

UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE CUENCA

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA AUTOMOTRIZ

*Trabajo de titulación previo
a la obtención del título de
Ingeniero Mecánico Automotriz*

PROYECTO TÉCNICO:

**“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”**

AUTORES:

RONAL LEONEL PIÑA GARCÍA

JHONNATHAN JAIRO SISA JAYA

TUTOR:

ING. JAVIER STALIN VÁZQUEZ SALAZAR, Ms.C.

CUENCA - ECUADOR

2021

CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

Nosotros, Ronal Leonel Piña García con documento de identificación N° 0302608450 y Jhonnathan Jairo Sisa Jaya con documento de identificación N° 0605161975, manifestamos nuestra voluntad y cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del trabajo de titulación: **“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”**, mismo que ha sido desarrollado para optar por el del título de: *Ingeniero Mecánico Automotriz*, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En aplicación a lo determinado en la Ley de Propiedad Intelectual, en nuestra condición de autores nos reservamos los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia, suscribimos este documento en el momento que hacemos entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, junio de 2021.



Ronal Leonel Piña García
C.I. 0302608450



Jhonnathan Jairo Sisa Jaya
C.I. 0605161975

CERTIFICACIÓN

Yo, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **“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”**, realizado por Ronal Leonel Piña García y Jhonnathan Jairo Sisa Jaya, obteniendo el *Proyecto Técnico*, que cumple con los requisitos estipulados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, junio de 2021.



Ing. Javier Vázquez Salazar, Ms.C.

C.I. 0301448353

DECLARATORIA DE RESPONSABILIDAD

Nosotros, Ronal Leonel Piña García con documento de identificación N° 0302608450 y Jhonnathan Jairo Sisa Jaya con documento de identificación N° 0605161975, autores del trabajo de titulación: **“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”**, certificamos que el total contenido del *Proyecto Técnico*, es de nuestra exclusiva responsabilidad y autoría.

Cuenca, junio de 2021.



Ronal Leonel Piña García
C.I. 0302608450



Jhonnathan Jairo Sisa Jaya
C.I. 0605161975

DEDICATORIA

Este trabajo lo dedico primeramente a Dios, además de manera muy especial a mis queridos padres Carlos Piña y Lourdes García, por haber tenido paciencia conmigo a lo largo de los años y ser el pilar fundamental de apoyo en mi vida cotidiana.

A mis hermanos y amigos quienes me brindan apoyo incondicional y gracias a quienes he logrado alcanzar mis metas de manera satisfactoria.

Ronal

DEDICATORIA

Dedico este proyecto técnico de manera muy especial a mis queridos padres: Segundo Sisa y Rosa Jaya, por haberme forjado en la que soy; muchos de mis logros se los debo a ustedes en los que se incluye este trabajo. Me formaron con reglas y algunas libertades, pero al final de cuentas, me motivaron constantemente para alcanzar mis anhelos. Gracias padre y madre.

Jhonnathan Jairo

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por ser la fuente de sabiduría y el apoyo espiritual sobre el cual reposan todos los logros conseguidos a lo largo de mi vida.

Agradezco a mis padres Carlos y Lourdes, quienes son el ejemplo de trabajo, perseverancia, amor y lucha, que he intentado reflejar en cada acción realizada a lo largo de mi formación, tanto profesional como personal.

A mis hermanos Walter, Carlos y Catalina, por estar siempre conmigo, compartiendo cada momento de mi vida y por el apoyo incondicional que me brindan.

A la Universidad Politécnica Salesiana por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional.

Al director de mi tesis, Ingeniero Javier Vázquez por el apoyo con sus conocimientos y experiencia durante la elaboración de este proyecto.

A todos mis amigos, con los cuales he compartido momentos maravillosos a lo largo de esta etapa, por su apoyo, consejos y afecto.

Ronal

AGRADECIMIENTO

En primer lugar, agradezco a Dios por estar siempre a mi lado a lo largo de mi vida, y en especial en este camino lleno de luchas constantes que ha sido la carrera Universitaria, también por brindarme salud y fuerzas.

A mis queridos padres: Segundo Sisa y Rosa Jaya, por siempre creer en mí y apoyarme incondicionalmente para alcanzar este título profesional, también por repetir en cada momento que se sienten orgullosos de mí, yo también siento orgullo de ser su hijo.

A todos los miembros de mi familia, por su apoyo y ánimo, cada uno ha contribuido de manera especial y única para el desarrollo de mi formación profesional.

A la Universidad Politécnica Salesiana por darme la oportunidad de estudiar y ser un profesional.

A todos mis amigos, con los cuales he compartido momentos maravillosos en esta etapa, por su apoyo, consejos y afecto.

Jhonnathan Jairo

RESUMEN

Esta investigación presenta el proceso para la obtención de la demanda energética y el valor de los parámetros indicativos que debería tener el motor de un autobús eléctrico destinado al transporte urbano en el cantón Riobamba, como consecuencia de la nueva tendencia al uso de modelos y tecnologías sostenibles.

En primer lugar, se desarrolló una investigación teórica acerca de los parámetros que influyen en la demanda energética y sus métodos de obtención. Se determinan las ecuaciones de dinámica vehicular que se utilizarán posteriormente y los métodos de obtención de los ciclos de conducción que son de vital importancia para el cálculo de los parámetros indicativos. Luego se analiza la información del sistema de transporte urbano de Riobamba, para realizar la selección de las rutas en función de criterios tales como: demanda de pasajeros, pendiente, longitud de recorrido y los lugares importantes de la ciudad por los que atraviesa cada línea de bus. Además, se determinan los parámetros del vehículo en este caso de un modelo AK-8JRSA de la marca HINO que abarca el 73% del total de la flota de buses urbanos. Una vez seleccionada la ruta, se realiza la adquisición de datos mediante el dispositivo GPS Garmin 64 para la construcción de los ciclos de conducción. Después se realiza un algoritmo para el procesamiento de datos de la demanda energética y demás parámetros indicativos en software Matlab.

En último lugar, se muestra el alcance de las prestaciones en rueda, para cumplir con un bus eléctrico los requerimientos de la trayectoria.

Palabras Clave: Demanda energética, ciclo de conducción, dinámica vehicular, bus eléctrico

SUMMARY

This research presents the process for obtaining energy demand and the value of the indicative parameters that the motor of an electric bus destined for urban transport in the Riobamba canton should have, as a consequence of the new trend towards the use of sustainable models and technologies. .

In the first place, a theoretical investigation was carried out on the parameters that influence energy demand and their methods of obtaining it. The vehicle dynamics equations that will be used later and the methods of obtaining the driving cycles that are of vital importance for the calculation of the indicative parameters are determined. Then the information of the urban transport system of Riobamba is analyzed, to make the selection of the routes based on criteria such as: passenger demand, slope, length of route and the important places in the city through which each line of bus. In addition, the vehicle parameters are determined in this case of a HINO brand AK-8JRSA that covers 73% of the total urban bus fleet. Once the route is selected, data is acquired using the Garmin 64 GPS device to construct the driving cycles. Afterwards, an algorithm for data processing of energy demand and other indicative parameters is carried out in Matlab software.

Lastly, the scope of wheel performance is shown, to meet the path requirements with an electric bus. **Key Words:** *Energy demand, driving cycle, vehicle dynamics, electric bus*

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	viii
SUMMARY	ix
ÍNDICE GENERAL	x
ÍNDICE DE TABLAS	xv
ÍNDICE DE FIGURAS.....	xvii
ÍNDICE DE ECUACIONES	xx
INTRODUCCIÓN	1
PROBLEMA.....	1
Antecedentes	1
Importancia y alcance	2
Delimitación.....	3
Ubicación geográfica del cantón Riobamba	3
OBJETIVOS	3
Objetivo General.....	3
Objetivos Específicos.....	4
CAPITULO I	5
1. ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	5

1.1. MARCO TEÓRICO.....	5
1.1.1. DEMANDA ENERGÉTICA DEL TRANSPORTE EN ECUADOR.....	5
1.1.2. ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA.....	6
1.1.2.1. DINÁMICA DE VEHÍCULOS	6
1.1.3. CLASIFICACIÓN VEHICULAR.....	8
1.1.3.1. CATEGORÍA M.....	9
1.1.3.2. SUBCATEGORÍA M3	9
1.1.4. BUS URBANO.....	10
1.1.4.1. REQUISITOS	10
1.1.5. CICLOS DE CONDUCCIÓN	10
1.1.5.1. TIPOS DE CICLOS DE CONDUCCIÓN	11
MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE CICLOS DE CONDUCCIÓN	13
1.2. ESTADO DEL ARTE.....	15
CAPITULO II.....	18
2. METODOLOGÍA.....	18
2.1. SELECCIÓN DE RUTAS DE PRUEBA.....	18
2.1.1. SITUACIÓN ACTUAL DE LA MOVILIDAD EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA.....	18
División política.....	18
2.1.2. MOVILIDAD EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA	19
2.1.2.1. SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO	19
Velocidades y tiempos promedio.....	21
Pendiente en ruta.....	22

Vehículos para el sistema de transporte urbano.....	23
2.1.3. SELECCIÓN DE RUTA	24
2.2. PARÁMETROS DEL VEHÍCULO	27
2.2.1. ÁREA FRONTAL DEL VEHÍCULO (A_f).....	28
2.2.2. COEFICIENTE DE ARRASTRE (C_d)	29
2.2.3. COEFICIENTE DE RESISTENCIA A LA RODADURA (f_r).....	30
2.2.4. MASA DEL VEHÍCULO (m)	31
2.2.5. RADIO DINÁMICO (R_d)	31
2.3. PARÁMETROS AMBIENTALES	33
2.3.1. DENSIDAD DEL AIRE	33
2.3.2. GRAVEDAD	34
2.4. CICLOS DE CONDUCCIÓN	34
2.4.1. DETERMINACIÓN DEL PROCESO	34
2.4.1.1. MÉTODO A UTILIZAR	36
2.4.1.2. RUTAS DE ANÁLISIS	36
Línea N° 4 (Licán-Bella Vista).....	36
Línea N° 13 (Sixto Durán - San Miguel de Tapi).....	38
Línea N° 14 (24 de Mayo – La Libertad)	40
2.4.1.3. INSTRUMENTACIÓN	43
Dispositivo GPS.....	43
Configuración del equipo GPSMAP 64.....	44
2.4.1.4. RECOLECCIÓN DE DATOS.....	45
2.4.1.5. ANÁLISIS FÍSICO-ESTADÍSTICO.....	49

Línea N° 4 (Licán-Bella Vista).....	52
Línea N° 13 (Sixto Durán - San Miguel de Tapi).....	53
Línea N° 14 (24 de Mayo – La Libertad)	55
2.4.2. CICLOS DE CONDUCCIÓN	57
2.4.2.1. LÍNEA 4.....	57
2.4.2.2. LÍNEA 13.....	59
2.4.2.3. LÍNEA 14.....	60
CAPITULO III.....	62
3. DEMANDA ENERGÉTICA EN LAS RUTAS DETERMINADAS	62
3.1. ALGORÍTMO PARA LA OBTENCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA	62
3.1.1. PROCESAMIENTO DE DATOS	63
3.1.2. CÁLCULO DE LAS PRESTACIONES EN RUEDA	65
3.1.3. CÁLCULO DE PRESTACIONES EN MOTOR	71
CAPITULO IV.....	79
4. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	79
4.1. ANÁLISIS DEL BUS DE COMBUSTION INTERNA	79
4.1.1. ANÁLISIS DE TORQUE.....	79
4.1.2. ANÁLISIS DE LA POTENCIA.....	80
4.1.3. DEMANDA ENERGETICA	81
4.2. ANÁLISIS DEL BUS ELÉCTRICO.....	82
4.2.1. ANÁLISIS DE TORQUE.....	83
4.2.2. ANÁLISIS DE LA POTENCIA.....	84

4.2.3. DEMANDA ENERGÉTICA	84
CONCLUSIONES	87
RECOMENDACIONES.....	89
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	90

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Formulas aplicadas en dinámica de vehículos.....	8
Tabla 2: Exigencias de la bacteria en rutas de diferentes ciudades	16
Tabla 3: Listado de operadoras y flota de transporte urbano en la ciudad de Riobamba	20
Tabla 4: Flota de buses observada en campo.....	21
Tabla 5: Velocidad de las líneas por vuelta	22
Tabla 6: Pendiente máxima de cada ruta	23
Tabla 7: Factores para matriz de decisión.....	25
Tabla 8: Valoración de cada factor decisión.....	26
Tabla 9: Puntuación ponderada decisión	27
Tabla 10: Coeficiente de rodadura.....	30
Tabla 11: Masa de vehículo	31
Tabla 12: Coordenadas de terminal Línea 4	37
Tabla 13: Coordenadas de terminal Línea 13	39
Tabla 14: Coordenadas de terminal Línea 14	41
Tabla 15: Especificaciones de Navegador Garmin GPSMAP 64.....	44
Tabla 16: Criterio de ponderaciones	50
Tabla 17: Parámetros resumen para la obtención del ciclo de conducción de la línea 4.....	52
Tabla 18: Desviación respecto a la media de los parámetros resumen de la línea 4	53
Tabla 19: Parámetros resumen para la obtención del ciclo de conducción de la línea 13	54
Tabla 20: Desviación respecto a la media de los parámetros resumen de la línea 13	55
Tabla 21: Parámetros resumen para la obtención del ciclo de conducción de la línea 14.....	56
Tabla 22: Desviación respecto a la media de los parámetros resumen de la línea 14	57

Tabla 23: Parámetros resumen para determinación de la demanda energética	62
Tabla 24: Valores máximos de fuerza, torque, potencia y demanda de energía.....	68
Tabla 25: Relación de transmisión del bus analizado	72
Tabla 26: Especificaciones de motor	72
Tabla 27: Torque en cada relación de transmisión	80
Tabla 28: Demanda energética requerida en una jornada laboral.....	81
Tabla 29: Características técnicas de buses eléctricos disponibles en el mercado mundial	82
Tabla 30: Torque, potencia y demanda energética en rueda requerida en un bus eléctrico	83
Tabla 31: Resumen de torques y relación de transmisión.....	84
Tabla 32: Demanda energética requerida para una jornada laboral.....	85
Tabla 33: Demanda energética requerida para una jornada laboral + 50% factor de seguridad ..	85

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Fuerzas opositoras al movimiento de un automóvil.....	7
Figura 2: Clasificación vehicular subcategoría M3	9
Figura 3: Ciclos de conducción modales	12
Figura 4: Ciclos de conducción transitorios.....	13
Figura 5: Ciclo de conducción FTP-72	14
Figura 6: Ciclo de conducción NEDC	15
Figura 7: División política del cantón Riobamba	19
Figura 8: Buses urbanos de la ciudad de Riobamba de la marca Hino y carrocería Cepeda.....	28
Figura 9: Área frontal de un vehículo automóvil.....	28
Figura 10: Nomenclatura de neumático	32
Figura 11: Proceso de obtención de ciclo de conducción	35
Figura 12: Terminal de Línea 4 (Licán).....	37
Figura 13: Recorrido de Línea 4	38
Figura 14: Terminal de Línea 13 (Sixto Durán)	39
Figura 15: Recorrido de Línea 13	40
Figura 16: Terminal de Línea 14 (San Luis).....	41
Figura 17: Recorrido de Línea 14	42
Figura 18: Navegador Garmin GPSMAP 64	43
Figura 19: Pagina Web Strava	46
Figura 20: Página principal de GPS Visualizer	47
Figura 21: Conversión de archivo .GPX a “.txt”	48
Figura 22: Extracto de datos de un archivo en formato “.txt”	48

Figura 23: Visualización de coordenadas de longitud y latitud en Google hearth	49
Figura 24: Ciclo de conducción Línea 4	58
Figura 25: Perfil de altitud Línea 4	58
Figura 26: Ciclo de conducción Línea 13	59
Figura 27: Perfil de altitud Línea 13	60
Figura 28: Ciclo de conducción Línea 14	61
Figura 29: Perfil de altitud línea 14	61
Figura 30: Proceso para la obtención de la demanda de energía	63
Figura 31: Declaración de variables y carga de archivos a Matlab	64
Figura 32: Ingreso de datos de ciclo de conducción	65
Figura 33: Fuerzas resistivas del vehículo	65
Figura 34: Cálculo de Torque, Potencia y Demanda energética en rueda	66
Figura 35: Valores máximos de los parámetros obtenidos	66
Figura 36: Grafica de fuerza, torque y energía en rueda.....	67
Figura 37: Generación de archivo ".xls" de resultados	68
Figura 38: Extracto de fuerza en rueda de Línea 14	69
Figura 39: Extracto de torque en rueda de Línea 14.....	70
Figura 40: Extracto de potencia en rueda de Línea 14.....	70
Figura 41: Extracto de demanda energética en rueda de Línea 14	71
Figura 42: Curvas de potencia y torque motor.....	73
Figura 43: Diagrama de cubrimiento de motor diésel	74
Figura 44: Extracto de línea de código para la obtención de las prestaciones del motor	76
Figura 45: Distribución de torque requerido en motor de Línea 14	77

Figura 46: Distribución de potencia requerida en motor de Línea 14 78

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1: Área frontal	29
Ecuación 2: Coeficiente de arrastre	29
Ecuación 3: Radio dinámico	32
Ecuación 4: Ecuación de gases ideales	33
Ecuación 5: Ecuación de la densidad.....	34
Ecuación 6: Desviación respecto a la media.....	51
Ecuación 7: Promedio ponderado de las desviaciones respecto a la media.....	51
Ecuación 8: Torque motor	75
Ecuación 9: Potencia motor	75

INTRODUCCIÓN

Gran parte del transporte terrestre actual basa su funcionamiento en combustibles fósiles derivados del petróleo, esto produce gases de efecto invernadero, los cuales provocan el cambio climático; es así que, para reducir tales efectos se están incorporando nuevas tecnologías amigables con el medio ambiente dentro del transporte, tales como, los buses eléctricos. Sin embargo, para la implementación de este sistema de transporte se necesita una evaluación técnica y económica que dicte la factibilidad de su implementación. En este documento se realiza un estudio técnico como es la determinación de la demanda energética considerando parámetros técnicos que abarcan las particularidades del vehículo, los parámetros ambientales, como la densidad del aire y la gravedad y los parámetros de trabajo que involucra el ciclo de conducción propio de una ruta, todo esto para que, mediante la aplicación de las fórmulas de dinámica vehicular se obtenga la demanda energética en escenarios reales de operación y que dicha información establezca una base para los futuros análisis y estudios.

PROBLEMA

Antecedentes

La contaminación ambiental es el problema que tiene preocupado al mundo entero, ya que una consecuencia de esto es el calentamiento global. Uno de los principales generadores de contaminación es el uso de carburantes fósiles, ya sea en transporte, industria u otras actividades. Por esta razón el mundo entero se ha dedicado al estudio e implementación de nuevas tecnologías

que utilicen energías renovables y sean amigables con el medio ambiente, entre estas tecnologías se tiene principalmente la implementación de vehículos eléctricos, en especial en los sistemas de transporte público. Según el estudio realizado por (Zhou et al., 2016), los buses eléctricos logran disminuir hasta en 85% el empleo del petróleo y de entre 19% a 35% las emisiones de CO₂.

La demanda de energía en una ruta determinada es de vital importancia para la implementación de un bus eléctrico, dicha demanda de energía varía de acuerdo al perfil de altitud, características del vehículo y los parámetros ambientales. Según (Miles & Potter, 2014), un bus eléctrico que recorra de entre 200 a 300 km diariamente, tiene una demanda de energía que ronda entre 500 a 1000 kWh.

Importancia y alcance

Considerando que el sistema de transporte en el país es el causante del 39% de la emanación de gases de invernadero (GEI) (Guayanlema, 2013), el proyecto 2025 del Ecuador plantea a partir de ese año cambiar la flota vehicular de transporte urbano e interparroquial a buses totalmente eléctricos (Pacheco, 2019), sin embargo, la geografía de nuestro país hace necesario un estudio de la demanda energética que considere parámetros en rutas, tales como: pendiente, distancia de recorrido, número de pasajeros, velocidad, factores de dinámica vehicular, entre otros. La ciudad de Riobamba carece de este tipo de información, lo cual imposibilita realizar estudios de factibilidad y propuestas de implementación con un criterio técnico.

Este estudio permitirá al GAD Municipal de la ciudad de Riobamba cumplir con las especificaciones sobre reducción de emisiones contaminantes, requisito que plantea el proyecto nacional de eficiencia energética del 2025.

Delimitación

Ubicación geográfica del cantón Riobamba

Riobamba, ciudad capitalina de la provincia de Chimborazo, ubicada en la región sierra a 2.750 msnm, la cual cuenta con una población de 225.741 habitantes (Plan de Desarrollo Ordenamiento Territorial 2015-2019, 2015). Este cantón está delimitado al Norte por los cantones Guano y Penipe; al Sur por los cantones Colta y Guamote; al Este por el cantón Chambo y la provincia de Morona Santiago; y, al Oeste por las provincias de Bolívar y Guayas (Plan de Desarrollo Ordenamiento Territorial 2015-2019, 2015).

El cantón Riobamba se compone por 5 parroquias urbanas: Maldonado, Veloz, Lizarzaburu, Velasco y Yaruquíes; y 11 parroquias rurales: San Juan, Licto, Calpi, Quimiag, Cacha, Flores, Punín, Cubijíes, Licán, San Luis y Pungalá.

OBJETIVOS

Objetivo General

Determinar la demanda energética en rutas establecidas del transporte urbano en la ciudad de Riobamba, mediante cálculos matemáticos y software de ingeniería; obteniendo las bases para una posterior implementación de buses eléctricos.

Objetivos Específicos

- Establecer el marco de referencia que sustente los temas analizados, mediante investigación bibliográfica.
- Analizar el estado actual de la movilidad del transporte urbano mediante documentos suministrados por el GADMR y el monitoreo en ruta, determinando los ciclos de conducción y las condiciones dinámicas vehiculares.
- Determinar la demanda energética mediante cálculos matemáticos y software (Matlab).
- Analizar los resultados obtenidos a través del método descriptivo.

CAPITULO I

1. ESTADO DEL ARTE Y MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

Este capítulo revisa los factores influyentes en la demanda energética dentro del marco teórico referencial como: parámetros de cálculo sobre dinámica del automóvil, definiciones sobre bus urbano y ciclos de conducción; además se detalla la metodología sobre la elaboración de ciclo de conducción.

Asimismo, investiga sobre el estado del arte, el cual abarca situaciones acerca del avance en las investigaciones sobre vehículos eléctricos y la demanda energética a nivel mundial y en el Ecuador.

1.1. MARCO TEÓRICO

1.1.1. DEMANDA ENERGÉTICA DEL TRANSPORTE EN ECUADOR

El transporte de personas y bienes es el más grande consumidor de energía a nivel mundial; también es el sector más reacio a renunciar a la dependencia de los carburantes fósiles. Por lo tanto, desempeña un papel primordial en la controversia sobre la disponibilidad del abasto de energía, así como en las secuelas en el medio ambiente.

Según el (Instituto de investigación Geológico y Energético (IIGE), 2018), en Ecuador el dispendio total de energía por carburantes como la gasolina y el diésel constituye para la nación el 48.8% de la demanda, es decir, los sectores de transporte de carga liviana y pesada, representan un gasto de 980 millones de galones de gasolina y de 1.010 millones de galones de diésel aproximadamente.

Si se considera la última década, la tasa anual de crecimiento en el consumo en este sector tiene una media de 6.4%, porcentaje que está sometido a incremento continuo. De ahí la importancia de la búsqueda de modelos y tecnologías que se implementen para el uso eficaz de la energía en el transporte.

1.1.2. ESTIMACIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA

1.1.2.1. DINÁMICA DE VEHÍCULOS

Es el estudio del desplazamiento del automóvil y de las fuerzas que provocan dicho movimiento. El desplazamiento de un vehículo está establecido por las reacciones (fuerzas) que se le aplican del exterior. Éstas son de dos tipos, en cuanto el contacto con el exterior es doble: con el aire y con el terreno; por esto se habla de fuerzas aerodinámicas y de fuerzas de adherencia rueda-terreno (Diccionario MotorGiga, 2019).

La dinámica vehicular es una parte trascendente para el cálculo de consumo energético, ya que, se consideran todas las fuerzas resistivas al desplazamiento del vehículo, Figura 1.

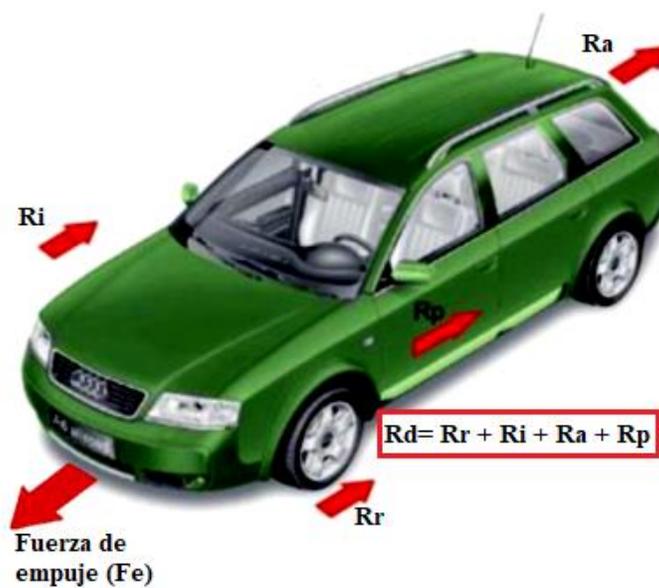


Figura 1: Fuerzas opuestas al movimiento de un automóvil.

Fuente:(Domínguez & Ferrer, 2012)

Las ecuaciones que describen dichas resistencias se definen en la Tabla 1, y las sumatorias de estas dan como consecuencia una fuerza designada como “Fuerza en rueda”, esta es de vital consideración para estimar el consumo energético.

Tabla 1: Formulas aplicadas en dinámica de vehículos.

Variable	Ecuación [Unidad]	Descripción de variable [Unidad]
Fuerza de arrastre (Fd)	$F_d = \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot \rho \cdot A_f \cdot v^2$ [N]	c_d = Coeficiente de arrastre del vehículo [adimensional]
		ρ = Densidad del aire [Kg/m ³]
		A_f = Área frontal del vehículo [m ²]
		v = Velocidad del vehículo [m/s]
Resistencia a la pendiente (Rg)	$R_g = m \cdot g \cdot \sin \theta$ [N]	m = Masa del vehículo [Kg]
		g = Gravedad [m/s ²]
		θ = Pendiente [rad]
Resistencia a la rodadura (Rx)	$R_x = f_r \cdot m \cdot g \cdot \cos \theta$ [N]	f_r = Coeficiente a la rodadura [adimensional]
		m = Masa del vehículo [Kg]
		g = Gravedad [m/s ²]
		θ = Pendiente [rad]
Resistencia a la inercia (Ri)	$R_i = m \cdot a$ [N]	m = Masa del vehículo [Kg]
		a = Aceleración [m/s ²]
Fuerza en rueda (Fx)	$F_x = F_d + R_g + R_x + R_i$ [N]	
Torque en rueda (T)	$T = F_x \cdot r_d$ [N]	F_x = Fuerza en rueda [N]
		r_d = Radio dinámico de neumático [m]
Potencia en rueda (P)	$P = F_x \cdot v$ [W]	F_x = Fuerza en rueda [N]
		v = Velocidad del vehículo [m/s]
Demanda de energía (E)	$E = P \cdot \Delta_t$ [kWh]	P = Potencia en rueda [kW]
		Δ_t = Variación de tiempo [h]

Fuente:(Vélez & Vera, 2016), (Aparicio et al., 1995)

1.1.3. CLASIFICACIÓN VEHICULAR

La (INEN 2656, 2016) establece la clasificación de los vehículos motorizados y no motorizados, identificados mediante características generales de diseño y uso. Esta norma se aplica a todos los vehículos diseñados para circulación terrestre (vehículos motorizados y unidades de carga).

1.1.3.1. CATEGORÍA M

Vehículos automotores de cuatro ruedas o más diseñados y contruidos para el transporte de pasajeros (INEN 2656, 2016).

1.1.3.2. SUBCATEGORÍA M3

Vehículos motorizados con más de ocho plazas, además del asiento del conductor, y cuyo PBV sea superior a 5000 kg (INEN 2656, 2016).

A continuación, en la Figura 2, se indica la clasificación vehicular correspondiente a la subcategoría M3.

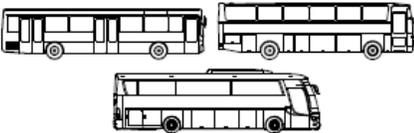
CÓDIGO	TIPO	ESQUEMA	DESCRIPCIÓN
MCB	MICROBÚS		Ver NTE INEN-ISO 3833, 3.1.2.
MNB	MINIBÚS		Ver NTE INEN-ISO 3833, 3.1.2.
BUS	BUS		Ver NTE INEN-ISO 3833, 3.1.2, 3.1.2.2, 3.1.2.3 y 3.1.2.4.
BDP	BUS DE DOS PISOS, PISO Y MEDIO		Vehículo destinado al transporte de pasajeros de dos plantas con espacios internos para la circulación (corredor central), de Clase III. Ver NTE INEN-ISO 3833, 3.1.2 y 3.1.2.4.
ART	ARTICULADO		Ver NTE INEN-ISO 3833, 3.1.2.5.
BART	BIARTICULADO		Ver NTE INEN-ISO 3833, 3.1.2.5. En este caso el vehículo cuenta con tres secciones que están unidas por dos juntas.
TRO	TROLEBÚS		Ver NTE INEN-ISO 3833, 3.1.2.6.
BCO	BUS TIPO COSTA		Vehículo destinado al transporte de pasajeros y mercancías a partir de un chasis cabina adaptado en forma artesanal, de Clase III (Tabla 6). Ver NTE INEN-ISO 3833, 3.1.2.7.

Figura 2: Clasificación vehicular subcategoría M3

Fuente: (INEN 2656, 2016)

1.1.4. BUS URBANO

Vehículo automotor diseñado y equipado para uso en zonas urbanas, con una capacidad igual o superior a 60 pasajeros. Esta clase de vehículo tiene asientos y espacios considerados para pasajeros de pie y permite el movimiento de éstos correspondiente a paradas frecuentes (INEN 2205, 2010).

1.1.4.1. REQUISITOS

- *Requisitos mínimos de seguridad.* Los buses y minibuses urbanos deben cumplir con los elementos detallados en el Reglamento Técnico Ecuatoriano RTE INEN 034.
- Los aspectos primordiales del bus y minibús urbano son: motor, chasis, carrocería, organización externa e interna, detalles exteriores e interiores y elementos de seguridad y control (INEN 2205, 2010).

1.1.5. CICLOS DE CONDUCCIÓN

El ciclo de conducción se describe como un conjunto de secuencias de tiempos y velocidades, que proceden de datos estadísticamente representativos, de un área en estudio anticipadamente determinada. Además los ciclos de conducción se usan para la estimación de emisiones contaminantes (Osses & Rojas, 2003).

Los niveles de emisión dependen de muchos parámetros, incluidos factores relacionados con el vehículo, como el modelo, el tamaño, tipo de combustible, nivel de tecnología y kilometraje, y factores operativos como velocidad, aceleración, selección de marcha y pendiente de la carretera.

Por lo tanto, se han perfeccionado algunos ciclos de conducción para diferentes tipos de vehículos como autos, camionetas, camiones, buses y motocicletas (Barlow, Latham, McCrae, & Boulter, 2009).

También es útil tener en cuenta que los ciclos de conducción se pueden utilizar para una variedad de propósitos distintos a las emisiones de gases. Tales como: medir la eficiencia del vehículo, probar la durabilidad del motor o del tren de transmisión, estimar el consumo de combustible, determinar la demanda energética, etc.

1.1.5.1. TIPOS DE CICLOS DE CONDUCCIÓN

Dependiendo de parámetros de velocidad y carga de motor se puede dividir en dos tipos de ciclos de conducción:

Ciclos de conducción modales

Los ciclos de conducción modales o estacionarios se identifican por tener una sucesión de velocidad y aceleraciones invariables del motor. Estos ciclos de conducción se utilizan especialmente para la prueba de motores a diésel dedicadas al servicio de transporte pesado.

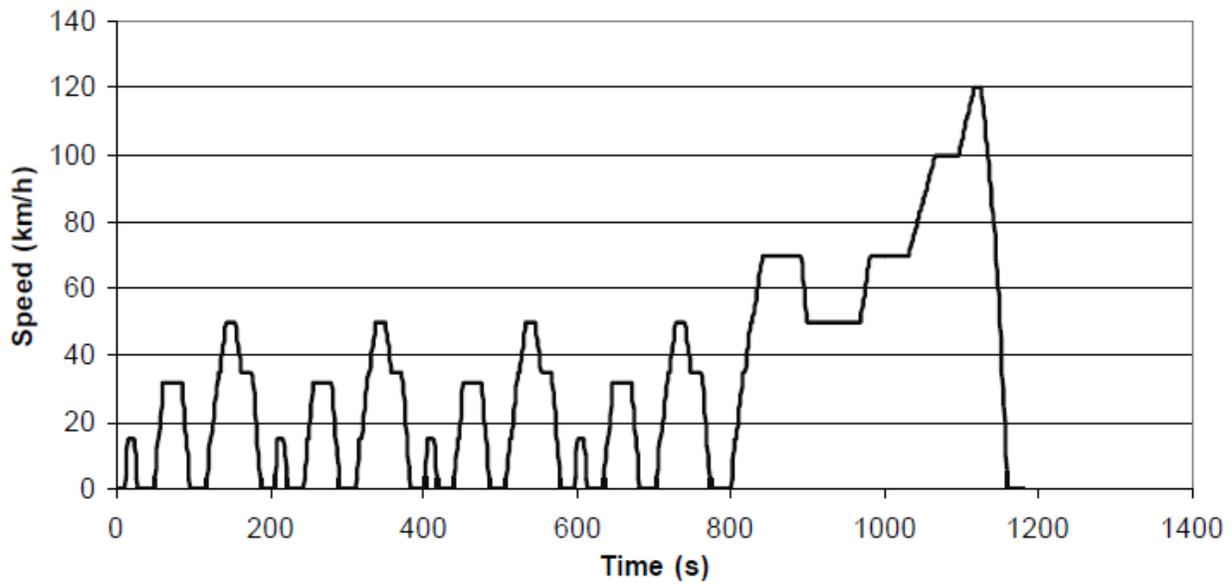


Figura 3: Ciclos de conducción modales

Fuente: (Barlow, Latham, McCrae, & Boulter, 2009)

Ciclos de conducción transitorios

Los ciclos de conducción transitorios se identifican por tener diferenciaciones de velocidad y aceleración en casi todo el tiempo de recorrido, siendo este ciclo el más representativo de los escenarios reales de conducción de un vehículo en carretera.

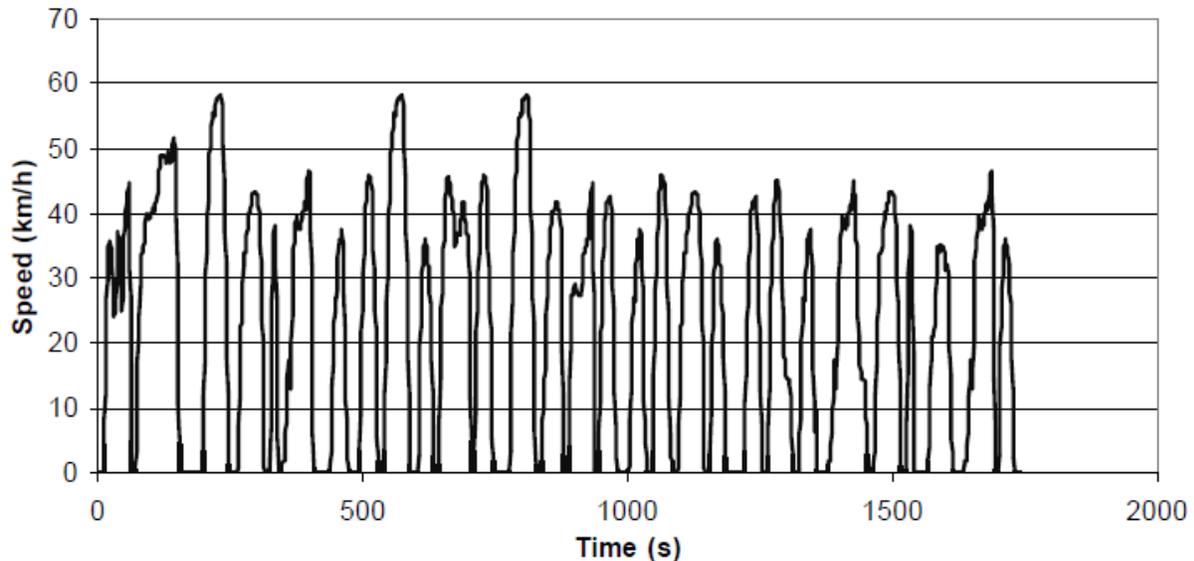


Figura 4: Ciclos de conducción transitorios

Fuente: (Barlow, Latham, McCrae, & Boulter, 2009)

MÉTODOS DE OBTENCIÓN DE CICLOS DE CONDUCCIÓN

En la actualidad existen dos metodologías para obtener los ciclos de conducción:

Métodos directos

El método directo radica en obtener un ciclo de conducción característico del entorno que se está estudiando, directamente de las mediciones reales en una ruta previamente establecida. Los datos de velocidad y tiempo son registrados a través de la instrumentación del vehículo, para posteriormente ser analizados mediante métodos estadísticos, de tal manera que, el ciclo de conducción represente las situaciones reales de operación (Gómez de las Heras, 2011), un ejemplo de esta técnica es el ciclo de conducción FTP-72 representada en la Figura 5.

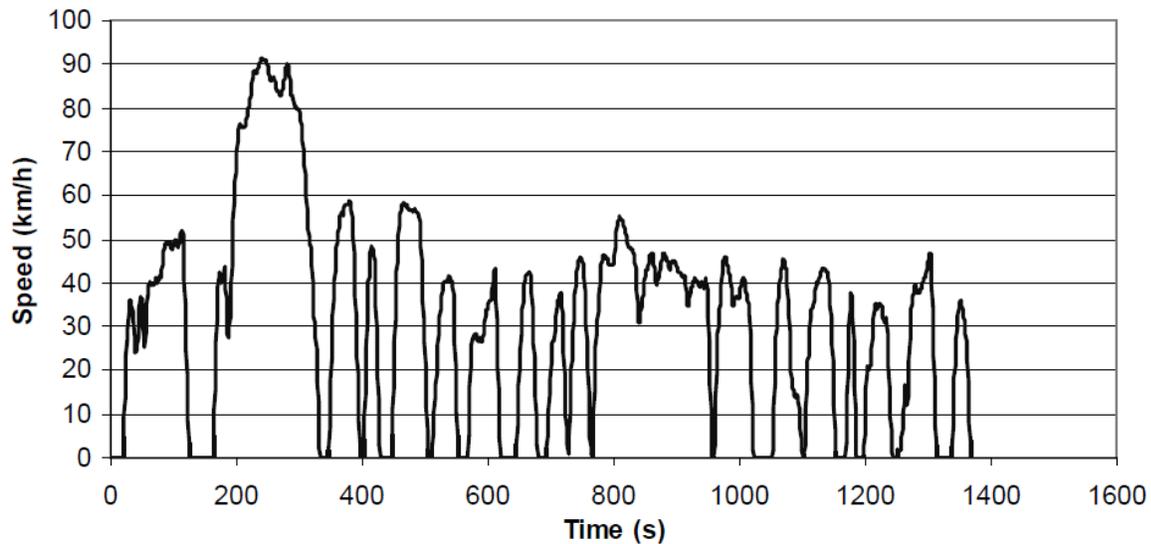


Figura 5: Ciclo de conducción FTP-72

Fuente: (Barlow, Latham, McCrae, & Boulter, 2009)

Métodos indirectos

El método indirecto consiste en trabajar directamente sobre los datos de rutas definidas como objeto de estudio, para determinar sobre ella ciclos de conducción representativas (Gómez de las Heras, 2011), un ejemplo de esta técnica es el ciclo de conducción NEDC representada en la Figura 6.

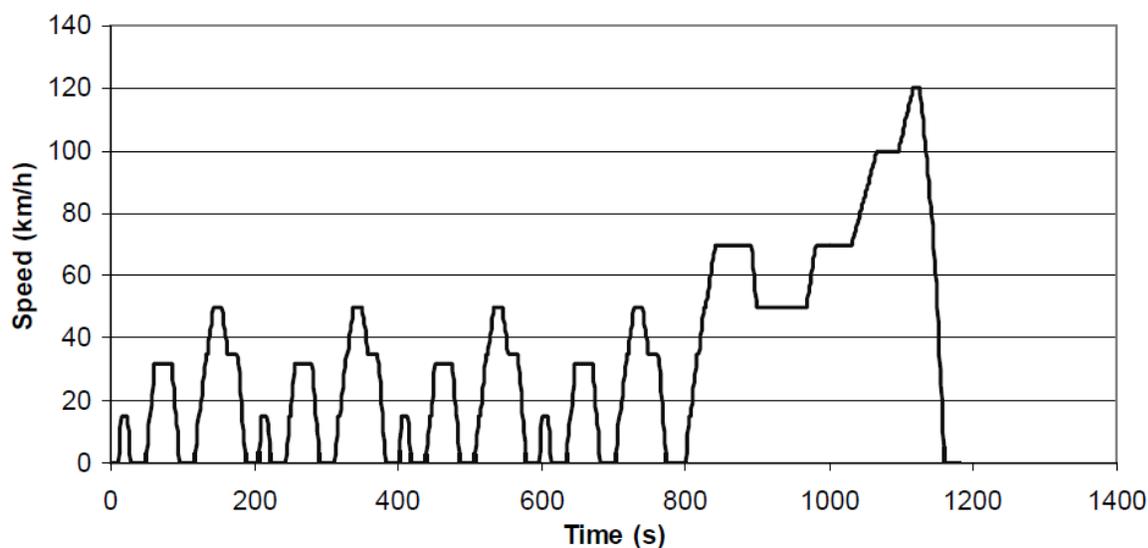


Figura 6: Ciclo de conducción NEDC

Fuente: (Barlow, Latham, McCrae, & Boulter, 2009)

1.2. ESTADO DEL ARTE

Existen algunas investigaciones sobre vehículos eléctricos en el mundo, para el caso de buses eléctricos existe un estudio elaborado en Inglaterra por (Miles & Potter, 2014) que demuestra que la demanda de energía en un bus eléctrico que recorre de 200 a 300 km diariamente, varía entre 500 a 1000 kWh, tal como se muestra en la Tabla 2. Esto depende del tipo de vehículo, el ciclo de conducción y la altimetría de la ruta.

El estudio realizado por (Zhou et al., 2016), mediante un análisis WTW (Well to Wheel) señala que los buses eléctricos logran una reducción del 85% del uso de petróleo, un 32% del consumo de combustible fósil, además, disminuye entre 19% a 35 % las emisiones de CO₂

Tabla 2: Exigencias de la batería en rutas de diferentes ciudades

Ciudad	Exigencia de la batería [kWh]
Sao Paolo	700
Shenzen	900
London	1000
Milton Keynes	500
Warsaw	650

Fuente: (Miles & Potter, 2014)

En Ecuador se han realizado estudios enfocados principalmente en el análisis de factibilidad de la implementación de vehículos eléctricos, sin tomar en cuenta que la demanda energética de los vehículos que ayuda de gran manera a tomar una decisión sobre implementar o no este tipo de unidades. Entre los estudios que evalúan la demanda energética en los vehículos encontramos los siguientes:

- “Evaluación de la demanda energética en buses con motores de combustión interna, en rutas reales; para implementar buses eléctricos” (Zumba, 2017).
- “Determinación de la demanda energética de vehículos motorizados ciclo Otto pertenecientes a la subcategoría M1, para el servicio de taxi en la ciudad de Cuenca” (Jara & Pineda, 2019)

Las dos investigaciones enunciadas basan su estudio en determinar la demanda energética mediante ciclos de conducción, parámetros de dinámica de vehículos, parámetros ambientales y perfiles de altitud.

La primera evalúa la demanda energética en tres rutas del transporte urbano en la ciudad de Cuenca, considerando como referencia los ciclos de conducción obtenidos en el trabajo de (Astudillo, 2016), los parámetros de dinámica del vehículo usado en este sistema de transporte y el perfil de altitud obtenido mediante un dispositivo GPS. Una vez obtenida la demanda energética enlista una serie de buses eléctricos que podrían adaptarse a esta condición.

En la investigación sobre la demanda energética en vehículos de la subcategoría M1, se considera el tipo de vehículo con mayor población utilizada para el servicio de taxi. La instrumentación para adquirir los diferentes parámetros y datos incluye equipos como GPS, Freematics y analizador de gases. Y al igual que en la tesis anterior mediante el uso de ecuaciones de dinámica del automóvil y los ciclos de conducción se calcula la demanda energética y se realiza una estimación de las emisiones producidas por los vehículos que prestan este servicio.

CAPITULO II

2. METODOLOGÍA

En este capítulo se presenta el método para la elaboración de ciclos de conducción y la definición de parámetros de dinámica del automóvil que permitan determinar la demanda energética.

2.1. SELECCIÓN DE RUTAS DE PRUEBA

2.1.1. SITUACIÓN ACTUAL DE LA MOVILIDAD EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA

San Pedro de Riobamba, es la capital de la provincia de Chimborazo, está ubicada en la zona centro de la región interandina del Ecuador, a una altitud de 2750 msnm, instituida el 15 de agosto de 1534. En la actualidad es la décimo tercera ciudad más poblada del país con 225.741 habitantes, según los registros del Instituto Nacional de Estadística y Censos.

División política

El cantón Riobamba se divide en 5 parroquias urbanas: Maldonado, Veloz, Lizarzaburu, Velasco y Yaruquíes; y 11 parroquias rurales: San Juan, Licto, Calpi, Quimiag, Cacha, Flores, Punín, Cubijíes, Licán, San Luis y Pungalá.



Figura 7: División política del cantón Riobamba

Fuente: (Plan de Desarrollo Ordenamiento Territorial 2015-2019, 2015)

2.1.2. MOVILIDAD EN LA CIUDAD DE RIOBAMBA

Conforme a (*Plan Movilidad Informe FASE II, 2019*) se indica que en la ciudad de Riobamba se estima un total de 129.089 viajes por día normal que para una población urbana de 171.551 da un índice de 0.71 viajes por persona. Del 100 % de estos viajes el 34% es por trabajo, el 33% por motivo de estudios, 14% por trámites, 9% por compras y 10% por otras situaciones.

2.1.2.1. SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO

Según (*Plan Movilidad Informe FASE II, 2019*), las mayores zonas generadoras de viajes son: la zona céntrica de la ciudad de Riobamba comprendido entre la Estación del Ferrocarril y el parque Maldonado, la Escuela Politécnica, el sector de la Media Luna, así como los mercados Mayorista, La Condamine, Santa Rosa y San Alfonso.

En el sistema de transporte público por bus de la ciudad de Riobamba trabajan siete operadoras con 184 buses de acuerdo con los registros municipales (*Plan Movilidad Informe FASE II, 2019*). Las operadoras y la cantidad de buses con la cual desarrollan sus funciones se detallan en la Tabla 3.

Tabla 3: Listado de operadoras y flota de transporte urbano en la ciudad de Riobamba

N°	MODALIDAD URBANO	OPERADORA	FLOTA
1	Colectivo urbano	Bustrap S.A.	13
2	Colectivo urbano	Ecoturisa S.A.	9
3	Colectivo urbano	El Sagrario	31
4	Colectivo urbano	Liribamba	41
5	Colectivo urbano	Puruha	56
6	Colectivo urbano	Unitraseep S.A.	28
7	Colectivo urbano	Urbesp S.A.	6

Fuente: Plan Movilidad Informe FASE II, 2019

Del total de la flota de buses tan solo 174 unidades están operativas, debido a que varias de las unidades se encuentran en actividades de mantenimiento. Las siete operadoras de transporte urbano abarcan 16 líneas en las cuales está dividida la flota de buses, además como se detalla en la Tabla 4, en cada línea se muestra el lugar de origen y destino (*Plan Movilidad Informe FASE II, 2019*).

Tabla 4: Flota de buses observada en campo

N° LÍNEA	FLOTA OBSERVADA
01 - Santa Ana-Bella Vista	13
02 - 24 De Mayo Y Bellavista	13
03 - Santa Ana – Camal	10
04 - Licán – Bellavista	9
05 - Corona Real – Bellavista	11
06 - Miraflores – Bellavista	9
07 - La Inmaculada - Barrio El Rosal	14
08 - Yaruquíes - Las Habras	14
09 - Licán Los Pinos – Camal	9
10 - Los Pinos - San Antonio	8
12 - San Gerardo - El Batan	
13 - Sixto Durán - San Miguel De Tapi	8
14 - 24 De Mayo - La Libertad	18
15 - Licán Espoch Y Unach	18
16 - Calpi - La Paz	11
01 - Santa Ana-Bella Vista	9
Total	174

Fuente: Plan Movilidad Informe FASE II, 2019

Velocidades y tiempos promedio

El análisis de las velocidades comerciales de las rutas indica que estas varían de entre 12,15 a 19,22 kilómetros por hora. En la

Tabla 5, se detallan el promedio de la velocidad, la longitud y el tiempo por vuelta de cada una de las líneas.

Tabla 5: Velocidad de las líneas por vuelta

Línea	Longitud en redondo (km)	Tiempo (h)	Velocidad (km/h)
01 - Santa Ana-Bella Vista	21,13	1,5	14,09
02 - 24 De Mayo Y Bellavista	20,15	1,44	13,96
03 - Santa Ana – Camal	21,79	1,52	14,37
04 - Licán – Bellavista	21,4	1,55	13,85
05 - Corona Real – Bellavista	30,77	1,87	16,44
06 - Miraflores – Bellavista	22,41	1,35	16,57
07 - La Inmaculada - Barrio El Rosal	31,45	2,06	15,23
08 - Yaruquíes - Las Habras	18,44	1,52	12,15
09 - Licán Los Pinos – Camal	26,6	1,73	15,37
10 - Los Pinos - San Antonio	24,3	1,68	14,5
12 - San Gerardo - El Batan	21,94	1,47	14,91
13 - Sixto Durán - San Miguel De Tapi	22,95	1,76	13,03
14 - 24 De Mayo - La Libertad	29,65	2,04	14,56
15 - Licán Espoch Y Unach	19,73	1,41	13,96
16 - Calpi - La Paz	29,8	1,55	19,22

Fuente: Plan Movilidad Informe FASE II, 2019

Pendiente en ruta

A través del programa Google Earth Pro se obtuvo el trazado de cada una de las rutas y mediante este el perfil de altitud de las mismas. Además, se obtiene las pendientes máximas en cada línea como se muestra en la Tabla 6, datos importantes para la selección de la ruta de estudio.

Tabla 6: Pendiente máxima de cada ruta

Línea	Pendiente máxima (%)
01 - Santa Ana-Bella Vista	9,7
02 - 24 De Mayo Y Bellavista	9,8
03 - Santa Ana - Camal	9,7
04 - Licán - Bellavista	8,6
05 - Corona Real - Bellavista	8,2
06 - Miraflores - Bellavista	7,1
07 - La Inmaculada - Barrio El Rosal	9,4
08 - Yaruquíes - Las Habras	8,8
09 - Licán Los Pinos - Camal	9,2
10 - Los Pinos - San Antonio	7,1
12 - San Gerardo - El Batan	13,3
13 - Sixto Durán - San Miguel De Tapi	8,6
14 - 24 De Mayo - La Libertad	23
15 - Licán Espoch Y Unach	8
16 - Calpi - La Paz	12,3

Fuente: Autores

Vehículos para el sistema de transporte urbano

Las marcas de los buses usados para el transporte urbano de la ciudad de Riobamba son en 73% Hino, 14% Mercedes Benz, 11% Chevrolet, 1% Volkswagen y el 1% restante corresponde a otras marcas.

Según estudios de (*Plan Movilidad Informe FASE II, 2019*) la edad promedio de la flota es de 8 años, además, las unidades tienen una capacidad nominal de 80 pasajeros la cual no es sobrepasada, debido a que en promedio se realiza el viaje con 70 personas.

2.1.3. SELECCIÓN DE RUTA

En la elección de la ruta se ha tomado en cuenta varios factores como son: la distancia de recorrido, la pendiente, lugares generadores de viajes y demanda de pasajeros. Para esto se realiza una matriz de decisión que ayudará a elegir de manera técnica la mejor ruta para el análisis. Se toma en consideración la importancia de cada uno de los factores como se describe a continuación:

Distancia de recorrido: Su importancia radica en que a mayor distancia mayor consumo de energía, por lo tanto, se elige la ruta que tenga mayor recorrido dentro de los límites de la Ciudad.

Pendiente: Este factor determina el consumo máximo de energía en el recorrido, a mayor pendiente mayor consumo energético. Considerando que en un bus eléctrico la pendiente superable tiene un valor de entre 15 y 20% se elige la ruta con valores aproximados (BYD, 2020), y que el punto donde se encuentre dicha pendiente esté dentro de los límites de la ciudad.

Lugares generadores y demanda de pasajeros: Estos factores van de la mano, ya que las líneas de buses que pasan por la mayor cantidad de lugares generadores son las mismas que tienen mayor demanda de pasajeros. Además, la demanda es importante porque influye en la masa del vehículo; también al tener mayor demanda se tendrá mayor cantidad de beneficiarios de los resultados que genere este proyecto.

A continuación, en la Tabla 7 se presenta la información de estos parámetros para cada una de las líneas y se realiza la matriz de decisión.

Tabla 7: Factores para matriz de decisión

	Longitud de recorrido [Km]	Pendiente máxima [%]	Lugares generadores	Lugares importantes	Demanda de pasajeros
Línea 1	21,13	9,7	5	17	Baja
Línea 2	20,15	9,8	5	17	Baja
Línea 3	21,79	9,7	3	8	Baja
Línea 4	21,4	8,6	6	19	Alta
Línea 5	30,77	8,2	6	19	Alta
Línea 6	22,41	7,1	6	14	Baja
Línea 7	31,45	9,4	7	17	Baja
Línea 8	18,44	8,8	5	18	Media
Línea 9	26,6	9,2	4	24	Media
Línea 10	24,3	7,1	5	24	Media
Línea 12	21,94	13,3	2	9	Baja
Línea 13	22,95	8,6	7	21	Alta
Línea 14	29,65	23	5	13	Alta
Línea 15	19,73	8	5	16	Media
Línea 16	29,8	12,3	4	13	Media

Fuente: Autores

En la

Tabla 8, se da una valoración a cada factor dependiendo de la importancia de las mismas, además, cada línea con una puntuación dependiendo del factor.

Para determinar la importancia de cada factor se da una valoración en una escala de 1 a 3, siendo: 1 (Poco importante), 2 (Importante) y 3 (Muy importante).

En cada línea se da una valoración según el cumplimiento de los factores en una escala de 1 a 5, siendo: 1 que cumple de 0-20 %, 2 de 20-40 %, 3 de 40-60 %, 4 de 60-80 % y 5 de 80-100 %.

Tabla 8: Valoración de cada factor decisión

	FACTORES				
	Demanda de pasajeros	Lugares Turísticos	Pendiente	Distancia de recorrido	Lugares generadores de viaje
Importancia	3	2	3	3	3
	Puntuación				
Línea 1	1	3	3	1	3
Línea 2	1	3	3	1	3
Línea 3	1	1	3	1	1
Línea 4	5	5	1	3	5
Línea 5	3	5	1	5	5
Línea 6	1	3	1	3	5
Línea 7	1	3	3	5	5
Línea 8	3	5	1	1	3
Línea 9	3	5	3	5	3
Línea 10	3	5	1	3	3
Línea 12	1	1	5	3	1
Línea 13	5	5	1	3	5
Línea 14	5	5	5	5	3
Línea 15	3	3	1	1	3
Línea 16	3	1	5	5	3

Fuente: Autores

En la Tabla 9, se muestra la puntuación ponderada, la cual consiste en multiplicar la importancia por la valoración de los factores de cada línea descritos en la

Tabla 8.

Entonces las líneas seleccionadas serán la de mayor puntuación, ya que esto implica que cumplen con todos los parámetros para el estudio.

Tabla 9: Puntuación ponderada decisión

	Demanda de pasajeros	Lugares Turísticos	Pendiente	Distancia de recorrido	Lugares generadores de viaje	
	Puntuación Ponderada					TOTAL
Línea 1	3	6	9	3	9	30
Línea 2	3	6	9	3	9	30
Línea 3	3	2	9	3	3	20
Línea 4	15	10	3	9	15	52
Línea 5	9	10	3	15	15	52
Línea 6	3	6	3	9	15	36
Línea 7	3	6	9	15	15	48
Línea 8	9	10	3	3	9	34
Línea 9	9	10	9	15	9	52
Línea 10	9	10	3	9	9	40
Línea 12	3	2	15	9	3	32
Línea 13	15	10	3	9	15	52
Línea 14	15	10	15	15	9	64
Línea 15	9	6	3	3	9	30
Línea 16	9	2	15	15	9	50

Fuente: Autores

De acuerdo con los resultados de la Tabla 9, las líneas con mayor puntuación son: línea 4, línea 5, línea 13 y línea 14. Sin embargo, se seleccionan las líneas 4, 13 y 14, ya que la línea 5 tiene el mismo recorrido que la línea 4 por ende el consumo energético será igual en las dos líneas.

2.2. PARÁMETROS DEL VEHÍCULO

Para la aplicación de las ecuaciones de dinámica vehicular enunciadas en la Tabla 1, se debe primero definir cada una de las variables influyentes para el cálculo de la demanda energética, a continuación, se describe cada uno de estos parámetros tomando en consideración al modelo AK-8JRSA de la marca HINO que abarca el 73% del total de la flota de buses urbanos.

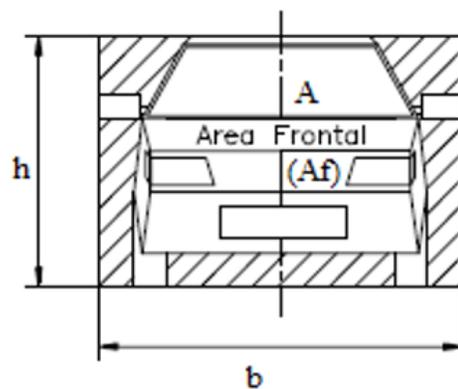


Figura 8: Buses urbanos de la ciudad de Riobamba de la marca Hino y carrocería Cepeda

Fuente: Autores

2.2.1. ÁREA FRONTAL DEL VEHÍCULO (A_f)

El área frontal del bus urbano se determina en base a fórmulas establecidas en el libro de (Aparicio et al., 1995), donde se establece lo siguiente:



Tipo de vehículo	Área frontal m ²
Mini	≈ 1.8
Medio	≈ 1.9
Medio Superior	≈ 2.0
Grande	≈ 2.1

Figura 9: Área frontal de un vehículo automóvil

Fuente: (Aparicio et al., 1995)

Considerando que un bus no tiene una forma compleja, sino que más bien su forma se aproxima a un rectángulo, entonces se puede calcular su área con la siguiente formula:

$$A_f = b * h$$

Ecuación 1: Área frontal

En donde:

A_f = Área frontal del bus [m²]

b = ancho del bus [m]

h = altura del bus [m]

De acuerdo con el manual del fabricante (Cepeda, 2020) se observa que el vehículo tiene 2,58 m de ancho y 3,215 m de altura, dando como resultado:

$$A_f = 2,58 * 3,215$$

$$A_f = \mathbf{8,295 [m^2]}$$

2.2.2. COEFICIENTE DE ARRASTRE (Cd)

Para este trabajo se calcula el coeficiente de arrastre o coeficiente aerodinámico a través de la fórmula planteada en el libro “Teoría de los vehículos automóviles”:

$$C_d = \frac{\gamma_m * m * (a_1 - a_2)}{\frac{\rho}{2} * A_f * (v_1^2 - v_2^2)}$$

Ecuación 2: Coeficiente de arrastre

En donde:

γ_m = coeficiente de masas giratorias

m = masa de vehículo [kg]

a = Aceleración [m/s^2]

A_f = Área frontal del vehículo [m^2]

v = velocidad [m/s]

ρ = Densidad del aire [kg/m^3]

Una vez finalizada las pruebas en carretera, se determinó un C_d constante de 0.634

2.2.3. COEFICIENTE DE RESISTENCIA A LA RODADURA (f_r)

Es un coeficiente adimensional que depende de las características del neumático y del tipo de calzada por la cual circula el vehículo. En el libro (Aparicio et al., 1995, p. 48) se muestran algunos valores de este factor dependiendo de la superficie y tipo de vehículo, como se enuncia en la Tabla 10.

Tabla 10: Coeficiente de rodadura

Tipo de vehículo	Superficie		
	Hormigón o Asfalto	Dureza Media	Arena
Turismos	0,015	0,08	0,3
Camiones	0,012	0,06	0,25
Tractores	0,02	0,04	0,2

Fuente:(Aparicio et al., 1995)

En este trabajo, se determinó mediante pruebas en carretera un f_r constante de 0.00923

2.2.4. MASA DEL VEHÍCULO (m)

La masa del vehículo es uno de los parámetros más incidentes en la demanda de energía, por lo cual, en la Tabla 11 se plantea tres situaciones de carga (vacía, media carga, plena carga).

La masa en vacío del bus es de 9310 kg y el plan de movilidad (*Plan Movilidad Informe FASE II*, 2019), indica que la capacidad de pasajeros es de 70; la NTE INEN 1668 establece que la masa de un pasajero es de 70 kg (INEN 1668, 2015).

Tabla 11: Masa de vehículo

Masa del bus		
Vacío [kg]	9310	Sin pasajeros
Media Carga [kg]	11760	35 pasajeros
Plena carga [kg]	14210	70 pasajeros

Fuente:(MAVESA, 2020)

2.2.5. RADIO DINÁMICO (Rd)

Se llama radio dinámico al radio real de un neumático cuando está sometido a una deformación debido a la masa del vehículo.

Para determinar dicho radio se debe estar al tanto de la nomenclatura del neumático, como se observa en la Figura 10, donde la altura está en (%), el ancho (mm) y el diámetro (in).



Figura 10: Nomenclatura de neumático

Fuente:(CONAE)

El autobús en análisis dispone de las siguientes medidas en sus ruedas: 295/80 R22.5.

En base a la nomenclatura de la Figura 10, a continuación, se establece una fórmula para determinar el radio dinámico del neumático en metros.

$$r_d = \frac{\left(A_{sección} \cdot \frac{R_{aspecto}}{100} + \frac{R}{2} (25.4) \right)}{1000}$$

Ecuación 3: Radio dinámico

En donde:

$A_{sección}$ = Ancho de la sección del neumático [mm]

r_d = Radio dinámico [m]

$R_{aspecto}$ = Relación de aspecto [%]

R = Radio del neumático (Rin) [in]

$$r_d = \frac{\left(295 \cdot \frac{80}{100} + \frac{22.5}{2} (25.4) \right)}{1000}$$

$$r_d = 0.522 \text{ m}$$

2.3. PARÁMETROS AMBIENTALES

Dentro de los parámetros ambientales se toma en cuenta la gravedad y la densidad del aire, ya que la densidad varía de acuerdo con la altimetría y las condiciones atmosféricas, lo que influye en el trabajo de los motores de combustión interna (Giacosa, 1970)

2.3.1. DENSIDAD DEL AIRE

La densidad del aire varía proporcionalmente respecto a la presión atmosférica y proporcionalmente inverso a la temperatura, y su valor se determina partiendo de la ecuación de gases ideales:

$$PV = MRT$$

Ecuación 4: Ecuación de gases ideales

En donde:

P = Presión atmosférica [kPa]

V = volumen [m³]

T = temperatura en grados kelvin [K]

R = constante del gas ideal [$\frac{kJ}{kg \cdot K}$]

M = masa del gas [kg]

Considerando que la densidad es igual a la masa sobre volumen, despejando estas de la Ecuación 4 obtenemos la ecuación de la densidad:

$$\rho = \frac{P}{R * T}$$

Ecuación 5: Ecuación de la densidad

Basados en la Ecuación 5 se establece la densidad del aire aproximado en la ciudad de Riobamba con datos de temperatura y presión tomados de (Tiupul & Arévalo, 2019).

Sustituyendo:

$$T = 13.6 \text{ } ^\circ\text{C a K} = 286,75 \text{ K}$$

$$P = 72,59 \text{ kPa}$$

$$R = 0.2870 \text{ kJ/kg}^*\text{K}$$

El valor de la densidad del aire es de:

$$\rho = 0.882 \text{ kg/m}^3$$

2.3.2. GRAVEDAD

Es la aceleración que tienen los cuerpos en caída libre y cuyo valor universal es de $9,81 \text{ m/s}^2$, de acuerdo con la ley de Newton se maneja este valor para el cálculo del peso de los cuerpos.

2.4. CICLOS DE CONDUCCIÓN

2.4.1. DETERMINACIÓN DEL PROCESO

Se plantea el proceso a seguir para la elaboración del ciclo de conducción de las líneas previamente seleccionadas, en esta investigación dichas etapas son: Definición del método de obtención,

establecimiento de ruta y vehículo, instrumentación, recolección de datos y análisis físico-estadístico.

La ruta y el vehículo para objeto de estudio se han definido anteriormente, y se puede encontrar toda la información necesaria para el desarrollo del ciclo de conducción.

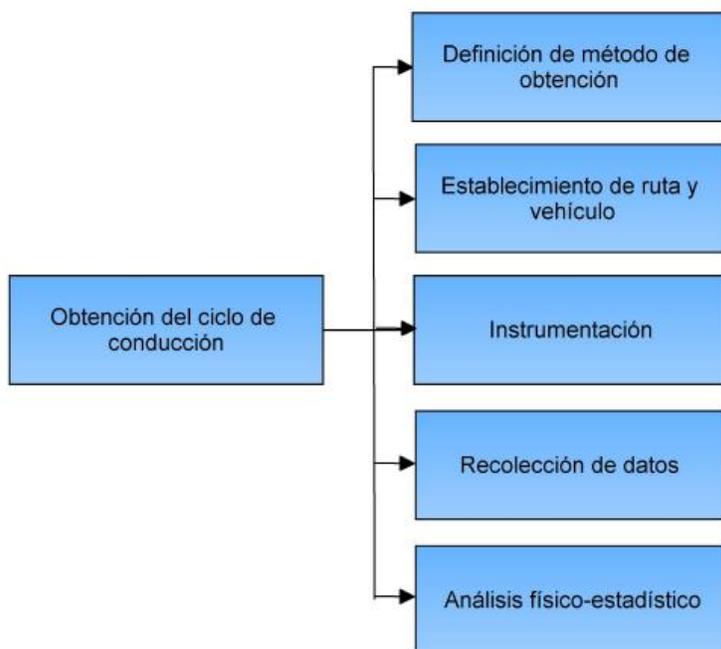


Figura 11: Proceso de obtención de ciclo de conducción

Fuente: Autores

2.4.1.1. MÉTODO A UTILIZAR

El ciclo de conducción es una herramienta para la determinación de la demanda energética, por lo cual es conveniente involucrar todos los parámetros de operación, por tal motivo se emplea la técnica de obtención de datos directa y la construcción se basa en la estimación por promedios ponderados.

2.4.1.2. RUTAS DE ANÁLISIS

Las líneas de buses para el análisis han sido seleccionadas anteriormente mediante una matriz de decisión (Tabla 9), tomando en consideración los parámetros influyentes en la demanda energética. A continuación, se muestran las líneas seleccionadas, sus terminales y la ruta que sigue cada una de ellas.

Línea N° 4 (Licán-Bella Vista)

La Línea N° 4 es una de las líneas con mayor afluencia de pasajeros, consta de una terminal, la cual está ubicada en la parroquia Licán, entre las calles Cayapas y Atacames.



Figura 12: Terminal de Línea 4 (Licán)

Fuente: Autores

En la Tabla 12, se presenta las coordenadas que delimitan la Terminal de la línea 4.

Tabla 12: Coordenadas de terminal Línea 4

Latitudo	Longitudo
-1.650846755	-78.706520270
-1.651312709	-78.706933053
-1.651627510	-78.706426400
-1.651155432	-78.706008319

Fuente: Autores

La Figura 13, presenta el recorrido a lo largo de la ciudad.

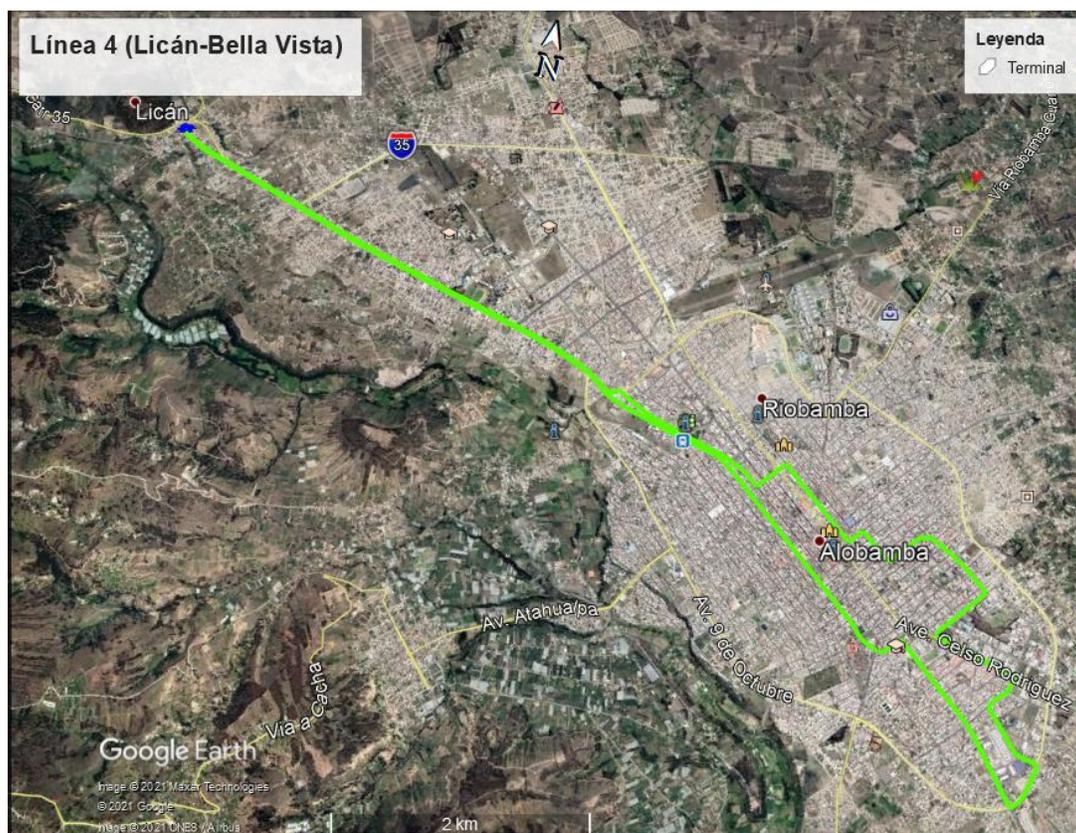


Figura 13: Recorrido de Línea 4

Fuente: Autores

Línea N° 13 (Sixto Durán - San Miguel de Tapi)

La Línea N°13 es una de las líneas con mayor afluencia de pasajeros, consta de una terminal, la cual está ubicada en el sector Sixto Durán, en las calles Londres y Madrid (esquina).



Figura 14: Terminal de Línea 13 (Sixto Durán)

Fuente: Autores

En la Tabla 13, se presenta las coordenadas que delimitan la terminal de la línea 13.

Tabla 13: Coordenadas de terminal Línea 13

Latitude	Longitude
-1.687306.77	-78.639514929
-1.687792267	-78.638872310
-1.687222619	-78.638319339
-1.686629678	-78.638949281

Fuente: Autores

La Figura 15 presenta el recorrido a lo largo de la ciudad.

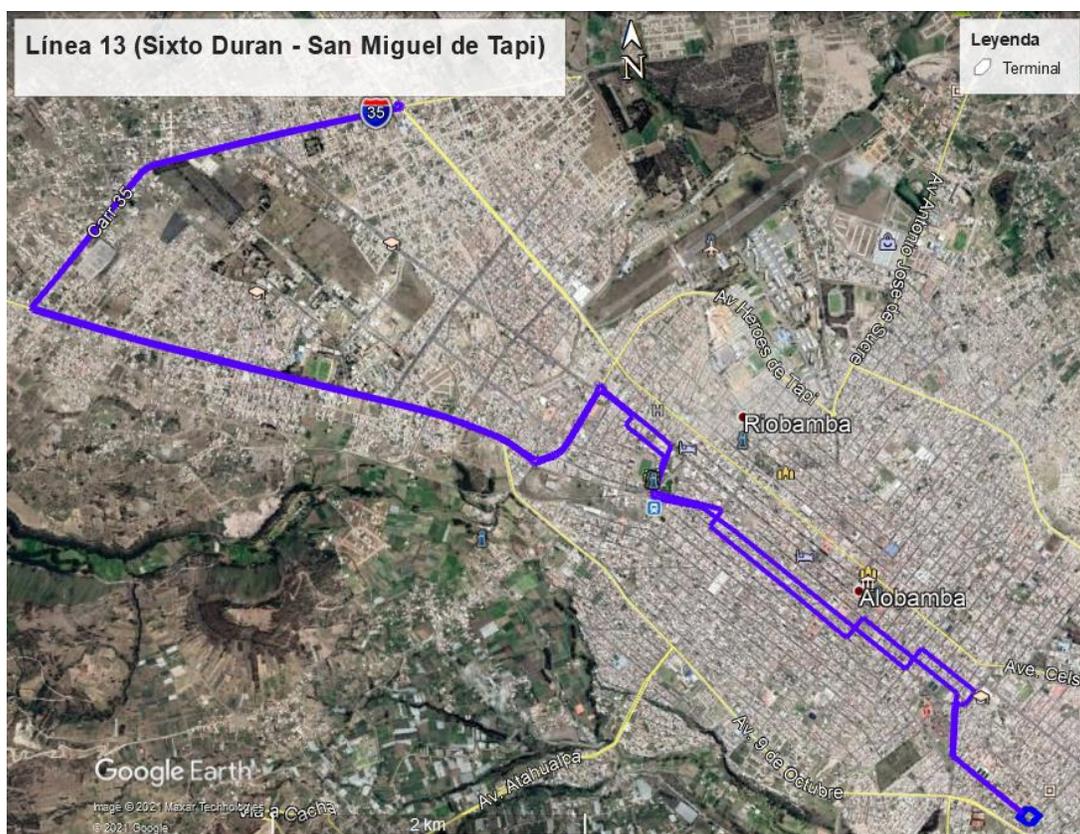


Figura 15: Recorrido de Línea 13

Fuente: Autores

Línea N° 14 (24 de Mayo – La Libertad)

La Línea N°14 es una de las líneas con mayor pendiente y distancia de recorrido, consta de una terminal, la cual está ubicada en el sector San Luis, entre las calles Chimborazo e Independencia.



Figura 16: Terminal de Línea 14 (San Luis)

Fuente: Autores

En la Tabla 14, se presenta las coordenadas que delimitan la terminal de la línea 14.

Tabla 14: Coordenadas de terminal Línea 14

Latitude	Longitude
-1.709.220.574	-78.646.039.375
-1.709.551.502	-78.645.712.170
-1.709.031.983	-78.645.150.978
-1.708.659.407	-78.645.520.271

Fuente: Autores

La Figura 17 presenta el recorrido a lo largo de la ciudad.



Figura 17: Recorrido de Línea 14

Fuente: Autores

2.4.1.3. INSTRUMENTACIÓN

Dispositivo GPS



Figura 18: Navegador Garmin GPSMAP 64

Fuente: (GARMIN, 2021)

Se utiliza el dispositivo de posicionamiento satelital para la obtención de los parámetros de: tiempo, velocidad, aceleración y pendiente de ascenso en cada una de las rutas en análisis. Este dispositivo tiene las siguientes características:

Tabla 15: Especificaciones de Navegador Garmin GPSMAP 64

Especificaciones	Descripción
Batería	2 pilas AA
Duración	16 horas
Radiofrecuencia y protocolos	2,4 GHz ANT+Bluetooth 4,0 (con EDR y BLE)
Mapa base	Si
Memoria interna	4 GB
Waypoints	5000
Rutas	200
Track log	10.000 puntos, 200 tracks guardados
Altímetro barométrico	Si
Receptor de lata sensibilidad	Si

Fuente:(GARMIN, 2021)

Configuración del equipo GPSMAP 64

Configuración general del equipo, en el Menú principal del dispositivo seleccionar la opción Configuración, dentro de esta seleccionar la opción Sistema, en la opción Sistema de satélite seleccionar GPS + GLONASS, activar la opción WAAS/EGNOS, dicha opción permite incrementar la precisión en la toma de datos.

Para modificar las unidades con las que se desea adquirir los datos se puede hacer en configuración, para ello se debe ir a Menú principal del dispositivo seleccionar la opción Configuración, dentro de esta seleccionar la opción Unidades y especificar las unidades de cada variable con las que se desee trabajar.

2.4.1.4. RECOLECCIÓN DE DATOS

En la toma de datos se utiliza el dispositivo GPSMAP 64, y al conductor cotidiano del autobús, este último con el propósito de registrar los escenarios normales de operación.

Antes de iniciar con la adquisición de datos con el dispositivo se debe seleccionar una unidad que este dentro del criterio de selección de unidades, presentadas anteriormente.

Para iniciar con la toma de datos se debe seleccionar la opción Track Manager del equipo, para una mejor recepción de datos se debe colocar el equipo en la parte frontal de la unidad ya que esto permite una mejor sincronización entre el dispositivo GPS y los satélites.

Al finalizar la jornada laboral de la unidad es necesario guardar el ultimo track. Para descargar los datos adquiridos por el dispositivo a una laptop se debe conectar el cable USB, en Archivos seleccionar la memoria interna del dispositivo Garmin GPSMAP 64, en la carpeta GPX copiar los tracks guardados.

La obtención de un track completo de una jornada laboral, se realiza mediante la página web Strava, esta página permite unir varios tracks y al finalizar permite tener un solo track en formato GPX.

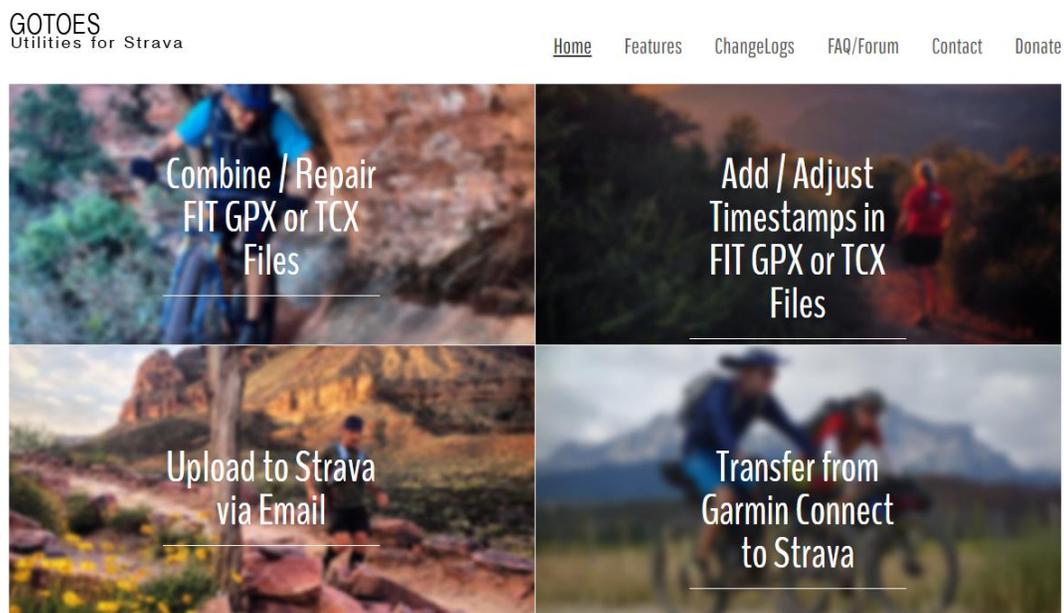


Figura 19: Pagina Web Strava

Fuente: (Strava, 2021)

Lectura y visualización de datos

La lectura y visualización de datos se realiza con la herramienta GPS Visualizer, la cual se encuentra en línea de forma gratuita. En la página principal del sitio web seleccionar la opción “Convert to plain text”, muestradas en la Figura 20.

GPS Visualizer

MAKE A MAP
- Leaflet/Google
- Google Earth
- JPG/PNG/SVG

MAKE A PROFILE
CONVERT A FILE
Draw on a map
Calculators

Geocode addresses
Look up elevations
Atlas: Share a map
GPSLabel

Examples
Help/FAQ
About GPSV

Ad closed by Google

GPS Visualizer: Do-It-Yourself Mapping

GPS Visualizer is an online utility that creates maps and profiles from geographic data. It is **free** and easy to use, yet powerful and extremely customizable. Input can be in the form of GPS data (tracks and waypoints), driving routes, street addresses, or simple coordinates. Use it to see where you've been, plan where you're going, or quickly visualize geographic data (scientific observations, events, business locations, customers, real estate, geotagged photos, etc.).

Get started now!

Upload a GPS file: Ni...ado

Choose an output format:

To set more options, use the detailed input pages:

- Google Maps / Leaflet
- Google Earth KML
- JPEG/PNG/SVG maps
- Plot data points
- Profiles (elevation, etc.)
- Convert to GPX
- Convert to plain text**
- Sandbox (drawing)
- Geocoding
- KML overlays

GPS Visualizer can read data files from many different sources, including but not limited to: **GPX** (a standard format used with many devices and Garmin's eTrex, GPSMAP, Oregon, Dakota, Colorado, & Nüvi series), **Google Earth** (.kml/.kmz), **Google Maps routes** (URLs), **FAI/IGC glider log**, **Furuno**, **Garmin Fitness** (.fit), **Garmin Forerunner** (.xml/.hst/.tcx), **Garmin MapSource/BaseCamp/HomePort** (.gdb), **Geocaching.com** (.igo (.trk), **Lowrance** (.usr), **Microsoft Excel spreadsheets** (.xls/.xlsx), **NMEA 0183 data**, **OziExplorer** (.plt/.wpt), **Suunto X9/X9i** (.sdf), **Ti** (.pgl), **U-blox** (.ubx), **XML feeds**, and of course **tab-delimited or comma-separated text**.

GPS Visualizer is based in Portland, Oregon, and has been on the Web since October 2002.

Figura 20: Página principal de GPS Visualizer

Fuente:(Schneider, 2019)

Dentro de la página se debe cargar el track de la jornada laboral en formato GPX. A continuación, seleccionar los campos de: velocidad, pendiente (%) y distancia. Una vez convertido y descargado el archivo “.txt”, se debe realizar una modificación del separador decimal (punto a coma), de esta manera se puede abrir directamente el archivo “.txt” en Excel.

Formato de salida: Texto sin formato GPX KML de Google Earth

Sube tus archivos aquí: (Tamaño total máximo de 10 MB, se admite .zip / .gz)

Archivo # 1 Track_AAAAA... 101715.gpx X

Archivo # 2 Ningún archivo seleccionado X

Archivo # 3 Ningún archivo seleccionado X

[Mostrar más cuadros de archivo](#)

O pegue sus datos aquí:

Forzar que los datos de texto sean de este tipo:

O proporcione la URL de un archivo en la Web:

Delimitador de texto sin formato: Unidades de salida de texto sin formato:

Agregar campos estimados: velocidad título Pendiente (%) distancia VMG ritmo

Agregue datos de elevación DEM:

[Guarde estos ajustes](#) • [Cargar desde guardados](#)

[+] mostrar opciones avanzadas

Figura 21: Conversión de archivo .GPX a ".txt"

Fuente:(Schneider, 2019)

type	time	latitude	longitude	altitude (m)	speed (km/h)	slope (%)	distance_inte
T	11:42:51	-1,6514723	-78,7065408	2927,6	0	0	0
T	11:42:52	-1,65147205	-78,7065387	2927,6	0,9	-4,5	0,24
T	11:42:54	-1,65147171	-78,7065366	2927,6	0,4	-4,2	0,24
T	11:42:55	-1,6514718	-78,7065355	2927,6	0,4	-4,9	0,12
T	11:42:56	-1,65147188	-78,7065344	2927,6	0,4	-4,1	0,12
T	11:42:57	-1,6514718	-78,706533	2927,6	0,6	-4,4	0,16
T	11:42:58	-1,65147171	-78,7065317	2927,5	0,5	-5	0,14
T	11:42:59	-1,65147138	-78,7065308	2927,5	0,4	-3,7	0,11
T	11:43:00	-1,65147129	-78,7065295	2927,5	0,5	-4,3	0,14
T	11:43:01	-1,65147088	-78,7065291	2927,5	0,2	-3	0,07

Figura 22: Extracto de datos de un archivo en formato ".txt"

Fuente: Autores

En la Figura anterior se muestra un extracto del archivo “.txt” en Excel. Para visualizar cada coordenada se utiliza el programa Google Hearth, con la cual se verifica una toma correcta de datos en el recorrido establecido por cada línea de buses, como en la Figura 23 se indica.

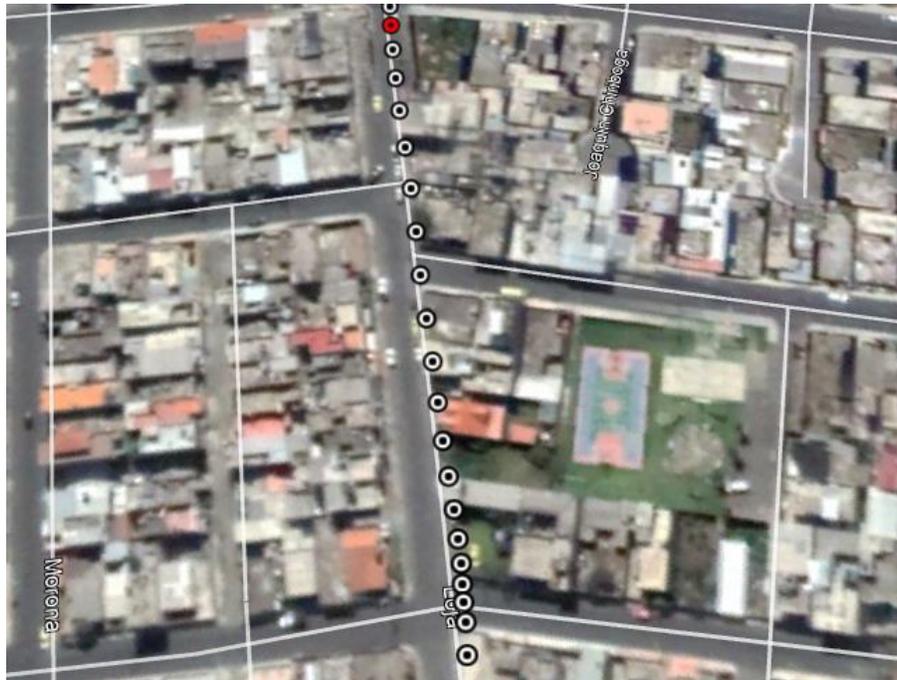


Figura 23: Visualización de coordenadas de longitud y latitud en Google hearth

Fuente: Autores

2.4.1.5. ANÁLISIS FÍSICO-ESTADÍSTICO

Análisis por promedios ponderados

La obtención de ciclos de conducción en países tales como: Estados Unidos de América, México, Colombia, entre otros, han sido definidos a través del criterio de promedios ponderados, este consiste en contrastar las variables representativas de mayor predominio de cada curva

experimental con respecto a la media de dichas variables con una asignación previa de una ponderación (Restrepo et al., 2007).

Las variables en materia se denominan parámetros resumen, para la construcción del ciclo de conducción de un bus urbano se ha seleccionado parámetros como son: velocidad máxima, velocidad promedio, tiempo total de recorrido, tiempo de ralentí, tiempo con aceleración positiva, distancia recorrida y aceleración máxima.

Tabla 16: Criterio de ponderaciones

Parámetros	Peso de la ponderación W_i
Velocidad media del ciclo completo incluyendo los periodos en modo ralentí, v_1	1
<i>Velocidad Máxima, v_{max}</i>	0,25
<i>Tiempo total de manejo, T_{manejo}</i>	1
Tiempo de ralentí, $T_{ralentí}$	0,75
Distancia recorrida, $D_{recorrida}$	1
Aceleración media de todas las fases de aceleración, a	1
Aceleración positiva máxima, a_{max}	0,75
Tiempo de aceleración, $T_{aceleración}$	0,25
Proporción del tiempo de conducción en modo ralentí, P_i	1
Proporción del tiempo de conducción en modo aceleración, P_a	1
Total	8

Fuente: (Restrepo et al., 2007)

Para el uso de este método de obtención se sigue el siguiente proceso:

- Primero se calcula el promedio P de los valores de cada uno de los parámetros $P_{i,j}$.
- Luego se determina la desviación respecto al promedio con valor absoluto en cada uno de los parámetros mediante la siguiente formula:

$$\frac{|P_{i,j} - \bar{P}|}{\bar{P}}$$

Ecuación 6: Desviación respecto a la media

Donde:

$P_{i,j}$ = es el valor de cada parámetro para el recorrido correspondiente

P = Promedio del parámetro en todos los recorridos

- Se determina el valor “Y” para cada uno de los parámetros y seguidamente se ejecuta una adición para cada recorrido obteniendo el valor Y definitivo, para finalmente seleccionar el valor mínimo del total obtenido, ya que representa la menor variación respecto a la media. El valor Y se calcula de la siguiente manera:

$$Y = \frac{w_i * \frac{|P_{i,j} - P|}{P}}{\text{Total de ponderaciones}}$$

Ecuación 7: Promedio ponderado de las desviaciones respecto a la media

En donde:

Y = Promedio ponderado de las desviaciones con respecto a la media

Wi = Ponderación de cada parámetro.

A continuación, se muestran los resultados de los parámetros resumen para los recorridos de cada línea:

Línea N° 4 (Licán-Bella Vista)

La Tabla 17 detalla los valores de los parámetros para cada uno de los recorridos correspondientes a la línea Nro.4, conjuntamente con el promedio de estos.

Tabla 17: Parámetros resumen para la obtención del ciclo de conducción de la línea 4

Recorrido	velocidad promedio [km/h]	velocidad máxima [km/h]	Tiempo de manejo [s]	Tiempo de ralentí [s]	Distancia recorrida [m]	Aceleración promedio [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Tiempo de aceleración [s]	proporción del tiempo de conducción en modo ralentí [%]	proporción del tiempo de conducción en modo aceleración [%]
1	15,30	53,30	5122	1082,0	21,82	0,37	2,08	2122,00	21,12	41,43
2	15,29	64,10	5142	1314,0	21,87	0,41	3,61	2132,00	25,55	41,46
3	15,08	59,50	5268	1388,0	22,12	0,46	1,97	2115,00	26,35	40,15
4	14,89	66,90	5347	1595,0	22,15	0,43	5,42	1980,00	29,83	37,03
5	15,50	67,10	5139	1441,0	22,17	0,49	2,36	2028,00	28,04	39,46
6	14,75	53,50	5371	1388,0	22,04	0,37	2,28	2104,00	25,84	39,17
7	14,72	54,50	5375	1477,0	22,00	0,41	2,17	2044,00	27,48	38,03
8	15,07	62,30	5550	1331,0	23,27	0,43	2,64	2240,00	23,98	40,36
9	15,02	56,00	5277	1271,0	22,05	0,38	2,28	2071,00	24,09	39,25
10	14,48	54,30	5469	1537,0	22,03	0,41	2,11	2072,00	28,10	37,89
P	15,01	59,15	5306	1382,4	22,15	0,42	2,69	2090,80	26,04	39,42

Fuente: Autores

La Tabla 18, muestra la desviación respecto a la media y el valor Y para cada parámetro.

Tabla 18: Desviación respecto a la media de los parámetros resumen de la línea 4

Recorrido	velocidad promedio [km/h]	velocidad máxima [km/h]	Tiempo de manejo [s]	Tiempo de ralentí [s]	Distancia recorrida [m]	Aceleración promedio [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Tiempo de aceleración [s]	Proporción del tiempo de conducción en modo ralentí [%]	Proporción del tiempo de conducción en modo aceleración [%]	Y
1	0,0025	0,0031	0,0043	0,0204	0,0019	0,0151	0,0212	0,0005	0,0236	0,0064	0,0932
2	0,0023	0,0026	0,0039	0,0046	0,0016	0,0018	0,0320	0,0006	0,0023	0,0065	0,0611
3	0,0006	0,0002	0,0009	0,0004	0,0002	0,0129	0,0251	0,0004	0,0015	0,0023	0,0469
4	0,0010	0,0041	0,0010	0,0144	0,0000	0,0036	0,0949	0,0017	0,0182	0,0076	0,1465
5	0,0041	0,0042	0,0039	0,0040	0,0001	0,0216	0,0115	0,0009	0,0096	0,0001	0,0601
6	0,0022	0,0030	0,0015	0,0004	0,0006	0,0137	0,0144	0,0002	0,0009	0,0008	0,0377
7	0,0024	0,0025	0,0016	0,0064	0,0009	0,0027	0,0183	0,0007	0,0069	0,0044	0,0468
8	0,0005	0,0017	0,0057	0,0035	0,0063	0,0056	0,0018	0,0022	0,0099	0,0030	0,0402
9	0,0001	0,0017	0,0007	0,0076	0,0006	0,0094	0,0144	0,0003	0,0094	0,0006	0,0446
10	0,0044	0,0026	0,0038	0,0105	0,0007	0,0013	0,0202	0,0003	0,0099	0,0049	0,0586

Fuente: Autores

Línea N° 13 (Sixto Durán - San Miguel de Tapi)

La Tabla 19 detalla los valores de los parámetros para cada uno de los recorridos correspondientes a la línea Nro.13, conjuntamente con el promedio de estos.

Tabla 19: Parámetros resumen para la obtención del ciclo de conducción de la línea 13

Recorrido	velocidad promedio [km/h]	velocidad máxima [km/h]	Tiempo de manejo [s]	Tiempo de ralentí [s]	Distancia recorrida [m]	Aceleración promedio [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Tiempo de aceleración [s]	Proporción del tiempo de conducción en modo ralentí [%]	Proporción del tiempo de conducción en modo aceleración [%]
1	15,51	71,50	5609	1808	24,20	0,44	3,28	2058	32,23	36,69
2	15,54	61,50	5604	1983	24,21	0,47	3,11	1871	35,39	33,39
3	15,58	60,60	5640	1689	24,43	0,16	3,11	2088	29,95	37,02
4	14,95	61,90	5853	1829	24,33	0,41	2,06	2159	31,25	36,89
5	15,27	60,20	5664	1637	24,05	0,45	2,67	2162	28,90	38,17
6	15,16	47,50	5721	1473	24,10	0,36	1,47	2287	25,75	39,98
7	15,65	57,70	5615	1450	24,44	0,38	1,78	2293	25,82	40,84
8	15,18	51,30	5725	1668	24,16	0,37	1,72	2125	29,14	37,12
9	15,37	52,60	5673	1646	24,25	0,42	2,53	2164	29,01	38,15
10	15,22	50,00	5795	1710	24,51	0,41	1,92	2160	29,51	37,27
P	15,34	57,48	5689,90	1689,30	24,27	0,39	2,36	2136,70	29,69	37,55

Fuente: Autores

La Tabla 20, muestra la desviación respecto a la media y el valor Y para cada parámetro.

Tabla 20: Desviación respecto a la media de los parámetros resumen de la línea 13

Recorrido	velocidad promedio [km/h]	velocidad máxima [km/h]	Tiempo de manejo [s]	Tiempo de ralentí [s]	Distancia recorrida [m]	Aceleración promedio [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Tiempo de aceleración [s]	Proporción del tiempo de conducción en modo ralentí [%]	Proporción del tiempo de conducción en modo aceleración [%]	Y
1	0,0014	0,0076	0,0018	0,0066	0,0004	0,0187	0,0362	0,0012	0,0107	0,0029	0,0932
2	0,0016	0,0022	0,0019	0,0163	0,0003	0,0256	0,0296	0,0039	0,0240	0,0139	0,0611
3	0,0019	0,0017	0,0011	0,0000	0,0008	0,0749	0,0296	0,0007	0,0011	0,0018	0,0469
4	0,0032	0,0024	0,0036	0,0078	0,0003	0,0081	0,0122	0,0003	0,0065	0,0022	0,0467
5	0,0006	0,0015	0,0006	0,0029	0,0011	0,0216	0,0120	0,0004	0,0033	0,0021	0,0460
6	0,0015	0,0054	0,0007	0,0120	0,0008	0,0089	0,0354	0,0022	0,0166	0,0081	0,0916
7	0,0025	0,0001	0,0016	0,0133	0,0009	0,0036	0,0232	0,0023	0,0163	0,0109	0,0749
8	0,0013	0,0034	0,0008	0,0012	0,0006	0,0056	0,0254	0,0002	0,0024	0,0014	0,0422
9	0,0002	0,0027	0,0004	0,0024	0,0001	0,0101	0,0065	0,0004	0,0029	0,0020	0,0276
10	0,0010	0,0041	0,0023	0,0011	0,0013	0,0089	0,0177	0,0003	0,0008	0,0009	0,0385

Fuente: Autores

Línea N° 14 (24 de Mayo – La Libertad)

La

Tabla 21 detalla los valores de los parámetros para cada uno de los recorridos correspondientes a la línea Nro.14, conjuntamente con el promedio de estos.

Tabla 21: Parámetros resumen para la obtención del ciclo de conducción de la línea 14

Recorrido	velocidad promedio [km/h]	velocidad máxima [km/h]	Tiempo de manejo [s]	Tiempo de ralentí [s]	Distancia recorrida [m]	Aceleración promedio [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Tiempo de aceleración [s]	Proporción del tiempo de conducción en modo ralentí [%]	Proporción del tiempo de conducción en modo aceleración [%]
1	16,99	64,20	6280	1948	29,66	0,48	2,50	7380	31,02	36,75
2	17,41	70,90	6128	1625	29,66	0,46	7,31	2508	26,52	40,93
3	17,14	61,00	6220	1643	29,67	0,48	2,44	2564	26,41	41,22
P	17,18	65,37	6209,33	1738,67	29,66	0,48	4,08	4150,67	27,98	39,63

Fuente: Autores

La Tabla 22 muestra la desviación respecto a la media y el valor Y para cada parámetro.

Tabla 22: Desviación respecto a la media de los parámetros resumen de la línea 14

Recorrido	velocidad promedio [km/h]	velocidad máxima [km/h]	Tiempo de manejo [s]	Tiempo de ralentí [s]	Distancia recorrida [m]	Aceleración promedio [m/s ²]	Aceleración máxima [m/s ²]	Tiempo de aceleración [s]	Proporción del tiempo de conducción en modo ralentí [%]	Proporción del tiempo de conducción en modo aceleración [%]	Y
1	0,0014	0,0006	0,0014	0,0113	0,000028	0,0015	0,0364	0,0243	0,0136	0,0091	0,0995
2	0,0017	0,0026	0,0016	0,0061	0,000003	0,0027	0,0740	0,0124	0,0065	0,0041	0,1118
3	0,0003	0,0021	0,0002	0,0052	0,000031	0,0012	0,0376	0,0119	0,0070	0,0050	0,0706

Fuente: Autores

2.4.2. CICLOS DE CONDUCCIÓN

2.4.2.1. LÍNEA 4

El recorrido tiene su inicio en el sector “Licán” y finiquita en “Bellavista”, regresando inmediatamente al sector de “Licán”, realizando de esta forma un viaje de ida y vuelta. Esta línea realiza el recorrido en un tiempo promedio de 1 hora 30 minutos, la velocidad promedio es de 14.74 km/h y la velocidad máxima es de 53.5 km/h, cada bus realiza 6 viajes diarios. A continuación, se presenta el ciclo de conducción y la altimetría obtenidos en esta ruta:

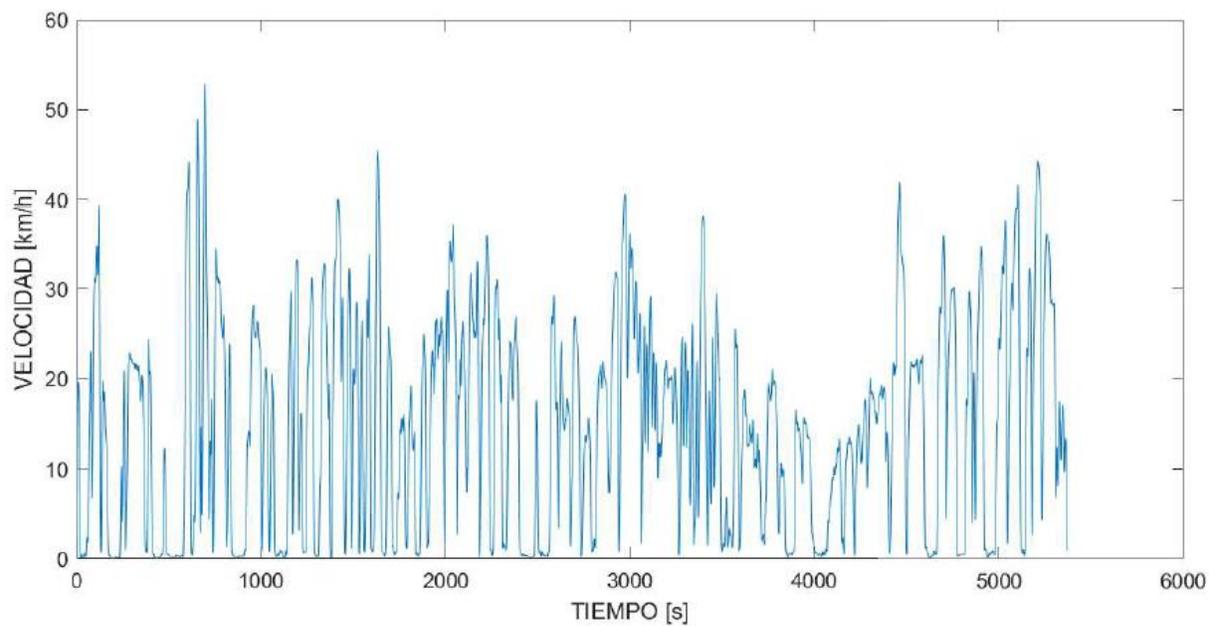


Figura 24: Ciclo de conducción Línea 4

Fuente: Autores

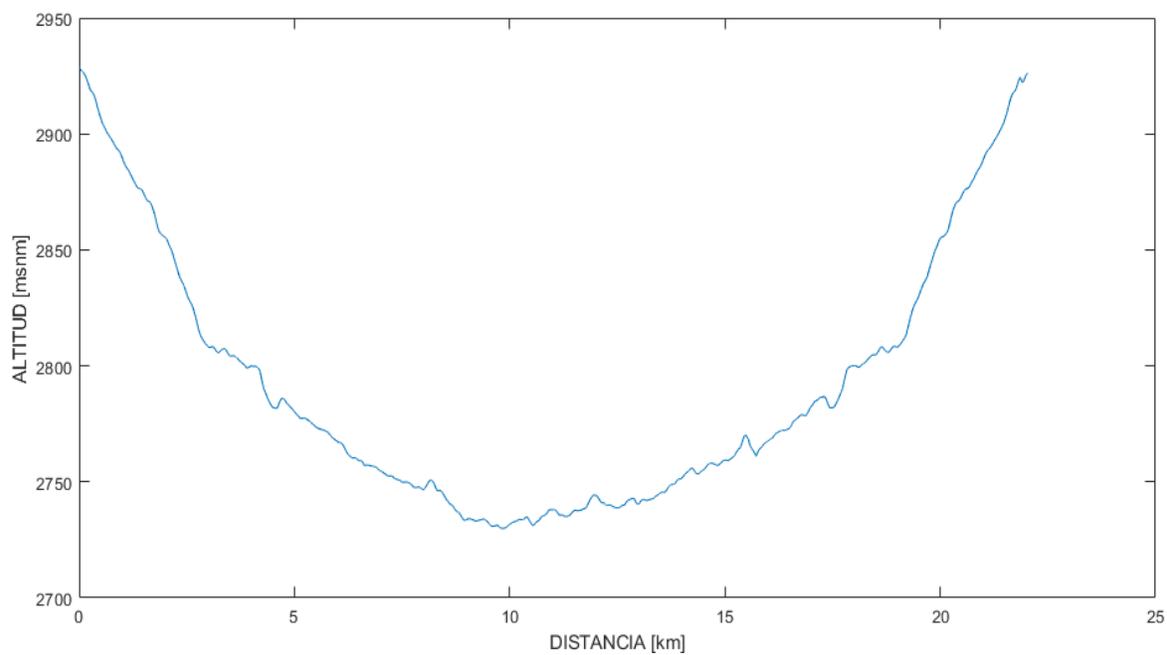


Figura 25: Perfil de altitud Línea 4

Fuente: Autores

2.4.2.2. LÍNEA 13

El recorrido tiene su inicio en el sector “Sixto Durán” y finiquita en “San Miguel de Tapi”, regresando inmediatamente al sector de “Sixto Durán”, realizando de esta forma un viaje de ida y vuelta. Esta línea realiza el recorrido en un tiempo promedio de 1 hora 35 minutos, la velocidad promedio es de 15.37 km/h y la velocidad máxima es de 52.6 km/h, cada bus realiza 6 viajes diarios. A continuación, se presenta el ciclo de conducción y la altimetría obtenidos en esta ruta:

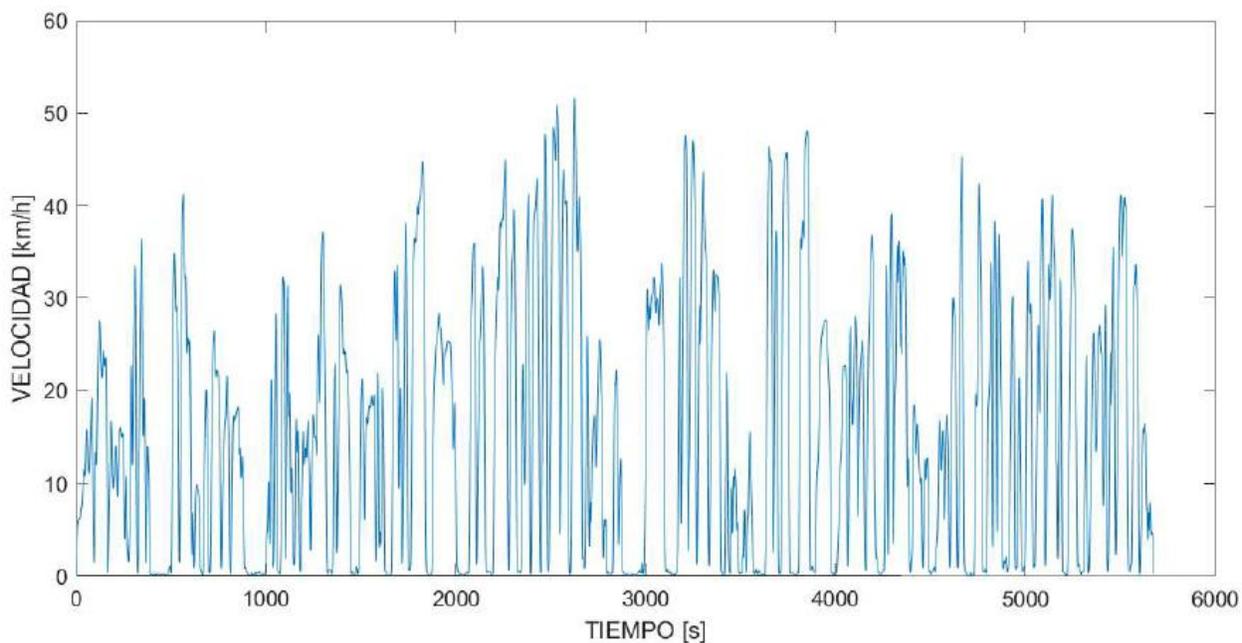


Figura 26: Ciclo de conducción Línea 13

Fuente: Autores

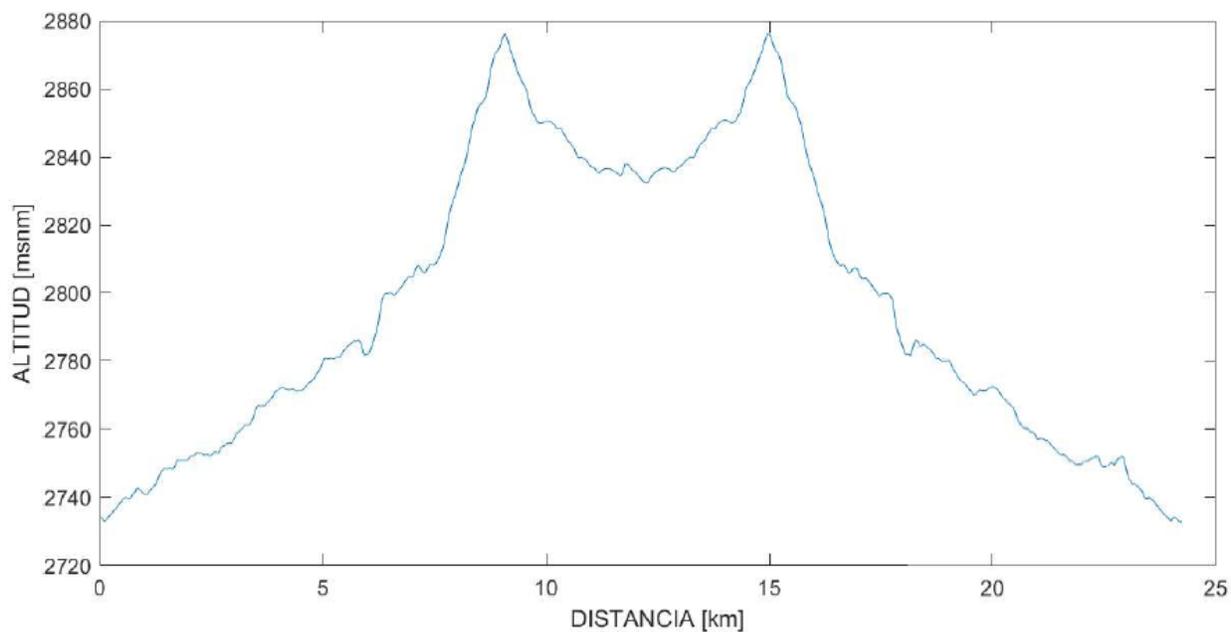


Figura 27: Perfil de altitud Línea 13

Fuente: Autores

2.4.2.3. LÍNEA 14

El recorrido tiene su inicio en el sector “San Luis” y finaliza en el sector “”, regresando inmediatamente al sector de “Licán”, realizando de esta forma un viaje de ida y vuelta. Esta línea realiza el recorrido en un tiempo promedio de 1 hora 45 minutos, la velocidad promedio es de 17.13 km/h y la velocidad máxima es de 61 km/h, cada bus realiza 6 viajes diarios. A continuación, se presenta el ciclo de conducción y la altimetría obtenidos en esta ruta:

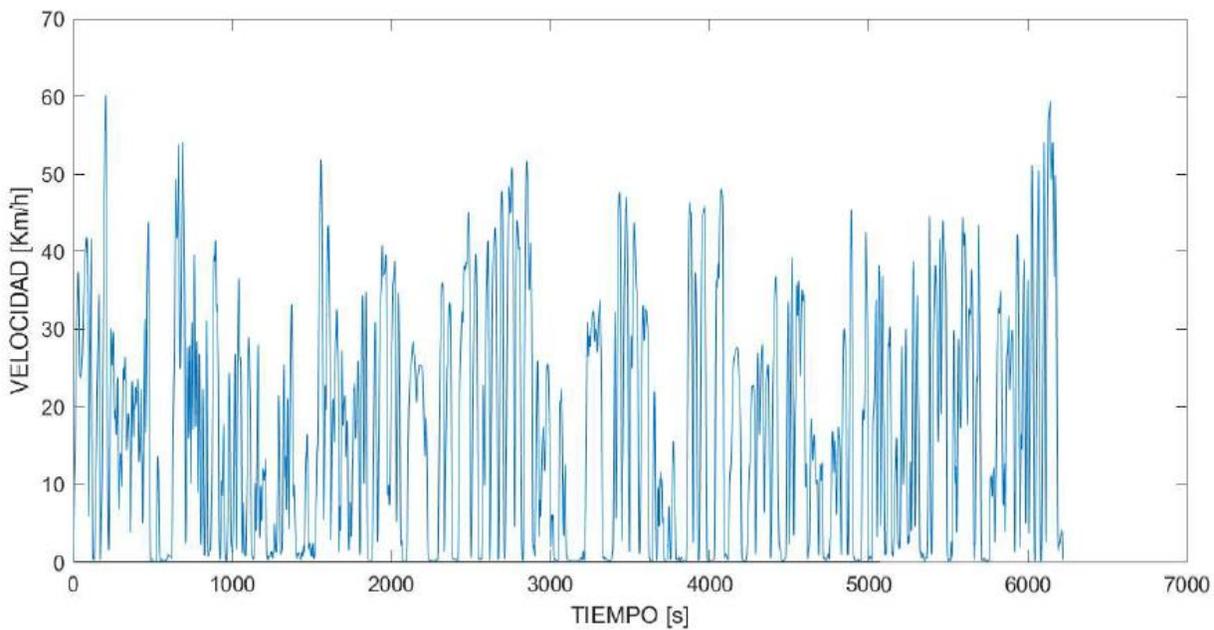


Figura 28: Ciclo de conducción Línea 14

Fuente: Autores

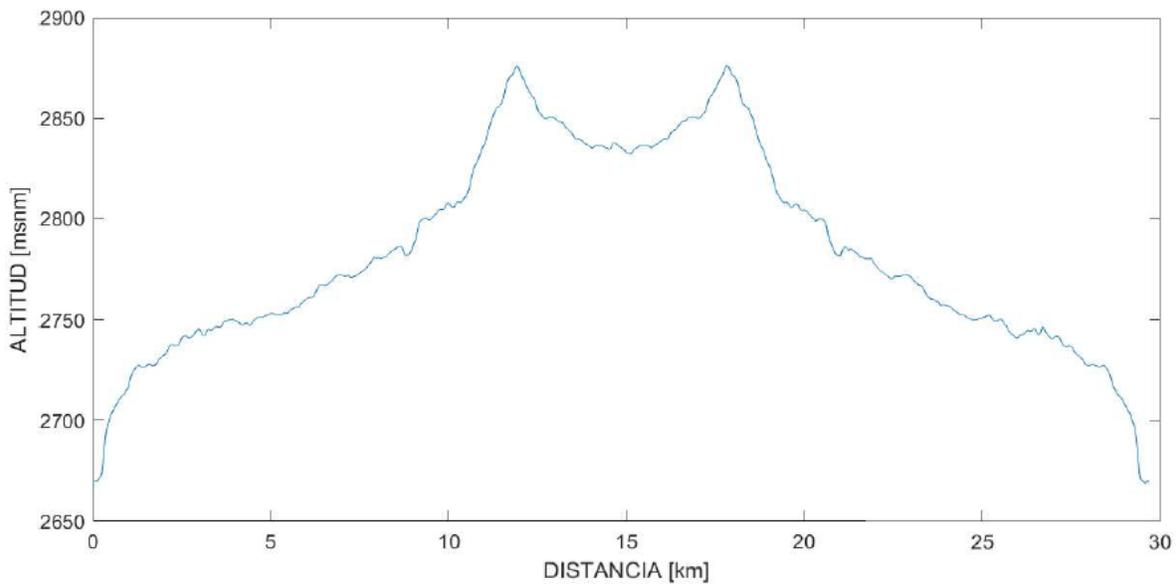


Figura 29: Perfil de altitud línea 14

Fuente: Autores

CAPITULO III

3. DEMANDA ENERGÉTICA EN LAS RUTAS DETERMINADAS

Este capítulo describe el desarrollo del algoritmo para la determinación de la demanda de energía en cada una de las rutas seleccionadas, además los valores máximos de torque y potencia para los diferentes escenarios de carga en cada una de estas.

3.1. ALGORÍTMO PARA LA OBTENCIÓN DE LA DEMANDA ENERGÉTICA

Definidos los parámetros ambientales, parámetros dinámicos del vehículo y los parámetros de operación se puede realizar el algoritmo para obtener la demanda energética. A continuación, se presenta un cuadro resumen de los parámetros antes mencionados:

Tabla 23: Parámetros resumen para determinación de la demanda energética

Parámetros de vehículo		
Descripción	Simbología	Valor
Área frontal [m ²]	[A]	8.295
Coeficiente de arrastre [-]	[Cd]	0.634
Coeficiente de resistencia a la rodadura [-]	[fr]	0.00923
Masa del vehículo [kg]	[m]	9310
Radio dinámico [m]	[rd]	0.522
Masa de pasajero [kg]	[m]	70
Capacidad de pasajeros	--	70
Parámetros ambientales		
Densidad del aire [kg/m ³]	--	0.882
Gravedad [m/s ²]	[g]	9.81
Parámetros de operación		
Velocidad [km/h]	[v]	Ciclo de conducción
Aceleración [m/s ²]	[A]	
Pendiente [rad]	[i]	

Fuente: Autores

Es importante conocer el proceso de la obtención de la demanda energética en la ruta, y para esto se tiene el siguiente flujograma, el mismo que se tomará como base para la elaboración del algoritmo.

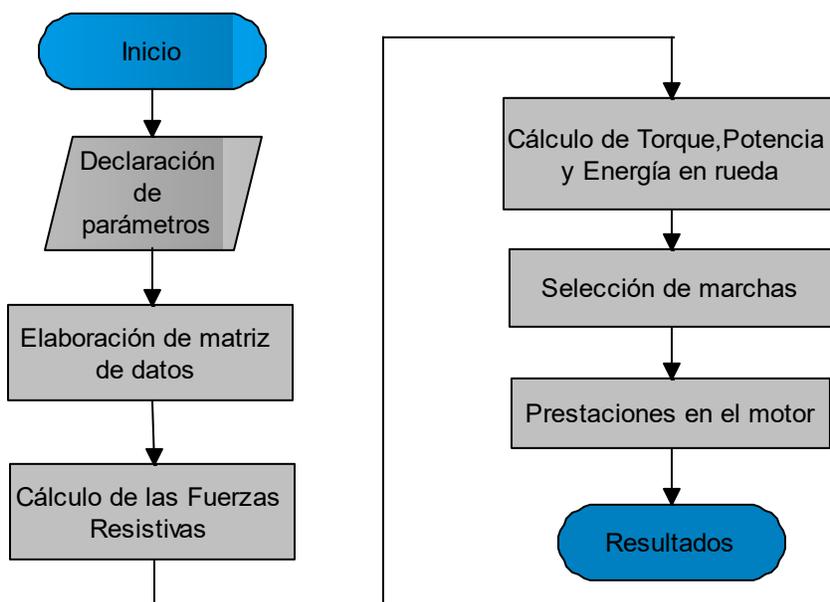


Figura 30: Proceso para la obtención de la demanda de energía

Fuente: Autores

3.1.1. PROCESAMIENTO DE DATOS

Debido al extenso número de datos conseguidos en el monitoreo de cada ruta, es necesario que el procesamiento de los mismos se realice en un software como Matlab. En la Figura 31 se muestra un extracto de la interfaz para la declaración de variables.

```

INGRESE LOS VALORES DE LOS PARÁMETROS DEL VEHÍCULO
Ingrese el valor del coeficiente de rodadura: 0.00923
Ingrese el valor del coeficiente aerodinámico: 0.634
Ingrese el valor del área frontal [m^2]: 8.295
Ingrese el radio dinámico del neumático del vehículo [m]: 0.522
Ingrese el valor de la masa en vacío del vehículo [Kg]: 9310
Ingrese la capacidad de pasajeros: 70
  INGRESE LOS VALORES DE LOS PARÁMETROS AMBIENTALES
Ingrese el valor de la densidad del aire [Kg/m^3]: 0.882

Entradas =

8x2 table

      Variable                Valor
      -----                -
'coeficiente de rodadura'    0.00923
'coeficiente aerodinámico'   0.634
'Area frontal'               8.295
'Radio Dinámico'             0.522
'Masa en vacío'                9310
'Capacidad de Pasajeros'     70
'Densidad del aire'          0.882
'Gravedad'                   9.81

```

Figura 31: Declaración de variables y carga de archivos a Matlab

Fuente: Autores

Para cargar los archivos “.xls” que contienen los datos de velocidad y pendiente correspondientes al ciclo de conducción de cada ruta, se debe tener el archivo en la carpeta del programa. La interfaz le pedirá introducir el nombre del archivo y de la hoja en donde se encuentran dicha información, estos deberán ser escritos entre “comillas simples”. Además, se debe especificar el número de columna que contiene el dato de velocidad, pendiente y tiempo como muestra la siguiente figura:

INGRESE EL NOMBRE DEL ARCHIVO QUE CONTIENE LOS DATOS DEL CICLO DE CONDUCCION
 El archivo debe ser de formato .xls
 La velocidad debe estar en [Km/h] y el tiempo en segundos [s]
 Ingrese el nombre del archivo entre comillas simple: 'LINEA4'
 Ingrese el nombre de la hoja entre comillas simple: '6'
 Especifique el número de columna donde se encuentra el dato de:
 Velocidad: 5
 Pendiente: 7
 Tiempo: 1

Figura 32: Ingreso de datos de ciclo de conducción

Fuente: Autores

3.1.2. CÁLCULO DE LAS PRESTACIONES EN RUEDA

Para este proceso se utilizan las fórmulas de dinámica vehicular expuestas en la Tabla 1. Se desarrolla las líneas de código que permiten adquirir la información necesaria de cada punto y calcular las diferentes fuerzas resistivas y la fuerza total, que es la sumatoria de todas las fuerzas resistivas. más adelante se muestra un fragmento del código utilizado para cada una de las fuerzas:

```

32 - □ for t=1:length(tiempo(:,1))
33 -     vf=V(t,1)/3.6;
34 -     a(t,1)= vf-vi;
35 -     vi=V(t,1)/3.6;
36 - end
37     % Cálculo de la fuerza de arrastre
38 -     Fd=0.5*cd*den*Af*(V/3.6).^2;
39     %Cálculo de la Resistencia a la pendiente
40 -     Rg= m*g*seno;
41     %Cálculo de la Resistencia a la rodadura
42 -     Rx=fr*m*g.*cosd(p);
43     %Cálculo de la Resistencia a la inercia
44 -     Ri= m.*a;
45     % Cálculo de la fuerza resistiva total
46 -     Ft= Fd+Rg+Rx+Ri;
```

Figura 33: Fuerzas resistivas del vehículo

Fuente: Autores

Seguidamente se calcula el torque y la potencia en rueda, además se obtiene la demanda energética por cada punto y la total para la ruta mediante la siguiente línea de código:

```

55      % Cálculo de Torque en rueda
56 -    Tr= Ft.*rd;
57 -    Trmax=max(Tr);
58      % Cálculo de la potencia en rueda
59 -    Pr= (Ft.*(V/3.6))/1000;
60 -    Prmax= max(Pr);
61      %Demanda energética
62 -    dt=0;
63 -    for t= 1:length(tiempo(:,1))
64 -        de(t,1)= Pr(t,1) ./3600;
65 -        dt=de(t,1)+dt;
66 -    end

```

Figura 34: Cálculo de Torque, Potencia y Demanda energética en rueda

Fuente: Autores

Una vez calculado estos parámetros, se mostrará en la interfaz una tabla con los valores máximos en los diferentes escenarios de carga, como muestra la Figura 35:

Valores_maximos =

4×4 [table](#)

Dato	Vacio	Media_Carga	Full
'Fuerza en rueda [N]'	13288	16768	20248
'Torque en rueda [N.m]'	6936.4	8753.1	10570
'Potencia en rueda [kW]'	107.46	135.17	162.88
'Demanda de energía [kW/h]'	14.439	18.12	21.8

Figura 35: Valores máximos de los parámetros obtenidos

Fuente: Autores

Se muestra también las gráficas de cada parámetro para los diferentes escenarios de carga.

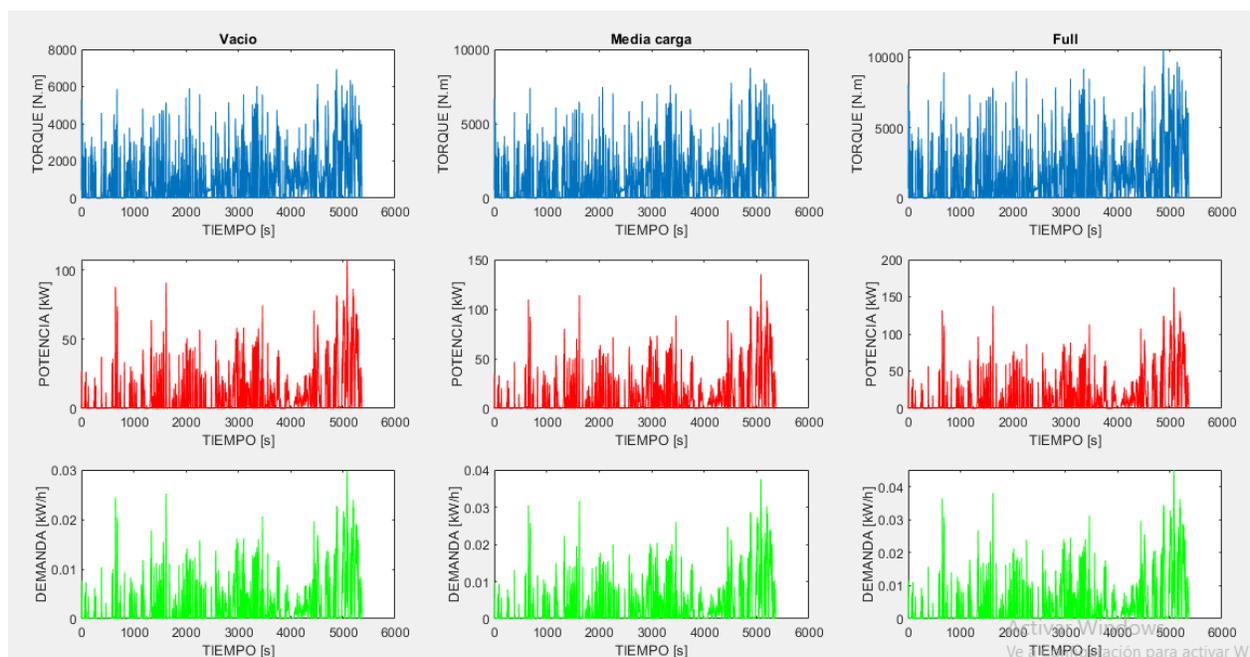


Figura 36: Grafica de fuerza, torque y energía en rueda

Fuente: Autores

La matriz de resultados se puede guardar en un archivo “.xls” para lo cual se debe introducir el nombre con el que deseamos guardarlo entre comillas simple y el programa lo generará automáticamente en la ubicación del programa.

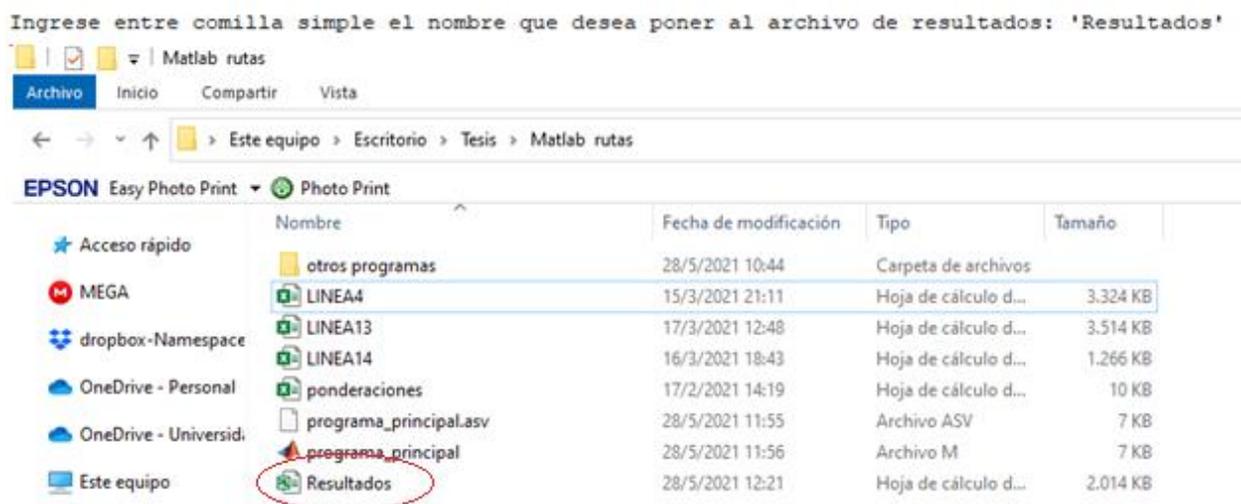


Figura 37: Generación de archivo ".xls" de resultados

Fuente: Autores

En la Tabla 24 se detalla los valores máximos de fuerza, torque, potencia y demanda de energía en rueda para las líneas en análisis, estos valores son tomados de las simulaciones realizadas en Matlab con los diferentes escenarios de carga del vehículo.

Tabla 24: Valores máximos de fuerza, torque, potencia y demanda de energía

	Línea 4			Línea 13			Línea 14		
	V	Mc	F	V	Mc	F	V	Mc	F
Fuerza en rueda máxima [N]	13288	16768	20248	15105	19076	23047	21930	27673	33417
Torque en rueda máximo [Nm]	6936	8753	10570	7885	9957	12030	11447	14446	17444
Potencia en rueda máximo [kW]	107	135	163	108	136	164	146	184	223
Demanda energética [kWh]	14	18	22	17	22	26	24	30	37

Fuente: Autores

En las Figuras 38, 39, 40, 41 se presentan un extracto de los resultados obtenidos de las simulaciones realizadas de la Línea 14. Es importante mencionar que, en este estudio se tomó en consideración solo los resultados de valor positivo, ya que representan el consumo de energía del automóvil.

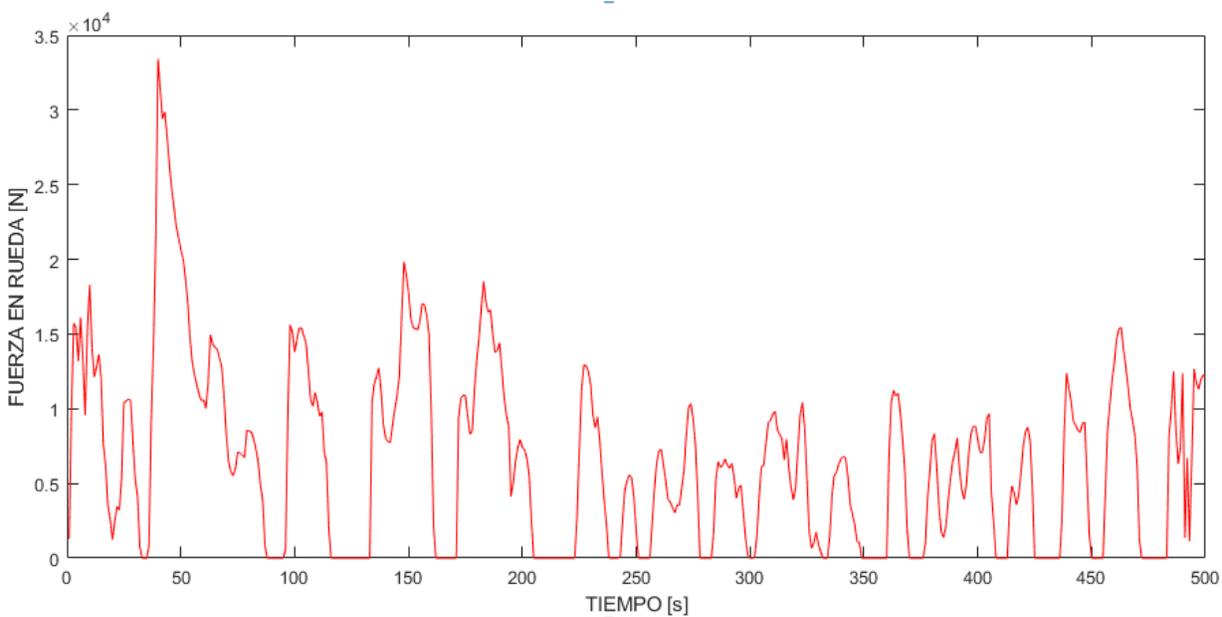


Figura 38: Extracto de fuerza en rueda de Línea 14

Fuente: Autores

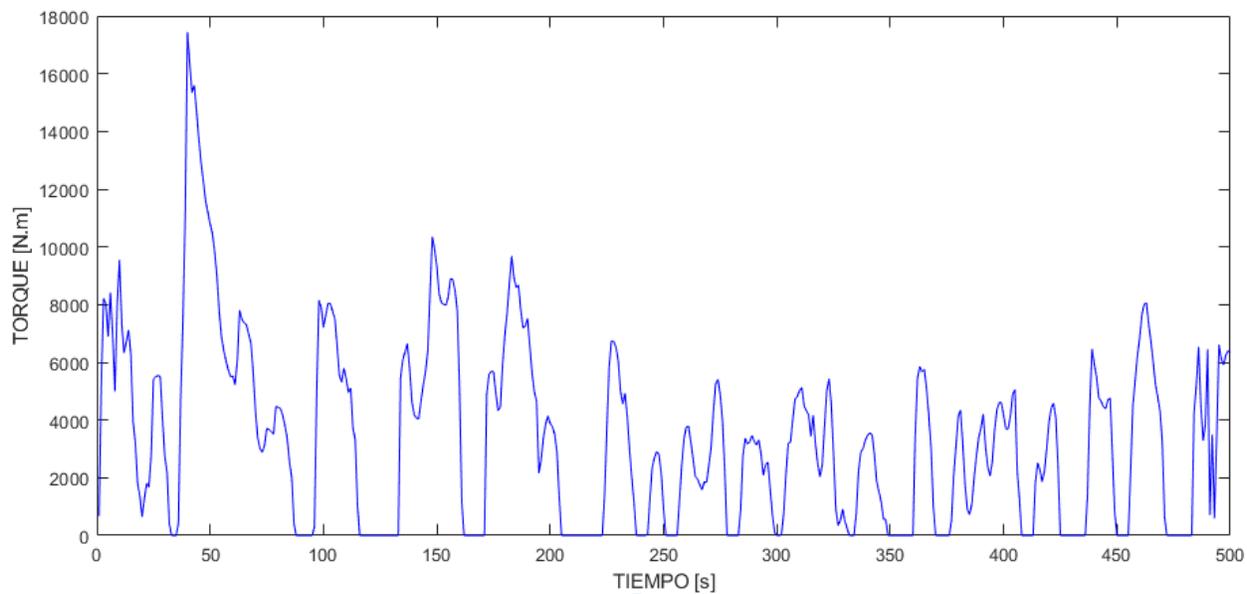


Figura 39: Extracto de torque en rueda de Línea 14

Fuente: Autores

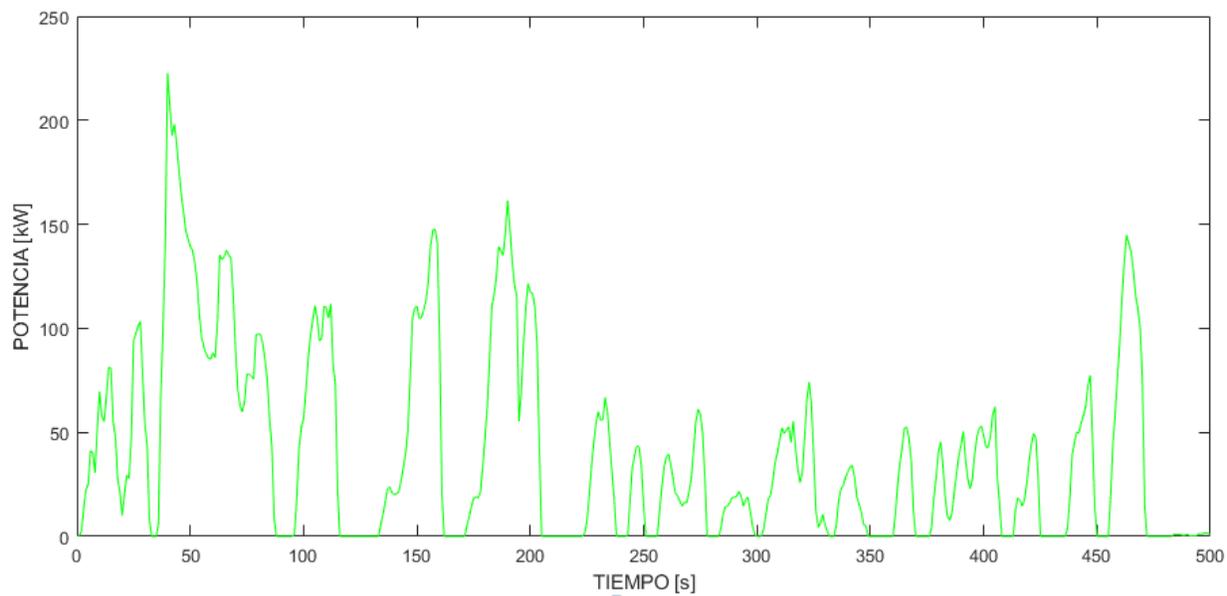


Figura 40: Extracto de potencia en rueda de Línea 14

Fuente: Autores

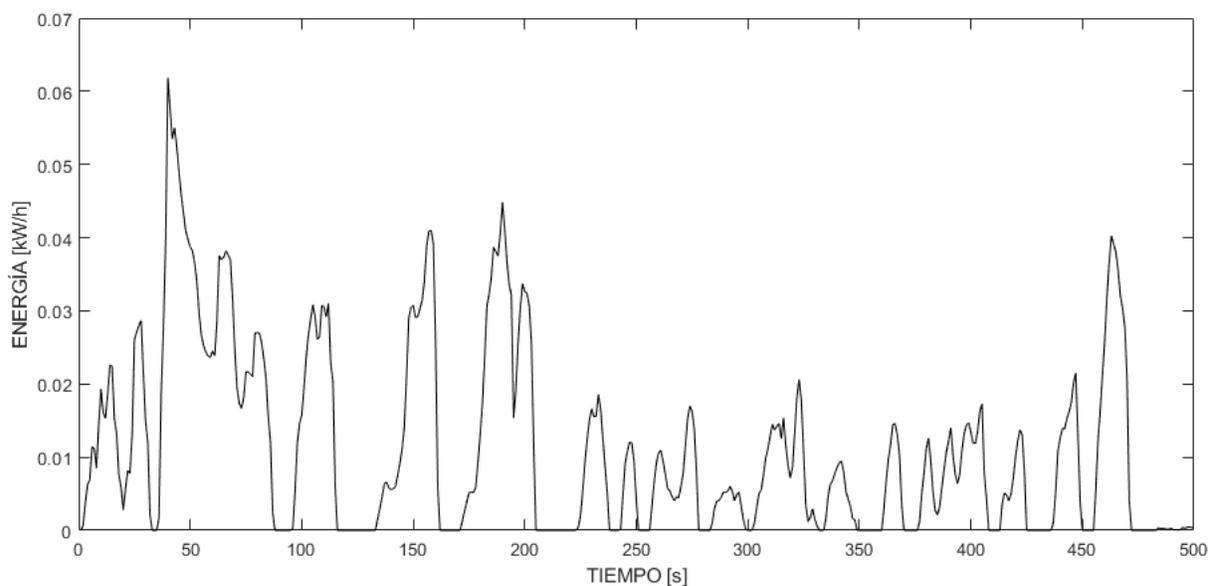


Figura 41: Extracto de demanda energética en rueda de Línea 14

Fuente: Autores

3.1.3. CÁLCULO DE PRESTACIONES EN MOTOR

Para identificar los valores de los parámetros indicativos de torque y potencia que el motor ha entregado a lo largo de la ruta, es imprescindible conocer la información correspondiente a la transmisión, para de esta manera realizar la asignación de cada una de las marchas utilizadas en el transcurso de la ruta. Las relaciones de transmisión del vehículo utilizado, fueron tomadas de la ficha técnica publicada por el fabricante, mismas que se pueden observar en la Tabla 25.

Tabla 25: Relación de transmisión del bus analizado

Marcha o cambio	Relación de transmisión
1°	8,189
2°	5,340
3°	3,076
4°	1,936
5°	1,341
6°	1
Rev.	7,142
Relación del diferencial	4,625 / 37 a 8

Fuente: (MAVESA, 2020)

Además de las relaciones de transmisión es importante conocer el torque y la potencia máxima que otorga el motor del bus en estudio, con el fin de realizar un diagrama de cubrimiento de cada marcha que permita obtener la velocidad máxima de cada una de estas. Esto ayudará a que en función de la velocidad del ciclo de conducción se seleccione la marcha.

Los datos de potencia y torque máximo del motor se especifican en la Tabla 26 .

Tabla 26: Especificaciones de motor

Motor	Especificaciones
Marca/Modelo	HINO J08E UD
Potencia	247 Hp @ 2,500 Rpm
Torque máximo	75,4 Kgf·m @ 1,500 Rpm

Fuente: (MAVESA, 2020)

La Figura 42, presenta las curvas de potencia y torque correspondientes al motor antes mencionado.

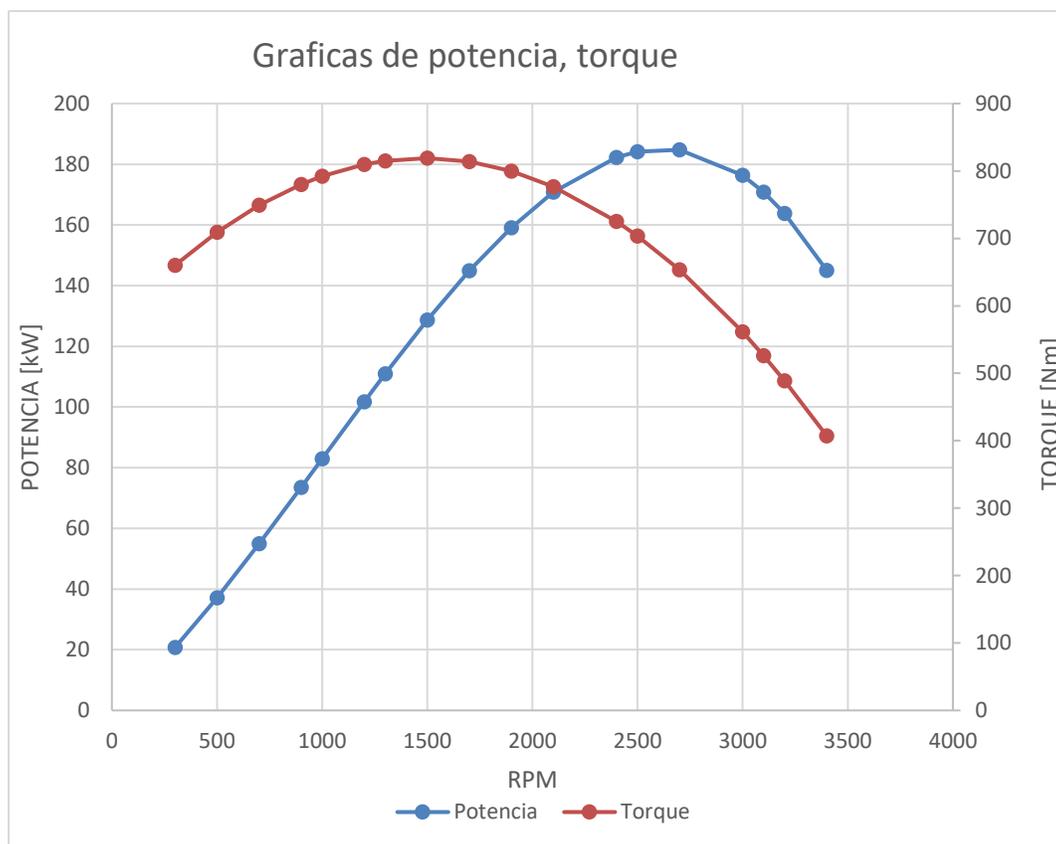


Figura 42: Curvas de potencia y torque motor

Fuente: Autores

Diagrama de cubrimiento se representa a través de una gráfica de la fuerza en rueda en función de las revoluciones del motor (rpm), dichos datos se obtienen mediante las siguientes ecuaciones.

Velocidad de cada marcha [km/h]:

$$V_{marcha} = \frac{\omega_{motor} \cdot 2\pi \cdot r_d \cdot 3,6}{N_{td} \cdot 60}$$

Donde:

ω_{motor} = Revoluciones por minuto del motor [Rpm]

r_d = Radio dinámico [m]

N_{td} = Relación de transmisión total

Cálculo de la fuerza tractora (F_x):

$$F_x = \frac{T_{motor} \cdot N_{td}}{r_d}$$

Donde:

T_{motor} = Torque del motor [Nm]

r_d = Radio dinámico [m]

N_{td} = Relación de transmisión total

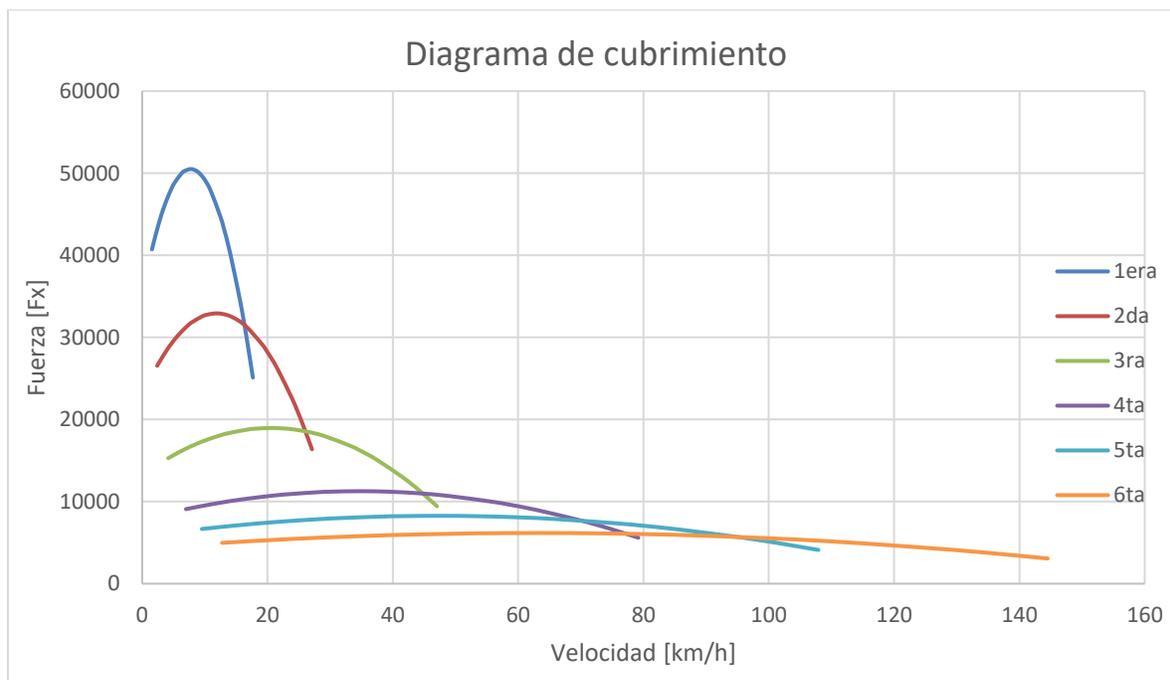


Figura 43: Diagrama de cubrimiento de motor diésel

Fuente: Autores

Una vez obtenidas las velocidades máximas de cada marcha, se realiza el algoritmo que selecciona la marcha en función de la velocidad y calcula las prestaciones del motor en cada punto mediante las siguientes formulas.

$$T_{motor} = \frac{T_{rueda}}{R_t * n_t}$$

Ecuación 8: Torque motor

Donde:

T_{motor} = Torque del motor [Nm]

T_{rueda} = Torque en rueda en [Nm]

R_t = Relación total de la marcha

n_t = Rendimiento de la transmisión

$$P_{motor} = \frac{P_{rueda}}{n_t}$$

Ecuación 9: Potencia motor

Donde:

P_{motor} = Potencia del motor [kW]

P_{rueda} = Potencia en rueda [kW]

n_t = Rendimiento de la transmisión

A continuación, se muestra un extracto del código que realiza esta función:

```

79 - for t=1:length(tiempo(:,1))
80 -
81 -     if V(t,1)<=v1
82 -         RT1=R1*Rd;
83 -         Rt(t,1)=RT1;
84 -         rpm(t,1)=(V(t,1)*2500)/v1;
85 -         Tmotor(t,1)= Tr(t,1)/(RT1*nt);
86 -         Pmotor(t,1)= Pr(t,1)/nt;
87 -     else
88 -         if V(t,1)<=v2
89 -             RT2=R2*Rd;
90 -             Rt(t,1)=RT2;
91 -             rpm(t,1)=(V(t,1)*2500)/v2;
92 -             Tmotor(t,1)= Tr(t,1)/(RT2*nt);
93 -             Pmotor(t,1)= Pr(t,1)/nt;
94 -         else
95 -             if V(t,1)<=v3
96 -                 RT3=R3*Rd;
97 -                 Rt(t,1)=RT3;
98 -                 rpm(t,1)=(V(t,1)*2500)/v3;
99 -                 Tmotor(t,1)= Tr(t,1)/(RT3*nt);
100 -                 Pmotor(t,1)= Pr(t,1)/nt;

```

Figura 44: Extracto de línea de código para la obtención de las prestaciones del motor

Fuente: Autores

Una vez calculadas las prestaciones del motor se grafica cada uno de los valores en función de las RPM, además se tiene como referencia la curva empírica de potencia y torque, que es de ayuda para un posterior análisis de las prestaciones necesarias en un bus eléctrico. En las Figuras 45 y 46 se muestra la gráfica de potencia y torque en motor para la Línea 14, en un escenario de máxima carga, ya que es la de mayor exigencia en cuanto a pendiente y longitud de recorrido.

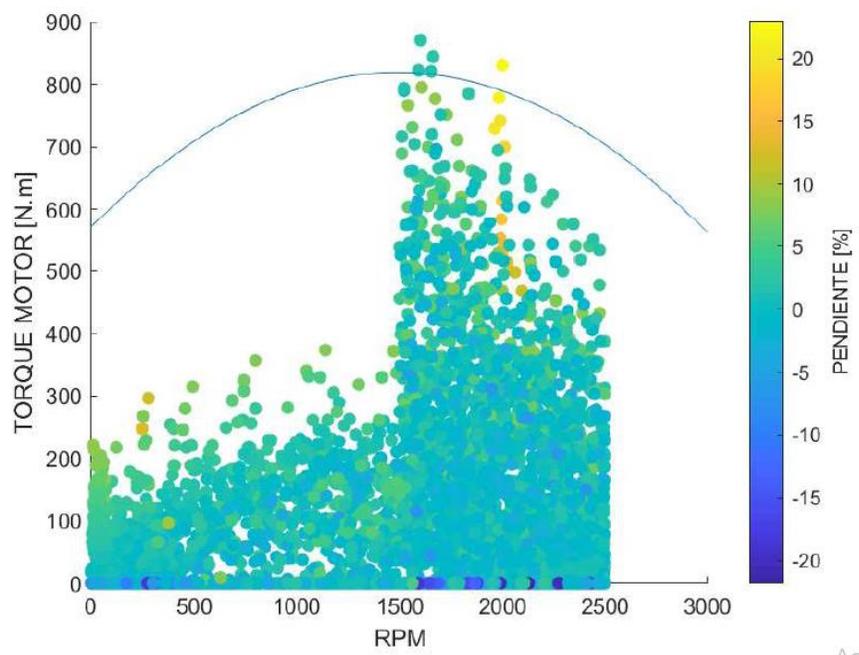


Figura 45: Distribución de torque requerido en motor de Línea 14

Fuente: Autores

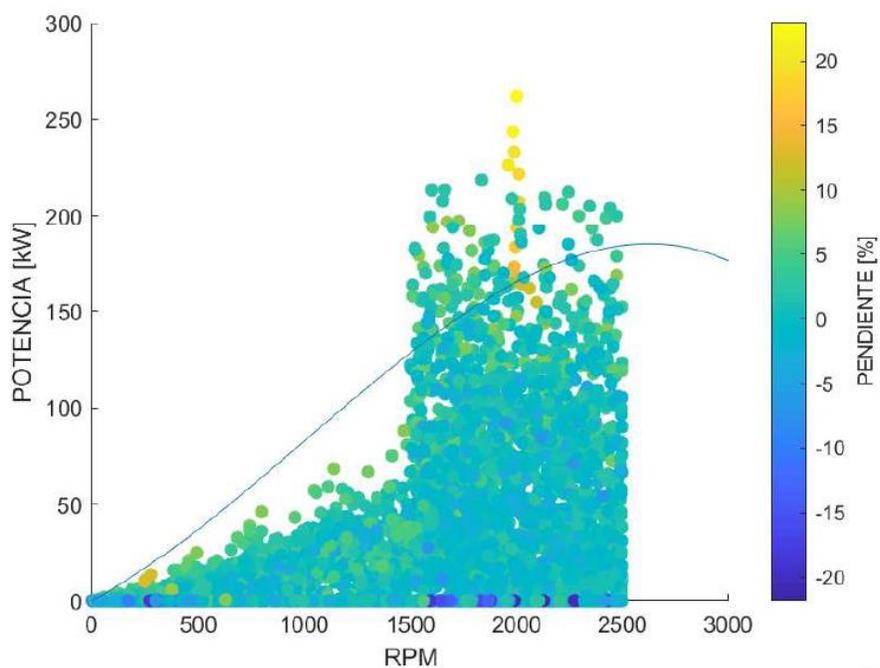


Figura 46: Distribución de potencia requerida en motor de Línea 14

Fuente: Autores

En las imágenes anteriores se muestra la potencia y torque a lo largo del recorrido de la línea con mayor pendiente, 97% de los puntos se encuentran por debajo de la curva empírica tanto de la potencia como del torque, por lo que el modelo para determinar las prestaciones del motor tiene un error del 3%.

CAPITULO IV

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

Este capítulo presenta una descripción y análisis de los resultados obtenidos del algoritmo de la demanda energética, tanto para el bus usado como para un bus eléctrico presente en el mercado ecuatoriano.

4.1. ANÁLISIS DEL BUS DE COMBUSTION INTERNA

Este apartado analiza los resultados obtenidos y los contrasta para un bus eléctrico, considerando que este tenga las mismas características tanto en área frontal, peso en vacío, capacidad de pasajeros y el radio dinámico del neumático.

4.1.1. ANÁLISIS DE TORQUE

Según los resultados mostrados en el capítulo III, el torque máximo, considerando un escenario de máxima carga tiene valores de entre 10 570 [Nm] y 17 444 [Nm], siendo el mayor valor el presentado en la línea 14, debido a que presenta pendientes de hasta el 23%.

Conforme a la ficha técnica del vehículo usado para el análisis, el torque máximo es de 742 [Nm] y considerando las relaciones totales de la primera marcha (37.87) y segunda marcha (24.69) como límites y, además, un coeficiente de rendimiento de la transmisión de 0.85 se obtiene el torque del motor para una gama de relaciones de transmisión como muestra la Tabla 27:

Tabla 27: Torque en cada relación de transmisión

Torque máximo	17444	Rendimiento
Relaciones de transmisión	Torque Motor [Nm]	0,85
37,87	541,92	
35	586,35	
33	621,89	
31	662,01	
29	707,67	
28	732,94	
27	760,09	
24,69	831,20	

Fuente: Autores

De acuerdo a los datos de torque motor obtenidos, el motor del vehículo usado puede satisfacer el requerimiento del torque máximo siempre y cuando tenga una relación total de marcha mayor a 28:1. Un bus eléctrico con un motor de 700 Nm necesitaría una relación mayor a 29:1 para satisfacer los requerimientos de la ruta en un escenario de máxima carga.

4.1.2. ANÁLISIS DE LA POTENCIA

En cuanto a la potencia los valores rondan entre 163 [kW] a 223 [kW], de igual manera el valor máximo se da en el punto de mayor pendiente de la línea 14. Este valor sobrepasa la potencia máxima del motor del vehículo usado, esto sucede debido a que, el recorrido en este punto se da generalmente con una cantidad de pasajeros menor a la mitad de la capacidad del bus, por lo que en este escenario las velocidades son mucho mayores a lo que sería con la capacidad máxima de pasajeros.

4.1.3. DEMANDA ENERGETICA

La demanda de energía sirve de base para la selección de la capacidad de las baterías, en este caso la demanda en un viaje ida y vuelta, considerando un escenario de carga máxima de pasajeros, esta entre 22 [kWh] y 37 [kWh]. Debido a factores como: la agresividad de conducción del controlador del bus que altera el consumo de energía ($\pm 20\%$) (Merchán, 2018), y otras circunstancias que pueda alterar el recorrido normal se toma como factor de seguridad un 50% adicional al valor de la demanda energética, ya con este valor y considerando que cada uno realiza seis viajes diarios se obtiene la demanda total diaria.

Tabla 28: Demanda energética requerida en una jornada laboral

	Línea 4			Línea 13			Línea 14		
	V	Mc	F	V	Mc	F	V	Mc	F
Demanda energética [KWh]	14	18	22	17	22	26	24	30	37
Energía requerida [kWh]	21	27	33	25,5	33	39	36	45	55,5

Fuente: Autores

El valor máximo de la demanda diaria varía entre 198 a 333 [kWh], esto implica que, para cumplir una jornada laboral completa en un bus eléctrico sin necesidad de recargar la batería, se necesitaría que el mismo tenga una batería de esta capacidad. Esto se deduce sin tomar en cuenta la recuperación de las baterías y el sistema de freno regenerativo que implementan algunos vehículos eléctricos.

4.2. ANÁLISIS DEL BUS ELÉCTRICO

En este caso se usan los datos de un bus eléctrico con dimensiones similares al bus de combustión y con la misma capacidad de pasajeros. En lo que difieren estos vehículos es en que, el bus eléctrico debido a las baterías que usa para la alimentación del motor, generalmente de litio-hierro-fosfato, tiene un peso en vacío que casi corresponde al peso con capacidad máxima de pasajeros en el bus de combustión.

En Tabla 29 se describe las características generales del bus eléctrico de la marca BYD, modelo K9G, mismo que está homologado y disponible para la comercialización en el país. Con estos datos se realizan las simulaciones con los diferentes escenarios de carga en las líneas seleccionadas en el Capítulo 2.

Tabla 29: Características técnicas de buses eléctricos disponibles en el mercado mundial

Marca		BYD	YUTONG
Característica	Modelo	K9	E12
	Largo [m]	12000	12170
	Ancho [m]	2550	2550
	Alto [m]	3210	3300
	N° pasajeros	70	70
Parámetros	Masa en vacío [kg]	13100	13000
	Rd [m]	0,52	0.51
Motor	Tipo	Inducción	Double
	Potencia [kW]	300	500
	Torque [Nm]	1100	2400
Baterías	Tipo de batería	Litio-Hierro-Fosfato	Litio-ferrosfario
	Energía [kWh]	324	374
	Autonomía [km]	250	320
Transmisión	Relación de transmisión	x	x
Fuente		(BYD, 2020)	(YUTONG, 2020)

En la Tabla 30 se muestran los valores máximos para el torque y potencia en rueda, además de la demanda de energía para cada una de las rutas y en los diferentes escenarios de carga.

Tabla 30: Torque, potencia y demanda energética en rueda requerida en un bus eléctrico

	Línea 4			Línea 13			Línea 14		
	V	Mc	F	V	Mc	F	V	Mc	F
Fuerza en rueda máxima [N]	18671	22151	25631	21247	25218	29189	30814	36558	42301
Torque en rueda máximo [Nm]	9746	11563	13380	11091	13164	15237	16085	19083	22081
Potencia en rueda máximo [kW]	150	178	206	151	179	207	205	244	282
Demanda energética [kWh]	20	24	27	24	28	33	34	40	46

Fuente: Autores

4.2.1. ANÁLISIS DE TORQUE

Según los resultados en la Tabla 30, el torque máximo considerando un escenario de máxima carga tiene valores de entre 13380 [Nm] y 22081 [Nm], siendo el mayor valor el presentado en la línea 14, debido a la mayor pendiente que presenta.

Conforme a la ficha técnica del vehículo en análisis, el torque máximo es de 1100 [Nm] y considerando un coeficiente de rendimiento de la transmisión de 0.85 se obtiene la relación de transmisión necesaria para satisfacer los requerimientos de máxima carga en cada una de las rutas.

Tabla 31: Resumen de torques y relación de transmisión

	Línea 4	Línea 13	Línea 14
Torque motor [Nm]	1100	1100	1100
Torque en ruta[Nm]	13380	15237	22081
Rendimiento	0,85	0,85	0,85
Relación de transmisión total	14,31	16,30	23,62

Fuente: Autores

4.2.2. ANÁLISIS DE LA POTENCIA

En cuanto a la potencia los valores rondan entre 206 [kW] a 282 [kW], de igual manera el valor máximo se da en el punto de mayor pendiente de la línea 14. Este valor está por debajo de la potencia máxima del motor del vehículo usado, ya que según lo que se especifica el motor del bus tiene una potencia de 300 [kW], por consecuencia se deduce que el bus indicado satisface los requerimientos de potencia en todas las rutas.

4.2.3. DEMANDA ENERGÉTICA

La demanda en un viaje ida y vuelta, considerando un escenario de carga máxima de pasajeros, tiene un valor de entre 27 [kWh] y 46 [kWh], y considerando que cada uno realiza 6 viajes diarios se obtiene la demanda total diaria como muestra la Tabla 32:

Tabla 32: Demanda energética requerida para una jornada laboral

	Línea 4			Línea 13			Línea 14		
	V	Mc	F	V	Mc	F	V	Mc	F
Demanda energética [kWh]	20	24	27	24	28	33	34	40	46
Nro. de viajes	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Energía requerida diaria [kWh]	120	144	162	144	168	198	204	240	276

Fuente: Autores

Debido a factores como: la agresividad de conducción del controlador del bus ($\pm 20\%$) (Merchán, 2018), la eficiencia del motor eléctrico que ronda entre el 85 a 90% (pérdida del 10-15%), el uso equipos periféricos (10%) (Armijos & Gómez, 2018) y otras circunstancias que pueda alterar el recorrido normal se toma como factor de seguridad un 50% adicional al valor de la demanda energética, ya con este valor se obtiene la demanda total diaria.

Tabla 33: Demanda energética requerida para una jornada laboral + 50% factor de seguridad

	Línea 4			Línea 13			Línea 14		
	V	Mc	F	V	Mc	F	V	Mc	F
Demanda energética [kWh]	20	24	27	24	28	33	34	40	46
Energía requerida [kWh]	30	36	40.5	36	42	49.5	51	60	69
Nro. de viajes	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Energía requerida diaria [kWh]	180	216	243	216	252	297	306	360	414

Fuente: Autores

Comparando los valores de la Tabla 32 y la Tabla 33 y tomando en cuenta que la capacidad de la batería es de 324 [kWh] se considera que se puede cumplir de forma interrumpida con una jornada laboral completa en todas las rutas a excepción de la línea 14. En el caso de la demanda energética en la línea 14 y con el 50% adicional no cumpliría con la jornada laboral sin necesidad de recargar la batería, sin embargo, se debe considerar que sin el 50% adicional la batería satisface la demanda energética, además que este valor está sobredimensionado debido a que considera un recorrido total con una capacidad máxima de pasajeros, lo que no es el comportamiento real de carga durante el recorrido.

CONCLUSIONES

Mediante la presente investigación se pudo conocer los fundamentos teóricos necesarios para la obtención de la demanda de energía para cualquier tipo de vehículo y en especial del tipo bus, además del método de obtención de cada uno de los factores del vehículo y de la ruta, que influyen en la demanda de energía.

Por medio de los documentos suministrados por el Departamento de Movilidad de la ciudad de Riobamba, se conoció las características de cada una de las rutas, identificando a la línea 14, como la de mayor pendiente con un 23%, además que es una de las rutas con mayor distancia de recorrido con 29.65 km, a las líneas 4 y 13 que son las de menor pendiente (8.6%) y las de mayor demanda de pasajeros. Además, dichos documentos sirvieron para identificar el vehículo con mayor población dentro del sistema de transporte dando como resultado el modelo AK-8JRSA de la marca HINO con un 73% del total de la flota vehicular.

Para la construcción de los ciclos de conducción experimentales de las líneas seleccionadas, se utilizó en método directo, permitiendo visualizar el comportamiento real de manejo de parte de los conductores de las unidades al momento de enfrentar al tráfico de la ciudad. Cabe recalcar que el dispositivo GPS, recopiló parámetros de posición, altitud, distancia, tiempo, velocidad y pendiente con una frecuencia de 1 Hz.

Debido a la gran cantidad de datos fue de vital importancia el uso del software Matlab, ya que permitió establecer un modelo en el que se pueden ingresar las variables de dinámica vehicular y

la información de cualquier ciclo de conducción, lo que hace posible que este modelo calcule la demanda de energía para cualquier tipo de vehículo.

De acuerdo a los resultados del Capítulo IV, el bus eléctrico en análisis cumpliría sin problema un recorrido en todas las rutas a excepción de la línea 14, ya que, estas no tienen una variación significativa en cuanto a pendiente, con respecto a las líneas 4 y 13, por lo que el bus eléctrico cubriría con los requerimientos de potencia sin problema, en cuanto al torque el bus cubre los requerimientos siempre y cuando se tenga relaciones de transmisión mayores a las expuestas en la Tabla 31.

Analizando la demanda energética en la línea 14, con un escenario de máxima carga durante toda la ruta y considerando que es la Línea con mayor pendiente y una de las de mayor recorrido, además el factor de seguridad, se concluye que las baterías implementadas en el bus eléctrico analizado no satisfacen una jornada laboral completa sin necesidad de recarga.

RECOMENDACIONES

Los resultados obtenidos se consideran en base a un estudio teórico, sin embargo, se podría evaluar los resultados obtenidos mediante el uso de un vehículo eléctrico, con la finalidad de calibrar el algoritmo, validar el modelo y los valores obtenidos en este estudio mediante pruebas en carretera.

La demanda energética que presenta el transporte público mediante el uso de vehículos eléctricos es significativa y de acuerdo a los resultados obtenidos en esta investigación se demuestra esta afirmación, es por ello que se recomienda estimar y analizar la demanda energética en la red eléctrica de la ciudad de Riobamba, al implementar buses urbanos 100% eléctricos.

Al evaluar el funcionamiento de los buses eléctricos serían significativas las ventajas frente al uso vehículos de combustibles fósiles, sin embargo, se deberá considerar el impacto económico generado por el cambio de unidades, ya que se deberá evaluar el costo de inversión inicial y costos operativos, por lo cual se recomienda desarrollar un estudio de factibilidad previo a la implementación de buses 100% eléctricos al sistema de transporte urbano de la ciudad de Riobamba.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aparicio, F., Vera, C., & Díaz, V. (1995). *Teoría de los vehículos automóviles*. Madrid: Sección de Publicaciones de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad Politécnica de Madrid.
- Armijos, L., & Gómez, W. (2018). *Análisis de consumo energético del vehículo eléctrico Kia Soul por la utilización del sistema de calefacción y audio en la ciudad de Cuenca*. Universidad Politécnica Salesiana.
- Astudillo, R. F. (2016). *Obtención de ciclos de conducción para la flota de buses urbanos del cantón Cuenca*. Universidad del Azuay.
- Barlow, T., Latham, S., McCrae, I., & Boulter, P. (2009). *A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions*.
- BYD. (2020). *Bus Eléctrico K9G*. Obtenido de: <https://bydelectrico.com/ec/portfolio/bus-electrico-k9g/>
- Cepeda, P. (2020). *Carrocerías Patricio Cepeda. Bus Urbano*. Obtenido de: <http://patriciocepeda.com/bus-urbano/>
- CONAE. (s. f.). *Manual de información técnica de neumáticos*. México, D.F.

Diccionario MotorGiga. (2019). *Dinámica del vehículo*. Obtenido de: <https://diccionario.motorgiga.com/diccionario/dinamica-del-vehiculo-definicion-significado/gmx-niv15-con193863.htm>

Domínguez, E. J., & Ferrer, J. (2012). *Sistema de transmisión y frenado*. Editex.

GARMIN. (2021). *GPSMAP® 64*. Obtenido de: <https://buy.garmin.com/es-ES/ES/p/140022>

Giacosa, D. (1970). *Motores endotérmicos* (Tercera edición). Barcelona, España: Editorial Científico Medica.

Gómez de las Heras, B. P. (2011). *Desarrollo de una metodología para generación de ciclos de conducción representativos del tráfico real urbano. Aplicación para medida de emisiones en banco de rodillos*. Universidad Politécnica de Madrid.

Guayanlema, V. M. (2013). *Inventario nacional de emisiones de gases de efecto invernadero en el sector transporte al 2012*. Universidad Central del Ecuador.

INEN 1668. (2015). *Vehículos de transporte público de pasajeros intrarregional, interprovincial e intraprovincial. Requisitos*. Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito, Ecuador.

INEN 2205. (2010). *Vehículos Automotores. Bus Urbano. Requisitos*. Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito, Ecuador.

INEN 2656. (2016). *Clasificación vehicular*. Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito, Ecuador.

- Instituto de investigación Geológico y Energético (IIGE). (2018). *Balance Energético Nacional*.
- Jara, W. X., & Pineda, J. C. (2019). *Determinación de la demanda energética de vehículos motorizados ciclo Otto pertenecientes a la subcategoría M1, para el servicio de taxi en la ciudad de Cuenca*. Universidad Politécnica Salesiana.
- MAVESA. (2020). *MODELO: AK BUS - AK8JRSA*. <https://grupomavesa.com.ec/grupomavesa-marcas-pesados-hino-seriebus-ak8jrja/>
- Merchán, J. (2018). *Estudio del Rendimiento Energético de un Vehículo Eléctrico en la Ciudad de Cuenca*. Universidad de Cuenca.
- Miles, J., & Potter, S. (2014). Developing a viable electric bus service: The Milton Keynes demonstration project. *Research in Transportation Economics*, 48, 357-363. <https://doi.org/10.1016/j.retrec.2014.09.063>
- Osses, M., & Rojas, D. (2003). *Determinación Experimental de Ciclos de Conducción de Vehículos Livianos para la ciudad de Santiago*. Universidad de Chile.
- Pacheco, M. (2019). *Los buses que se adquieran desde el 2025 deberán ser eléctricos*. El Comercio. Obtenido de: <https://www.elcomercio.com/actualidad/buses-electricos-transporte-ley-combustible.html?fbclid=IwAR1y7-y5wP3uXd4gs-mQZDcz6xpWmtwshWIR58iFNXGNJ3pm92VOWjbesYA>
- Plan de Desarrollo Ordenamiento Territorial 2015-2019*. (2015). Municipio de Riobamba.

Plan Movilidad Informe FASE II (p. 350). (2019). Municipio de Riobamba.

Restrepo, A., Carranza, Y., & Tibaquira, J. (2007). Design and application of methodology to determine vehicular conduction cycles in Pereira city. *Scientia et Technica Año XIII*, 6.

RTE INEN 034. (2016). *Elementos mínimos de seguridad en vehículos automotores*. Instituto Ecuatoriano de Normalización, Quito, Ecuador.

Schneider, A. (2019). *GPS Visualizer*. Obtenido de: <https://www.gpsvisualizer.com/>

Strava. (2021). *Combining Strava GPS (TCX|GPX|FIT) files, exporting GPX files from Garmin Connect, and adding time stamps to GPX files—GOTOES free utilities*. Obtenido de: <https://gotos.org/gotos/strava/>

Tiupul, P., & Arévalo, M. (2019). *Anuario climatológico*. Escuela Superior Politécnica de Chimborazo. Obtenido de: <https://www.esPOCH.edu.ec/index.php/estaci%C3%B3n-meteorol%C3%B3gica.html>

Vélez, S. C., & Vera, A. V. (2016). *Obtención de los parámetros necesarios para el cálculo de la fuerza en rueda de vehículos eléctricos*. Universidad del Azuay.

YUTONG. (2020). *Ficha técnica unidad Yutong estilo bus eléctrico E12*.

Zhou, B., Wu, Y., Zhou, B., Wang, R., Ke, W., Zhang, S., & Hao, J. (2016). Real-world performance of battery electric buses and their life-cycle benefits with respect to energy consumption and carbon dioxide emissions. *Energy*, 96, 603-613.
<https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.041>

Zumba, W. M. (2017). *Evaluación de la demanda energética de buses con motores de combustión interna, en rutas reales; para implementar buses eléctricos*. Universidad del Azuay.