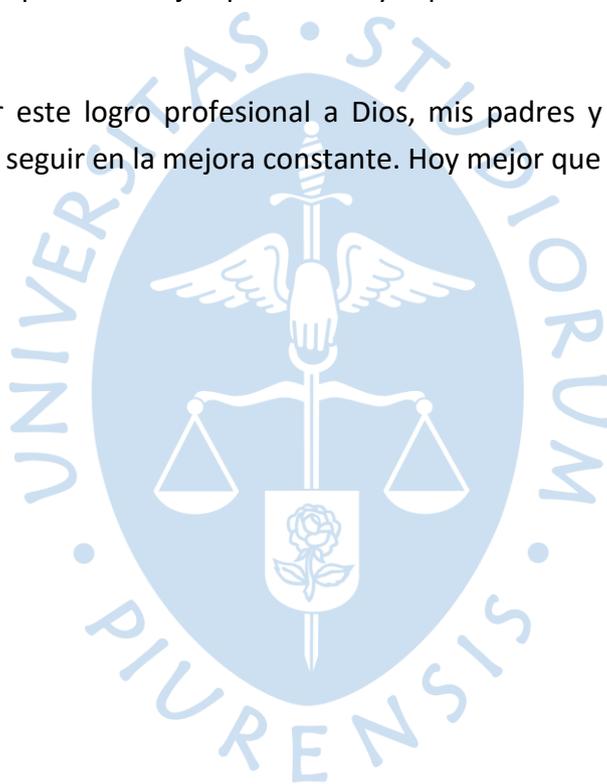
Dedicatoria

Esta investigación se la dedico ante todo a Dios por permitirme disfrutar y tener a mi familia, gracias a mis padres por su apoyo incondicional y educación en valores y finalmente gracias a mis hermanos por ser mi ejemplo de vida y superación.

Renato.

Quiero dedicar este logro profesional a Dios, mis padres y hermanos que me han apoyado y motivado a seguir en la mejora constante. Hoy mejor que ayer.

Yerson.





Resumen

Debido al cambio climático relacionado a la alta emisión de gases de efecto invernadero, cada día se buscan nuevas formas de disminuir el consumo de combustibles fósiles. La presente investigación nos ofrece la oportunidad de empezar con una serie de estudios relacionados con el reemplazo de flotas de buses convencionales en rutas de transporte público local a buses eléctricos de batería, ya que existe muy poca iniciativa para implementar este tipo de tecnologías.

El hecho de priorizar la electrificación del transporte público radica en que los perfiles de conducción, los rangos y las características de la ruta son bien conocidos y claros. Es por ello, que se ha propuesto una metodología de análisis energético mediante el desarrollo de un modelo que permita representar la dinámica del vehículo.

El modelo desarrollado permite analizar el estado de carga de la batería y su consumo energético a lo largo de una ruta de estudio. No se ha desarrollado un perfil de conducción específico de la ruta, sino que se ha optado por adaptar datos ya definidos de fuentes confiables.

La ruta Sullana – Piura recorrida por la empresa de transporte EPPO S.A. consta de 35,39 km entre sus estaciones. El bus escogido para el análisis será el BYD K9FE; se ha escogido esta marca en particular debido a su gran implementación en flotas de buses en países latinoamericanos. Para el recorrido en mención se obtuvo un total del 30,3 % de descarga al cual le correspondía un consumo energético de 87,8 kWh.

Analizando el caso en el que el mismo bus tenga que recorrer el máximo número de salidas que la empresa pone a disposición en cada una de sus terminales. A pesar de considerar los intervalos de carga de la batería, el bus escogido solo pudo completar 9 de las 11 salidas.

Finalmente, se dan pautas de las futuras investigaciones necesarias que se pueden llegar a realizar para alcanzar la implementación de flotas de buses eléctricos y promover el desarrollo tecnológico del país.



Tabla de contenido

Introducción	13
Capítulo 1 Identificación del problema a resolver	15
1.1 Justificación	15
1.1.1 Panorama mundial de los buses eléctricos	16
1.1.2 Panorama de los buses eléctricos en Latinoamérica	18
1.2 Antecedentes.....	20
1.3 Objetivos.....	22
1.3.1 Objetivo general	22
1.3.2 Objetivos específicos.....	22
1.4 Metodología	22
Capítulo 2 Modelo de demanda energética.....	25
2.1 Descripción de sistemas considerados.....	25
2.1.1 Modelo del vehículo.....	25
2.1.2 Modelo del conductor.....	30
2.1.3 Modelo de la batería	31
2.2 Simulación.....	33
2.2.1 Subsistema de conducción	33
2.2.2 Subsistema de batería	34
2.2.3 Subsistema de vehículo	35
Capítulo 3 Validación de modelo y análisis de resultados	37
3.1 Descripción de casos de estudio.....	37
3.1.1 Descripción de bus eléctrico	37
3.1.2 Ciclo de conducción.....	40

3.2 Simulación.....	44
3.2.1 Sintonización del PID	45
3.2.2 Análisis de resultados.....	47
3.3 Implementación de infraestructura	55
Conclusiones.....	59
Referencias bibliográficas	61



Lista de tablas

Tabla 1 Informe de buses eléctricos en Chile a marzo 2022.....	18
Tabla 2 Informe de buses eléctricos en Colombia a marzo 2022	18
Tabla 3 Entrada de buses eléctricos al Perú a junio del 2022	19
Tabla 4 Entrada de buses híbridos al Perú a junio del 2022	20
Tabla 5 Valores del coeficiente de superficie de carretera.....	27
Tabla 6 Tabla de sintonización de Ziegler Nichols a lazo cerrado.....	31
Tabla 7 Datos del producto	38
Tabla 8 Datos de motor.....	38
Tabla 9 Dimensiones del bus.....	38
Tabla 10 Sistema de baterías del bus.....	39
Tabla 11 Horarios de salidas entre buses.....	42
Tabla 12 Fragmentado del ciclo de velocidad.....	43
Tabla 13 Clasificación de pendientes y características de relieve	43
Tabla 14 Resumen de variables utilizadas en el modelo para la simulación	44
Tabla 15 Variables de sintonización de PI.....	47
Tabla 16 Salidas de buses con horarios propuestos	56
Tabla 17 Salidas de buses al horario más próximo	57
Tabla 18 Cargos de energía en tarifa MT2	58



Lista de figuras

Figura 1 Ventas de vehículos eléctricos de pasajeros por país en el mundo.....	16
Figura 2 Mercado global de buses eléctrico	17
Figura 3 Evolución del consumo final de energía por sectores.....	19
Figura 4 Diagrama de cuerpo libre de un bus en movimiento.....	26
Figura 5 Circuito ideal de la batería	32
Figura 6 Modelo matemático de consumo energético de bus eléctrico	33
Figura 7 Representación de sistema de conducción.....	34
Figura 8 Representación de subsistema de batería	34
Figura 9 Cálculo de corriente	35
Figura 10 Bloque de análisis de resultados de subsistema de batería	35
Figura 11 Representación de subsistema de vehículo	36
Figura 12 Análisis de resultado de subsistema de vehículo.....	36
Figura 13 Secciones de modelo de neumático.....	40
Figura 14 Proceso de obtención de ciclo de conducción	41
Figura 15 Ruta de análisis Sullana - Piura.....	42
Figura 16 Velocidad de referencia	45
Figura 17 Muestra de oscilaciones permanentes en velocidad de salida.....	46
Figura 18 Cálculo de periodo crítico.....	46
Figura 19 Velocidad de referencia contra velocidad de salida del proceso.....	47
Figura 20 Variable manipulable – Fuerza en rueda	47
Figura 21 Señal de error	48
Figura 22 Distancia recorrida	48
Figura 23 Potencia tractiva.....	49

Figura 24 Torque de salida	49
Figura 25 Corriente de batería	50
Figura 26 Estado de carga	50
Figura 27 Energía consumida	51
Figura 28 Potencia perdida en la batería	51
Figura 29 Voltaje de batería	52
Figura 30 Corriente de batería contra velocidad de salida	52
Figura 31 Propuestas de salidas y recargas para un bus eléctrico.....	55
Figura 32 Tipo de cargadores a instalar en terminales	56



Introducción

El desarrollo de modelos de demanda para el análisis de energía consumida por los buses eléctricos se ha venido implementando en muchos países para la transición de flotas de buses convencionales a buses eléctricos de baterías.

Debido interés global por la reducción de emisión de gases de efecto invernadero, en distintas zonas del mundo se ha optado por la implementación de vehículos eléctricos. Éstos ofrecen la ventaja de reducir hasta en un 80% las emisiones de CO₂.

Uno de los principales focos en los que se ha realizado este cambio es en el transporte público ya que los perfiles de conducción, los rangos y las características de la ruta son bien conocidos y claros.

El objetivo general de esta investigación es desarrollar un modelo de demanda energética de un bus eléctrico de batería mediante el software SIMULINK que permita satisfacer las necesidades las necesidades de una ruta estandarizada de transporte público.

Con la investigación de los antecedentes se han identificado algunas de las variables críticas que debe contener el modelo a desarrollar. Luego se han estudiado los fenómenos físicos que representa cada una de las variables y las ecuaciones que gobiernan su comportamiento. Finalmente, se desarrolla el modelo mediante el software SIMULINK y se definen un bus, ruta de recorrido y curva de velocidades como resultados se obtiene principalmente la velocidad de salida (para la comparación con la velocidad de entrada al modelo), el estado de carga de la batería (para poder estimar cuando tiempo se necesita cargar) y la energía consumida (junto con el estado de carga ayudan a estimar el tiempo de carga y hacer un cálculo de coste de energía).



Capítulo 1

Identificación del problema a resolver

En esta sección se tratarán los temas introductorios previos al modelamiento de demanda energética que se pretende analizar y adaptar a nuestra realidad nacional. Se empezará describiendo la justificación, para dar a entender la necesidad de realizar esta investigación y concientizar a la sociedad peruana sobre los beneficios que podría traer consigo una pronta migración al uso de eléctricos.

En los antecedentes se expondrán algunos resultados concretos de trabajos de investigación relacionados con este tema, realizados en diferentes partes del mundo. Luego, se definirán los objetivos de esta investigación y, finalmente, la metodología de trabajo que se usará.

1.1 Justificación

El constante incremento de preocupación de los países sobre temas ambientales ha generado un gradual interés en el reemplazo de los vehículos convencionales (de combustión interna) por unos que sean más amigables con el medio ambiente.

Los vehículos eléctricos tienen la ventaja de reducir la producción de emisiones de CO₂ hasta en un 80% mejorando la calidad del aire; además, se debe tener en cuenta que, la electrificación vehicular trae consigo una urbanización inteligente, que podría reflejarse, sobre todo, en un transporte público más eficiente y de mejor calidad.

El transporte público local en las ciudades ofrece especialmente la oportunidad de introducir la movilidad eléctrica, pues los contraargumentos comunes que son válidos para el transporte privado no aplican para la operación de flotas públicas dentro de una ciudad. Primero, los perfiles de conducción, los rangos y las características de la ruta son bien conocidos y claros. Luego, es posible cargar en lugares bien definidos dependiendo de la ruta.

Todo esto, sumado a los avances tecnológicos de carga inteligente y la reducción de precios de las baterías, hace que sea factible y justificable la realización de un estudio de modelo de demanda de energía, con la finalidad de encontrar soluciones que permitan la implementación de una óptima estructura de carga que pueda alimentar correctamente la flota de buses eléctricos al cual se aspira.

Con los resultados de los análisis de demanda y comparaciones con otras ciudades en las que se han implementado flotas de buses eléctricos, se aspira a cimentar las bases para futuros proyectos de electrificación vehicular. Por otro lado, de forma indirecta, se espera que este estudio ayude con la formulación de leyes que promuevan el uso de vehículos eléctricos.

Para ofrecer un panorama más amplio, se analizarán los principales países que están implementado este tipo de tecnologías tanto a nivel mundial como a nivel de Latinoamérica.

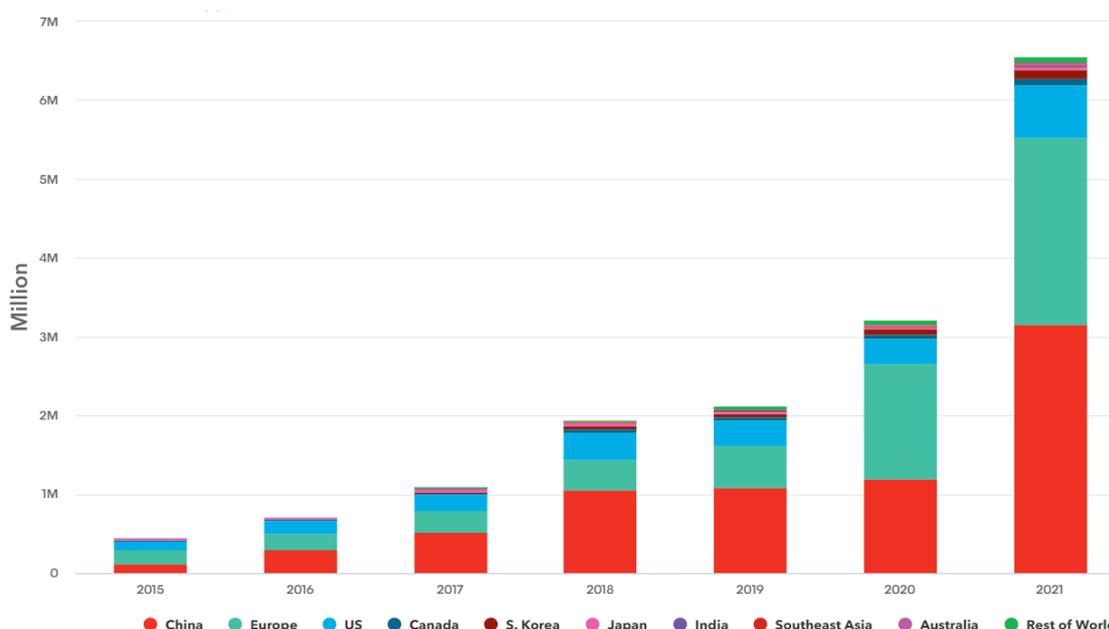
1.1.1 Panorama mundial de los buses eléctricos

La presión política hacia el cero neto y las mejoras en la tecnología de las baterías está aumentando en muchos países haciendo que, al 2022, hubiera casi 20 millones de vehículos eléctricos de pasajeros en circulación, de los cuales, por encima de 1,3 millones incluían buses, furgonetas de reparto y camiones en las vías de todo el mundo (McKerracher et al., 2022).

Para dejar más en claro este incremento de compras de vehículos eléctricos se presenta la Figura 1.

Figura 1

Ventas de vehículos eléctricos de pasajeros por país en el mundo



Nota. Extraído de “Electric Vehicle Outlook 2022” (McKerracher et al., 2022)

1.1.1.1 Caso China. En 2016 se habían registrado 340 buses eléctricos circulando por día. En 2015 había 69 000 unidades, cifra que iría creciendo con los años, en 2016 había 132 000, para 2017 había 90 000 vehículos eléctricos. Estas cifras alcanzaron el 13% de los buses eléctricos en el mundo (385 000 en total). Al año siguiente se vendieron 55 658 buses eléctricos aumentado así un 20%, en el 2019 la cifra cayó en 11% y en 2020 se realizó un

pedido de 741 buses de YUTONG de parte de Mowsalat, para el transporte público de la copa del mundo 2022 (Rojas et al., 2022).

1.1.1.2 Caso Europa. El incremento en Europa de buses eléctricos fue del 48% del 2017 al 2018, en el 2019 se triplicó la cifra, para el 2020 llegó a 2 062 buses eléctricos, un aumento del 22%, para el 2021 aumentó un 48% llegando a 3 282 buses eléctricos. Donde los Países como Alemania, Reino Unido y Francia fueron los más representativos. Una estimación dado por el BNEF¹ proyectó que para el 2040 el incremento de los buses eléctricos será del orden del 67%, cifra que representaría el 39% de la flota total de buses mundial. Además, la financiera ING asegura que para finales del 2 030 los buses convencionales erradicarían a cero, teniendo 8 500 buses eléctricos en Europa (Rojas et al., 2022).

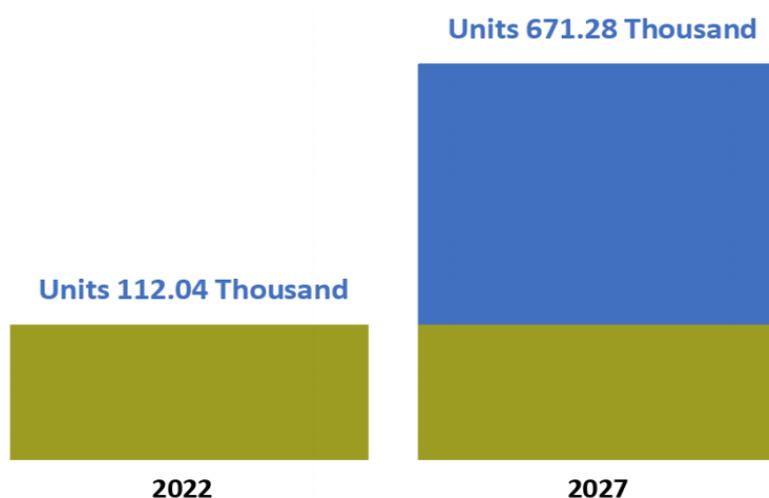
1.1.1.3 Caso India. Se estima que para el 2025 el 10% de la flota total de buses eléctricos en el mundo se concentrará en la India (Rojas et al., 2022).

1.1.1.4 Caso USA. Para el 2017 se registran en las empresas de transporte público 182 buses eléctricos, para el año siguiente se incrementó en un 83% con una cifra de 383 buses eléctricos. En el 2017 los buses eléctricos fueron el 0.5% del total de buses, aumentando en 450 buses eléctricos al 2019, 1 000 buses al 2020 y en el 2021 incrementó al 27% total de los buses, representando un total de 3 533 unidades. Las empresas líderes del mercado en USA son PROTERRA, BYD, NEW FLYER (Rojas et al., 2022).

En la Figura 2 se puede ver que la proyección a nivel mundial para 2022 de buses eléctricos, fue de 112,04 mil y para el 2027 será 671,28 mil.

Figura 2

Mercado global de buses eléctrico



Nota. Extraída de “Situación actual de los vehículos y buses híbridos y eléctricos en el Perú” (Rojas et al., 2022)

¹ BloombergNEF

1.1.2 Panorama de los buses eléctricos en Latinoamérica

1.1.2.1 Caso Chile. Para inicios del 2022 este país contaba con 776 buses eléctricos distribuidos entre las marcas BYD, YUTONH, KING LING y FOTON. Adicionalmente, había siete buses eléctricos en proyectos piloto (Rojas et al., 2022). La distribución de los buses según su marca se muestra en la Tabla 1:

Tabla 1

Informe de buses eléctricos en Chile a marzo 2022

Marca	Cantidad	Operador	Financista
BYD	436	Metbus	Enel
YUTONG	75	Buses Bule	Engie
YUTONG	25	STP	Engie
KING LONG	25	Redbus	NeoT Capital
FOTON	215	STP	Kaufmann-Copec
No precisa	7	Proyecto piloto	

Nota. Extraído de “Situación actual de los vehículos y buses híbridos y eléctricos en el Perú” (Rojas et al., 2022)

1.1.2.2 Caso Colombia. Para el mismo periodo de tiempo que en Chile, en este país se contaba con 973 buses eléctricos; encontrándose la mayoría de estos en la ciudad de Bogotá (868) (Rojas et al., 2022). La distribución de los buses según su marca se muestra en la Tabla 2:

Tabla 2

Informe de buses eléctricos en Colombia a marzo 2022

Marca	Cantidad	Operador	Financista
No precisa	868	Transmilenio	Bogotá
No precisa	69	Metroplús	Medellín
No precisa	36	Mio	Cali
Total	973		

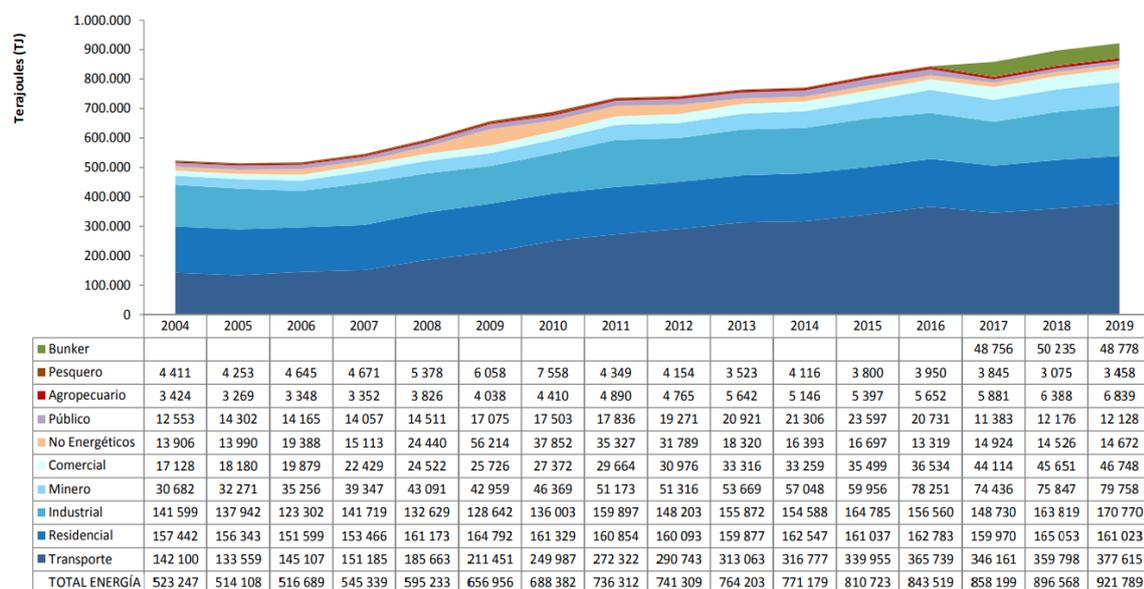
Nota. Extraído de “Situación actual de los vehículos y buses híbridos y eléctricos en el Perú” (Rojas et al., 2022)

1.1.2.3 Caso Perú. Las estadísticas para Perú muestran que somos uno de los países con menor inversión en lo que corresponde a vehículos eléctricos, teniendo un total de 11 unidades de buses híbridos y 13 buses eléctricos; cómo se puede ver en la Figura 3 El uso de energía por parte del sector transporte en nuestro país tiene la tendencia de aumentar conforme pasan los años y si se quiere ser más específico, en el año 2019 representó el 41% del total de energía consumida (MEM, 2021). La importancia de realizar este tipo de estudios

radica en que ayudan a fomentar el avance tecnológico del país y, a la vez, evitar la creciente contaminación que trae consigo el aumento del consumo energético del sector transporte. Los años de adquisición de los buses eléctricos se muestran en la Tabla 3 y Tabla 4.

Figura 3

Evolución del consumo final de energía por sectores



Nota. Extraído de “Balance Nacional de Energía 2019” (MEM, 2021)

Tabla 3

Entrada de buses eléctricos al Perú a junio del 2022

Año	EBus
2019	4
2020	2
2021	4
2022	3
Total	13

Nota. Extraído de “Situación actual de los vehículos y buses híbridos y eléctricos en el Perú” (Rojas et al., 2022)

Tabla 4*Entrada de buses híbridos al Perú a junio del 2022*

Año	EBus
2019	3
2020	8
2021	0
2022	0
Total	11

Nota. Extraído de “Situación actual de los vehículos y buses híbridos y eléctricos en el Perú” (Rojas et al., 2022)

1.2 Antecedentes

Uno de los principales retos de la introducción de flotas de buses impulsados por baterías es tratar de conseguir una autonomía más extendida. Por lo que, en Sinhuber et al., (2010) se discuten las consideraciones sobre el dimensionamiento del sistema de baterías y el régimen de alimentación de estas.

En primer lugar, se analizan los parámetros de diseño (como las características de la autopista, perfiles de altitud y velocidad, la ocupación, etc.) y disponibilidad de la flota de buses, de hasta 18 horas, para definir el total de energía requerida. El total de energía consumida después de las simulaciones fue de 900 kWh. Al mostrar la poca factibilidad de implementar baterías con muy altas capacidades y elevados pesos, se empieza a analizar la posibilidad de instalar baterías de mucha menor capacidad, pero con soluciones óptimas de carga durante la trayectoria recorrida.

Después de analizar diferentes tipos de baterías y sus formas óptimas de carga para reducir los tiempos de parada, se llega a la conclusión de que cargar con menos frecuencia no reduce el tiempo total de carga y no contribuye a la disponibilidad de los vehículos en funcionamiento. Así pues, la carga puede programarse con la mayor frecuencia posible para que el ciclo de la batería sea lo menos intenso posible y aumente la vida útil. Además, si se hace un análisis económico del coste de las baterías, electricidad y demás relacionados en contra de los gastos en combustible de forma anual, es factible el tránsito de vehículos de combustión interna a vehículos eléctricos para el transporte público.

Siguiendo el plan de las investigaciones para la correcta implementación de una flota de buses eléctricos, en Sinhuber et al., (2012) se analiza un modelo creado en Simulink para la estimación de la demanda de potencia y energía de un total de 100 líneas de autobús eléctrico, con el objetivo de determinar un sistema de baterías que logre satisfacer la carga laboral de toda la flota. Los buses analizados fueron de 18 m de largo con 8 h de trabajo diario, pero, si se deseaba simular diferentes tipos de buses, solo había que ajustar el peso, el coeficiente de arrastre y la superficie de la sección transversal. Se debe tener en cuenta

también, que el modelo del vehículo incluía la resistencia de conducción, la resistencia del aire, la resistencia a la rodadura y la resistencia a la escalada para calcular la propulsión mecánica.

La investigación proponía solo cargar las baterías durante la noche. Sin embargo, después de analizar las simulaciones, las baterías requeridas eran muy pesadas. Por lo que fue más razonable escoger un sistema de baterías modulares que permite adaptarse a los diferentes tipos de buses y optimizar su tamaño para las diferentes características de la ruta.

Los modelos de demanda de energía de las flotas de buses eléctricos pueden ayudar también a la estimación de la reducción de emisión de gases de efecto invernadero y otros contaminantes tóxicos. Según el estudio realizado por Valenti et al., (2017) en la ciudad de Roma (Italia) con una electrificación parcial de la flota de buses se podía llegar a reducir considerablemente las emisiones de contaminantes asociadas con el tráfico, como el CO₂, y reducir los consumos de combustible.

Los buses eléctricos son parte del futuro del transporte y es necesario que puedan satisfacer las necesidades de operación en ruta, al igual que los buses de convencionales. En Guiñansaca Chincilima (2020) se diseñó un modelo de simulación que estime la demanda energética de un bus eléctrico con el objetivo de desarrollar una configuración energética óptima, apoyado del software MATLAB SIMULINK. Las variables que intervienen directamente con la energía consumida se agrupan en parámetros dimensionales de vehículo, ambientales, de operación, tren motriz, de transmisión y batería. La simulación tendrá en cuenta 3 escenarios: a carga completa, media carga y en vacío; por el cual, para su validación con los datos reales, se usa una carga media constante.

Para la validación del modelo se realiza una comparación tanto de los rendimientos simulados con los rendimientos reales, resultando así un coeficiente de determinación del 0,8356 que indica que el modelo computarizado posee un rango de precisión satisfactorio de acuerdo con su aplicación. Las exigencias de operación deben cubrir 6 rutas completas diarias, minimizando sus periodos de recarga durante la jornada. Los buses Tata y Kamaz demostraron mejores rendimientos y menores consumos energéticos, sin embargo, su capacidad de batería solo les permitía cubrir entre 1 y 2 rutas completas respectivamente, además para cumplir su exigencia de ruta se necesitan de 3 a 4 recargas respectivamente en los buses en mención. Por otro lado, el modelo BYD K9 tiene una capacidad de batería que completa hasta 5 rutas con solo una recarga, haciendo este modelo de bus más autónomo. Para la estimación del tiempo de recarga se usó un cargador de 80 kW, dando como resultado periodos de carga que van de 1 a 4 horas dependiendo del modelo de bus. Por lo tanto, el bus BYD K9 se adapta mejor a las condiciones de operación por su autonomía y rendimiento medio.

En Di Martino et al., (2022) se desarrolla un modelo de demanda de energía para un autobús eléctrico, que incluye un vehículo parametrizado y se basa en varios escenarios de conducción existentes. En consecuencia, mediante MATLAB-SIMULINK se propone un modelo

que tiene como entrada datos del ciclo real del conducción y perfil de altitud de una ruta seleccionada; además, se considera la caracterización del vehículo como subsistemas motores, baterías, frenos y transmisión; representado en el modelo con 6 subsistemas que describen el consumo de energía del vehículo para una ruta de referencia. El modelo se ha usado para simular todo el comportamiento en marcha de los buses eléctricos a baterías (BEB), estimando un porcentaje de estado de carga de la batería (SOC), la batería utilizada para cada autobús en funcionamiento y la regeneración de energía. EL modelo resultó ser preciso, replicando el comportamiento real con errores mínimos. En conclusión, con la estimación de demanda de energía es que se pueden realizar mejoras de la infraestructura de transporte público existente y a la vez, permite la posibilidad de aplicarse a rutas públicas no electrificadas de diferentes ciudades.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo general

Diseñar e implementar un modelo de demanda de energía de buses eléctricos para transporte público local

1.3.2 Objetivos específicos

- Proponer un modelo de demanda de energía a partir de datos reales de ciclos de conducción. Se tendrán en cuenta las variables analizadas en los proyectos de implementación de flotas de buses en otros países.
- Simular el estado de carga de batería del vehículo bajo operación utilizando MATLAB/SIMULINK. El modelo se dividirá en subsecciones que analizarán la variación de las diferentes variables.
- Validar el modelo con datos reales disponibles.
- Utilizar los resultados para proponer mejoras en la infraestructura de carga de vehículos eléctricos.

1.4 Metodología

Para el desarrollo de la presente investigación se seguirá la siguiente metodología:

- En primer lugar, basándonos en los antecedentes, se seleccionarán las variables que intervienen en el consumo energético de los vehículos eléctricos para poder definir correctamente el modelo. De las variables seleccionadas, se hará una distinción de las que se pueden definir con respecto a los estudios ya realizados (coeficiente de arrastre, coeficiente de rodadura, entre otros) y las que dependen exclusivamente de la zona en la que se hará el estudio (parámetros del vehículo, propiedades de las baterías, entre otros).
- Con las variables ya definidas y agrupadas, se escogerá una de las rutas recorridas por las flotas actuales de vehículos convencionales en las cuales se disponga con la

información de sus ciclos de conducción. El vehículo por analizar se escogerá teniendo en cuenta el estado actual de los vehículos eléctricos en el Perú.

- Una vez recopilada la información de todas las variables que intervienen en nuestro estudio se realizará un modelo matemático que se simulará en MATLAB/SIMULINK, para obtener como resultado la estimación del consumo energético del vehículo a lo largo de la ruta.
- Para validar el modelo diseñado, este se simulará en una ruta de la cual se disponga de los datos de consumo energético de un vehículo eléctrico para su comparación.
- Finalmente se propondrá el sistema de baterías óptimo para el recorrido, que cuente con la capacidad energética suficiente en base a nuestras simulaciones y que a la vez se pueda implementar junto con una infraestructura de carga.





Capítulo 2

Modelo de demanda energética

En este capítulo se estudiarán las variables y subsistemas que contendrá el modelo matemático que se desarrollará. Como se busca que el modelo sea fácilmente adaptable a cualquier zona del país donde se puedan implementar flotas de buses eléctricos, se tendrá una descripción de cada uno de los fenómenos físicos que tengan relación con las variables a utilizar. Así mismo, se mencionará qué tipos de respuestas o resultados se obtendrán de cada parte de la simulación.

En conclusión, en este capítulo se presentará el modelado de todas las ecuaciones que intervienen en el cálculo de la demanda energética de un bus eléctrico para transporte público local.

2.1 Descripción de sistemas considerados

Se plantea dividir el modelo en 3 bloques: bloque de conductor, bloque de vehículo y de batería (Team, 2023). Se espera que el modelo tenga una fácil adaptabilidad a diferentes zonas y modelos de autobuses, por lo que los subsistemas de los motores de tracción, freno dinámico y transmisión no formarán parte de nuestro modelo.

2.1.1 Modelo del vehículo

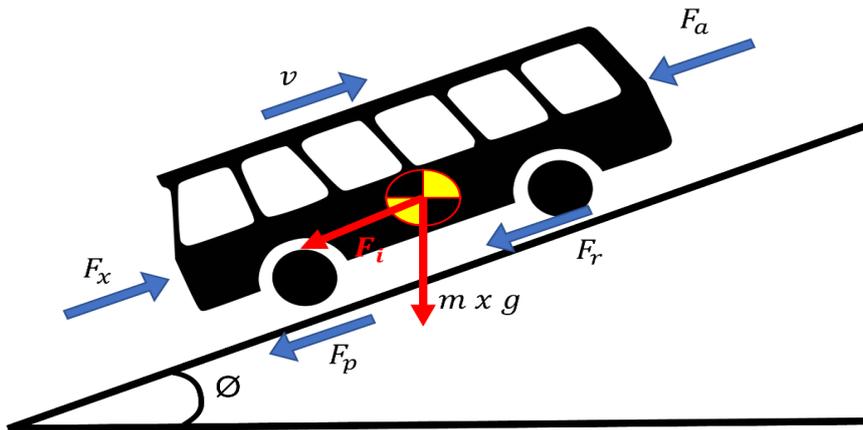
El estudio del desplazamiento del vehículo es importante para lograr reconocer todas las fuerzas que debe llegar a superar este sistema para conseguir el movimiento. Las típicas resistencias o fuerzas son: la resistencia del viento debido a la interacción entre el aire y el vehículo, la resistencia a la rodadura debido a la interacción de los neumáticos y la autopista, la resistencia a la pendiente debido a las diferentes inclinaciones de la autopista y la resistencia a la aceleración (también mencionada como resistencia a la inercia en otras investigaciones) debido a que la masa del vehículo influye directamente en la fuerza necesaria para seguirlo acelerando (Zongxuan & Guoming G., 2014).

En este bloque se tendrá como entrada la fuerza en ruedas proveniente del bloque del conductor (se explicará más adelante) para tener como respuesta la velocidad en km/h que retroalimentará nuestro proceso para calcular el error y lograr un controlador fiel al modelo.

Para identificar todas las resistencias antes mencionadas se hará uso de un diagrama de cuerpo libre suponiendo al vehículo como un punto de masa como se muestra en la Figura 4. Para el movimiento del automóvil, la fuerza en rueda debe superar todas las fuerzas de resistencia como se muestra en la ecuación 1.

Figura 4

Diagrama de cuerpo libre de un bus en movimiento



Donde:

F_x = Fuerza total en rueda [N]

F_r = Resistencia a la rodadura [N]

F_p = Resistencia a la pendiente [N]

F_a = Resistencia del viento [N]

F_i = Resistencia a la aceleración [N]

m = masa del vehículo [kg]

g = gravedad [m/s^2]

$$F_x = F_r + F_p + F_a + F_i \quad (1)$$

2.1.1.1 Resistencia a la rodadura. Es una de las mayores resistencias al movimiento al nivel del suelo, generada por la energía perdida debido a la deflexión del neumático con la superficie, deslizamiento longitudinal y lateral del neumático, rozamiento del aire en el interior y exterior del neumático, entre otros. Mientras otras resistencias se hacen presente solo en ciertas condiciones dinámicas, la resistencia a la rodadura está presente desde que las ruedas inician su rotación. Está definida por la ecuación 2. (Gillespie, 1992)

$$F_r = f_r \times m \times g \times \cos(\theta) \quad (2)$$

Donde:

f_r = Coeficiente a la rodadura [Adimensional]

m : Masa del vehículo [kg]

g : Gravedad [m/s^2]

θ : Pendiente [Radianes]

Para el cálculo del coeficiente de rodadura, se usará una de las fórmulas propuestas por el Instituto de Investigación de Transporte de la Universidad de Michigan. Si bien esta fórmula se aplica para camiones pesados, un autobús con pasajeros se puede asemejar a estas condiciones. (Gillespie, 1992)

$$f_r = (0.0041 + 0.000041 \times V) \times C_h \quad \text{Neumáticos radiales} \quad (3)$$

$$f_r = (0.0066 + 0.000046 \times V) \times C_h \quad \text{Neumáticos de capas diagonales} \quad (4)$$

Donde:

V = Velocidad [mph]

C_h = Coeficiente de superficie de carretera [Adimensional]

Tabla 5

Valores del coeficiente de superficie de carretera

Condición de carretera	C_h
Concreto liso	1,0
Hormigón templado, ladrillo, asfalto frío	1,2
Asfalto caliente	1,5

Nota. Elaborada con información de “Fundamentals of Vehicle Dynamics” (Gillespie, 1992)

Como se debe simular en la situación más exigente, se asumirá el valor de coeficiente de superficie de carretera como 1,5 con la ecuación 3.

2.1.1.2 Resistencia a la pendiente. Fuerza que se opone al avance del vehículo cuando recorre un tramo ascendente, pero si el tramo es descendente, esta fuerza impulsa su desplazamiento. Esta resistencia es dependiente de la masa del vehículo y del ángulo de inclinación del tramo, a mayor pendiente mayor consumo de energía (Vélez Loaiza & Vera Vanegas, 2016). La ecuación 5 describe el fenómeno definido anteriormente.

$$F_p = m \times g \times \text{sen}(\theta) \quad (5)$$

Donde:

m : Masa del vehículo [kg]

g : Gravedad [m/s^2]

θ : Pendiente [Radianes]

2.1.1.3 Resistencia del viento. Como resultado de la interacción entre el aire con el vehículo aparecen fuerzas y momentos: fuerzas de arrastre, fuerzas de elevamiento, fuerzas laterales, momentos de inercia y rotaciones. De todas las fuerzas antes mencionadas, la de mayor impacto a velocidades normales de carretera es la fuerza de arrastre, por lo que las otras se asumirán insignificantes. Como el flujo del aire sobre el vehículo es muy complejo, es necesario desarrollar un modelo semi empírico para representar este efecto. Por lo tanto, la fuerza de arrastre es caracterizada por la ecuación 6 (Gillespie, 1992).

$$F_a = \frac{1}{2} \times C_d \times \rho \times A_f \times v^2 \quad (6)$$

Donde:

C_d = coeficiente de arrastre

A_f = área frontal del vehículo [m^2]

ρ = densidad [kg/m^3]

v = velocidad [m/s]

Para la elección del valor del coeficiente de arrastre se ha basado en las investigaciones realizadas por Peña Salvador (2021):

El coeficiente de arrastre varía según el modelo de autobús utilizado. Además de la velocidad que tenga el autobús con respecto al aire en todo momento. Para simplificar se usan los datos obtenidos en el estudio anteriormente mencionado. El coeficiente de arrastre varía entre 0,583 y 0,654, en este caso se utilizará el valor medio entre estos dos valores.

El comportamiento de un gas real a bajas densidades se aproxima con buena precisión con la ecuación de estado de gas ideal, la cual depende de las condiciones climáticas de operación: temperatura, presión y humedad. Por lo tanto, la fórmula usada para el cálculo de la densidad del aire es la ecuación de estado de los gases ideales (ecuación 7) (Cengel & Boles, 1999).

$$PY = RT \quad (7)$$

Donde

P = Presión absoluta [kPa]

γ = Volumen específico [$\frac{m^3}{kg}$]

R = Constante del gas [$\frac{kPa \cdot m^3}{kg \cdot K}$]

T = Temperatura absoluta [K]

El valor de constante del gas utilizado será de 0,2870, el cual corresponde al aire.

2.1.1.4 Resistencia a la inercia. Si un vehículo está acelerando a lo largo de la carretera, es conveniente representar la resistencia a la inercia como la fuerza que actúa en el centro de gravedad en dirección opuesta a la aceleración del vehículo. El principio por el que se rige esta fuerza es conocido como d' Alembert force y se define con la ecuación 8. (Gillespie, 1992)

$$F_i = m_i \times a \quad (8)$$

Donde:

m_i = Masa inercial [kg]

a = Aceleración $\left[\frac{m}{s^2}\right]$

Dependiente de la inercia del sistema de tren motriz en relación con la masa del vehículo, el peso equivalente del vehículo podría ser significativamente mayor que el peso real del vehículo. (Zongxuan & Guoming G., 2014)

La masa inercial es definida con la ecuación 9. (Saleem et al., 2020)

$$m_i = 1,04 \times m \quad (9)$$

2.1.1.5 Fuerza total en rueda. Es la fuerza resultante de la sumatoria de las resistencias que se oponen al desplazamiento del vehículo como se muestra en la ecuación 1.

Con la fuerza en rueda ya definida, se pueden precisar las ecuaciones de potencia y torque en rueda. (Piña García & Sisa Jaya, 2021)

$$T = F_x \times R_d \quad (10)$$

$$P = F_x \times v \quad (11)$$

Donde:

T = Torque en rueda [N]

R_d = Radio dinámico [m]

P = Potencia en rueda [W]

v = Velocidad $\left[\frac{m}{s}\right]$

2.1.1.6 Parámetros de vehículo

2.1.1.6.1 Radio dinámico. Se define como el radio del neumático deformado por el peso y el movimiento del vehículo, llegando a representar del 97 al 98 % de su dimensión nominal (Guiñansaca Chincilima, 2020). Se define según la ecuación 12.

$$R_d = \frac{2 \times a_n \times alt + \emptyset \times 25,4}{2000} \times 0,97 \quad (12)$$

Donde:

R_d = Radio dinámico [m]

a_n = Ancho de la banda de rodadura [mm]

a_{lt} = Altura de la cámara [%]

\emptyset = Diámetro del aro [pulg]

2.1.1.6.2 Área frontal. Es el área de contacto frontal del vehículo con el viento. Ya que la forma de un bus se asemeja a la de un rectángulo, se puede definir según la ecuación 13. (Piña García & Sisa Jaya, 2021).

$$A_f = b \times h \quad (13)$$

Donde:

A_f = Área frontal del bus [m^2]

b = Ancho del bus [m]

h = Altura del bus [m]

2.1.1.6.3 Masa del vehículo. La masa del vehículo depende del diseño, tamaño y proporción de los componentes que lo conforman. La manera más efectiva de calcular la masa es realizando un pesaje con balanzas especiales, pero como no se cuenta con los automóviles en físicos, no se aplicará esta metodología; por lo tanto, se obtendrá este dato a partir de los datos del fabricante.

2.1.1.6.4 Otras variables. Otras variables que necesita el modelo y se extraerán de los datos del fabricante, serán:

- Neumático escogido
- Capacidad de pasajeros
- Ancho y alto del bus
- Pendiente máxima
- Velocidad máxima
- Autonomía por carga
- Sistema de baterías
- Demanda de accesorios

2.1.2 Modelo del conductor

El conductor se regirá bajo el sistema de control PID, ya que este presenta simplicidad, fácil uso y un aceptable resultado en el control de procesos simples.

Un controlador PID (controlador proporcional, integral y derivativo) es un mecanismo de control que, a través de un lazo cerrado (retroalimentado), permite regular la variable

manipulable en un proceso en general. Este controlador nos garantiza errores nulos, es muy robusto y sus parámetros se pueden interpretar de manera sencilla. (Ipanaqué Alama, 2012)

Como entrada a este bloque se tendrá la velocidad, el ciclo de conducción y la velocidad del modelo del vehículo; la diferencia de estas variables representará el error del sistema. Dicho error será la entrada del controlador PID, el cual dará como respuesta la fuerza en rueda (variable manipulable) que entrará al subsistema del vehículo. Cabe recalcar, que esta misma fuerza entrará al sistema de baterías para el cálculo de la demanda energética.

Para la sintonización del PID se usará el segundo método de sintonización de Ziegler Nichols a lazo cerrado según el cual se busca un valor de la constante crítica (k_c) y el periodo crítico (T_c). Debido a que se desconoce la función de transferencia que gobierna nuestro proceso (vehículo) se hará variar el valor de ganancia hasta encontrar un valor que haga llegar a oscilaciones permanentes el proceso. Una vez llegado a ese punto para hallar el valor del periodo crítico se medirá el tiempo que ha pasado entre dos picos de oscilaciones. (Ipanaqué Alama, 2012)

Una vez definidos los valores de constante y periodos críticos se usará la Tabla 6, la cual corresponde a la tabla de sintonización de Ziegler Nichols a lazo cerrado para hallar los valores del controlador.

Tabla 6

Tabla de sintonización de Ziegler Nichols a lazo cerrado

	K	T_i	T_d
P	$0.5 \times k_c$		
PI	$0.4 \times k_c$	$0.8 \times T_c$	
PID	$0.6 \times k_c$	$0.5 \times T_c$	$0.125 \times T_c$

Nota. Elaborada con información de “Control automático de Procesos” (Ipanaqué Alama, 2012)

2.1.3 Modelo de la batería

Como ya se ha mencionado, no se cuenta con un vehículo físico que se pueda tener como referencia para un mejor modelado. Por lo tanto, el modelo de la batería no tendrá en cuenta la química.

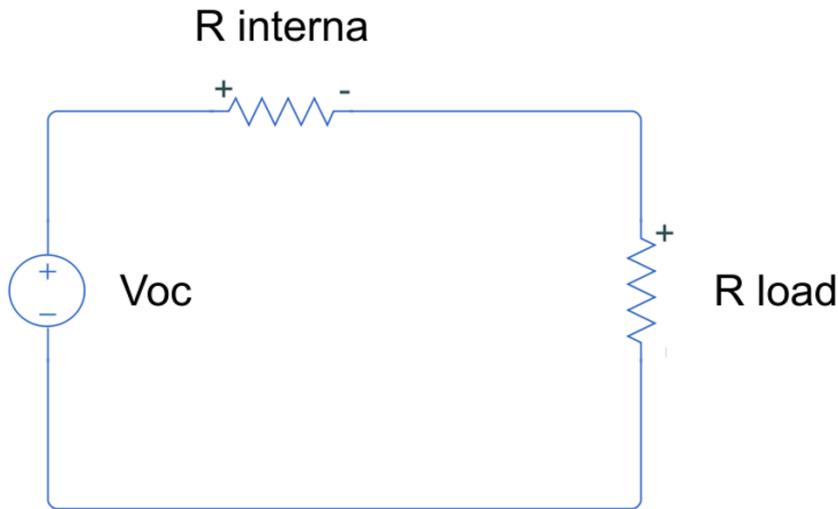
Se supondrá la batería como un circuito ideal con una resistencia interna. El circuito equivalente se muestra en la Figura 5, y las ecuaciones usadas para el análisis de la batería se muestran a continuación.

A este bloque entrará la potencia en rueda, la cual, sumada a la potencia de los dispositivos auxiliares se convierte en la potencia actual entregada por la batería. A pesar de ser un bloque ideal, se tienen en cuenta algunas unas pérdidas por calor generadas por la resistencia interna de la batería como se indica en la ecuación 16. Para el cálculo de la corriente de salida de la batería se planteó la ecuación cuadrática 17, la que se solucionó con la fórmula general para ecuaciones de segundo grado dando como resultado la ecuación 18.

Una vez definida la corriente es posible definir un estado de carga (SOC) en función de la energía nominal de la batería como se muestra en la ecuación 19. El SOC proporciona el estado real de la batería, donde 0 % indica que la batería está completamente descargada y el 100 % que la batería se encuentra completamente cargada.

Figura 5

Circuito ideal de la batería



$$P_{ideal} = P_{actual} + P_{perdidas} \quad (14)$$

$$P_{ideal} = I \times V_{oc} \quad (15)$$

$$P_{perdida} = I^2 \times R_{interna} \quad (16)$$

$$P_{actual} = I \times V_{oc} - I^2 \times R_{interna} \quad (17)$$

$$I = \frac{V_{oc} - \sqrt{V_{oc}^2 - 4 \times R_{interna} \times P_{actual}}}{2 \times R_{interna}} \quad (18)$$

$$SOC_{bat} = \frac{-\int_0^t V_{oc} \times I_{descargada} dt}{E} \times 100 \quad (19)$$

Donde:

P_{ideal} = Potencia ideal [W]

P_{actual} = Potencia actual [W]

$P_{\text{pérdidas}}$ = Potencia de pérdidas [W]

I = Corriente de descarga [A]

V_{oc} = Voltaje de la fuente [V]

R_{interna} = Resistencia interna de la batería [Ω]

SOC_{bat} = Estado de carga de la batería [%]

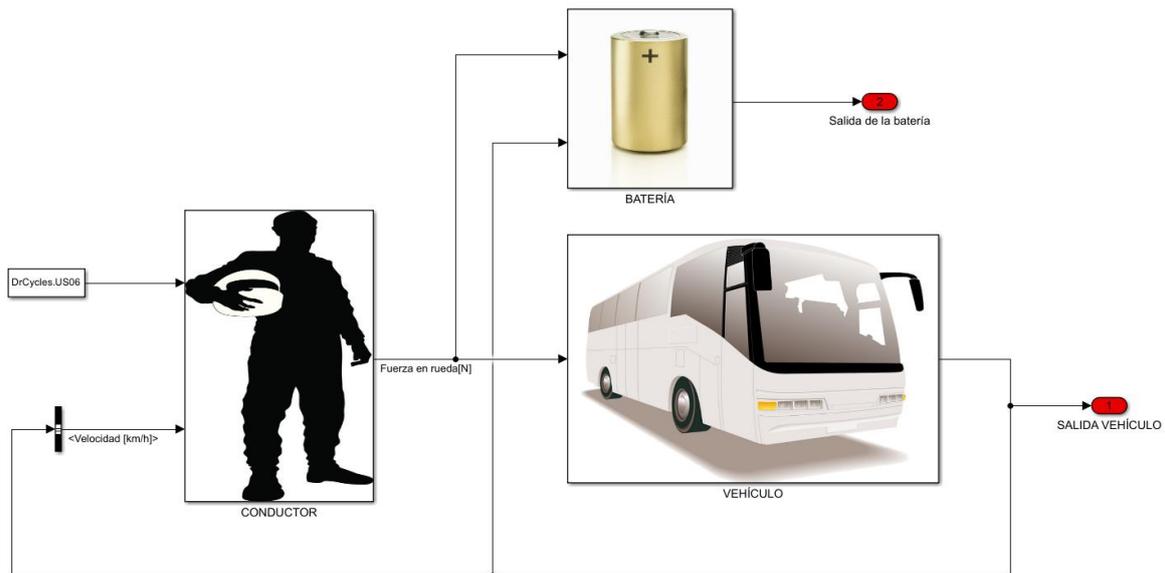
E = Energía total de la batería [kWh]

2.2 Simulación

En esta sección se muestran los diagramas en SIMULINK de los subsistemas de conducción, batería y de vehículo para así estimar la demanda energética en la marcha del vehículo. La representación de cada uno de los bloques antes mencionado y su conexión se puede observar en la Figura 6.

Figura 6

Modelo matemático de consumo energético de bus eléctrico

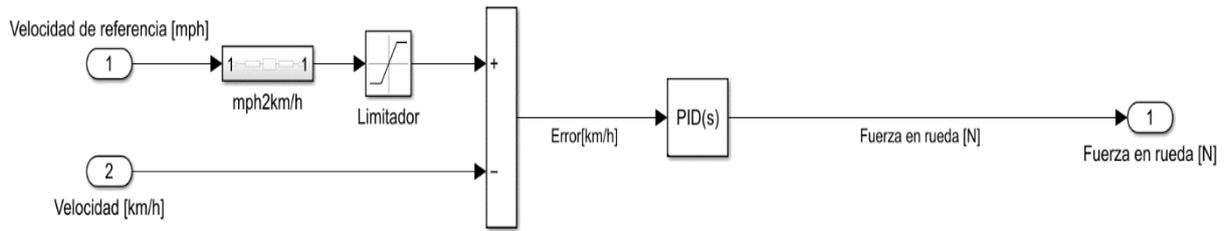


2.2.1 Subsistema de conducción

El modelo presentado para el sistema de conducción se ha elaborado como se muestra en la Figura 7. En él se pueden observar un bloque PID, cuyo uso ya se ha explicado anteriormente y, además, se ha visto conveniente el uso de un bloque limitador de la velocidad de entrada, cuyo valor dependerá de la máxima velocidad a la que pueda llegar el vehículo o la máxima velocidad permitida por la carretera que esté circulando.

Figura 7

Representación de sistema de conducción



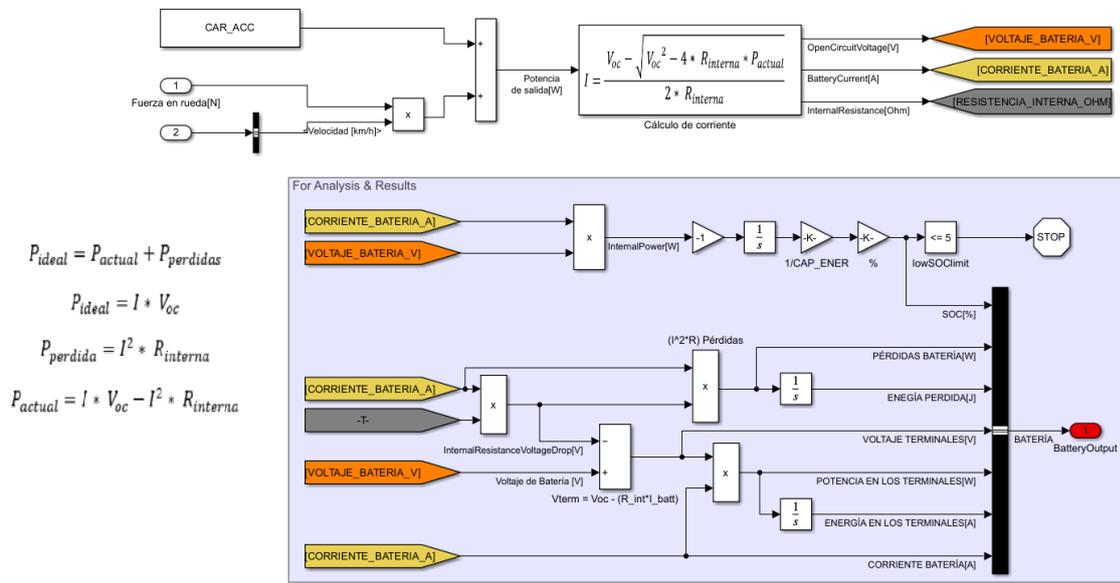
2.2.2 Subsistema de batería

La Figura 8 muestra el modelo del subsistema de batería, en él se hace el cálculo de la corriente (Figura 9). Para un mejor análisis de resultado se ha visto conveniente tener diferentes salidas (Figura 10) por lo que, en un bloque aparte se han relacionado las variables de voltaje, resistencia y corriente de forma que se pueden obtener el estado de carga (SOC), pérdidas en la batería, energía perdida, Voltaje en los terminales, entre otros.

Por otra parte, a manera de representar un cuidado de la batería, se ha agregado un bloque limitador de estado de carga cuya función es la de detener la simulación si la carga de batería es mejor al 5%.

Figura 8

Representación de subsistema de batería



$$P_{ideal} = P_{actual} + P_{perdidas}$$

$$P_{ideal} = I * V_{oc}$$

$$P_{perdida} = I^2 * R_{interna}$$

$$P_{actual} = I * V_{oc} - I^2 * R_{interna}$$

Figura 9

Cálculo de corriente

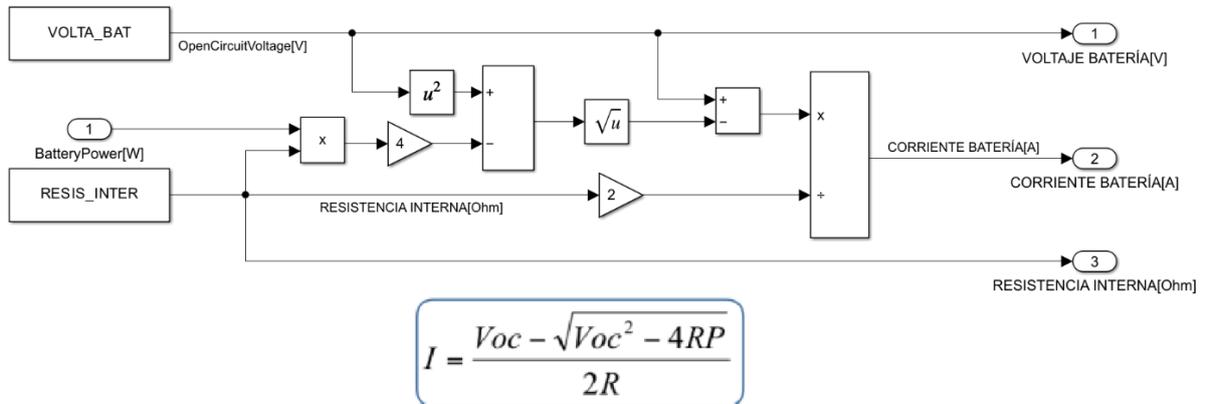
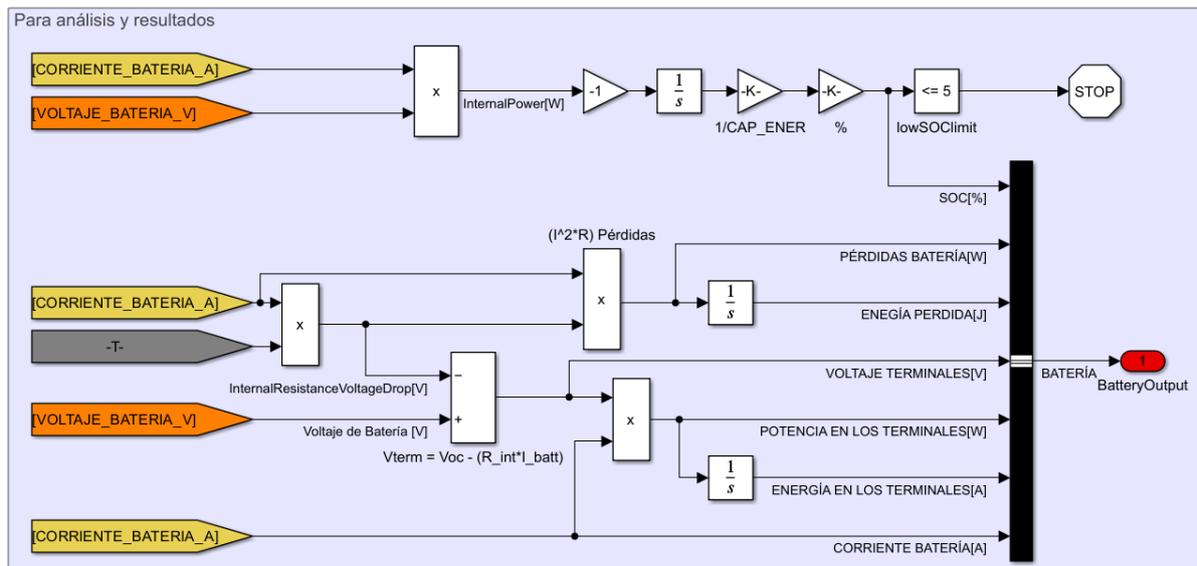


Figura 10

Bloque de análisis de resultados de subsistema de batería



2.2.3 Subsistema de vehículo

El subsistema del vehículo se ha elaborado como se muestra en la Figura 11, dejando una zona de análisis de resultados (Figura 12). Se debe tener en cuenta que en este bloque se han tenido que representar todas las ecuaciones planteadas anteriormente.

Figura 11

Representación de subsistema de vehículo

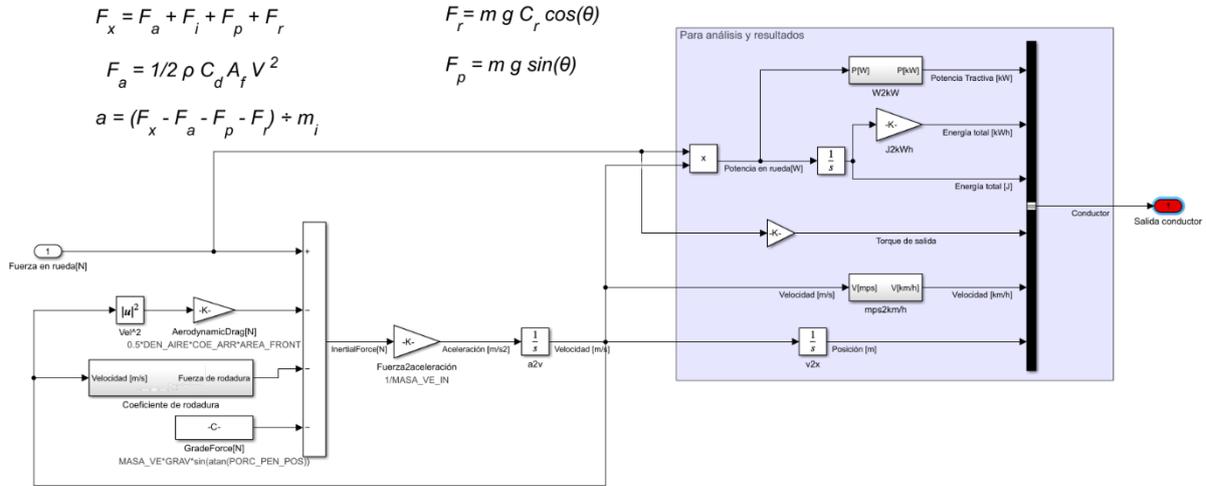
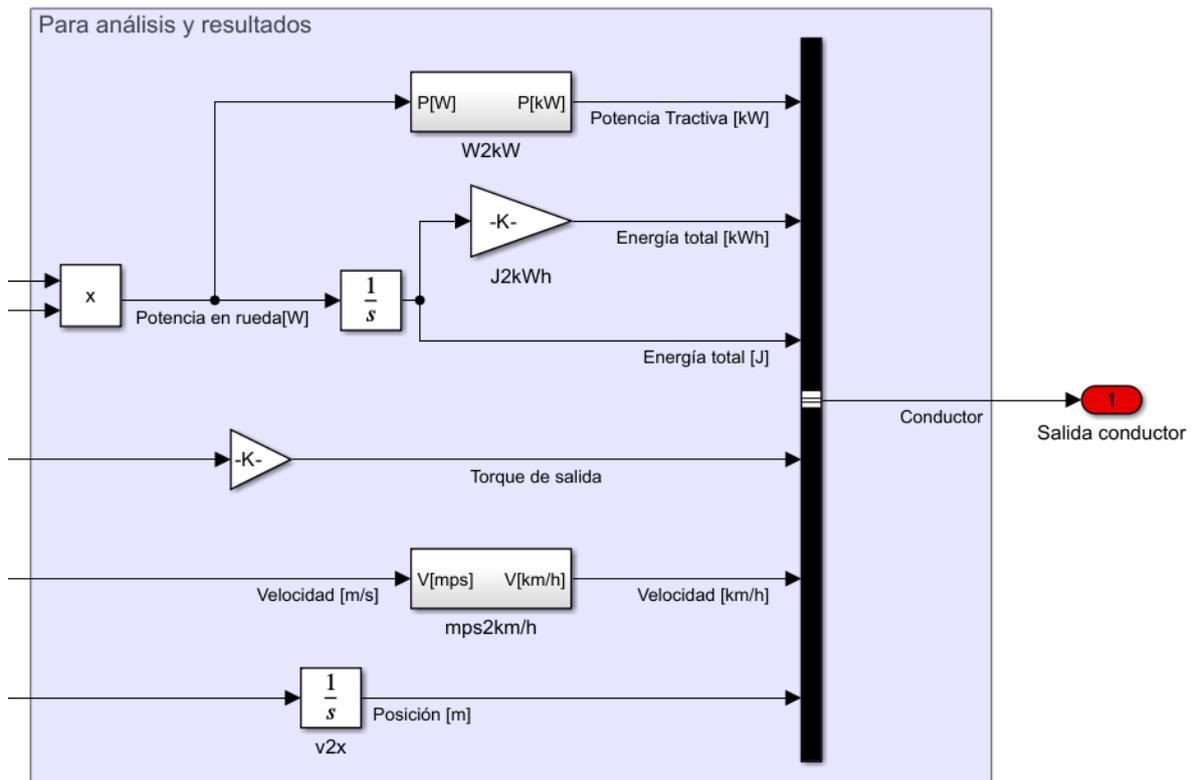


Figura 12

Análisis de resultado de subsistema de vehículo



Capítulo 3

Validación de modelo y análisis de resultados

En este capítulo se realizará la selección del tipo de bus que se va a simular, del cual debemos de recopilar sus características necesarias para la simulación y definir nuestro ciclo de conducción el cual será una adaptación de una ruta de una ciudad del Perú. Además, se simulará nuestro modelo matemático desarrollado en SIMULINK, definido en 3 subsistemas. Por último, se hará un análisis de resultados de las variables que se consideran más significativas para una futura implementación.

3.1 Descripción de casos de estudio

Se empezará dando una breve descripción del vehículo usado. Posteriormente, se describirá la ruta y finalmente, se simulará con el modelo realizado.

3.1.1 Descripción de bus eléctrico

Para esta investigación se ha utilizado el siguiente tipo de bus eléctrico teniendo en cuenta lo siguiente.

Según Rojas et al., (2022) la flota de vehículos eléctricos de la marca BYD son comúnmente encontrados en esta parte de la región (Latinoamérica), con gran acogida en países de la zona como Colombia con una flota de 64 unidades al 2019 y Chile con 200 unidades al 2019. Por ello para este estudio se escogerá esta marca de buses eléctricos. El modelo seleccionado será el BYD K9FE del cual contamos con los datos del fabricante y ha sido diseñado especialmente para la ciudad de Santiago de Chile, adaptando sus condiciones a la ruta a una ciudad peruana escogida para el análisis.

A continuación, en las Tabla 7, Tabla 8, Tabla 9 y Tabla 10 se presentarán las características del modelo de autobús eléctrico BYD K9FE proporcionadas por el fabricante.

Tabla 7*Datos del producto*

Dato	Valor
Marca	BYD
Modelo	K9FE
Tipo	Bus Urbano
Categoría	M3 (Clase B)
Combustible	Electricidad

Nota. Elaborado con información de “Bus eléctrico K9FE” (BYD,2020)

Tabla 8*Datos de motor*

Dato	Valor
Tipo	AC síncrono de imanes permanentes
Modelo	BYD K9FE
Potencia máxima	300 kW
Autonomía	250 km
Pendiente máxima	18%
Velocidad máxima	60 km/h

Nota. Elaborado con información de “Bus eléctrico K9FE” (BYD,2020)

Tabla 9*Dimensiones del bus*

Dato	Valor
Longitud	11,98 m
Ancho	2,58 m
Alto	3,45 m
Radio de giro	12 m
Peso bruto vehicular	18.500 kg
Capacidad de pasajeros sentados	31 personas
Capacidad de pasajeros de pie	50 personas
Neumático	305/70 R 22,5

Nota. Elaborado con información de “Bus eléctrico K9FE” (BYD,2020)

Tabla 10*Sistema de baterías del bus*

Dato	Valor
Capacidad de batería	276,5 kWh
Potencia máxima de carga	80 kW
Modelo de cargador	BYD EVA 080K1/01 AC estándar europeo
Peso bruto vehicular	18500 kg
Tipo de tecnología	Fierro fosfato

Nota. Elaborado con información de “Bus eléctrico K9FE” (BYD,2020)

Con los datos antes mencionados de dimensiones del bus se pueden realizar los cálculos del área frontal, masa, masa inercial del vehículo, radio dinámico y carga de accesorios.

$$A_f = 2,58 \times 3,45$$

$$A_f = 8,901 \text{ m}^2$$

Para el cálculo de la masa del vehículo se tendrá en cuenta lo siguiente:

La empresa de transporte en estudio (EPPO) solo transporta pasajeros sentados, por lo que se obviará la capacidad de pasajeros parados que pueda llevar el bus.

La altura promedio de una persona en Perú es de 1,59 m (Valores médicos, s.f.) con un peso promedio correspondiente de una persona de contextura gruesa de 60 kg (Valores médicos, s.f.).

A la masa de los pasajeros se debe sumar el peso bruto del vehículo

$$m = 18500 + 31 \times 60$$

$$m = 20360 \text{ kg}$$

$$m_i = 1,04 \times 20360$$

$$m_i = 21174,4 \text{ kg}$$

Para leer correctamente las características del neumático que usa el tipo de bus elegido y poder calcular el radio dinámico se ha considerado la Figura 13, la cual muestra diferentes secciones del modelo de un neumático, la nomenclatura como se representan y su significado.

La letra A hace referencia a la anchura del neumático en milímetros, la letra B es la altura del neumático con respecto a la anchura total expresado en porcentaje, la letra C corresponde al tipo de estructura del neumático (R se refiere a radial) y por último la letra D hace referencia al diámetro del aro en pulgadas (Tecnología y Motor, 2020).

Figura 13

Secciones de modelo de neumático



Nota. Extraído de “¿Cómo leer un neumático?” (Tecnología y Motor, 2020)

Por lo tanto, el cálculo del radio dinámico queda de la siguiente forma:

$$R_d = \frac{2 \times 305 \times 0,7 + 22,5 \times 25,4}{2000} \times 0,97$$

$$R_d = 0,4843 \text{ m}$$

El consumo de los dispositivos auxiliares depende de los sistemas de puertas, luces, de calefacción, de aire acondicionado, del clima, estación del año, número de pasajero y otros. El mayor consumidor de potencia de los sistemas antes mencionados viene a ser el de aire acondicionado y debido a que la temperatura media de Piura es de 24 °C se puede considerar que se hará un uso continuo de este de forma anual. En resumen, el valor de potencia consumida de estos dispositivos oscilará entre los 40 kW o más. (Philipp, Werner, & Dirk Uwe, 2010)

Para esta investigación se considerará un valor fijo de 40 kW de consumo para los dispositivos auxiliares.

Gracias a la tecnología de hierro fosfato que conforma la batería se puede obtener una estabilidad del voltaje a lo largo de la descarga, siendo esto una consecuencia de la estabilidad del valor de resistencia interna a lo largo de los ciclos de descarga (BSLBATT, 2020). Para fines de simulación se considerará un valor de 0,1 ohm.

Considerando los diferentes modelos de baterías ofrecidos por BYD, la alta capacidad de carga que debe llevar el bus y la alta densidad energética de las baterías se considerará que el voltaje de la batería de 400 V.

3.1.2 Ciclo de conducción

La determinación del ciclo de conducción se definirá de acuerdo con las siguientes etapas: definición del método de obtención, establecimiento de una ruta, recolección de datos y análisis de dato como se muestra en la Figura 14.

Figura 14*Proceso de obtención de ciclo de conducción*

3.1.2.1 Definición de método de obtención. El ciclo de conducción es una de las formas por la cual se puede calcular la demanda energética; por lo tanto, es importante involucrar todos los parámetros que interfieren en la operación.

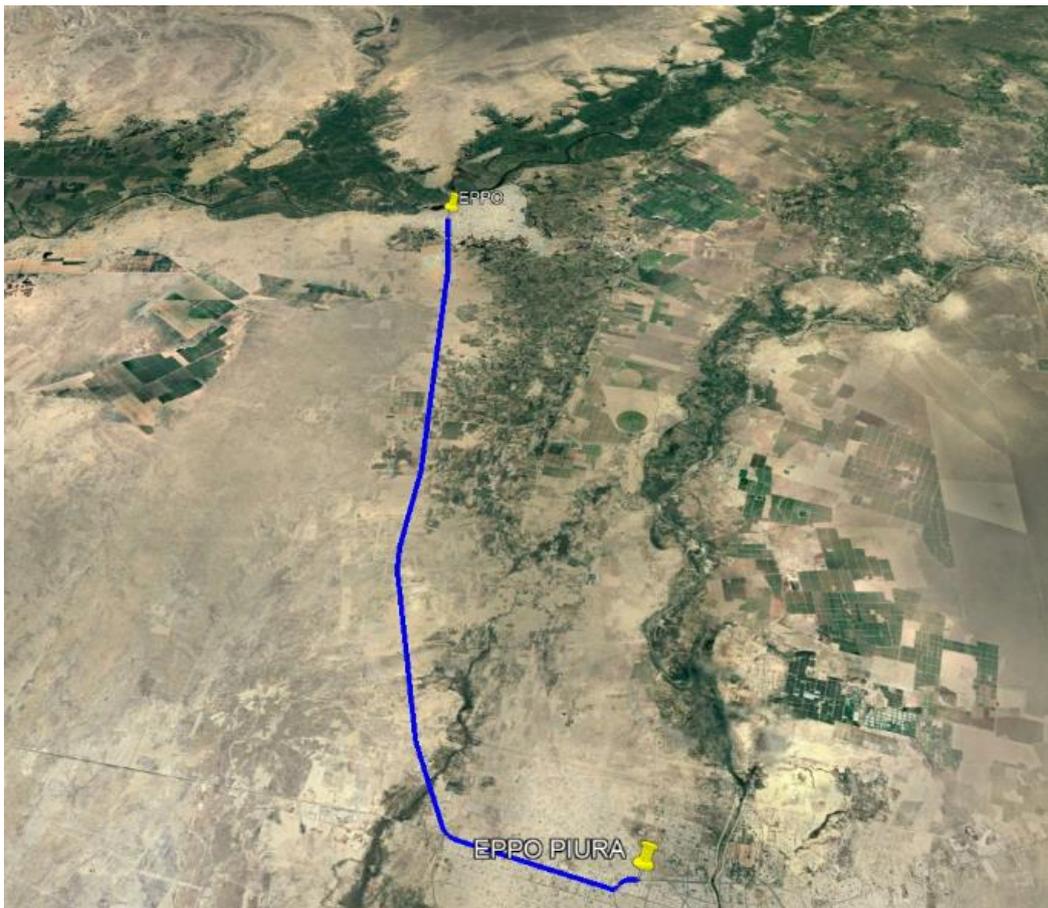
Debido a la falta de instrumentación y recursos para el seguimiento de un bus en una ruta en específico se ha decidido obtener curvas de velocidad de la base de datos de la agencia de protección ambiental de estado unidos (EPA) y los datos de la ruta desde Google Earth Pro y GPS visualizer.

La motivación de usar la base datos de la EPA es que presenta diferentes ciclos de velocidades reales en función del tiempo; sin embargo, no presenta datos de la ruta en específico que genera dicha curva de velocidad. Debido a que es necesaria la definición de una pendiente para poder concretar correctamente algunas de las resistencias que debe superar la fuerza en rueda es que se usa Google Earth Pro y GPS visualizer.

3.1.2.2 Rutas de análisis. La línea que se ha escogido es la ruta de Sullana - Piura la cual tiene mayor afluencia de pasajeros en la ciudad, usada por muchos trabajadores, estudiantes y otras personas de la zona. Una de las principales razones para la elección de esta ruta es que tiene los puntos de partida y llegada bien definidos, tiene un número de pasajeros definidos en cada trayecto y presenta horarios de salida entre buses como se muestra en la Tabla 10. Esta ruta parte del terminal de Eppo ubicado en San Marcelo 445 hacia su correspondiente en Piura ubicado en Av. Andrés Avelino Cáceres. El recorrido del bus se puede observar en la Figura 15 el cual corresponde a un total de 35,39 km.

Tabla 11*Horarios de salidas entre buses*

Ruta: Sullana - Piura	
Horarios de salida	Intervalo de salidas
6:00 – 21:00	45 minutos

Figura 15*Ruta de análisis Sullana - Piura*

3.1.2.3 Recolección y análisis de datos. Como ya se ha mencionado, para la recolección de datos se usarán la base de datos de la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (EPA) y Google Earth Pro.

Un fragmento del ciclo de velocidad escogido se presenta en la Tabla 12. Para el cálculo del porcentaje de pendiente al que iba a estar expuesto el bus en todo el trayecto se exportaron los datos de la ruta de la aplicación de Google Earth Pro para luego ingresarse a GPS visualizer. De todos los porcentajes de pendiente entregados por el programa se pudo obtener que la ruta en cuestión tiene un máximo de pendiente positiva de 3,1 % y un máximo de pendiente negativa de 3,2 %. La Tabla 13 muestra una clasificación de pendientes y sus tipos de relieves característicos.

Tabla 12*Fragmentado del ciclo de velocidad*

Tiempo de testeo (s)	Velocidad (mph)
0	0
1	0
2	0
3	0
4	0
5	0
6	0,2
7	0,7
8	1,1
9	1,4
10	6

Tabla 13*Clasificación de pendientes y características de relieve*

Pendiente (%)	Tipo de relieve
0 – 3	Plano
3 – 7	Suave
7 – 12	Mediano
12 – 35	Accidentado
35 – 50	Fuerte
50 – 75	Muy Fuerte
> 75	Escarpado

Nota. Elaborado con datos de “Estudio morfométrico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aire (Argentina)” (Camino et al., 2018)

En conclusión, se puede decir que la ruta elegida corresponde a un terreno de relieve plano, por lo que hacer el cálculo del promedio de porcentajes de pendientes puede ser factible para la simulación. El resultado del promedio como tal dio un valor de 1,07 %.

Como la ruta escogida pertenece a la región Piura para el cálculo de la densidad del aire se usará la temperatura promedio anual y su respectiva presión atmosférica según SENAMHI-PERÚ (2016).

$$T = 24 \text{ }^{\circ}\text{C} = 297,15 \text{ k}$$

$$P = 101.2 \text{ kPa}$$

$$101,2 \times \gamma = 0.287 \times 297,15$$

$$\gamma = 0.8427$$

$$\gamma = \frac{1}{\rho}$$

$$\rho = 1,187 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

3.2 Simulación

A manera de resumen se ha presentado la Tabla 14 con los valores de todas las variables que se considerarán en la simulación.

Tabla 14

Resumen de variables utilizadas en el modelo para la simulación

Variable	Valor	Unidad de medida
m	20360	kg
m _i	21174,4	kg
A _f	8,901	m ²
ρ	1,187	kg/m ³
C _h	1.5	Adimensional
C _d	0,6185	Adimensional
R _d	0,4843	m
V _{oc}	400	V
R _{interna}	0,1	Ohm
E	276,5	kWh
% pendiente	1,07	Adimensional
Potencia de dispositivos auxiliares	40	kW
Velocidad máxima	60	km/h
Estado de carga inicial	98	Porcentaje
Tiempo de simulación	596	s

Dependiendo del solver (solucionador) escogido para la simulación del modelo, los resultados pueden variar bastante. Los solucionadores ofrecidos por simulink se diferencian por el tamaño de paso: fijo y variable.

Un solucionador de paso fijo, como su mismo nombre dice, usan un intervalo de tiempo regular desde el principio hasta el final de la simulación. Este tamaño de paso se puede especificar directamente o dejar que el programa escoja un tamaño de paso. Un tamaño de paso más pequeño aumenta la precisión, pero genera tiempos de simulación más largos.

Un solucionador de paso variable varía el tamaño de los intervalos dependiendo de la variación de los estados del modelo. Se reduce el tamaño del paso para aumentar la precisión cuando los estados cambian repentinamente y los aumentan para evitar dar pasos innecesarios cuando los estados del modelo cambian lentamente. Esta variación de paso genera menores tiempo de simulación, pero aumenta los requerimientos computacionales debido al cálculo del tamaño del paso en cada punto de la simulación (Hahn, 2017).

Como el modelo presentado tiene varios puntos en el que las variables adoptan un comportamiento continuo debido a los limitadores, para evitar iteraciones innecesarias se usará un solucionador de paso variables.

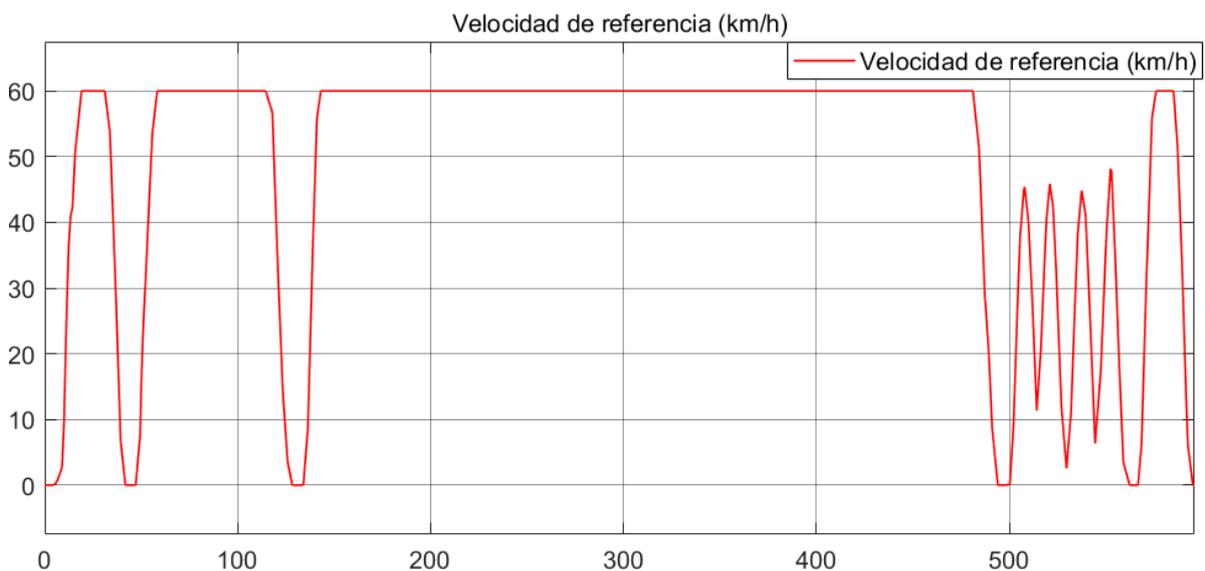
3.2.1 Sintonización del PID

La señal de velocidad de entrada se muestra en la Figura 16. Como se puede observar, la gráfica tiene cambios bruscos del valor de referencia, siendo lo óptimo para este proceso la implementación de un controlador PI.

El valor derivativo es altamente sensible a los cambios bruscos de la señal de referencia, lo que ocasiona incrementos de la señal de comando y problemas de saturación y sobre oscilación. (Ipanaqué Alama, 2012)

Figura 16

Velocidad de referencia



Como se explicó en el capítulo 2; en primer lugar, se buscará un valor ganancia que permita llevar al sistema a oscilaciones permanente. Dicho valor fue de 7500 dando los resultados mostrados en la Figura 17. Para obtener el dato del periodo crítico se usó la herramienta de data tips incluida en el programa, dicha medida se puede observar en la Figura 18.

Figura 17

Muestra de oscilaciones permanentes en velocidad de salida

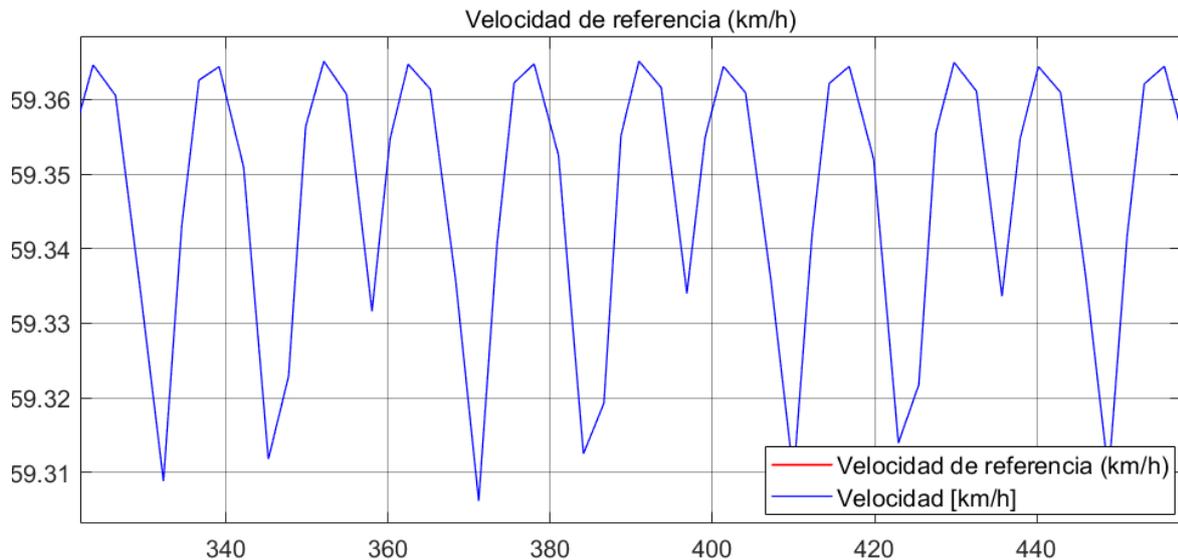
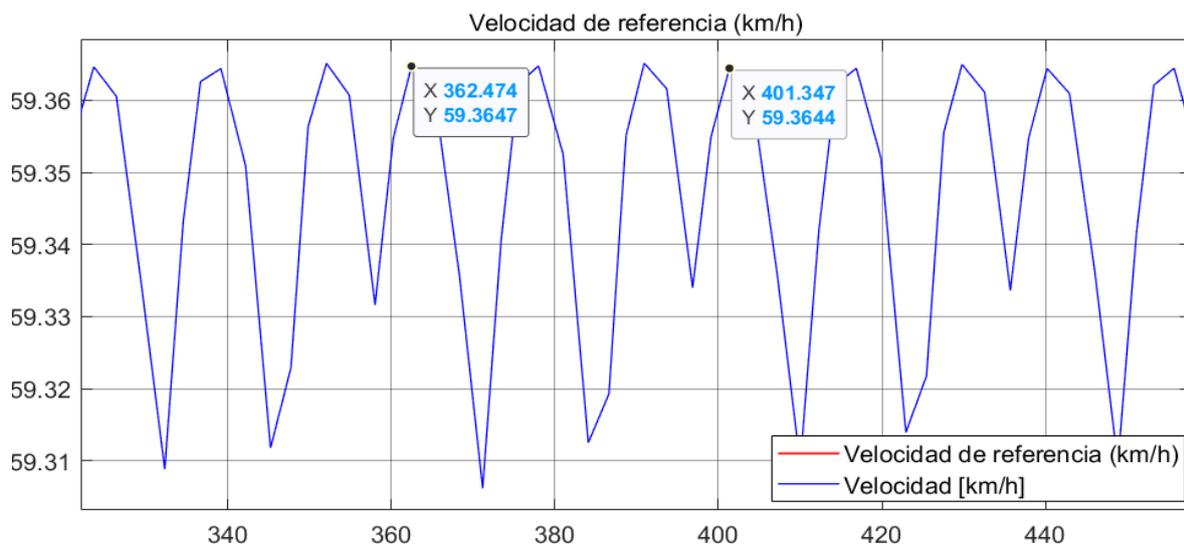


Figura 18

Cálculo de periodo crítico



La diferencia de tiempo entre los puntos señalados da como resultado 38,87 segundos. Los resultados de las variables del controlador PI se muestran en la Tabla 15.

Tabla 15*Variables de sintonización de PI*

	K	T_i
PI	3000	96.5250965

3.2.2 Análisis de resultados

En esta sección se presentarán de manera gráfica los resultados del modelo desarrollado en simulink.

3.2.2.1 Modelo del conductor. En esta sección se presentarán las curvas de velocidad de referencia contra velocidad de salida del proceso (Figura 19), la fuerza en rueda, variable manipulable (Figura 20), y la señal de error (Figura 21).

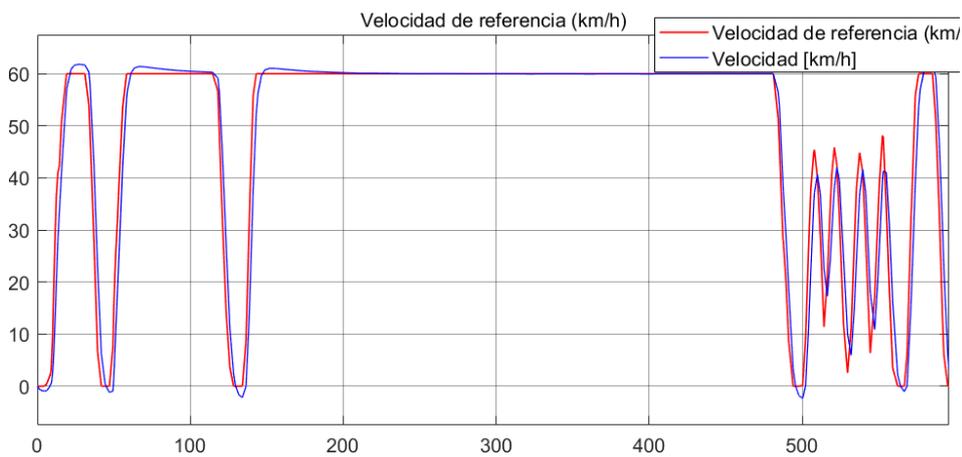
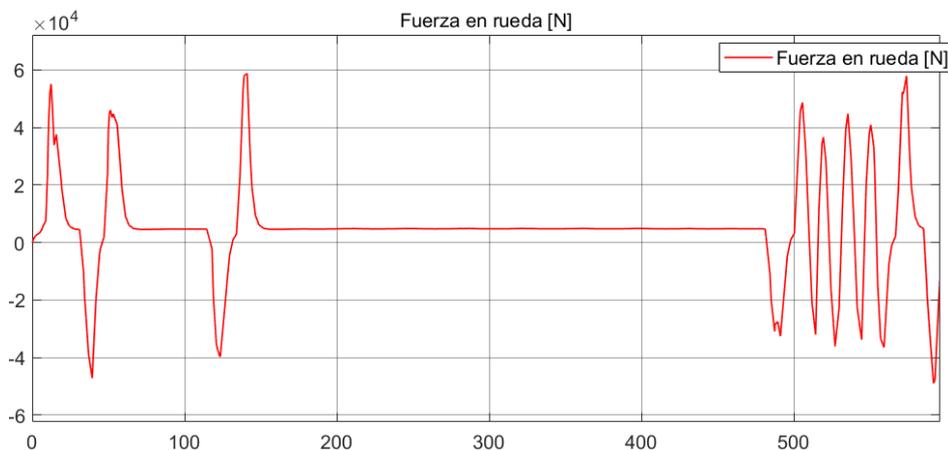
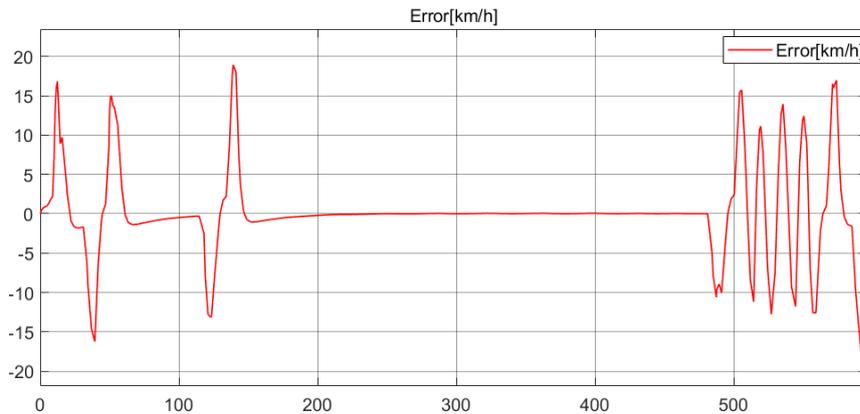
Figura 19*Velocidad de referencia contra velocidad de salida del proceso***Figura 20***Variable manipulable – Fuerza en rueda*

Figura 21*Señal de error*

Como se puede observar en la Figura 19 el controlador PI implementado hace un buen seguimiento de la señal de referencia, pero le es difícil su seguimiento en cambios bruscos.

En la Figura 20 se observa que la variable manipulable oscila entre valores de 60 kN y -60 kN. Estos valores representan la fuerza en rueda que necesita el vehículo para vencer las resistencias explicadas en el capítulo 2. Cuando el valor de fuerza es positivo se entiende que el vehículo está acelerando y cuando es negativo está en procesos de frenado.

A partir de la Figura 21 se refuerza más el hecho de no poder implementar la parte derivativa del controlador PID ya que al derivar los puntos de cambios bruscos como después del segundo 500 generan valores que provocan grandes oscilaciones en la respuesta del proceso.

3.2.2.2 Modelo de vehículo. En esta sección se mostrarán los resultados de la simulación de distancia recorrida (Figura 22), potencia tractiva (Figura 23) y torque de salida (Figura 24).

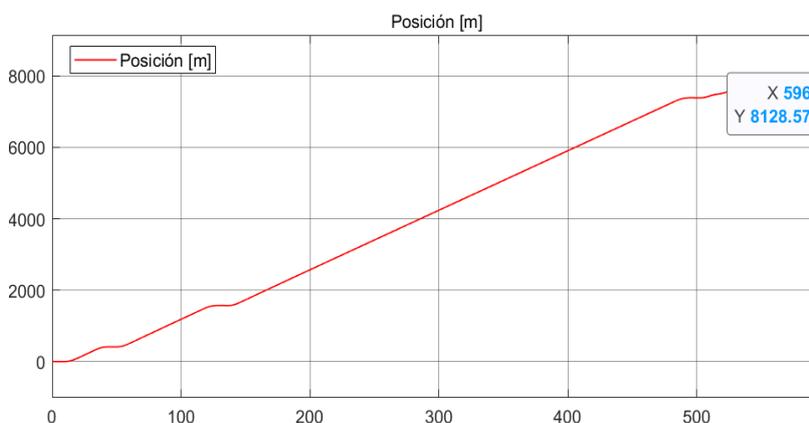
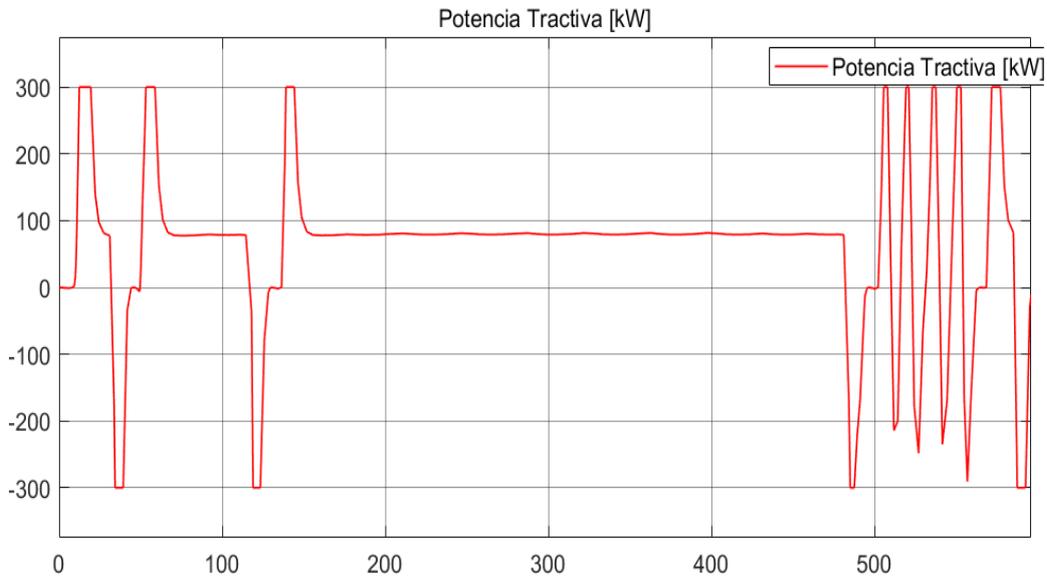
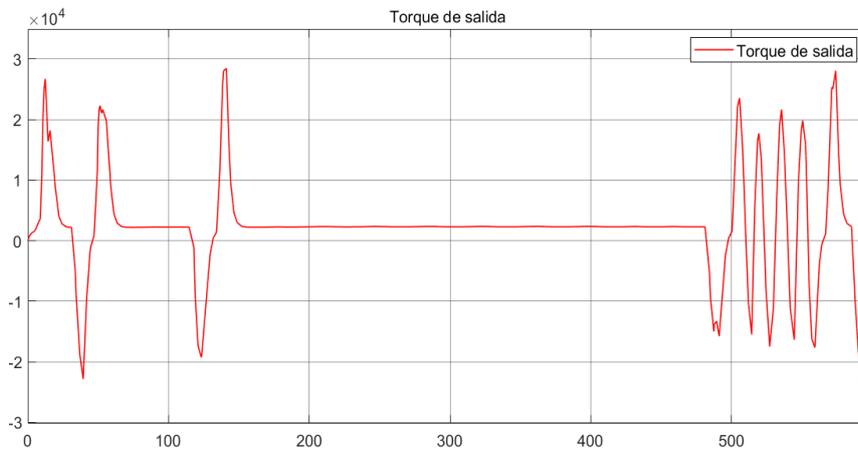
Figura 22*Distancia recorrida*

Figura 23*Potencia tractiva***Figura 24***Torque de salida*

Como se muestra en la Figura 22 la máxima distancia que logra recorrer el modelo es de 8,13 km por el perfil de velocidades de referencia. Como el objetivo es que el bus recorra 35,39 km los resultados presentados en el bloque de batería serán aproximados al recorrido total. Para esto se implementará la ecuación 20.

$$\text{Medida a estimar} = \frac{\text{valor de medida} \times 35.39}{8.13} \quad (20)$$

En las Figura 23 y Figura 24 se puede apreciar que tanto la potencia como el torque siguen a la curva de fuerza presenta en la Figura 20.

3.2.2.3 Modelo de batería. En esta sección se presentarán los resultados de corriente en la batería (Figura 25), estado de carga (Figura 26), energía consumida (Figura 27), potencia perdida (Figura 28) y voltaje de salida (Figura 29).

Figura 25

Corriente de batería

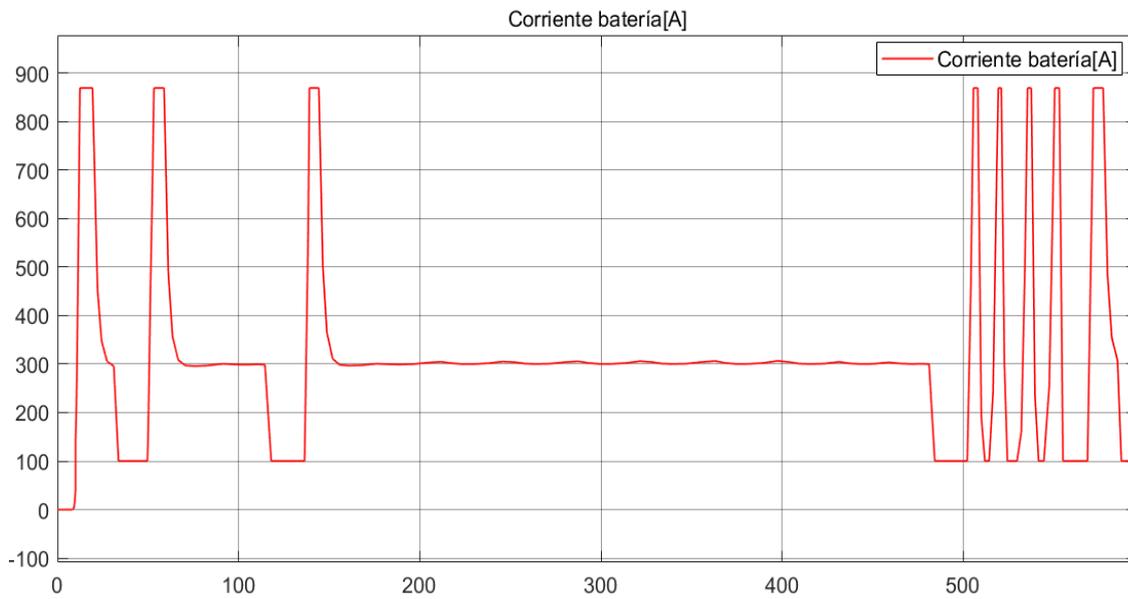


Figura 26

Estado de carga

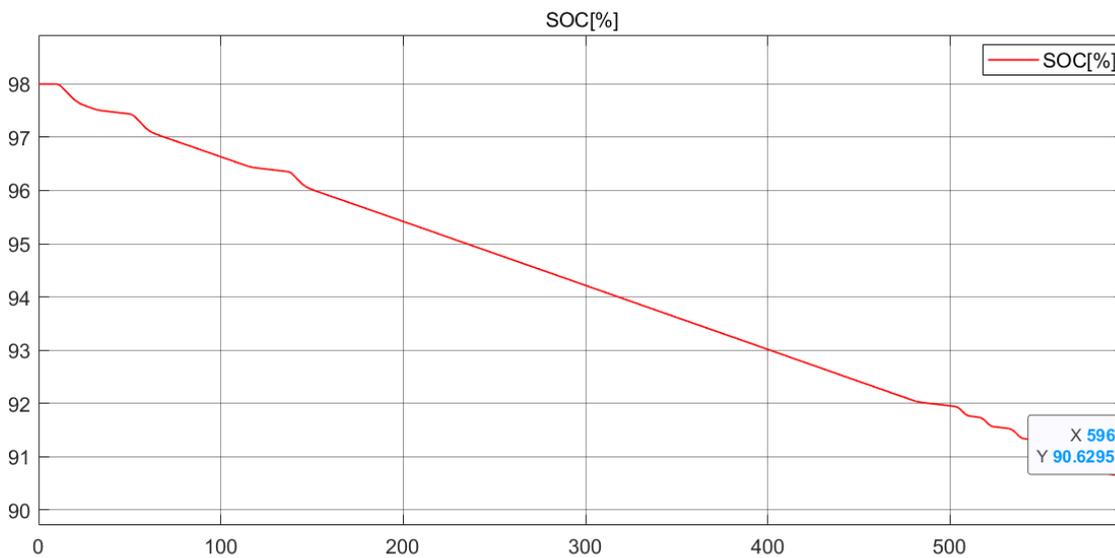


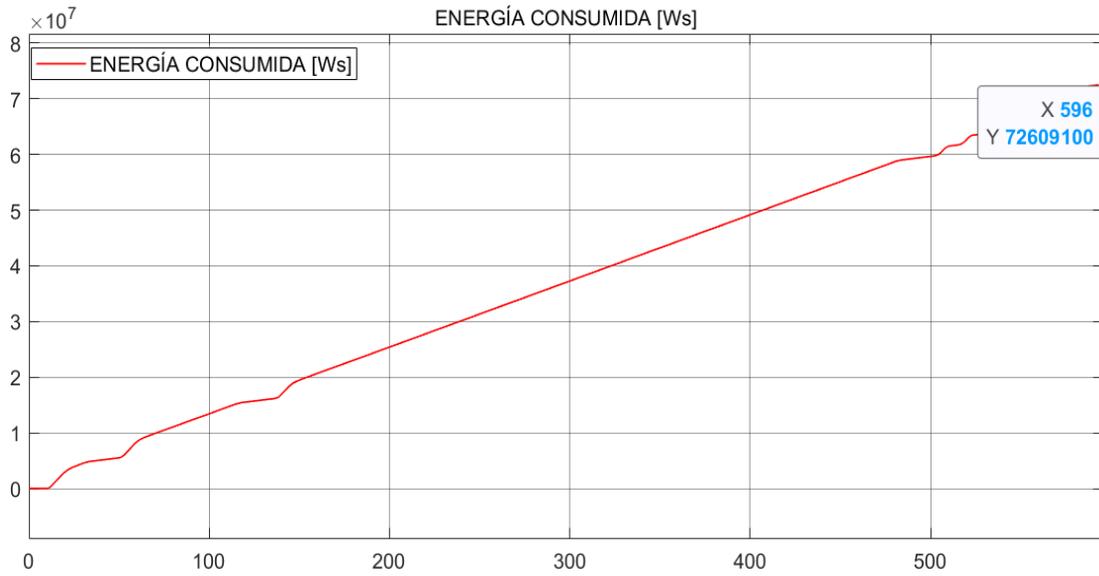
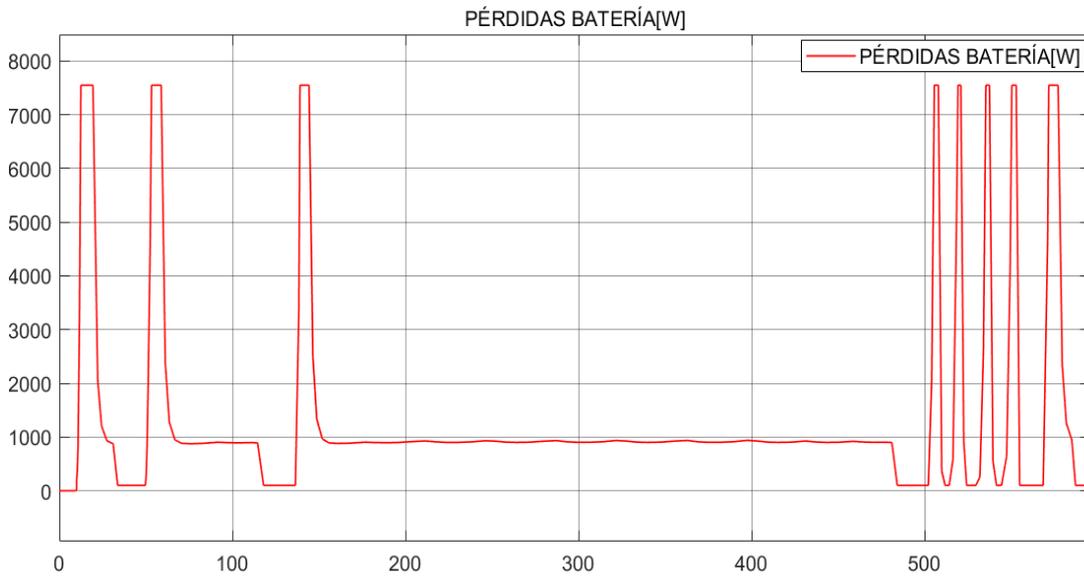
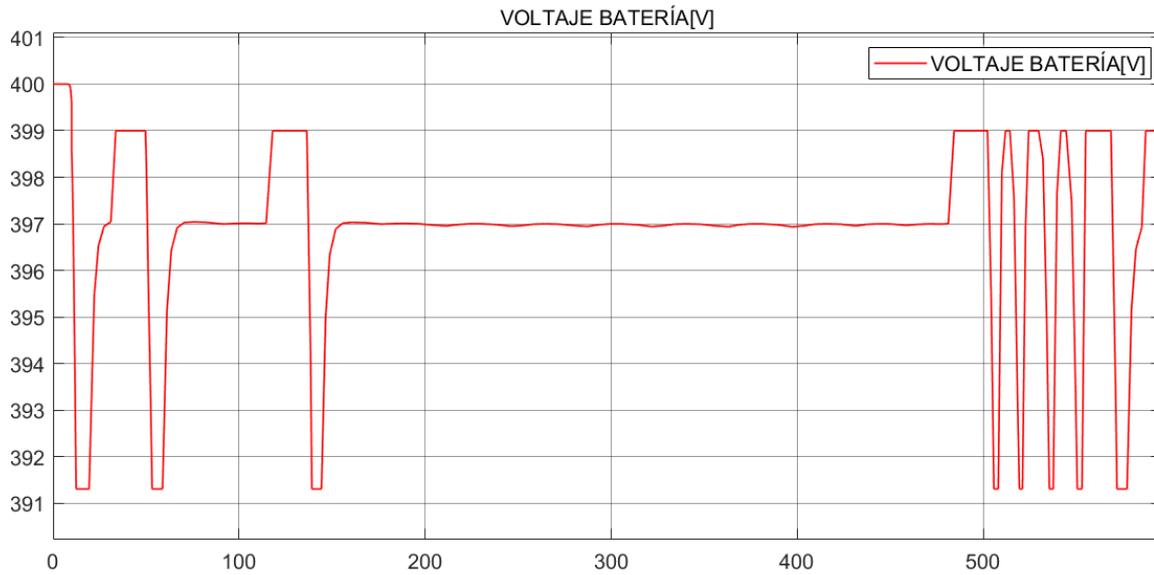
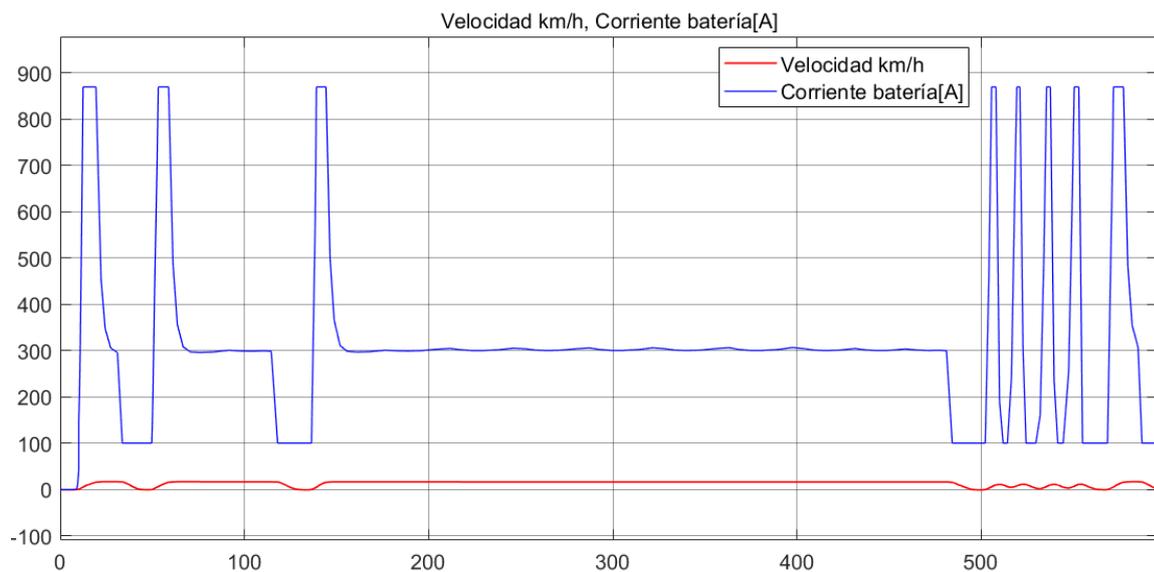
Figura 27*Energía consumida***Figura 28***Potencia perdida en la batería*

Figura 29*Voltaje de batería*

La Figura 25 tiene una forma similar a la de la potencia; sin embargo, a la potencia de entrada al cálculo de la corriente se le debe sumar la potencia de los accesorios. Para entender la gráfica de la corriente de batería se ha obtenido la Figura 30 que presenta la corriente contra la velocidad, donde se puede observar que a medida que se requiere más velocidad, aumentará la potencia requerida y la corriente.

Figura 30*Corriente de batería contra velocidad de salida*

En la Figura 26 se puede observar qué tanto se descarga la batería a lo largo de todo el recorrido dando un porcentaje de carga final de 90.63 %, como el vehículo inicia el recorrido con un estado de carga inicial del 98 %, la batería se ha descargado un 7.37 %. Como ya se mencionó se usarán los datos de recorrido para simular la descarga total en la ruta escogida con la ecuación 20.

$$\text{descarga total} = \frac{7.37 \times 35,39}{8,13}$$

$$\text{descarga total} = 32.08 \%$$

$$\text{SOC}_{\text{final}} = 98 - 32.08 = 65.92 \%$$

La energía total consumida mostrada en la Figura 27 es de 72,61 MWs. Para entender mejor este dato se convertirá a kWh y luego se simulará para el recorrido total con la ecuación 20.

$$\text{Energía consumida} = 72,61 \times \frac{1000}{3600}$$

$$\text{Energía consumida} = 20,17 \text{ kWh}$$

$$\text{Energía consumida}_{\text{total}} = \frac{20,17 \times 35,39}{8,13} = 87,8 \text{ kWh}$$

$$\text{Energía restante} = \text{Energía total de batería} - \text{Energía consumida}_{\text{total}}$$

$$\text{Energía restante} = 183,7 \text{ kWh}$$

Con el dato de energía total consumida se puede estimar cuantos recorridos puede hacer un bus sin necesidad de recargar la batería con la ecuación 21.

$$\text{Número de recorridos} = \frac{\text{Energía total de batería}}{\text{Energía consumida}_{\text{total}}} \quad (21)$$

$$\text{Número de recorridos} = \frac{276,5}{87,8} = 3,15$$

Si se tiene en cuenta que el horario de trabajo es de 15 horas es necesario implementar un sistema de carga de batería que permita alcanzar un mayor número de recorridos.

La Figura 28 tiene una forma similar a la Figura 25 ya que a medida que se requiere mayor corriente, se generará más calor y en consecuencia se perderá más potencia.

Con respecto a la Figura 29, se puede notar que el voltaje de la batería baja conforme aumentan los requerimientos de corriente; sin embargo, no vuelve a su estado inicial de 400 V sino a un valor de 399 V. Esto es, debido a que se ha considerado el consumo de los dispositivos auxiliares como una entrada escalón a partir del segundo 10. Como se tiene un valor constante de consumo la batería no se puede llegar a su valor inicial

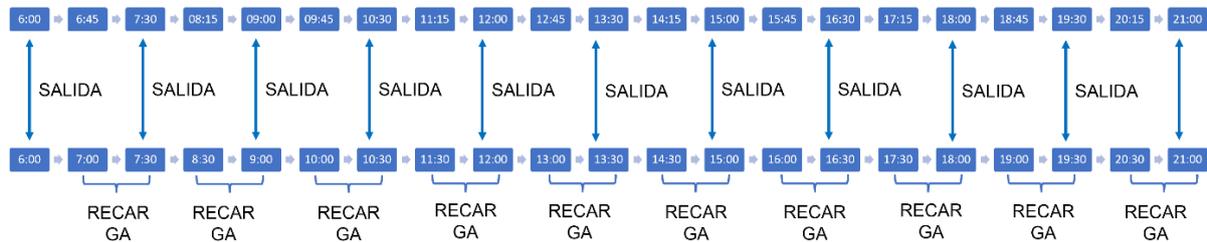
3.3 Implementación de infraestructura

Como se requiere que el vehículo tenga un mayor número de viajes, es necesario implementar una estructura de carga en cada una de las estaciones. En primer lugar, se definirá el horario de conducción de un solo bus a lo largo del día sacando provecho de los tiempos muertos para que el bus cargue y pueda realizar el máximo número de viajes.

Teniendo en cuenta que el intervalo de salidas de buses es cada 45 minutos y el tiempo de duración del viaje es 1 hora. Entonces como se muestra en la Figura 31 el bus tendrá que completar 11 viajes diarios con una disposición de 30 minutos de tiempo muerto para recarga de la batería.

Figura 31

Propuestas de salidas y recargas para un bus eléctrico



Según BYD (2020) muestra un tipo de cargador BYD EVA 080K1/01 estándar, que presenta una potencia máxima de carga de 80 kW. Debido a que dicho cargador es del tipo pistola, la infraestructura de carga que se debe implementar será la misma que se muestra en BYD (2020), Figura 32. El total de la carga se realizará según la ecuación 22.

$$E_{\text{recarga}} = P_{\text{cargador}} \times T_{\text{carga}} \quad (22)$$

Donde:

E_{recarga} : Energía recargada [kWh]

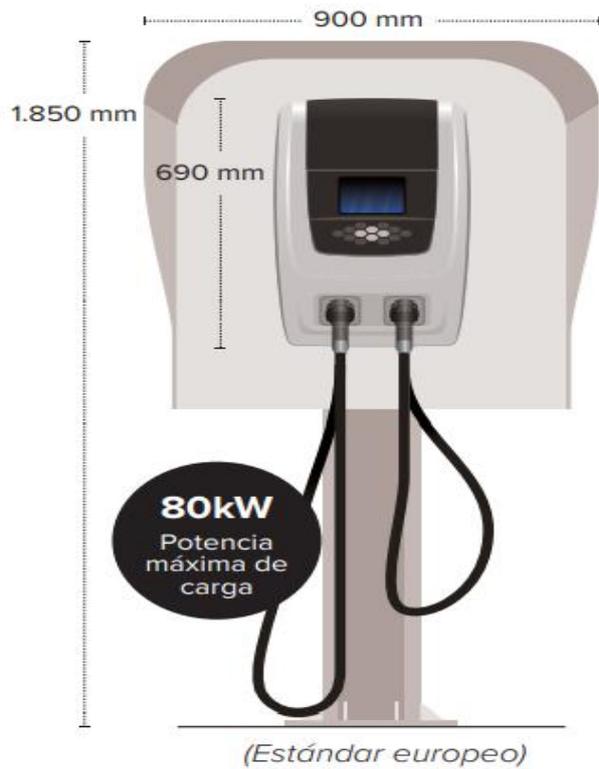
P_{cargador} : Potencia máxima de cargador [kW]

T_{carga} : Tiempo de carga [h]

$$E_{\text{recarga}} = 80 \text{ kW} \times 0,5 \text{ h} = 40 \text{ kWh}$$

Figura 32

Tipo de cargadores a instalar en terminales



Nota. Extraído de "Bus eléctrico K9FE" (BYD, 2020)

Siguiendo el esquema presentado en la Figura 31, se ha analizado la energía después de cada carga y descarga, además de los tiempos del cual el bus tiene disponibilidad para cargar. Entonces se puede obtener 2 esquemas de carga.

El primero escenario se ajusta a los horarios de salida presentados en la Figura 31, como se muestra en la Tabla 16 y el segundo trata de llegar al horario más próximo de salida como se muestra en la Tabla 17.

Tabla 16*Salidas de buses con horarios propuestos*

Hora	SOC	Energía de batería	Energía recargada
06:00	98.00%	270.97	-
07:00	65.92%	183.17	-
07:30	80.71%	223.17	40
08:30	48.96%	135.37	-
09:00	63.42%	175.37	40
10:00	31.67%	87.57	-
10:30	46.14%	127.57	40
11:30	14.38%	39.77	-
12:00	28.85%	79.77	40
13:00	57.78%	159.77	80
13:30	72.25%	199.77	40
14:30	40.50%	111.97	-
15:00	54.96%	151.97	40
16:00	23.21%	64.17	-
16:30	37.67%	104.17	40
17:30	5.92%	16.37	-
18:00	20.39%	56.37	40
19:00	49.32%	136.37	80
19:30	63.79%	176.37	40
20:30	32.03%	88.57	-
21:00	46.50%	128.57	40
-	14.75%	40.77	-

Nota. Las horas en rojo representa las horas de salida del bus

Tabla 17*Salidas de buses al horario más próximo*

Hora	SOC	Energía de batería (kWh)	Energía recargada (kWh)
06:00	98.00%	270.97	-
07:00	65.92%	183.17	
07:30	80.71%	223.17	40
08:30	48.96%	135.37	-
09:00	63.42%	175.37	40
10:00	31.67%	87.57	-
10:30	46.14%	127.57	40
11:30	14.38%	39.77	-
12:00	28.85%	79.77	40
12:45	50.55%	139.77	60
13:45	18.80%	51.97	-
14:15	33.26%	91.97	40
15:00	54.96%	151.97	60
16:00	23.21%	64.17	-
16:30	37.67%	104.17	40
17:30	5.92%	16.37	
18:00	20.39%	56.37	40
18:45	42.09%	116.37	60
19:45	10.33%	28.57	-
20:15	24.80%	68.57	40
21:00	46.50%	128.57	60
-	14.75%	40.77	-

Nota. Las horas en rojo representa las horas de salida del bus

En ambos casos se tiene un total de nueve salidas, con un total de 560 kWh de energía recargada, de los cuales 360 kWh se encuentra fuera de hora punta y 200 kWh dentro de hora punta (de 18:00 a 23:00 de cada año menos domingos y feriados).

Como una estimación de los gastos en energía se tomará una tarifa de media tensión (MT2) la cual tienen las siguientes tarifas fuera de hora punta y dentro de hora punta. Como se muestra en la Tabla 18.

Tabla 18

Cargos de energía en tarifa MT2

Cargo	Unidad	Tarifa
Cargo por energía activa en punta	ctm. S//kW.h	34.19
Cargo por energía activa fuera de punta	ctm. S//kW.h	28.32

Nota. Elaborada con datos de “Pliego tarifario máximo del servicio público de electricidad” (OSINERGMIN,2023)

El cálculo de la tarifa eléctrica se hará por medio de la ecuación 23. No se tiene en cuenta los cargos adicionales relacionados a la tarifa MT2 al no tener información de consumos eléctricos por parte de la empresa.

$$S/. \text{Gasto} = \frac{E_{HP} \times 34,19 + E_{FHP} \times 28,32}{100} \quad (23)$$

Donde

S/ GE: Gasto electrico en soles

E_{HP} : Energía en hora punta

E_{FHP} : Energía fuera de hora punta

$$S/ \text{Gasto} = \frac{200 \times 34,19 + 360 \times 28,32}{100} = S/170,332$$

El total de gasto en soles para un bus recorriendo en los horarios propuesto en la Figura 31 sería de 170,332 soles.

Conclusiones

En esta investigación se ha realizado el modelo de demanda de energía de un bus eléctrico para una ruta de transporte público local.

Como se ha buscado que el modelo tenga una fácil adaptabilidad a cualquier zona del país que desee analizar los consumos energéticos de un bus en cierto recorrido no se han considerado algunos subsistemas en la simulación (motor, transmisión y freno regenerativo), ya que estos implican la definición de pérdidas que dependen exclusivamente del modelo de bus en estudio. Las variables involucradas son las que se han considerado de más fácil acceso por la baja implementación de flotas de vehículos eléctricos en el Perú.

Con los subsistemas definidos se ha podido llegar a realizar satisfactoriamente el análisis del estado de carga de la batería. Sin embargo, como la curva de velocidades obtenida no lograban satisfacer las necesidades de distancia de la ruta se han tenido que escalar los resultados obtenidos.

Suponiendo que un solo bus debe recorrer el máximo de rutas diarias. El bus en estudio pudo llegar a recorrer 9 de las 11 rutas que le permite los horarios de salida de la empresa EPPO. Además, se puede obtener datos de la variación de la energía de su batería y su estado de carga para procurar que no tenga la necesidad de cargar sin tener que terminar un trayecto.

El modelo desarrollado muestra resultados congruentes de consumo de energía, estado de carga y distancia recorrida comparándolo con el modelo desarrollado por Team (2023) para el mismo ciclo de velocidades pero con diferentes características de vehículos y trayectorias.

Debido a que la empresa de transporte público en estudio solo realiza parada en sus terminales la opción de infraestructura de carga óptima a implementar sería una estación que permita cargar las baterías de los buses a su máxima potencia para reducir los tiempos de parada y que estos puedan realizar más recorridos a lo largo del día.

Para mejorar las investigaciones con respecto al desarrollo de modelos de demanda de buses eléctricos se pueden realizar ensayos en los que se obtengan los ciclos de conducción específicos para alguna ruta en estudio y obtener datos precisos de consumo de energía.

Así mismo, se deben realizar estudios económicos para comparar los consumos de energía eléctrica con los del consumo de combustible de un bus de convencional utilizados

por la empresa EPO. En este mismo análisis se pueden incluir los costos del vehículo, implementación e infraestructura de carga y estimación del tiempo de retorno de la inversión.

Finalmente, con esta investigación se planea iniciar una serie de investigaciones relacionadas con la implementación de flotas de buses eléctricos en el Perú, motivando a la vez a que las empresas analicen la factibilidad de implementación de estas flotas y que los gobiernos puedan proponer políticas que favorezcan el uso de vehículos eléctricos como medida de enfrentar la crisis ambiental actual.



Referencias bibliográficas

- BSLBATT. (29 de Febrero de 2020). *BSLBATT*. Obtenido de BSLBATT best solution lithium battery: <https://www.lithium-battery-factory.com/es/lithium-iron-phosphate-vs-lithium-ion/>
- BYD. (2020). *BYDCHILE*. Recuperado el 14 de Febrero de 2023, de BUS ELÉCTRICO K9FE: <https://www.bydchile.com/images/K9FE.pdf>
- Camino, M., Bó, M., Cionchi, J., López de Armentia, A., Del Río, J., & De Marco, S. (2018). *Estudio morfológico de las cuencas de drenaje de la vertiente sur del sudeste de la provincia de Buenos Aires (Argentina)*. Revista Universitaria de Geografí.
- Cengel, Y., & Boles, M. (1999). *Termodinámica* (1a ed.). MEXICO: MCGRAW-HILL.
- Di Martino, A., Longo, M., Shankar Prasad, G., Foidalli, F., Yaici, W., & Zaninelli, D. (2022). Implementation and validation modelling of energy demand of electric buses for local public transport. *2022 10th International Conference on Smart Grid (icSmartGrid)*, 266-270. doi:10.1109/icSmartGrid55722.2022.9848756
- Gillespie, T. (1992). *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. Warrendale: Society of Automotive Engineers, Inc. .
- Guiñansaca Chincilima, W. M. (2020). *Metodología para la Configuración Energética de un Bus Eléctrico*. Cuenca - Ecuador: Universidad de Azuay.
- Hahn, C. (8 de Diciembre de 2017). *MathWorks*. Obtenido de <https://blogs.mathworks.com/student-lounge/2017/12/08/solver-choice/>
- Ipanaqué Alama, W. (2012). *Control Automático de procesos*. Lima: Consejo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación Tecnológica - CONCYTEC.
- McKerracher, C., O'Donovan, A., Soulopoulos, N., Grant, A., Mi, S., Doherty, D., . . . Kawahara, T. (2022). *Electric Vehicle Outlook*. Bloomberg. Recuperado el 24 de Enero de 2023, de <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/>
- Minas, M. d. (2021). *Balance Nacional de Energía 2019*. Lima: Ministerio de Energía y Minas.
- OSINERGMIN. (04 de Febrero de 2023). *Osinergmin*. Obtenido de <https://www.osinergmin.gob.pe/Tarifas/Electricidad/PliegoTarifario?Id=200000>

- Peña Salvador, G. (2021). *Modelado de un autobús eléctrico urbano y optimización de la estrategia de carga*. Zaragoza: Universidad de Zaragoza.
- Philipp, S., Werner, R., & Dirk Uwe, S. (2010). Conceptional Considerations for Electrification of Public City Buses. *2010 Emobility - Electrical Power Train*, 1-5. doi:10.1109/EMOBILITY.2010.5668044
- Piña García, R. L., & Sisa Jaya, J. J. (2021). *Determinación de la demanda energética del sistema de transporte urbano en rutas establecidas previo a la implementación de buses eléctricos para la ciudad de Riobamba*. Cuenca - Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Rojas, A., Gonzales, S., Afa, O., Peña, C., & Alamo, M. (2022). *Situación actual de los vehículos y buse híbridos y eléctricos en el Perú*. Lima: AEDIVE PERÚ.
- Saleem, A., Liu, N., Junjie, H., Iqbal, A., Aftab Hayyat, M., & Mateen, M. (2020). *Modelling of an Electric Vehicle for Tractive Force Calculation Along With Factors Affecting the Total Tractive Power and Energy Demand*. Sukkur, Pakistan: IEEE.
- SENAMHI-PERÚ. (2016). *Caracterización y escenarios climáticos de la región Piura*. Lima: Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú SENAMHI.
- Sinhuber, P., Werner, R., & Uwe Sauer, D. (2012). Study on Power and Energy Demand for Sizing the Energy Storage Systems for Electrified Local Public Transport Buses. *2012 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference*, 315-320. doi:10.1109/VPPC.2012.6422680
- Team, M. S. (2023). *Matworks*. Recuperado el 07 de Febrero de 2023, de <https://github.com/mathworks/vehicle-modeling/releases/tag/v4.1.1>
- Tecnología y Motor. (14 de Agosto de 2020). *race.es*. Obtenido de ¿Cómo leer un neumático? Dimensiones, códigos y nomenclaturas: <https://www.race.es/como-leer-neumatico-dimensiones-codigos-nomenclaturas>
- Valenti, G., Liberto, C., Lelli, M., Ferrara, M., Nigro, M., & Villante, C. (2017). The impact of Battery Electric Buses in Public Transport. *2017 IEEE International Conference on Environment and Electrical Engineering and 2017 IEE Industrial and Commercial Power Systems Europe*, 1-5. doi:10.1109/EEEIC.2017.7977517
- Valores médicos*. (s.f.). Recuperado el 14 de Febrero de 2023, de <https://www.valoresmedicos.com/peso-promedio-segun-altura-de-una-persona-adulta/>
- Valores médicos*. (s.f.). Recuperado el 14 de Febrero de 2023, de <https://www.valoresmedicos.com/peso-promedio-segun-altura-de-una-persona-adulta/>

- Vélez Loaiza, S. C., & Vera Vanegas, A. V. (2016). *Obtención de los parámetros necesarios para el cálculo de la fuerza en rueda de vehículos eléctricos*. CUENCA: Universidad de Azuay.
- Zhang, B., & Chunting Mi, C. (2011). Charge-Depleting Control Strategies and Fuel Optimization of Blended-Mode Plug-In Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, VOL. 60.
- Zongxuan, S., & Guoming G., Z. (2014). *Design and Control of automotive Propulsion Systems* (1st ed.). Boca Raton: CRC Press. doi:<https://doi.org/10.1201/b17947>

