

## Universidad del Azuay

## Departamento de Posgrados

"Evaluación de la demanda energética de buses con motores de combustión interna, en rutas reales; para implementar buses eléctricos"

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

Magíster en Sistemas Vehiculares

Autor: Ing. Wilson Manolo Zumba Álvarez Director: Dr. Daniel Guillermo Cordero Moreno

Cuenca – Ecuador

2017

#### **DEDICATORIA**

Este proyecto le dedico de manera muy especial a mi querida esposa Janneth, por su gran apoyo y su paciencia durante todo este tiempo dedicado al proyecto, ya que sin su empuje no hubiera logrado este objetivo tan importante en mi vida, de igual manera a mis padres Mariana y Manuel por haber guiado mis pasos y ser un ejemplo, a mis hermanos Juan y Jessica, a mis suegros y a toda mi familia que me ha dado una palabra de aliento para seguir siempre adelante.

#### AGRADECIMIENTO

Agradezco primeramente a Dios por permitirme cumplir este proyecto y de manera especial a mi director y amigo Daniel Cordero por compartir todos sus conocimientos y haber guiado en todo momento este trabajo.

## CONTENIDO

CAPIT	TULO 1	۱ 1	5
INTRO	ODUC	CIÓN1	5
1.1	Ante	ecedentes1	5
1.2	Prob	lemática	6
1.3	Justi	ficación del proyecto1	7
1.4	Mar	co teórico1	7
1.5	Esta	do del arte2	1
1.6	Obje	etivos de la investigación	2
1.	.6.1	Objetivo general	2
1.	.6.2	Objetivos específicos	2
1.7	Alca	nce y contribuciones	2
1.8	Preg	unta de investigación	2
CAPIT	TULO 2	2	3
DEMA	ANDA	ENERGÉTICA DE LOS AUTOBUSES URBANOS ACTUALES EN	N
TRES	RUTA	S	3
2.1	Intro	oducción	3
2.2	Obte	ención de los parámetros de los buses actuales	3
2.	.2.1	Parámetros del vehículo	3
	2.2.1.	1 Masa del vehículo	4
	2.2.1.2	2 Radio dinámico	4
2.	.2.2	Parámetros ambientales	5
	2.2.2.	1 Densidad del aire	5
	2.2.2.2	2 Gravedad 2	5
2.	.2.3	Parámetros de operación del vehículo 2.	5
	2.2.3.	1 Ciclo de conducción y perfil de altitud - línea 5	6
	2.2.3.2	2 Ciclo de conducción y perfil de altitud - línea 7 2	7
	2.2.3.	3 Ciclo de conducción y perfil de altitud - línea 100 24	9
2.3	Elab	oración del modelo para la obtención de la demanda energética	1
2.	.3.1	Potencia y torque necesarios	7

CAPITULO 3
OFERTA GLOBAL DE BUSES ELÉCTRICOS 42
3.1 Introducción
3.2 Buses eléctricos a nivel mundial
3.3 Componentes principales de un bus eléctrico
3.3.1 Carrocería
3.3.2 Tren de potencia
3.3.2.1 Motores eléctricos, convertidor electrónico de potencia y transmisiones
3.3.3 Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica
3.3.3.1 Baterías
3.3.3.1.1 Baterías de níquel51
3.3.3.1.2 Baterías ion-litio51
3.3.3.2Tendencias tecnológicas de las baterías
3.3.4Infraestructura de carga53
3.3.4.1 Carga conductiva (plug-in)
3.3.4.2 Carga inductiva o sin contacto
3.3.4.3Carga de oportunidad
3.4 Norma técnica ecuatoriana (NTE) INEN 2205 y 1668
CAPÍTULO 4
MODELO PARA LA EVALUACIÓN DEL TREN DE POTENCIA DE ACUERDO AL CICLO DE TRABAJO
4.1 Introducción
4.2 Obtención de los parámetros de los buses eléctricos
4.2.1 Parámetros del vehículo
4.2.2 Parámetros ambientales
4.2.3 Parámetros de operación
4.2.4 Parámetros del motor eléctrico
4.2.5 Parámetros de la transmisión y diferencial
4.3 Elaboración del modelo
CAPITULO 5
EVALUACIÓN DE LAS DISTINTAS CONFIGURACIONES DE BUSES ELÉCTRICOS, EN LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LAS TRES RUTAS 

5.1 Introducción
5.2 Análisis estadístico para cada ruta seleccionada70
5.2.1 Escenario 1
5.2.1.1 Obtención de la fuerza, potencia, torque y demanda energética 72
5.2.1.2 Potencia y torque máximos en ruta
5.2.2 Escenario 2
5.2.2.1 Obtención de la fuerza, potencia, torque y demanda energética 75
5.2.2.2 Potencia del motor vs potencia en ruta
5.2.3 Prueba de arrancabilidad en pendiente
5.2.4 Prueba de aceleración en plano
CAPITULO 6
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES 80
6.1 Conclusiones
6.2 Trabajos futuros
ANEXOS
7.1 Parámetros de buses eléctricos según fichas técnicas
7.2 Parámetros de los buses eléctricos según la literatura revisada
BIBLIOGRAFÍA

## Índice de figuras

Figura 1. Consorcios encargados de la operación del transporte público en la ciudad de Cuenca
Figura 2 Parámetros técnicos y económicos para implementar buses eléctricos 17
Figura 3 Esquema para la obtención de la demanda energética en un vehículo 19
Figura 4. Ciclo de conducción y perfil de altitud
Figura 5. Nomenclatura de un neumático
Figura 6. Ruta correspondiente a línea 5
Figura 7. Ciclo de conducción correspondiente a la línea 5
Figura 8. Perfil de altitud correspondiente a la línea 5
Figura 9 Perfil de pendientes correspondiente a la línea 5
Figura 10. Ruta correspondiente a la línea 7
Figura 11. Ciclo de conducción correspondiente a la línea 7
Figura 12. Perfil de altitud correspondiente a la línea 7
Figura 13 Perfil de pendientes correspondiente a la línea 7 29
Figura 14. Ruta correspondiente a la Troncal 100
Figura 15. Ciclo de conducción correspondiente a la Troncal 100 30
Figura 16. Perfil de altitud correspondiente a la Troncal 100 30
Figura 17 Perfil de pendientes correspondiente a la línea 100 31
Figura 18 Diagrama de bloques para la evaluación de la demanda energética en rueda32
Figura 19 Diagrama interno del bloque denominado "ciclo de conducción" 33
Figura 20 Diagrama interno del bloque denominado "perfil de altitud" 34
Figura 21 Diagrama interno del bloque denominado "diagrama de fuerzas"
Figura 22 Diagrama interno del bloque denominado "demanda energética" 35
Figura 23 Valores máximos de fuerza, torque y potencia en rueda 36
Figura 24 Curva de torque y potencia del motor de buses diésel actuales
Figura 25 Diagrama de cubrimiento del motor de buses diésel actuales
Figura 26 Diagrama interno del bloque denominado " caja de cambios y diferencial"
Figura 27 Diagrama interno del bloque denominado "diagrama de torque y potencia"
Figura 28 Diagrama de bloques para la evaluación del torque y potencia necesarios 40
Figura 29 Torque y potencia máximos en la ruta en los motores diésel actuales 41

Figura 30. Producción mundial de buses por región43
Figura 31. Mercado mundial de buses eléctricos por región
Figura 32. Mercado mundial de baterías ion-litio por fabricante
Figura 33. Tendencias de los precios de las baterías de ion-litio al año 2030 44
Figura 34. Componentes principales de un bus eléctrico de baterías
Figura 35. Tren de potencia de un bus eléctrico 46
Figura 36 Diferentes configuraciones de un tren de potencia para buses eléctricos 46
Figura 37 Clasificación de los motores eléctricos 47
Figura 38 Vista en sección de motores eléctricos a) motor de inducción b) motor de imanes permanentes c) motor de reluctancia
Figura 39 Tipos de controladores electrónicos, sistemas de almacenamiento de energía, convertidores electrónicos de potencia y motores eléctricos
Figura 40 Transmisiones utilizadas en buses eléctricos50
Figura 41. Configuración interna de una batería de ion-litio51
Figura 42. Generación de baterías para buses eléctricos al año 2030 53
Figura 43. Esquema de carga conductiva (plug-in)
Figura 44. Carga inductiva en un bus eléctrico 55
Figura 45 Carga de oportunidad conductiva en un bus eléctrico
Figura 46 Parámetros de un bus urbano según la NTE 1668 y 2205 59
Figura 47 Diagrama de torque y potencia motor eléctrico de 850Nm utilizado para la simulación de buses eléctricos
Figura 48 Valores de la curva de eficiencia para el motor eléctrico de 850Nm 65
Figura 49 Curva de eficiencia motor eléctrico de 850 Nm utilizado para la simulación de buses eléctricos
Figura 50 Diagrama de torque y potencia motor eléctrico 1500Nm utilizado para la simulación de buses eléctricos
Figura 51 Valores de la curva de eficiencia para el motor eléctrico de 1500Nm 66
Figura 52 Curva de eficiencia motor eléctrico de 1500 Nm utilizado para la simulación de buses eléctricos
Figura 53 Diagrama de cubrimiento motor de 850Nm utilizado para la simulación de buses eléctricos
Figura 54 Diagrama de cubrimiento motor de 1500Nm utilizado para la simulación de buses eléctricos
Figura 55 Diagrama interno del bloque denominado " torque y potencia del motor " del bus eléctrico

Figura 56 Diagrama de bloques para la evaluación de la demanda energética en buses eléctricos
Figura 57 Diagramas de torque, potencia y eficiencia utilizados en la simulación del bus eléctrico – Escenario 1
Figura 58 Potencia y torque máximos en la ruta motor de 850Nm – Escenario 1 73
Figura 59 Potencia y torque máximos en la ruta motor de 2100Nm – Escenario 1 73
Figura 60 Diagrama de torque, potencia y eficiencia utilizados en la simulación del bus eléctrico – Escenario 2
Figura 61 Potencia y torque máximos en la ruta motor de 1500Nm – Escenario 2 76
Figura 62 Potencia y torque máximos en la ruta motor de 2200Nm – Escenario 2 77
Figura 62 Simulación de la prueba de aceleración en pendiente – escenario 1 y escenario 2
Figura 63 Simulación de la prueba de aceleración en plano – escenario 1 y escenario 2
Figura 65 Ingreso del ciclo de conducción y perfil de altitud en el modelo de simulación
Figura 66 Ingreso de los parámetros del vehículo en el modelo de simulación 81
Figura 67 Ingreso de las relaciones de transmisión en el modelo de simulación 81

## Índice de tablas

Tabla 1. Parámetros que intervienen en el cálculo de la demanda energética18
Tabla 2. Ecuaciones utilizadas para el cálculo de la demanda energética       19
Tabla 3. Características del recorrido de los buses urbanos para las tres rutas con mayor      demanda de pasajeros      21
Tabla 4. Requerimientos de la batería para rutas en diferentes ciudades 21
Tabla 5. Marcas de buses que se comercializan a nivel mundial y su capacidad en la batería      22
Tabla 6. Masa del bus Mercedes Benz con tres escenarios de carga de pasajeros 24
Tabla 7. Características de los ciclos de conducción para la línea 5, línea 7 y troncal10031
Tabla 8. Parámetros utilizados para la simulación del bus Mercedez Benz 32
Tabla 9. Fuerza, torque, potencia y demanda energética en rueda para las tres líneas debuses
Tabla 10. Características de las baterías ion-litio, Ni-MH y Ni-Cd 52
Tabla 11. Modos de carga para buses eléctricos    54
Tabla 12. Ventajas y desventajas entre sistemas de carga conductivo e inductivo 56
Tabla 13. Parámetros que se describen en la ficha técnica de buses eléctricos 58
Tabla 14. Parámetros de los buses eléctricos que cumplen con la NTE INEN 1668-2205
Tabla 15. Características técnicas de buses eléctricos
Tabla 16. Parámetros utilizados para la simulación de buses eléctricos
Tabla 17. Caja de cambios y diferencial utilizados para la simulación de buses      eléctricos
Tabla 18. Parámetros utilizados para la simulación del modelo de bus eléctrico – Escenario 1
Tabla 19. Fuerza, torque, potencia y demanda energética para las tres líneas de buses- Escenario 172
Tabla 20. Parámetros utilizados para la simulación del modelo de bus eléctrico –Escenario 274
Tabla 21. Fuerza, torque, potencia y demanda energética para las tres líneas de buses –      Escenario 2      75
Tabla 22. Demanda y consumo energético – Escenario 1
Tabla 23 Demanda y consumo energético – Escenario 2

#### RESUMEN

Para la implementación de nuevos modelos de buses en cualquier ciudad, se debe evaluar si el comportamiento de éstos es similar o mejor que los buses actuales. En este trabajo se analiza la implementación de buses eléctricos en la ciudad de Cuenca a través de un modelo de simulación desarrollado en Matlab/Simulink, para ello, se estudiaron condiciones reales de operación, determinadas por ciclos de conducción y perfil de altitud previamente definidos, para las líneas con mayor demanda de pasajeros; considerando, los parámetros del vehículo, parámetros ambientales, parámetros de la transmisión y los parámetros del motor eléctrico. Posteriormente, aplicando las ecuaciones de la dinámica de vehículos se obtuvo la demanda y consumo energético, para finalmente evaluar el desempeño de dos configuraciones de buses eléctricos disponibles en el mercado.

Palabras clave: bus eléctrico, demanda energética vehicular, ciclo de conducción

#### ABSTRACT

For the implementation of new bus models in any city, it is necessary to evaluate if the behavior of the new model is similar or better than the current buses. This paper analyzes the implementation of electric buses in Cuenca through a simulation model developed in Matlab / Simulink software. To achieve this, real operating conditions were studied based on previously determined driving cycles and altitude profiles for bus lines with great demand for passengers. Vehicle, environmental, transmission and electric motor parameters were considered. Subsequently, by applying the equations of vehicle dynamics, the demand and energy consumption were obtained to finally evaluate the performance of two configurations of electric buses available in the market.

Keywords: Electric bus, vehicular energy demand, driving cycle.



Translated by: Ing. Paúl Arpi

### **CAPITULO 1**

## INTRODUCCIÓN

La mayor parte del transporte público actual funciona con combustibles provenientes del petróleo (diésel), esto genera emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), provocando el calentamiento global; es así que, para disminuir tales efectos se están implementando nuevas tecnologías energéticas dentro del transporte, entre éstas, buses eléctricos. Para realizar una evaluación de buses eléctricos se requiere definir parámetros técnicos y económicos, en esta investigación se consideran los parámetros técnicos que comprenden las características del vehículo y los parámetros del tren de potencia y posteriormente aplicando las ecuaciones de la dinámica de vehículos se obtiene la demanda energética en condiciones reales de operación.

#### **1.1 Antecedentes**

El transporte público, a nivel mundial, inicia en el año 1840 con la implementación de los autobuses a vapor (Seijo, 2006). A partir del año 1900, con el descubrimiento del petróleo, aparecen nuevos combustibles como la gasolina y el diésel, luego el biodiesel y el bioetanol, posteriormente aparecen los vehículos híbridos y finalmente, en los últimos diez años, existe un auge del transporte eléctrico y celdas de combustible (Maeso, González, & Pérez, 2012). Esta evolución de tecnologías es motivada por la disminución de los GEI a nivel mundial (Zhou et al., 2016).

En 1960, aparece el transporte público en la ciudad de Cuenca, con la conformación de la empresa "12 de abril" y en el año 2000, se crea la cámara de transporte de Cuenca (CTC). La CTC funciona hasta la actualidad y entre otras actividades, asignó la flota de buses urbanos en la ciudad a 475 unidades. Entre el 2009 y 2010 se conformó un sistema de caja común para las empresas de transporte público de la ciudad, denominado Sistema Integrado de Recaudo (SIR). El municipio de la ciudad de Cuenca opera el tránsito y transporte desde el año 2012; finalmente en el 2014 empieza la construcción del tranvía como un modelo sustentable en el desarrollo del transporte público (Ilustre Municipalidad de Cuenca, 2015).

Actualmente, la CTC, se divide en 2 consorcios:

El consorcio Concuenca, se encarga del servicio de transporte de pasajeros en 29 rutas disponibles, posee una flota de 475 buses urbanos distribuidas en 7 compañías; la frecuencia promedio del servicio es de 5 minutos (figura 1).

El consorcio SIR Cuenca, se encarga del recaudo de fondos del transporte público (Astudillo Bravo, 2016; Ilustre Municipalidad de Cuenca, 2015).





#### 1.2 Problemática

La mayor parte del transporte público a nivel mundial aún despende de combustibles provenientes del petróleo y en la ciudad de Cuenca la flota completa de buses utiliza esta tecnología; como consecuencia de esto, se generan emisiones de GEI, siendo las industrias, construcciones y el transporte las fuentes principales causantes de estas emisiones.

El transporte es el causante del 27% de estas emisiones a nivel mundial (International Energy Agency, 2014), mientras que, en el Ecuador provoca un 39% de GEI. Actualmente el consumo de la energía por combustibles fósiles como petróleo, carbón y gas natural supera el 80% (Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos, 2015). Según (Moreno, 2016), en el 2010 existía un vehículo por cada cien habitantes, para el 2050 se proyecta un vehículo por cada cuatro habitantes. Este aumento en la flota de vehículos aumenta la emisión de GEI, una de las opciones para disminuir este aumento es utilizar tecnologías alternativas (Zhou et al., 2016).

#### 1.3 Justificación del proyecto

Para disminuir los gases de efecto invernadero, se está implementando a nivel mundial nuevas tecnologías energéticas en el transporte; entre éstas, buses eléctricos de baterías (Lajunen, 2014; Zhou et al., 2016); motivo por el que se realiza esta investigación.

#### 1.4 Marco teórico

Para la implementación de buses eléctricos en cualquier ciudad, es preciso definir cuatro parámetros que son: los parámetros de costo inicial, parámetros del vehículo, parámetros del tren de potencia y costos de funcionamiento y mantenimiento que se describen en la figura 2. Sin embargo, para una evaluación energética se consideran aspectos técnicos que están definidos por los parámetros del vehículo y los parámetros del tren de potencia, dejando a un lado los parámetros de fabricación, funcionamiento y mantenimiento.



Figura 2. Parámetros técnicos y económicos para implementar buses eléctricos (Benz, Gürges, & Borufka, 2015)

Estos aspectos técnicos deben cumplir con los estándares locales. En el caso de Ecuador, es necesario que las unidades de buses cumplan con la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 2205, que describe los requisitos que debe cumplir el bus urbano de tal manera que proporcione un adecuado nivel de seguridad y comodidad al usuario (NTE INEN, 2010), esta norma además incluye pruebas de aceleración en plano y pendiente.

Además, se consideran los parámetros ambientales como la densidad del aire y la gravedad y los parámetros de operación del vehículo determinados por los ciclos de conducción y perfil de altitud.

Una vez definidos los parámetros descritos en la tabla 1, se aplican las ecuaciones de la dinámica de vehículos definidos en la tabla 2 y se calculan: la fuerza, el torque, la potencia y finalmente se obtiene la demanda energética en rueda (Cordero, 2015; Filippo, Marano, & Sioshansi, 2014; Göhlich, Kunith, & Ly, 2014; Suh, Chang, Han, & Chung, 2012).

Paámetros	Descripción	Nomenclatura
Vehículo	Área frontal del vehículo [m <sup>2</sup> ]	[A]
	Coeficiente de arrastre [-]	[cd]
	Coeficiente de resistencia a la rodadura [-]	[fr]
	Masa del vehículo [kg]	[M]
	Radio dinámico [m]	[rd]
Ambientales	Densidad del aire [kg/m <sup>3</sup> ]	$[\rho]$
	Gravedad [m/s <sup>2</sup> ]	[g]
Operación	Aceleración [m/s <sup>2</sup> ]	[a]
	Pendiente [radianes]	[ heta]
	Tiempo [s]	[t]
	Velocidad [km/h]	[V]

Tabla 1. Parámetros que intervienen en el cálculo de la demanda energética(Cordero, 2015)

Variable		Ecuación	Unidades
Fuerza de arrastre [Fd]	Ec. 1		[N]
		$F_d = \frac{1}{2} \cdot c_d \cdot \rho \cdot A \cdot V^2$	
Resistencia a la pendiente [Rg]	Ec. 2		[N]
		$R_g = M \cdot g \cdot \sin \theta$	
Resistencia a la rodadura [Rx]	Ec. 3		[N]
		$R_x = f_r \cdot M \cdot g \cdot \cos \theta$	
Resistencia a la inercia [Ri]	Ec. 4		[N]
		$R_i = M \cdot a$	
Fuerza en rueda [Fx]	Ec. 5		[N]
		$F_x = F_d + R_x + R_i + R_g$	
Torque en rueda [T]	Ec. 6		[Nm]
		$T = F_x \cdot r_d$	
Potencia en rueda [P]	Ec. 7		[kW]
		$P = F_x \cdot V$	
Demanda de energía [E]	Ec. 8		[kWh]
		$E = P \cdot \Delta_t$	

Tabla 2. Ecuaciones utilizadas para el cálculo de la demanda energética (Cordero, 2015)

Posteriormente, en la figura 3, se muestra que, para satisfacer dicha demanda energética en rueda, se debe considerar la transmisión y las características del motor, como curvas de torque, potencia y eficiencia. Finalmente, se determina la energía requerida. Estas ecuaciones se definen en el capítulo 2.



Figura 3. Esquema para la obtención de la demanda energética en un vehículo (Cordero, 2015)

Cabe mencionar que, un ciclo de conducción (figura 4) describe mediante una gráfica de velocidad y tiempo, la forma típica de manejo de un vehículo en una región específica. Los ciclos de conducción se utilizan para el diseño de automóviles, consumo energético y análisis de emisiones de gases contaminantes. Existen 2 tipos de ciclos de conducción, de tipo estacionario y transitorio, este último presenta un patrón de manejo real en el vehículo, mientras que el perfil de altitud describe el perfil topográfico de la carretera. (Cordero, 2015).



Figura 4. Ciclo de conducción y perfil de altitud (Astudillo Bravo, 2016)

Ésta evaluación energética considera rutas reales y en este trabajo se analizan tres rutas que corresponden a las de mayor demanda de pasajeros (tabla 3) (Ilustre Municipalidad de Cuenca, 2015). Para estas rutas, se determinaron en un trabajo previo los ciclos de conducción y perfil de altitud (Astudillo Bravo, 2016).

#### Tabla 3. Características del recorrido de los buses urbanos para las tres rutas con mayor demanda de pasajeros (Astudillo Bravo, 2016; Ilustre Municipalidad de Cuenca, 2015)

Líneas	5	7	Troncal 100
Ruta	Los andes-El salado-	Trigales-Mall del	Ricaurte-Baños-
	Los andes	río-Trigales	Ricaurte
Longitud [km]	27,96	40,54	38,67
N° Viajes diarios flota	160	196	196
N° Viajes diarios por bus	6	6	6
N° Viajes por año	58461	71394	92163
Velocidad promedio [km/h]	16,54	18,08	17,41
N° Pasajeros diarios	14415	17604	17658
N° Pasajeros-km	5,8	5	5,4
N° Paradas	74	101	98

#### 1.5 Estado del arte

Existen algunos estudios realizados sobre buses eléctricos a nivel mundial, entre estos, un estudio realizado en Inglaterra por (Miles & Potter, 2014) indica que la demanda energética de un bus eléctrico que realiza recorridos entre 200 a 300km diarios, puede variar entre 500 a 1000kWh (tabla 4). Esto depende de los parámetros del vehículo, el ciclo de conducción y el perfil de altitud.

En cuanto a la economía mencionan que un bus eléctrico puede ahorrar \$18600 al año; en cambio (Zhou et al., 2016) indica que los buses eléctricos pueden reducir un 85% el uso del petróleo mediante un análisis WTW (Well to Wheel) además, una disminución entre 19%-35% de CO<sub>2</sub>.

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

Tabla 4. Requerimientos de la batería para rutas en diferentes ciudades (Miles & Potter, 2014)

Actualmente, existen buses eléctricos que se comercializan a nivel mundial, cuya capacidad de la batería varía entre 53 a 548kWh (tabla 5), según el fabricante (Gao et al., 2017).

# Tabla 5. Marcas de buses que se comercializan a nivel mundial y su capacidad en la batería (Gao et al., 2017)

Marca	Capacidad de la batería [KWh]
Proterra	53-321
PRIMOVE	60-90
Hengtong	61-78
Dongfeng	104
Ankai	170
New Flyer	200-300
EBusco	242-311
BYD	324-548

#### 1.6 Objetivos de la investigación

Por lo tanto, para el desarrollo de esta investigación se ha planteado los siguientes objetivos.

#### 1.6.1 Objetivo general

 Determinar la configuración de un bus eléctrico, que satisfaga las condiciones de operación en 3 rutas de la ciudad de Cuenca.

#### 1.6.2 Objetivos específicos

- ✓ Determinar la demanda energética de los autobuses urbanos actuales en tres rutas de la ciudad de Cuenca.
- ✓ Elaborar una base de datos de distintas configuraciones de buses eléctricos.
- ✓ Elaborar un modelo para la evaluación energética del tren de potencia de acuerdo al ciclo de trabajo.
- Evaluar las distintas configuraciones de buses eléctricos, en las condiciones de operación de tres rutas en la ciudad de Cuenca

#### **1.7** Alcance y contribuciones

El alcance de la investigación es, evaluar la demanda energética en rueda de los buses actuales y elaborar un modelo de tren de potencia para evaluar la energía requerida en buses eléctricos.

#### 1.8 Pregunta de investigación

¿Qué modelo de bus eléctrico se podría implementar en la ciudad de Cuenca?

### **CAPITULO 2**

## DEMANDA ENERGÉTICA DE LOS AUTOBUSES URBANOS ACTUALES EN TRES RUTAS

#### 2.1 Introducción

El primer paso es evaluar la demanda energética en los buses actuales, para ello, en este capítulo, se definen los parámetros del vehículo correspondientes al modelo de bus más utilizado, los parámetros ambientales y los tres ciclos de conducción con su perfil de altitud obtenidos para la ciudad de Cuenca. Es importante destacar que algunos estudios realizados sobre buses eléctricos por (Erkkilä et al., 2013; Göhlich et al., 2014; Halmeaho, Rahkola, & Tammi, 2015; Kim, Song, & Choi, 2015; Laurikko et al., 2015; Suh et al., 2012) no consideran el perfil de altitud y el ciclo de conducción de la línea de bus; sin embargo, utilizan ciclos de conducción estandarizados. Este trabajo considera el perfil de altitud y los ciclos de conducción de cada ruta.

#### 2.2 Obtención de los parámetros de los buses actuales

Para aplicar las ecuaciones de la dinámica de vehículos descritas en la tabla 2, el primer paso es definir todas las variables descritas en la tabla 1, correspondientes al vehículo de análisis. La flota de buses urbanos en la ciudad de Cuenca es de 475 unidades, el 50% pertenece a la marca Mercedez Benz. Por lo tanto, todas las características pertenecen a este modelo.

#### 2.2.1 Parámetros del vehículo

Los parámetros del bus son:

- Área frontal del autobús, [A].
- Coeficiente de arrastre, [cd].
- Coeficiente de resistencia a la rodadura, [fr].
- Masa del autobús, [M].
- Radio dinámico, [Rd].

Los valores del A, cd, fr y M, se obtuvieron en el trabajo de (Astudillo Bravo, 2016) para la obtención de los ciclos de conducción para la flota de buses urbanos del cantón Cuenca, a través de pruebas realizadas en carretera.

#### 2.2.1.1 Masa del vehículo

Según los estudios de (Göhlich et al., 2014; Lajunen, 2012a; Laurikko et al., 2015; Lindgren, 2015), la masa es el parámetro del vehículo que mayor incidencia tiene sobre la demanda energética, por lo que, en la tabla 6, se plantean tres escenarios de carga de pasajeros (vacía, media y plena carga).

La masa en vacío del autobús es 9470kg (Astudillo Bravo, 2016) y la (Ilustre Municipalidad de Cuenca, 2015), menciona que la capacidad de pasajeros es de 70; la NTE INEN 1668 establece que la masa de un pasajero es 70kg (NTE INEN, 2015).

Tabla 6. Masa del bus Mercedes Benz con tres escenarios de carga de pasajeros

Masa del autobús					
Vacío [kg]	9470	Sin pasajeros			
Media carga [kg]	11920	35 pasajeros			
Plena carga [kg]	14510	70 pasajeros			

#### 2.2.1.2 Radio dinámico

El radio dinámico, es el radio real del neumático que se encuentra deformado por el peso y el giro del mismo (Cordero, 2015).

Las medidas del neumático son 275/80R22,5 (Mercedes Benz, 2012).

En la figura 5 se describe la nomenclatura de un neumático, el ancho del neumático está en [mm], la altura en [%] y el diámetro en [pulgadas].



Figura 5. Nomenclatura de un neumático (Perez, n.d.)

El radio dinámico es (Cordero, 2015):

 $Rd = Anchura \cdot Altura + diámetro de la llanta.$  Ec. 9

$$Rd = \frac{275\frac{80}{100} + \frac{22,5}{2} \cdot 25,4}{1000}$$

El valor del Rd es 0,51m

#### 2.2.2 Parámetros ambientales

Los parámetros ambientales comprenden la densidad del aire y la gravedad universal.

#### 2.2.2.1 Densidad del aire

La densidad del aire depende de la presión atmosférica y la temperatura del ambiente (Cengel & Boles, 2012), y para determinar su valor se parte de la ecuación de los gases ideales :

$$P\vartheta = MR_aT$$
 Ec. 10

Donde P [kPa] es la presión ambiental,  $\vartheta$  [m<sup>3</sup>] es el volumen, M [kg] es la masa, R<sub>a</sub> [kJ/kg·K] es la constante universal de los gases y T [K] es la temperatura. Por lo tanto, la ecuación de la densidad del aire  $\rho_a$  [kg/m<sup>3</sup>] es:

$$\rho_a = \frac{P}{R_a T}$$
 Ec. 11

Los valores de presión y temperatura para la ciudad de Cuenca se tomaron de (INAMHI, 2016):

$$T = 16,05^{\circ}C$$
$$P = 68560Pa$$
$$R_a = 287 \text{kJ/kg} \cdot \text{K}$$

Aplicando la Ec. 11 el valor de la densidad del aire es  $\rho_a = 0.83$ kg/m<sup>3</sup>.

#### 2.2.2.2 Gravedad

Es la aceleración en caída libre de cuerpos cuyo valor es 9,81m/s<sup>2</sup>, y de acuerdo a la ley de Newton se utiliza para determinar el peso de los cuerpos (Cengel & Boles, 2012).

#### 2.2.3 Parámetros de operación del vehículo

Como se mencionó anteriormente, los parámetros de operación del vehículo se definen mediante un ciclo de conducción; en el trabajo de (Astudillo Bravo, 2016) se

determinó seis ciclos de conducción; estos son los ciclos para la línea 5, línea 7 y línea 100 y comprenden viajes de ida y vuelta.

En ésta investigación se unieron los viajes de ida y vuelta de cada línea, quedando de esta forma tres ciclos de conducción.

Los ciclos de conducción se determinaron según la demanda de pasajeros en donde cada ciclo de conducción, posee su perfil de altitud y al igual que la masa, es otro factor que incide en la demanda energética (Göhlich et al., 2014), debido al grado de inclinación de la carretera.

Cada ruta se trazó con los valores de longitud y altitud medidos por un GPS (Global Position System) por (Astudillo Bravo, 2016), mediante el software QGIS 2.18 para la visualización en el Google Maps Pro.

#### 2.2.3.1 Ciclo de conducción y perfil de altitud - línea 5

En la figura 6 se muestra la ruta de la línea 5, el recorrido de ida inicia en el sector denominado "Totoracocha" y finaliza en "El salado", retornando inmediatamente al sector "Totoracocha", cumpliendo de esta manera un viaje de ida y vuelta; esta línea es la más corta comparada con las otras dos líneas ya que recorre una distancia de 28km en un tiempo de 1 hora 37 minutos, consta de 74 paradas, la velocidad promedio es 16,50km/h y la velocidad máxima es 55,28km/h (figura 7), cada bus realiza 6 viajes diarios. La ruta presenta pendientes máximas del 14% (figura 9), además se presenta su perfil de altitud (figura 9).



Figura 6. Ruta correspondiente a línea 5



Figura 7. Ciclo de conducción correspondiente a la línea 5 (Astudillo Bravo, 2016)



Figura 8. Perfil de altitud correspondiente a la línea 5 (Astudillo Bravo, 2016)



Figura 9. Perfil de pendientes correspondiente a la línea 5

#### 2.2.3.2 Ciclo de conducción y perfil de altitud - línea 7

En la figura 10 se muestra la ruta de la línea 7, el recorrido de ida inicia en el sector denominado "Trigales" y finaliza en el "Mall del río", retornando inmediatamente al sector "Trigales", cumpliendo de esta manera un viaje de ida y vuelta; esta línea es la más larga comparada con las otras dos líneas ya que recorre una distancia de 40.54km en un

tiempo de 2 horas 14 minutos, consta de 101 paradas, la velocidad promedio es 18.07km/h y la velocidad máxima es 78.94km/h (figura 11), cada bus realiza 6 viajes diarios. Ésta ruta es muy irregular como se observa en la figura 12 en su perfil de altitud además que, presenta pendientes máximas del 25% lo que provoca una mayor demanda de energía (figura 13).



Figura 10. Ruta correspondiente a la línea 7



Figura 11. Ciclo de conducción correspondiente a la línea 7 (Astudillo Bravo, 2016)



Figura 13. Perfil de pendientes correspondiente a la línea 7

#### 2.2.3.3 Ciclo de conducción y perfil de altitud - línea 100

En la figura 14 se muestra la ruta de la línea 100, el recorrido de ida inicia en el sector denominado "Ricaurte" y finaliza en "Baños", retornando inmediatamente al sector de "Ricaurte", cumpliendo de esta manera un viaje de ida y vuelta; esta línea recorre una distancia de 38.67km en un tiempo de 2 horas 9 minutos, consta de 101 paradas, la velocidad promedio es 17.99km/h y la velocidad máxima es 59.94km/h (figura 15), cada bus realiza 6 viajes diarios. Ésta ruta se muestra en la figura 16 su perfil de altitud, además se presenta pendientes máximas del 12% (figura 17).



Figura 14. Ruta correspondiente a la Troncal 100



Figura 15. Ciclo de conducción correspondiente a la Troncal 100 (Astudillo Bravo, 2016)



Figura 16. Perfil de altitud correspondiente a la Troncal 100 (Astudillo Bravo, 2016)



Figura 17. Perfil de pendientes correspondiente a la línea 100

La tabla 7 muestra las carácterísticas de los ciclos de conducción para las tres rutas, los valores de velocidad promedio van desde los 16.50km/h hasta los 18.79km/h, la velocidad máxima se presenta en la línea 7 y es la ruta más larga; además que, tiene que superar pendientes de hasta el 25%, los tres recorridos pasan por el centro de la ciudad en donde existe un alto tráfico.

	Líneas				
Parámetro	5	7	100		
Ruta	Los andes-el	Trigales-Mall	Rucaurte-		
	salado-Los andes	del río-Trigales	Baños-Ricaurte		
Velocidad máxima [km/h]	55,28	78,94	59,94		
Velocidad promedio [km/h]	16,50	18,07	17,99		
Aceleración máxima [m/s <sup>2</sup> ]	1,38	1,48	1,49		
Desaceleración máxima [m/s <sup>2</sup> ]	-2,51	-2,45	-2,43		
Distancia recorrida [km]	28	40,54	38,67		
Número de paradas	74	101	98		
Tiempo de recorrido [h]	1h41	2h14	2h09		
Tiempo de aceleración negativa [min]	43	58	55		
Pendiente máxima [%]	14	25	12		

Tabla 7. Características de los ciclos de conducción para la línea 5, línea 7 y troncal 100(Astudillo Bravo, 2016; Ilustre Municipalidad de Cuenca, 2015)

# 2.3 Elaboración del modelo para la obtención de la demanda energética

Una vez definidos los parámetros que intervienen en el cálculo de la demanda energética en la sección 2.2, se elabora la tabla 8 en donde se resume los parámetros que se utilizan para realizar la simulación y encontrar la demanda energética en rueda.

Parámetros del vehículo	Simbología	Valor	Referencia			
Área frontal [m²]	[A]	7,29	Autodesk Inventor 2016			
Coeficiente de arrastre [-]	[Cd]	0,62	Pruebas en carretera (Astudillo Bravo, 2016)			
Coeficiente de resistencia a la rodadura [-]	[fr]	0,0092	Pruebas en carretera (Astudillo Bravo, 2016)			
Masa del vehículo [kg]	[M]	9470	Báscula			
Radio dinámico [m]	[Rd]	0,51	Ficha técnica (Mercedes Benz, 2012)			
Masa de un pasajero [kg]	[M]	70	(INEN, 2010)			
Capacidad de pasajeros	[-]	70	GAD Municipal Cuenca, 2015			
Parámetros ambientales						
Densidad del aire [kg/m <sup>3</sup> ]	$[\rho_a]$	0,83	(INAMHI, 2016)			
Gravedad [m/s <sup>2</sup> ]	[g]	9,81	(Cengel & Boles, 2012)			
Parámetros de operación						
Velocidad [km/h]	[V]		Ciclos de conducción y perfil de altitud (línea 5			
Aceleración [m/s2]	[a]		línea 7 y línea 100)			
Pendiente [rad]	[ $ heta$ ]					

Tabla 8. Parámetros utilizados para la simulación del bus Mercedez Benz

El siguiente paso, es elaborar el modelo mediante la utilización del software Matlab/Simulink, en donde, el modelo de evaluación de la demanda energética en rueda consta de cuatro bloques (figura 18):



Figura 18. Diagrama de bloques para la evaluación de la demanda energética en rueda

El primer bloque del modelo denominado "ciclo de conducción" permite el ingreso de cualquier ciclo de conducción e internamente permite el cálculo de la aceleración y la distancia recorrida utilizando las ecuaciones 12 y 13.

Distancia:

$$\int_0^t v dt$$
 Ec. 12

Donde:

v, es la velocidad en m/s.

dt, es la variación del tiempo en segundos.

Aceleración:

 $a = \frac{dv}{dt}$  Ec. 13

Donde:

dv, es la variación de la velocidad, en m/s

dt, es la variación del tiempo, en segundos.

Quedando el bloque tal como se muestra en la figura 19.



Figura 19. Diagrama interno del bloque denominado "ciclo de conducción"

El segundo bloque del modelo denominado "perfil de altitud" permite el ingreso de cualquier perfil de altitud e internamente consta de las funciones trigonométricas que se utilizan en las ecuaciones de la dinámica de vehículos (figura 20).



Figura 20. Diagrama interno del bloque denominado "perfil de altitud"

El tercer bloque del modelo denominado "diagrama de fuerzas" permite el ingreso de todos los parámetros del vehículo (masa, número de pasajeros, coeficiente de arrastre, coeficiente de resistencia a la rodadura, área frontal y radio dinámico) y los parámetros ambientales como la presión y temperatura, estos parámetros se utilizan para el cálculo de la fuerza en rueda descrita a través de las ecuaciones definidas en la tabla 3 (figura 21)



Figura 21. Diagrama interno del bloque denominado "diagrama de fuerzas"

Finalmente, el cuarto bloque del modelo denominado "demanda energética" permite el cálculo de la potencia, torque y demanda energética a través de las ecuaciones definidas en la tabla 3 (figura 22).



Figura 22. Diagrama interno del bloque denominado "demanda energética"

Por lo tanto, en la tabla 9 se resume los valores de fuerza, torque, potencia y demanda energética en rueda para las tres líneas de buses, con base en la simulación realizada.

	Línea 5			Línea 7			Línea 100		
	Vacío	Media	Full	Vacío	Media	Full	Vacío	Media	Full
Fuerza en rueda máxima [N]	15369	19340	23311	24101	30330	36558	16241	20416	24591
Torque en rueda máximo [Nm]	7838	9863	18889	12292	15468	18644	8283	10412	12541
Potencia en rueda máxima [kW]	120	150	180	150	188	226	125	157	189
Demanda energética [kWh]	23.5	29.5	35.4	37.3	46.8	55.9	34.6	43.3	52

Tabla 9. Fuerza, torque, potencia y demanda energética en rueda para las tres líneas de buses

De los valores obtenidos, se puede concluir que los máximos requerimientos (figura 23) en cuanto a fuerza, torque, potencia y demanda energética se presenta en la línea 7, debido que es una ruta sinuosa y es la más larga comparada con las otras dos rutas, además, presenta pendientes de hasta el 25%; en esta simulación se consideró tres escenarios de carga de pasajeros, mientras que, el menor requerimiento energético se presenta en la línea 5 debido a que es la ruta más corta.



Figura 23. Valores máximos de fuerza, torque y potencia en rueda
Por lo tanto, la demanda energética en rueda que se necesita para cubrir las tres rutas, considerando este modelo de bus y un escenario a plena carga de pasajeros varia de 35.4kWh a 55.9kWh.

### 2.3.1 Potencia y torque necesarios

Es importante conocer si actualmente los motores diésel de los buses actuales satisfacen las rutas y para realizar este análisis, es necesario conocer las especificaciones técnicas del motor como la curva de torque, potencia y el diagrama de cubrimiento, éste último se obtiene a través de las especificaciones del motor y las especificaciones de la caja de cambios y diferencial.

El motor utilizado en estos autobuses se detalla en la figura 24 (Mercedes Benz, 2012):



Figura 24. Curva de torque y potencia del motor de buses diésel actuales

El diagrama de cubrimiento del motor se describe a través de una gráfica de la fuerza en rueda ( $F_x$ ) en función de la velocidad de rotación del motor (V), a través de las siguientes ecuaciones:

Velocidad de cada marcha [km/h]:

$$V_{marchas} = \frac{\omega_{motor} \cdot 2\pi \cdot r_d \cdot 3,6}{N_{td} \cdot 60}$$
 Ec. 14

Donde:

 $\omega_{motor}$ , son las revoluciones por minuto del motor [Rpm].

r<sub>d</sub>, es el radio dinámico [m].

Ntd es la relación de transmisión total

Luego se calcula la fuerza  $(F_x)$ , a través de la ecuación:

$$F_x = rac{T_{motor} \cdot N_{td}}{r_d}$$
 Ec. 15

Donde:

T<sub>motor</sub>, es el torque del motor [Nm].

Una vez obtenidos los datos necesarios como el radio dinámico, la curva de torque del motor y las relaciones de transmisión y diferencial, utilizando las ecuaciones 12 y 13 obtenemos el diagrama de cubrimiento para los motores diésel actuales (figura 25).



Figura 25. Diagrama de cubrimiento del motor de buses diésel actuales

Con este diagrama de cubrimiento se elabora un diagrama interno en el modelo de simulación que permite colocar las marchas de acuerdo a la velocidad que se tiene en el ciclo de trabajo (figura 26).



Figura 26. Diagrama interno del bloque denominado "caja de cambios y diferencial"

Finalmente, con los valores de la curva de torque se elabora un diagrama interno que permite colocar la curva de torque del motor (figura 27).



Figura 27. Diagrama interno del bloque denominado "diagrama de torque y potencia"

Por lo tanto, el modelo finaliza con la elaboración del quinto bloque del modelo denominado "caja de cambios y diferencial" que permite el ingreso de las relaciones de transmisión de la caja de cambios y diferencial, además permite el ingreso de la velocidad a la que se realiza el cambio según el diagrama de cubrimiento, este bloque toma como referencia la velocidad del vehículo a la que se encuentra según el ciclo de conducción y el sexto bloque denominado "curva de torque y potencia" contiene la curva de torque del motor de acuerdo a las características del fabricante (figura 28).



Figura 28. Diagrama de bloques para la evaluación del torque y potencia necesarios

Entonces, a través del modelo de simulación se verifica que este motor actualmente satisface las rutas evaluadas para la ciudad de Cuenca, debido a que las curvas de color rojo representan la curva de torque y potencia del motor según especificaciones del fabricante y los puntos de color azul representan el torque y potencia en la ruta, es decir que los valores obtenidos se encuentran debajo de estas curvas (figura 29).



Figura 29. Torque y potencia máximos en la ruta en los motores diésel actuales

Por lo tanto, el modelo planteado permite el ingreso de cualquier ciclo de conducción y perfil de altitud, el cálculo de la distancia recorrida, la aceleración, además permite el ingreso de los parámetros de cualquier vehículo, para evaluar la demanda energética. Además, permite el ingreso de las relaciones de transmisión y diferencial con la velocidad del cambio de marchas de acuerdo al diagrama de cubrimiento, finalmente el modelo permite el ingreso de cualquier curva de torque de motor para obtener la potencia y torque necesarios en cualquier ruta.

# **CAPITULO 3**

# OFERTA GLOBAL DE BUSES ELÉCTRICOS

# 3.1 Introducción

De acuerdo al análisis realizado, para los buses actuales se obtuvo la demanda energética en rueda y además se verificó que éstos satisfacen las tres rutas en cuanto a potencia y torque. Sin embargo, los buses actuales utilizan motores diésel, que además de generar GEI, son menos eficientes que los motores eléctricos; según describe (Erkkilä et al., 2013), la alternativa principal para la reducción de éstos GEI, es el progreso de nuevas tecnologías energéticas, entre éstas el desarrollo de buses eléctricos con baterías.

Actualmente, dicha tecnología enfrenta desafíos como el desarrollo de sistemas de propulsión, sistemas de almacenamiento de energía eléctrica, la infraestructura de carga y cumplir un día de trabajo sin interrupciones (Živanović & Nikolić, 2015). Actualmente, se encuentran dos tipos de tecnologías que hacen uso de la energía eléctrica y son los sistemas híbridos y eléctricos; este trabajo no contempla los vehículos híbridos.

En este capítulo se describen los buses eléctricos disponibles en el mercado mundial, con sus características técnicas que manifiesta el fabricante. Estas unidades se comparan con la (NTE) INEN 1668 y la INEN 2205 que describe los requisitos técnicos de un bus urbano en el Ecuador.

### 3.2 Buses eléctricos a nivel mundial

La producción mundial de buses de distintas tecnologías es liderada por la región asiática con un 71% de participación, mientras que el continente europeo y americano aporta un 15% y 13% respectivamente, el 1% corresponde al continente africano (figura 30) (Benz et al., 2015).



Figura 30. Producción mundial de buses por región (Benz et al., 2015)

Por otro lado, la flota de buses eléctricos en el año 2015 alcanzó las 173.000 unidades, liderada por China con más de 170.000 unidades que representa el 98.3%, mientras que, en Europa se registran 1300 unidades (0,7%) y 1% restante corresponden a otras regiones como Estados Unidos y el resto de mundo (figura 31) (Busworld academy, 2016).



Figura 31. Mercado mundial de buses eléctricos por región (Busworld academy, 2016)

Según (Benz et al., 2015), el precio de un bus eléctrico oscila entre \$300000-\$800000, dependiendo del modelo, su costo se eleva respecto a un bus a diésel debido a los materiales que involucran la fabricación de la batería

En la figura 32 se muestra el mercado mundial de baterías utilizadas para el transporte; según (Benz et al., 2015), existen cinco empresas que lideran el mercado que

son Panasonic/Sanyo 41,2% (Japón), AESC 18,46%, Samsung 7,13%, LGC 7,11% (Corea), Litec 4,68% (Reino Unido), estas baterías son de ion-litio.



Las baterías de ion-litio disminuyeron su precio de \$1000/kWh a \$450/kWh, entre el año 2007 y 2014 (Benz et al., 2015), es decir, a una tasa de reducción anual del 14%. Se espera que en los próximos años, el precio se estabilice en \$150/kWh (figura 33).



Figura 33. Tendencias de los precios de las baterías de ion-litio al año 2030 (Busworld academy, 2016)

# 3.3 Componentes principales de un bus eléctrico

Los componentes principales de un bus eléctrico son la carrocería, el tren de potencia, los accesorios y cargador de baterías, así lo describe (Global Green Growth Institute, 2015) en la figura 34.



Figura 34. Componentes principales de un bus eléctrico de baterías (Global Green Growth Institute, 2015)

## 3.3.1 Carrocería

Según (Global Green Growth Institute, 2015), los parámetros de diseño de la carrocería que se deben conocer para el análisis de la demanda energética son el área frontal, coeficiente de arrastre, coeficiente de resistencia a la rodadura, masa y capacidad de pasajeros.

#### 3.3.2 Tren de potencia

El tren de potencia de un bus eléctrico consta de un sistema mecánico, eléctrico y de control; la parte mecánica contiene la dinámica longitudinal como la transmisión, diferencial y los neumáticos; la parte eléctrica contiene el motor eléctrico, el inversor y la batería y la parte de control conforma la UCE (unidad de control electrónica), que regula el par motor y los frenos, según la velocidad de entrada del vehículo (figura 35). Además, está conformado por un equipamiento de carga que puede ser conductiva e inductiva (Lajunen, 2012c).

De forma general, el funcionamiento de un tren de potencia consiste, en que la batería transforma la energía electroquímica almacenada y alimenta a diferentes elementos entre éstos el motor y el inversor que se encarga de transformar la corriente continua de la batería en corriente alterna, además en un vehículo eléctrico se puede regenerar la energía, en este proceso la energía mecánica se convierte en energía eléctrica, a través de una sistema de recuperación de energía (Eshani, Gao, Gay, & Emadi, 2010; Halmeaho et al., 2017; Kumar & Jain, 2014; Wu, Zhang, & Dong, 2015).

Las ruedas que utilizan los buses eléctricos tienen similares dimensiones que los buses diésel.



Figura 35. Tren de potencia de un bus eléctrico (Lajunen, 2012c)

Para realizar la simulación de un tren de potencia, se deben conocer entonces los parámetros del vehículo, los parámetros ambientales, los parámetros de operación del vehículo definidos por ciclos de conducción, las relaciones de transmisión de la caja de cambios y la relación de transmisión del diferencial, finalmente, los datos necesarios del motor eléctrico como las curvas de torque, potencia y eficiencia.

En la figura 36 se presentan diferentes configuraciones de trenes de potencia, para un bus eléctrico urbano, (Lajunen, 2012c; Wu et al., 2015).



Figura 36. Diferentes configuraciones de un tren de potencia para buses eléctricos (Lajunen, 2012c; Wu et al., 2015)

#### 3.3.2.1 Motores eléctricos, convertidor electrónico de potencia y transmisiones

El desempeño del tren de potencia depende de las condiciones de operación de un vehículo (Lajunen, 2012c). Por su parte, los motores eléctricos utilizados, deben ser capaces de satisfacer características básicas como son el alto par de arranque, baja velocidad en una pendiente, freno regenerativo, confiabilidad y temperatura (Eshani et al., 2010; Kumar & Jain, 2014; Riba, López-Torres, Romeral, & Garcia, 2016).

Cabe recalcar, que esta investigación no aborda el funcionamiento del freno regenerativo.

En la figura 37, se presenta una clasificación de los motores eléctricos utilizados en el transporte eléctrico.



Figura 37. Clasificación de los motores eléctricos (Lajunen, 2012c)

Los estudios realizados sobre motores eléctricos indican, que los motores de inducción de rotor de jaula de ardilla y los motores síncronos de imanes permanentes son

las opciones más adecuadas (figura 38), debido a las múltiples ventajas que presenta según (Eshani et al., 2010; Kumar & Jain, 2014; Riba et al., 2016), por una parte, la ventaja de un motor de inducción es la simplicidad, fiabilidad, bajo mantenimiento, sin embargo, son más pesados con relación a los motores de imanes permanentes.

Por otro lado, los motores de imanes permanentes, poseen un rotor altamente eficiente y buena refrigeración y el motor síncrono de reluctancia conmutada es más utilizado en vehículos híbridos e híbridos eléctricos enchufables, ya que opera a altas temperaturas y ofrece una construcción sencilla, pero, poseen alto ruido y vibraciones; una revisión más amplia sobre motores eléctricos se describe en (Kumar & Jain, 2014) y (Eshani et al., 2010; Riba et al., 2016).



Figura 38. Vista en sección de motores eléctricos a) motor de inducción b) motor de imanes permanentes c) motor de reluctancia (Kumar & Jain, 2014)

Por su parte, el uso de motores de corriente continua está reduciéndose, debido a que el tamaño es mayor respecto a un motor de corriente alterna y además presenta una baja eficiencia debido a los conmutadores mecánicos.

En la figura 39, se presenta a detalle los tipos de controladores electrónicos, sistemas de almacenamiento de energía, convertidores electrónicos de potencia y motores eléctricos.



Figura 39. Tipos de controladores electrónicos, sistemas de almacenamiento de energía, convertidores electrónicos de potencia y motores eléctricos (Kumar & Jain, 2014)

En cuanto a las transmisiones, los vehículos eléctricos livianos, utilizan sistemas de transmisión variables CVT (continuously variable transmission) y DCT (dual clutch transmission); es decir, que para este tipo de vehículos generalmente se utilizan transmisiones de engranajes planetarios de dos velocidades, para mejorar la eficiencia; los estudios mencionan que estas cajas de velocidades no son adecuados para buses eléctricos (Jun-Qiang, Guang-Ming, & Yan, 2008; Wang, Hou, Yu, & Lin, 2016).

No existe evidencia de cual sea la mejor opción de transmisión en buses eléctricos sin embargo, estudios mencionan que el tipo de transmisión que se acopla de mejor manera es el sistema de transmisión AMT (automatic/manual transmission) por sus siglas en inglés, este modelo une las dos tecnologías, tanto manual como automática (figura 40), es decir, con el cuerpo de engranajes pero, no necesita embrague, puesto que el módulo de control de la caja de cambios se encarga de las marchas de acuerdo a las necesidades del vehículo, es decir, actúa con doble caja de cambios, uniendo las ventajas de fácil manejo, bajo consumo de combustible, precio razonable y conducción controlada por el conductor; estudios como (Jun-Qiang et al., 2008; Wang et al., 2016), sostienen que este tipo de transmisión automática y a una caja de cambios manual.



Manual

Automática

Figura 40. Transmisiones utilizadas en buses eléctricos (Jun-Qiang et al., 2008)

# 3.3.3 Sistemas de almacenamiento de energía eléctrica

La viabilidad de un bus eléctrico depende del sistema de energía a bordo. En la actualidad, existen 3 sistemas de almacenamiento de energía a bordo que son las baterías, los supercapacitores y las celdas de combustible, y dependen de factores como durabilidad, costos, sostenibilidad ambiental, densidad de energía y desempeño. La tecnología que ha sido más estudiada y desarrollada según estos estudios (Benz et al., 2015; Erkkilä et al., 2013; Filippo et al., 2014; Global Green Growth Institute, 2015; Göhlich et al., 2014; Lajunen, 2012b, 2012c, 2014; Lajunen & Lipman, 2016; Laurikko et al., 2015; Lindgren, 2015; Miles & Potter, 2014; Mohamed, Farag, El-taweel, & Ferguson, 2017; Perrotta et al., 2014; Tzeng, Lin, & Opricovic, 2005; Živanović & Nikolić, 2015), es la batería, debido a que al momento es la tecnología más madura dentro de los vehículos eléctricos.

#### 3.3.3.1 Baterías

Una batería consta de dos electrodos, un ánodo (-) y un cátodo (+), dentro de éstos electrodos se integra un material denominado electrolito, el cual permite el almacenamiento de la energía eléctrica. Durante el proceso de carga de la batería, el electrolito, transforma la energía eléctrica en energía química, de esta forma los aniones se transmiten al ánodo y los cationes al cátodo; en el proceso de descarga el proceso es al revés (Benz et al., 2015).

Las baterías para buses eléctricos que se comercializan son de níquel y las de ionlitio, siendo estas últimas las que tienen un mayor uso debido a su mayor densidad energética; es decir, a menor masa puede almacenar mayor cantidad de energía, en la tabla 10 se muestran las baterías utilizadas en buses eléctricos (Benz et al., 2015).

#### 3.3.3.1.1 Baterías de níquel

Las baterías de níquel pueden tener configuraciones como de níquel-cadmio (Ni-Cd), níquel-zinc (Ni-Zn) y níquel-metal-hidruro (Ni-MH), el electrolito es hidróxido de potasio, el cátodo es hidróxido de níquel, mientras que el ánodo es cadmio (Cd) o zinc (Zn), con diferentes aleaciones, sin embargo, esta batería presenta desventajas como la toxicidad del cadmio, bajo rendimiento en temperaturas menores a 0°C y menor capacidad de almacenamiento. Las baterías de níquel-metal-hidruro, poseen baja densidad de energía 40-55Wh/kg, su vida útil es de 2000 ciclos,

#### 3.3.3.1.2 Baterías ion-litio

La batería de ion-litio es la más prometedora ya que tiene una potencia específica de 300W/kg, una densidad de energía de 85-200Wh/kg, una baja autodescarga, un bajo peso y alta resistencia a las temperaturas. Estas baterías soportan aproximadamente entre 1000-1500 ciclos de carga y descarga, generalmente el ánodo es de carbono y el cátodo a base de cobalto, para el electrolito se utiliza la sal de litio (figura 41) (Benz et al., 2015).



Figura 41. Configuración interna de una batería de ion-litio (Benz et al., 2015)

Otra tecnología son las baterías de plomo-ácido; sin embargo, presentan desventajas con relación a las de ion-litio ya que tiene baja densidad de energía 20-30Wh/kg, es decir,

son más pesadas. De igual forma los supercapacitores presentan baja densidad energética porque almacenan apenas el 10% comparado con las baterías de ion-litio, y las celdas de combustible son más caras que las baterías ion-litio debido a que necesita componentes como el paladio (Benz et al., 2015).

Por lo tanto, las baterías requieren una alta densidad de energía, debido a los requisitos de peso ligero, en la tabla 10 se muestran las baterías actualmente disponibles.

Sistema	Cátodo	Ánodo	Electrolito	Densidad de energía (Wh/kg)	Ciclo de vida	Precio por kWh (\$)	Fabricantes
	Litio-hierro- fosfato	Grafito	Carbonato de etileno (CE), carbonato de dimetilo (CDM)	85-105	200-2000	550-850	BYD, A123Systems, Amperex, Lishen
	Manganeso- litio	Grafito	CE,CDM	140-180	800-2000	450-700	LG Chem, AESC, Samsung
	Litio-hierro- fosfato		CE,CDM	80-95	2000- 25000	900-2200	ATL,Toshiba, LeclanchZ, Microvast
Ion-litio	Litio-óxido de cobalto	Grafito	Polímero de litio	140-200	300-800	250-500	Samsung, BYD, LG Chem, Panasonic, ATL, Lishen
	Litio-níquel- cobalto- aluminio	Grafito	CE,CDM	120-160	800-5000	240-380	Panasonic, Samsung
	Litio-níquel- manganeso- cobalto	Grafito- silicio	CE,CDM	120-140	800-2000	550-750	Johnson controls, Saft
Ni-MH	Hidróxido de níquel	Metal hidruro	Hidróxido de potasio	70-80	500-2000	500-550	Ovonic battery, GS Yuasa
Ni-Cd	Hidróxido de níquel	Cadmio	Hidróxido de potasio	40-60	Sobre los 2000	-	AMCO SAFT

Tabla 10. Características de las baterías ion-litio, Ni-MH y Ni-Cd (Global Green Growth Institute, 2015)

#### 3.3.3.2 Tendencias tecnológicas de las baterías

Según el estudio de (Benz et al., 2015), el titanio de litio ganará importancia en los próximos años, debido a su periodo de recarga más corto, otra tecnología prometedora es el carbono de silicio, con el fin de aumentar la densidad de energía, por otra parte, la batería litio-azufre posee mayor densidad de energía de 350Wh/kg, una desventaja es la baja cantidad de ciclos de carga; las baterías de litio-aire, aumenta la densidad de energía hasta 20 veces con respecto a las baterías de ion-litio, se espera que la densidad de energía aumente a 500Wh/kg para el año 2030 (figura 42).



Figura 42. Generación de baterías para buses eléctricos al año 2030 (Global Green Growth Institute, 2015)

Los fabricantes recomiendan que una batería funciones entre 10°C y 30°C, para lograr una vida útil más larga (Global Green Growth Institute, 2015).

### 3.3.4 Infraestructura de carga

Una infraestructura de carga realiza la transferencia de la energía eléctrica a la batería, actualmente, Shangai (Asia), cuenta con aproximadamente 5000 estaciones de recarga, Barcelona (Europa) posee 4500 estaciones de recarga y California (América) tiene 6000 estaciones de recarga. Los sistemas de carga existentes son de tipo conductivo e inductivo (Laurikko et al., 2015; Lindgren, 2015).

La infraestructura de carga esta estandarizado por la Comisión Electrotécnica Internacional (IEC, por sus siglas en inglés) (Asín, 2012), bajo la norma IEC 6185-1 (tabla 12) y el conector bajo la norma IEC 62196-1:2012, y en la tabla 11 se menciona que existen 4 niveles de carga que son regulados por la corriente eléctrica y el nivel de electricidad transferida, en buses eléctricos, el nivel 3 (carga rápida) es el más común, mientras que el modo 4 se refiere a una carga inductiva; para que las estaciones sean efectivas se debe usar el nivel 2 durante una carga nocturna y el nivel 3 o 4 al final de la ruta del autobús (Benz et al., 2015).

Nivel	Voltaje	Rango	Observaciones
AC-1	120V plug in	3-8km por hora de carga	Un extremo del cable es un conector NEMA 5-15 (3 pines). El otro extremo del enchufe es un conector estándar J1772
AC-2	240V plug in	16-32km por hora de carga	Funciona hasta 80A
DC-3 carga rápida	208/480V plug	80-112km por 20 minutos de carga	Mejor aplicación en buses
DC-4carga inductiva	240V plug	16-32km por hora de carga	La norma SAEJ3068, está en desarrollo para cargas más altas con corriente elevadas

# Tabla 11. Modos de carga para buses eléctricos (Global Green Growth Institute, 2015)

# 3.3.4.1 Carga conductiva (plug-in)

La tecnología plug-in (figura 43), realiza la carga a través de un conector en una estación de carga que puede estar localizada en el depósito de autobuses o al final de la ruta (Göhlich et al., 2014).



Figura 43. Esquema de carga conductiva (plug-in) (Global Green Growth Institute, 2015)

## 3.3.4.2 Carga inductiva o sin contacto

Este tipo de carga funciona creando un campo magnético entre 2 placas inductivas, están encajadas en el suelo y en el bus, cuando se produce la carga durante la conducción se denomina carga dinámica (Miles & Potter, 2014), y cuando está estacionado se denomina carga estática (figura 44).



Figura 44. Carga inductiva en un bus eléctrico (Miles & Potter, 2014)

## 3.3.4.3 Carga de oportunidad

Una carga de oportunidad puede ser de tipo conductiva o inductiva; de tipo conductiva trae el mismo mecanismo que utilizan los troles y tranvías desde el siglo XX, solamente que los puntos de carga se encuentran en puntos específicos en las paradas de bus (figura 45), y no tienen cables en las rutas, sino un brazo conector en la parada del bus, y de tipo inductiva se presentó en la figura 44.



Figura 45. Carga de oportunidad conductiva en un bus eléctrico (Volvo Bus Corporation, 2015)

Según un estudio realizado por (Miles & Potter, 2014) las cargas de oportunidad son capaces de superar las limitaciones de autonomía que poseen actualmente los buses eléctricos, lo que permite reducir el tamaño de la batería, trayendo consigo disminución de peso y costo, sin embargo, la inversión es elevada (Global Green Growth Institute, 2015).

De cualquier forma, una infraestructura de carga, busca encontrar soluciones para disminuir el tamaño de la batería, una empresa Mitsui Arup Sustainable Projects (MASP) prueba un sistema de carga inductivo en Reino Unido (Miles & Potter, 2014), otro caso de estudio es la implementación de cargas de oportunidad cada 4 paradas, con un tiempo de recarga de 15 segundos, en la terminal la batería se puede recargar completamente dentro de 4 minutos.

En la tabla 12 se muestra las ventajas y desventajas de los sistemas de carga conductivos e inductivos.

Parámetros	Carga conductiva	Carga inductiva
Costo de instalación	+	+
Costo de mantenimiento	+	+
Seguridad	+	1
Tiempo de vida	+	1
Eficiencia	(95%)	(80%-90%)
Confiabilidad	•	1

Tabla 12. Ventajas y desventajas entre sistemas de carga conductivo e inductivo(Global Green Growth Institute, 2015)

# 3.4 Norma técnica ecuatoriana (NTE) INEN 2205 y 1668

El bus eléctrico debe cumplir con las especificaciones que exige la NTE; en el Ecuador, la NTE INEN 2205 establece los requisitos que debe cumplir un bus urbano, de tal manera que proporcione un nivel de seguridad y comodidad al usuario, y la NTE INEN 1668 establece los requisitos que deben cumplir los vehículos de transporte público de pasajeros (NTE INEN, 2010, 2015).

Los valores encontrados en las fichas técnicas que se compararon con las normas son las dimensiones como el largo, ancho y alto del bus, capacidad de pasajeros y pendiente superable (figura 46).

De forma general, las normas describen los siguientes elementos:

#### Neumáticos

Los neumáticos deben cumplir la NTE INEN 011, según las fichas técnicas revisadas y las investigaciones, los buses eléctricos poseen dimensiones similares a la de los buses diésel.

#### Chasis y carrocería

El chasis debe ser diseño original sin modificaciones, sin embargo, todos los buses eléctricos urbanos revisados en la literatura, se los encuentra con chasis y carrocería.

La norma establece que un bus urbano puede ser de piso bajo (no posee peldaños), y de piso alto (con peldaños) para el ascenso y descenso de pasajeros, la altura al primer peldaño es de 450mm; por su parte, la carrocería debe soportar todo tipo de esfuerzo a la que puede estar sometido un bus urbano durante su funcionamiento normal, cumpliendo con la NTE INEN 1323; los buses eléctricos disponibles en el mercado son de piso bajo o alto.

#### Transmisión

La transmisión puede ser manual o automática de acuerdo al diseño original del fabricante, según las fichas técnicas, los buses eléctricos, utilizan cajas de cambio automáticas.

#### Capacidad de pasajeros

Por su parte, la NTE INEN 2205 establece una clasificación de buses urbanos en dos tipos: bus urbano con una capacidad igual o mayor a 60 pasajeros y un minibús con una capacidad menor a 60 pasajeros y deben cumplir requisitos mínimos de seguridad establecidos en la NTE INEN 034.

#### Número de puertas

El número de puertas puede ser de 2 o 3, cuando la capacidad de pasajeros sea mayor a 70 es obligatorio 3 puertas.

#### Arrancabilidad en plano y pendiente

El ensayo de arrancabilidad en plano indica que el tren de potencia debe ser capaz de permitirle al autobús alcanzar una velocidad de 40km/h en 22.5 segundos, por otro lado, la prueba de arranque en pendiente se describe en la NTE INEN 1668 anexo C, y menciona que la pendiente máxima superable debe ser como mínimo del 25%. La prueba debe realizarse en un tiempo no menor a 60 segundos con el vehículo totalmente cargado hasta que supere la pendiente.

#### **Emisiones contaminantes**

Para el caso de las emisiones contaminantes se debe cumplir con la NTE INEN 017, sin embargo, un bus eléctrico no emite gases contaminantes en carretera.

En el ANEXO 1 se detallan los modelos de buses eléctricos que existen a nivel mundial, mientras que en la tabla 13, se detallan los parámetros del vehículo que se necesitan para la evaluación de buses eléctricos y se especifica cuáles de ellos no se encuentra en la ficha técnica de buses eléctricos.

Parámetros	Características	Ficha técnica
	Dimensiones [mm]	Si
	Capacidad de pasajeros [-]	Si
	Masa en vacío [kg]	Si
Vehículo	Radio dinámico [m]	Si
	Cd [-]	No
	fr [-]	No
	Área frontal [m <sup>2</sup> ]	No
Transmisión	Relaciones de transmisión	No
Motor	Curvas de torque, potencia y eficiencia	No

Tabla 13. Parámetros que se describen en la ficha técnica de buses eléctricos

Por lo tanto, los valores que se ha comparado con la NTE INEN 1668 son las dimensiones, la capacidad de pasajeros y la pendiente superable. En la tabla 14, se muestra que las dimensiones de todos los modelos de buses eléctricos según el anexo 1 cumplen con la normativa, excepto el modelo Xcelsior de la marca New Flyer no cumple con los requisitos de altura, en cuanto a la pendiente superable la mayor parte de las fichas técnicas de buses eléctricos no detalla este valor, sin embargo, la pendiente máxima que puede superar un bus eléctrico según la ficha técnica es del 18%, con lo cual no cumpliría con la NTE.

Parámetros	Características	NTE 1668-2205	Cumple
Vehículo	Longitud [mm]	13000	Si
	Ancho [mm]	2600	Si
	Alto [mm]	3500	No
	Pendiente superable [%]	25	No

Tabla 14. Parámetros de los buses eléctricos que cumplen con la NTE INEN 1668-2205



Figura 46. Parámetros de un bus urbano según la NTE 1668 y 2205 (NTE INEN, 2010, 2015)

Finalmente, se han revisado once marcas de buses eléctricos a nivel mundial, de las cuales, cinco de ellas corresponden a la región asiática, cuatro a la región europea y una marca a la región americana, de estas marcas mencionadas se ha recopilado las características técnicas descritas en la tabla 15.

De estas marcas descritas, para la realizar la simulación se escogieron dos marcas de buses, BYD y Zhong Ton.

Marca		Ankai	Yutong	Zhong ton	BYD
Referencia		(JAC ANHUI ANKAI AUTOMOBILE CO., 2017)	(Yutong, 2014)	(Zhong Tong Bus, 2017)	(BYD, 2017)
Características	Modelo	HFF6120G03EV	E12	LCK6122EVG	К9
	Procedencia	China	China	China	China
	Región	Asia	Asia	Asia	Asia
	Largo [mm]	12000	12000	11990	12000
	Ancho [mm]	2500	2550	2540	2550
	Alto [mm]	3150	3340	3280	3260
	Velocidad máxima [km/h]	70	100	69	70
	N° de pasajeros	40	75	70	25
Parámetros	Área frontal [m <sup>2</sup> ]	Х	Х	Х	Х
	Cd [-]	Х	Х	Х	х
	fr [-]	Х	х	Х	х
	Masa en vacío [kg]	13500	12500	13100	13300
	Rd [m]	0,51	0,51	0,51	0,51
	Pendiente superable [%]	x	х	Х	15
Motor	Тіро	Síncrono imanes permanentes	Síncrono imanes permanentes	Síncrono imanes permanentes	Inducción
	Potencia [kW]	291	200	160	180
	Torque [Nm]	2040	2400	1400	700
	Eficiencia [%]	Х	х	Х	х
Baterías	Tipo de batería	Ion litio	Ion litio	Ion litio	Hierro
	Energía [kWh]	Х	295	230	324
	Autonomía [km]	Х	320	240	250
Transmisión	Relación de transmisión	X	Х	X	х

# Tabla 15. Características técnicas de buses eléctricos

Modelo		Volvo	Solaris	Irizar	New Flyer	Caetanobu s	JingHua
Referencia		(Volvo Bus Corpor ation, 2015)	(Solaris, 2017)	(Irizar, 2017)	(New Flyer, 2017)	(Laurikko et al., 2015)	(Jun-Qiang et al., 2008)
Características	Procedencia	7900	Ubino electric	I2e	Xcelsior	E.Cobus	BK6122EV 2
	Región	Suecia	Polonia	Española	Canadá	Portugal	Х
	Largo [mm]	Europa	Europa	Europa	América	Europa	Х
	Ancho [mm]	12000	12000	11980	12240	11995	11850
	Alto [mm]	2550	2550	2550	2550	2500	2540
	Velocidad máxima [km/h]	3280	3395	3209	3680	3058	3300
	N° de pasajeros	80	80	х	70	70	Х
Parámetros	Área frontal [m <sup>2</sup> ]	х	Х	х	Х	Х	Х
	Cd [-]	х	Х	х	Х	10	Х
	fr [-]	х	х	х	х	1,17	Х
	Masa en vacío [kg]	12000	Х	х	13835	Х	14500
	Rd [m]	0,51	0,51	-	0,51	0,5	Х
	Pendiente superable [%]	х	х	х	х	х	Х
Motor	Тіро	imanes perman entes	imanes permanentes	imanes permanente s	imanes permanente s	imanes permanente s	imanes permanentes
	Potencia [kW]	160	160	180	134	150	160
	Torque [Nm]	400	1400	1400	860	1500	1100
	Eficiencia [%]	Х	х	х	х	х	Х
Baterías	Tipo de batería	Ion litio	Ion-litio	Ion litio	Ion litio	х	Ion-litio
	Energía [kWh]	76	210	376	350	250	Х
	Autonomía [km]	Х	X	220	192	200	Х
Transmisión	Relación de transmisión	х	х	х	х		

# **CAPÍTULO 4**

# MODELO PARA LA EVALUACIÓN DEL TREN DE POTENCIA DE ACUERDO AL CICLO DE TRABAJO

## 4.1 Introducción

En el capítulo anterior se definieron los componentes principales de un bus eléctrico, se mencionaron los parámetros del vehículo que detallan las fichas técnicas y los buses eléctricos que cumplen con la NTE. Sin embargo, para realizar la evaluación completa de la demanda energética de los buses eléctricos es necesario conocer los valores que las fichas técnicas no presentan como el Cd, fr, A, relaciones de transmisión y curvas de torque y potencia y eficiencia de los motores eléctricos. Por este motivo, estos valores fueron extraídos de investigaciones realizadas en buses eléctricos a nivel mundial y de fichas técnicas de motores eléctricos comercialmente disponibles que se detallan en el anexo 1, de esta forma es posible realizar el modelo para determinar la demanda energética en rueda y la energía que se requiere para satisfacer esta demanda en las tres rutas para la ciudad de Cuenca.

### 4.2 Obtención de los parámetros de los buses eléctricos

En este capítulo, se elabora el modelo para la evaluación del consumo energético en un bus eléctrico, para ellos, se considera los valores de entrada como la velocidad del vehículo y el perfil de altitud, que corresponden a los parámetros de operación, luego se definen los parámetros del vehículo y los parámetros ambientales; de esta forma obtenemos la fuerza, el torque, la potencia y la demanda energética en rueda. Posteriormente, se elige la transmisión y diferencial, así como los parámetros de torque potencia y eficiencia del motor eléctrico; quedando de esta forma listo el modelo a través del software Matlab/Simulink, para la evaluación de la energía necesaria para satisfacer la demanda en rueda.

Para la simulación se eligieron dos modelos de buses disponibles en el mercado y que cumplen con la NTE INEN 1668-2205, el primero es el modelo K9 que pertenece a la marca BYD y segundo modelo elegido es el LCK6122EVG que pertenece a la marca Zhong Ton.

#### 4.2.1 Parámetros del vehículo

Los parámetros de los buses se detallan en la tabla 16, los valores de área frontal, Cd y fr se eligieron de acuerdo a la literatura revisada, debido a que estos valores no se consiguieron del fabricante. Por otro lado, los valores de masa, el radio dinámico, número de pasajeros y capacidad de ascenso son especificadas en la ficha técnica.

	BYD	LCK6122EVG
Masa [kg]	13300	13100
Área frontal [m²]	8.5	7.5
Cd [-]	0.79	0.8
fr [-]	0.0098	0.015
Rd [m]	0.5	0.48
N° pasajeros	26	70
Capacidad de ascenso [%]	15	-

Tabla 16. Parámetros utilizados para la simulación de buses eléctricos ("BYD ebus," 2017; Zhong Tong Bus, 2017)

#### 4.2.2 Parámetros ambientales

La simulación se realiza considerando la presión y temperatura para la ciudad de Cuenca y un valor de gravedad de 9,81m/s<sup>2</sup>; datos que fueron presentados en el capítulo 2.

#### 4.2.3 Parámetros de operación

Los parámetros de operación corresponden a los ciclos de conducción y perfil de altitud para las tres líneas en estudio que son la línea 5, línea 7 y troncal 100, especificados en el capítulo 2.

### 4.2.4 Parámetros del motor eléctrico

Los fabricantes de buses eléctricos en sus fichas técnicas indican el valor de potencia y torque máximos del motor, sin embargo, para realizar una evaluación técnica en cuanto al consumo energético se debe conocer la curva de torque, potencia y eficiencia.

(Jun-Qiang et al., 2008), realiza un estudio de la aplicación de cajas automáticas en buses eléctricos, en su trabajo presenta la curva de torque de un motor eléctrico utilizado en el modelo de bus BK6122EV2 que pertenece a la marca Jinghua. Por lo tanto, para desarrollar esta investigación se ha tomado la curva de torque de este motor (figura 46) y se ha trazado la curva de potencia aplicando la fórmula:

$$P = T \cdot w$$
 Ec. 16

Donde:

T= Torque del motor [Nm]

w= velocidad angular [rad/s], tomando en cuenta la transformación de rpm a rad/s.

En la figura 47, se presentan las curvas de potencia y torque para el motor eléctrico que será utilizado para realizar la simulación del modelo de bus eléctrico BYD K9.



Figura 47. Diagrama de torque y potencia motor eléctrico de 850Nm utilizado para la simulación de buses eléctricos (Jun-Qiang et al., 2008)

Para graficar la curva de eficiencia que se presenta en la figura 49, se recopilaron datos de la curva de eficiencia del motor eléctrico YASA-750R (Yasa motors, 2017), debido a que, este motor presenta la curva de eficiencia del fabricante, entonces, para elaborar la gráfica de eficiencia para los motores eléctricos que se utilizaron en la simulación, se elaboró la tabla que se muestra en la figura 48, éstos datos fueron colocados de forma manual tomando como base el motor YASA-750R.

			Torque [Nm]													
		100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	850
	250	64	64	64	63	61	60	58	55	54	52	50	0	0	0	0
	500	78	79	78.5	77	76	75.5	75	73	72	70	67.5	65.5	64	62	0
	750	84	84	84.2	84	83	82	81	79	78	77	76	73	72.5	70	68
	1000	87	87	87.5	87	86.5	86	85	84	83	82	80.5	79	77.5	75	74
	1250	89	89.5	89	88	88.8	88	87.5	86	85.5	84	83.5	82	81	79	78
n	1500	90	90	90.5	90.3	90.2	90	89	88	87.5	86	85.5	84	83	82	80
d	1750	90.5	91	91.5	91	91	90.1	90.2	89	88.5	87	87	86	85	83	82
R	2000	91	92	92.25	92.1	91.9	91.8	90.9	90	89.8	89	88.2	87	86.2	0	0
	2250	91.5	92	92.75	92.5	92.3	92	91.5	92	90.5	90	89	88	0	0	0
	2500	92	92.5	93.2	93	92.9	92.5	92.2	92	91	90	89.7	0	0	0	0
	2750	92.2	92.7	93.7	93.5	93.2	93	92.5	92	91.5	91	0	0	0	0	0
	3000	92.3	93	94	94	93.8	93	92.8	92	91.8	0	0	0	0	0	0
	3250	92.6	93	94.1	94.3	94.5	94	93	92	0	0	0	0	0	0	0

Figura 48. Valores de la curva de eficiencia para el motor eléctrico de 850Nm (Wang et al., 2016; Yasa motors, 2017)



Figura 49. Curva de eficiencia motor eléctrico de 850 Nm utilizado para la simulación de buses eléctricos

Por otro lado, para simular el motor que utiliza el bus eléctrico modelo LCK6122EVG de la marca Zhong Ton, hemos utilizado la curva de torque del motor LSM110C-HV1500 de la marca TM4 sumo ("SUMO MD - TM4," 2016), trazando la curva de potencia y eficiencia de la misma manera que se mencionó en el apartado anterior y se presenta en las figuras 50, 51 y 52.



Figura 50. Diagrama de torque y potencia motor eléctrico 1500Nm utilizado para la simulación de buses eléctricos ("SUMO MD - TM4," 2016)

			Torque [Nm]													
		100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000	1100	1200	1300	1400	1500
	250	64	64	64	63	61	60	58	55	54	52	50	50	50	0	0
	500	78	79	78.5	77	76	75.5	75	73	72	70	67.5	65.5	65.6	65.7	0
	750	84	84	84.2	84	83	82	81	79	78	77	76	73	72.5	70	68
	1000	87	87	87.5	87	86.5	86	85	84	83	82	80.5	79	77.5	75	74
	1250	89	89.5	89	88	88.8	88	87.5	86	85.5	84	83.5	0	0	0	0
u	1500	90	90	90.5	90.3	90.2	90	89	88	87.5	86	0	0	0	0	0
Id	1750	90.5	91	91.5	91	91	90.1	90.2	89	88.5	0	0	0	0	0	0
R	2000	91	92	92.25	92.1	91.9	91.8	90.9	90	0	0	0	0	0	0	0
	2250	91.5	92	92.75	92.5	92.3	92	91.5	0	0	0	0	0	0	0	0
	2500	92	92.5	93.2	93	92.9	92.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2750	92.2	92.7	93.7	93.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3000	92.3	93	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	3250	92.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Figura 51 Valores de la curva de eficiencia para el motor eléctrico de 1500Nm



Figura 52. Curva de eficiencia motor eléctrico de 1500 Nm utilizado para la simulación de buses eléctricos

#### 4.2.5 Parámetros de la transmisión y diferencial

En la investigación se evidenció que los fabricantes de buses eléctricos no dan a conocer el tipo de caja de cambios ni el diferencial, ni tampoco las relaciones de transmisión, además, no existe evidencia de cual sea la caja de cambios más adecuada para buses eléctricos; sin embargo, los autores (Jun-Qiang et al., 2008; Wang et al., 2016) sostienen que una caja de tres velocidades automática disminuye el consumo energético, por lo tanto, este será es el tipo de transmisión que se utiliza en la simulación con los datos que se muestra en la tabla 17.

Aplicando la misma metodología descrita en el capítulo 2 se muestra el diagrama de cubrimiento con el motor eléctrico de 850Nm y de 1500Nm en la figura 53 y 54 respectivamente.

Tabla 17. Caja de cambios y diferencial	l utilizados para la simulación de buses eléctricos
(Jun-Qiang et al.	., 2008; Wang et al., 2016)

Marcha	Relación de transmisión
1ª	4,403
2ª	2.446
3ª	1.507
Final	6.63



Figura 53. Diagrama de cubrimiento motor de 850Nm utilizado para la simulación de buses eléctricos



Figura 54. Diagrama de cubrimiento motor de 1500Nm utilizado para la simulación de buses eléctricos

# 4.3 Elaboración del modelo

El modelo es el mismo detallado en el capítulo 2, ya que el mismo permite el ingreso de datos de cualquier vehículo, con la diferencia que este modelo se considera la curva de eficiencia del motor eléctrico para determinar la energía requerida (figura 55).

El requerimiento de energía puede ser calculada de acuerdo a la siguiente ecuación (Lajunen, 2017):

$$P_{b\_salida} = \frac{w_m T_r}{\eta_m} + P_{aux}$$
 Ec. 17

Donde

Pb\_salida es la potencia de salida del motor eléctrico [kW].

w<sub>m</sub> es la velocidad angular del motor eléctrico [rad/s].

Tr es el torque requerido en el motor eléctrico [Nm]

 $\eta_m$  es la curva de eficiencia del motor eléctrico [-]

P<sub>aux</sub> es la demanda de potencia auxiliar [kW]

En esta investigación se consideró una potencia auxilar de 6kW, este valor fue tomado del trabajo desarrollado por (Lajunen, 2017), el consumo de energía de la batería es la suma de la  $P_{b_salida}$  y las pérdidas internas de la batería  $P_{b_perdidas}$ , sin embargo, en esta investigación no se consideran las pérdidas internas de la batería ni la regeneración de

energía, quedando de esta forma listo el modelo de simulación para buses eléctricos (figura 56).



Figura 55. Diagrama interno del bloque denominado "torque y potencia del motor" del bus eléctrico



Figura 56. Diagrama de bloques para la evaluación de la demanda energética en buses eléctricos

# **CAPITULO 5**

# EVALUACIÓN DE LAS DISTINTAS CONFIGURACIONES DE BUSES ELÉCTRICOS, EN LAS CONDICIONES DE OPERACIÓN DE LAS TRES RUTAS

# 5.1 Introducción

Una vez que se ha elaborado el modelo para la evaluación de la demanda energética en rueda y para evaluar la energía requerida, el siguiente paso es definir los escenarios de simulación, para ello, se realizó una lista de diez modelos de buses eléctricos disponibles en el mercado, de éstos modelos se escogieron dos modelos de buses, éstos corresponden a las marcas BYD y Zhong Ton, donde se evaluará de igual forma la fuerza, torque, potencia, demanda energética en rueda y la energía requerida para satisfacer dicha demanda energética, para las tres rutas seleccionadas.

### 5.2 Análisis estadístico para cada ruta seleccionada

Una vez elaborado el modelo, considerando los parámetros del vehículo, parámetros ambientales, parámetros de operación, parámetros de la transmisión y curvas de torque, potencia y eficiencia del motor eléctrico, se procedió a elaborar dos escenarios de simulación de buses eléctricos; el primero, corresponde a la marca BYD y el segundo a la marca Zhong Tong, la simulación se realiza considerando tres tipos de carga de pasajeros (vacía, media y plena carga), debido a que la masa, al igual que el perfil de altitud son las variables que más influyen en el consumo energético.

#### 5.2.1 Escenario 1

En la tabla 17 se describen las características técnicas de modelo de bus BYD K9, sin embargo, para la simulación hay que considerar que los parámetros marcados con (\*), como ya se indicó en el capítulo anterior se han adaptado al modelo, debido a que, los fabricantes no detallan estos valores en sus fichas técnicas y sin éstos no se podría realizar una valoración energética.

Con esta base, se procede a calcular la fuerza, torque en rueda, potencia y torque máximos en ruta y finalmente la energía requerida para satisfacer la demanda energética en rueda en las tres rutas seleccionadas, considerando la curva de torque, potencia y

eficiencia del motor eléctrico; en este estudio se consideró una potencia auxiliar de 6kW según describe en sus estudios (Lajunen, 2017).

Bus eléctrico BYD K9								
	Masa [kg]	13300, 14210, 15120						
	Área frontal * [m <sup>2</sup> ]	8.5						
Parámetros del vehículo	Cd * [-]	0.79						
	fr * [-]	0.0098						
	Capacidad de pasajeros	26						
	Rd [m]	0.5						
Parámetros de operación	Ciclo de conducción	Línea 5, línea 7 y línea 100						
	Perfil de altitud	Línea 5, línea 7 y línea 100						
Parámetros ambientales	Presión [Pa]	68560						
	Temperatura [°C]	16.05						
Parámetros de la transmisión *	primera	4.403						
	segunda	2.446						
	tercera	1.507						
	Diferencial	6.83						
Parámetros del motor *	Torque [Nm]	850						
	Potencia [kW]	155						

Tabla 18. Parámetros utilizados para la simulación del modelo de bus eléctrico – Escenario 1



Figura 57. Diagramas de torque, potencia y eficiencia utilizados en la simulación del bus eléctrico – Escenario 1

#### 5.2.1.1 Obtención de la fuerza, potencia, torque y demanda energética

Los mayores requerimientos son para la línea 7, debido a que es la ruta más larga y la vía presenta curvas sinuosas y pendientes superables del 25%, estos valores se presentan en la tabla 18.

	r						I		
	Línea 5			Línea 7		Línea 100			
	Vacío	Media	Full	Vacío	Media	Full	Vacío	Media	Full
Fuerza en rueda [N]	21665	23145	24625	33927	36246	38565	22897	24453	26009
Torque en rueda [Nm]	10632	11572	12312	16964	18123	19282	11448	12226	13004
Potencia en rueda [kW]	170	181	192	211	224	239	176	188	200
Demanda energética [kWh]	33.5	35.8	38	53	56.5	60	49.2	52.5	55.7
Energía requerida [kWh]	51.4	54.2	57	79.1	83.5	87.9	73.9	78.1	82.2
N° de viajes diarios	6	6	6	6	6	6	6	6	6
Energía requerida diaria [kWh]	308.4	325.2	342	474.6	501	538.2	443.4	468.6	493.2

Tabla 19. Fuerza, torque, potencia y demanda energética para las tres líneas de buses – Escenario 1 (el autor)

Por lo tanto, la energía requerida para cumplir un día de trabajo, para las tres líneas considerando el escenario de plena carga de pasajeros varía entre 342kWh – 538.2kWh; la capacidad energética de la batería del BYD es de 342kWh, por lo que según este análisis solo se puede cumplir con un día de trabajo sin interrupciones en la línea 5, para las otras líneas se necesitan realizar recargas en las baterías para cumplir el día de trabajo.

#### 5.2.1.2 Potencia y torque máximos en ruta

En la figura 58, se muestra con color rojo la curva de torque y potencia del motor eléctrico para el bus eléctrico BYD, mientras que los puntos de color azul muestran la potencia y torque máximo en la ruta; se observa que existen tramos de la ruta que no satisface la curva de torque y potencia; por lo tanto, este motor no es adecuado para las exigencias de esta ruta.


Figura 58. Potencia y torque máximos en la ruta motor de 850Nm - Escenario 1

Por el motivo citado anteriormente, se procede a la elección de un nuevo motor eléctrico disponible en el mercado; éste motor posee un torque 2100Nm y una potencia de 229kW y como se observa en la figura 5, este motor satisface la ruta.

Entonces de acuerdo al escenario planteado, para satisfacer las rutas en la ciudad de Cuenca se debe utilizar un motor con las características que se muestra en la figura 59.



Figura 59. Potencia y torque máximos en la ruta motor de 2100Nm - Escenario 1

#### 5.2.2 Escenario 2

En la tabla 19 se describen las características técnicas de modelo de bus Zhong Ton LCK6122EVG, sin embargo, para la simulación hay que considerar que los parámetros marcados con (\*), se han adaptado al modelo de bus debido a que los fabricantes no indican estos valores en sus fichas técnicas y sin estos no se podría realizar una valoración energética.

Considerando los valores más cercanos a los que el fabricante manifiesta, se procede a calcular la fuerza y torque en rueda, potencia y torque máximos en ruta y finalmente la energía requerida para satisfacer dicha demanda en las tres rutas seleccionadas; este modelo de bus aumenta su masa ya que puede cargar hasta 70 pasajeros; en la figura 69 se muestra las curvas de torque, potencia y eficiencia utilizados para realizar la simulación de este bus eléctrico.

Bus eléctrico Zhong Ton LCK6122EVG								
	Masa [kg]	13100, 15500, 18000						
	Área frontal * [m <sup>2</sup> ]	7.5						
Parámetros del vehículo	Cd * [-]	0.8						
	fr * [-]	0.015						
	Capacidad de pasajeros	70						
	Rd [m]	0.48						
Parámetros de operación	Ciclo de conducción	Línea 5, línea 7 y línea 100						
	Perfil de altitud	Línea 5, línea 7 y línea 100						
Parámetros ambientales	Presión [Pa]	68560						
	Temperatura [°C]	16.05						
Parámetros de la transmisión *	primera	4.403						
	segunda	2.446						
	tercera	1.507						
	Diferencial	6.83						
Parámetros del motor *	Torque [Nm]	1500						
	Potencia [kW]	164						

Tabla 20. Parámetros utilizados para la simulación del modelo de bus eléctrico – Escenario 2



Figura 60 Diagrama de torque, potencia y eficiencia utilizados en la simulación del bus eléctrico – Escenario 2

#### 5.2.2.1 Obtención de la fuerza, potencia, torque y demanda energética

De igual forma que en el escenario 1, el mayor requerimiento se presenta en la línea 7, debido a que es la ruta más larga y la vía presenta curvas sinuosas y pendientes superables del 25%, estos valores se presentan en la tabla 20.

	Línea 5				Línea 7		Línea 100			
	Vacío	Media	Full	Vacío	Media	Full	Vacío	Media	Full	
Fuerza en rueda [N]	22002	26112	30222	34065	40429	46793	23203	27516	31829	
Torque en rueda [Nm]	10561	12534	14506	16351	19406	22461	11137	13208	15278	
Potencia en rueda [kW]	175	207	239	213	252	292	179	212	245	
Demanda energética por viaje [kWh]	36.4	43	49.7	57.1	67.5	77.8	53.2	62.9	72.5	
Energía requerida [kWh]	55.7	64.4	73.2	85.5	99.1	113.1	79.7	92.4	105.3	
N° de viajes diarios	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
Energía diaria requerida [kWh]	334.2	386.4	439.2	513	594.6	678.6	478.2	554.6	631.8	

Tabla 21. Fuerza, torque, potencia y demanda energética para las tres líneas de buses – Escenario 2

Por lo tanto, en este escenario planteado, la energía requerida para cumplir un día de trabajo, para las tres líneas considerando el escenario de plena carga de pasajeros varía

entre 439.2kWh – 678.6kWh, en este escenario la energía requerida aumenta debido al incremento del número de pasajeros; la capacidad energética de la batería del bus Zhong Ton según el fabricante es de 240kWh, por lo que según este análisis en las tres rutas seleccionadas, no se puede cumplir con un día de trabajo sin la necesidad de una recarga en la batería.

#### 5.2.2.2 Potencia del motor vs potencia en ruta

En la figura 61, se muestra con color rojo la curva de torque y potencia del motor eléctrico adaptado para el bus eléctrico Zhong Ton, mientras que los puntos de color azul muestran la potencia y torque según las exigencias de la ruta; se observa que existen algunos tramos de la ruta que no satisface la curva de torque y potencia; por lo tanto, este motor tampoco se adecúa a las exigencias de las tres rutas.



Figura 61. Potencia y torque máximos en la ruta motor de 1500Nm - Escenario 2

El motor que satisface está ruta, corresponde a un motor de la marca TM4 SUMO (TM4 SUMO, 2017) cuyas características se detallan en la figura 62, éste motor se encuentra disponible en el mercado y será utilizado para realizar la simulación con los parámetros correspondientes al bus Zhong Ton;

Motor eléc	trico	200 - ep 150 - to - to -
Torque [Nm]	1500	0 0 500 1000 1500 2000 2500
Potencia [kW]	164	Torque motor vs torque en ruta
·		g 2000
		€ 1000 500
		0 500 1000 1500 2000 2500

Potencia motor vs potencia en ruta Curva de potencia motor

Figura 62. Potencia y torque máximos en la ruta motor de 2200Nm - Escenario 2

#### 5.2.3 Prueba de arrancabilidad en pendiente

Como se mencionó en el capítulo 1, los buses deben cumplir con la NTE 1668 que corresponde a la prueba de arranque en pendiente, la misma menciona que la pendiente de la zona de ensayo debe ser como mínimo del 25%, el vehículo debe estar cargado a su máximo peso bruto vehicular.

En un intervalo de un minuto, la prueba debe permitirle al vehículo la capacidad de arrancar y desplazarse de forma ascendente, partiendo del vehículo detenido hasta conseguir estabilidad en su velocidad (NTE INEN, 2015).

La capacidad de aceleración es el tiempo que tarda un vehículo en acelerar desde cero hasta determinada velocidad y se define por la siguiente ecuación:

$$a = \frac{\frac{\tau_e N_{td} \eta_{td}}{r_d} - R_x - F_d - R_g}{Mmf} \qquad \text{Ec. 18}$$

Donde:

T<sub>e</sub>, es el torque del motor [Nm].

Ntd, es la relación final de transmisión [-].

 $\eta_{td}$  es la eficiencia de la caja de cambios [-].

R<sub>d</sub>, es el radio dinámico [m].

R<sub>x</sub>, es la fuerza de resistencia a la rodadura [N].

F<sub>d</sub>, es la fuerza de resistencia al arrastre [N].

R<sub>g</sub>, es la fuerza de resistencia a la inercia [N].

Mmf, es la masa [-].

Los resultados se muestran en la figura 62, en donde, la línea con color azul, muestra la prueba realizada para el escenario 1 con el motor de 2100Nm y la curva de color rojo muestra la prueba realizada para el escenario 2 para con el motor de 2200Nm, ambos escenarios superan la pendiente del 25%.



Figura 63. Simulación de la prueba de aceleración en pendiente – escenario 1 y escenario 2

#### 5.2.4 Prueba de aceleración en plano

Por otra parte, el ensayo de aceleración en plano consiste en determinar la capacidad de aceleración del vehículo, en el cual, la NTE 1668 (NTE INEN, 2015) especifica que el tren motriz debe tener la potencia, torque y relación de transmisión necesarias que permita alcanzar una velocidad mínima de 40km/h, partiendo del reposo y en una superficie plana en un lapso de 22.5 segundos; para realizar esta prueba el vehículo debe estar cargado a peso bruto vehicular.

En la figura 63, se muestra que ambos buses cumplen con la prueba de aceleración, por un lado, la curva de color azul representa al escenario 1 con un motor de 2100Nm y

la curva de color rojo representa al escenario 2 con un motor de 2200Nm, ambos motores alcanzan una velocidad de 62.5km/h.



Figura 64. Simulación de la prueba de aceleración en plano – escenario 1 y escenario 2

## **CAPITULO 6**

### **CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS**

#### 6.1 Conclusiones

De acuerdo a la demanda energética en buses actuales:

Para los tres escenarios de carga de pasajeros (0, 35 y 70 pasajeros), la demanda energética en las rutas de acuerdo a las características de los buses urbanos diésel varía entre 23.5kWh - 55.9kWh, la mayor cantidad de energía se requiere en la línea 7, debido a que presenta una pendiente del 25% y por la estructura sinuosa que presenta esta vía a los largo de su recorrido.

De acuerdo a las configuraciones de buses eléctricos:

Los parámetros de buses eléctricos que se compararon según la Norma Técnica Ecuatoriana INEN 1668 y 2205, son las dimensiones (largo, ancho, alto), la capacidad de pasajeros y la pendiente superable; de acuerdo a la literatura revisada únicamente el modelo New Flyer Xcelsior no cumple con los requisitos de altura y según la ficha técnica los buses eléctricos algunos no superan una pendiente del 18%.

De acuerdo a la elaboración del modelo del tren de potencia:

Para la elaboración del modelo se utilizó el software Matlab/Simulink, la herramienta de simulación, permite colocar en primer lugar cualquier ciclo de conducción y perfil de altitud (figura 65).



Figura 65. Ingreso del ciclo de conducción y perfil de altitud en el modelo de simulación

Además, permite colocar los parámetros del vehículo tal como se muestra en la figura 66.



Figura 66. Ingreso de los parámetros del vehículo en el modelo de simulación

Y finalmente, permite el ingreso de las relaciones de transmisión de la caja de cambios y diferencial como se muestra en la figura 67.



Figura 67. Ingreso de las relaciones de transmisión en el modelo de simulación

De acuerdo a las distintas configuraciones de buses eléctricos:

Se plantearon dos escenarios de buses eléctricos, el primero representa a la marca BYD y el segundo a la marca Zhong Ton; considerando que, los valores de área frontal, cd y fr, parámetros de la transmisión y curvas de torque, potencia y eficiencia, se eligieron de acuerdo a la literatura revisada, debido a que estos valores el fabricante no especifica en su ficha técnica.

En la tabla 21 se muestra la demanda y consumo de energía para el escenario 1, la energía necesaria en rueda varía entre 38kWh - 60kWh entre la línea 5 y la línea 7 considerando una plena carga de pasajeros; para cubrir esta demanda, se necesita una energía entre 57kWh - 87.9kWh para realizar un viaje de ida y vuelta. Normalmente, en estas rutas se realizan seis viajes en un día de trabajo, por lo que, la energía requerida varía entre 342kWh - 538.2kWh para cubrir el día de trabajo. La capacidad energética de la batería del bus eléctrico BYD es de 342kWh según las especificaciones del fabricante, por lo que se podría cumplir con un día de trabajo para la línea 5, mientras que, para culminar un día de trabajo en los otros recorridos se requieren realizar recargas.

	Línea 5				Línea 7		Línea 100			
	Vacío	Media	Full	Vacío	Media	Full	Vacío	Media	Full	
Demanda energética por viaje [kWh]	33.5	35.8	38	53	56.5	60	49.2	52.5	55.7	
Energía requerida por viaje [kWh]	51.4	54.2	57	79.1	83.5	87.9	73.9	78.1	82.2	
N° de viajes diarios	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
demanda energética diaria [kWh]	201	214.8	228	318	339	360	295.2	315	334.2	
Energía requerida diaria [kWh]	308.4	325.2	342	474.6	501	538.2	443.4	468.6	493.2	

Tabla 22. Demanda y consumo energético – Escenario 1

Para el escenario 2 (tabla 22), en cambio la demanda energética varía de 49.7kWh - 77.8kWh, y para cubrir esta demanda, la energía requerida varía entre 73.2kWh - 113.1kWh considerando el escenario a plena carga de pasajeros. Tomando en cuenta los mismos seis viajes al día, el autobús necesita una batería con una capacidad entre 439.2kWh - 679kWh para cubrir un día de trabajo; la capacidad energética del bus

eléctrico Zhong Ton según la ficha técnica es de 240kWh, por lo que, se necesitan realizar recargas en el autobús para cumplir con un día de trabajo.

	Línea 5			Línea 7			Línea 100			
	Vacío	Media	Full	Vacío	Media	Full	Vacío	Media	Full	
Demanda energética por viaje [kWh]	36.4	43	49.7	57.1	67.5	77.8	53.2	62.9	72.5	
Energía requerida por viaje [kWh]	55.7	64.4	73.2	85.5	99.1	113.1	79.7	92.4	105.3	
N° de viajes diarios	6	6	6	6	6	6	6	6	6	
Demanda energética diaria [kWh]	218.4	258	298.2	342.6	405	466.8	319.2	377.4	435	
Energía diaria requerida [kWh]	334.2	386.4	439.2	513	594.6	678.6	478.2	554.6	631.8	

Tabla 23 Demanda y consumo energético – Escenario 2

Para satisfacer las tres rutas en cuanto a potencia y torque máximos en la ruta es necesario que estos motores tengan un torque de 2100Nm y una potencia de 229kW para el caso del BYD y un motor con un torque de 2200Nm y una potencia de 229kW para el bus Zhong Ton; de esta manera los buses podrían circular en toda la ruta considerando la plena carga de pasajeros.

La simulación de la aceleración en pendiente se realizó en Matlab/Simulink, y los resultados fueron que los dos buses superan la pendiente del 25%; en cuanto a la prueba de aceleración en plano los dos modelos también cumplen con la NTE, debido que el modelo BYD acelera de 0 a 47.3km/h en 22.5s, y el modelo Zhong Ton acelera de 0 a 46km/h en el mismo tiempo; la norma establece que el tren motriz debe permitir alcanzar una velocidad mínima de 40km/h.

### 6.2 Trabajos futuros

Validar el modelo con un bus eléctrico real con pruebas realizadas en carretera y comparar con los valores encontrados en este trabajo.

Evaluar los requerimientos de carga de buses eléctricos con diferentes métodos (conductiva e inductiva), para cumplir un viaje o para satisfacer un día de trabajo.

Evaluar el impacto en la red eléctrica con la implementación de una línea de bus eléctrico en la ciudad de Cuenca.

# ANEXOS

	I											
	Fichas técnicas											
	Marca	Anaki	Yutong	Zhong Ton	BYD	Volvo	Solaris	Irizar	New Flyer			
	Modelo	HFF6120G03 EV	E12	LCK6122EVG	К9	7900	Ubino electric	I2e	Xcelsior			
	Procedencia	China	China	China	China	Suecia	Polonia	Española	Canadá			
. 35	Región	Asia	Asia	Asia	Asia	Europa	Europa	Europa	América			
acteristic	Largo [mm]	12000	12000	11990	12000	12000	12000	11980	12240			
Care	Ancho [mm]	2500	2550	2540	2550	2550	2550	2550	2550			
	Alto [mm]	3150	3340	3280	3260	3280	3395	3209	3680			
	Velocidad máxima [km/h]	70	100	69	70	80	80	x	70			
	N° de pasajeros	40	75	70	25	82	87	82	83			
	Área frontal [m²]	x	х	x	x	x	x	x	x			
1	Cd [-]	х	х	х	х	х	х	х	х			
*105	fr [-]	х	х	х	х	х	х	х	х			
Paramet	Masa en vacío [kg]	13500	12500	11750	13300	12000	x	x	13835			
	Rd [m]	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	-	0,51			
1	Pendiente	×	×	У	15	×	×	18	v			
	superable [%]	^	^	^	15	^	^	10	^			
		Síncrono	Síncrono	Síncrono		Síncrono	Síncrono	Síncrono	Síncrono			
	Tipo de motor	imanes	imanes	imanes	Inducción	imanes	imanes	imanes	imanes			
* O <sup>t</sup>		permanentes	permanentes	permanentes		permanentes	permanentes	permanentes	permanentes			
Mor	Potencia [kW]	291	200	160	180	160	160	180	134			
	Torque [Nm]	2040	2400	1000	700	400	1400	1400	860			
	Eficiencia [%]	x	x	x	х	x	х	x	x			
	Tipo de batería	Ion litio	Ion litio	Ion litio	Hierro	Ion litio	Ion-litio	Ion litio	Ion litio			
	Energía [kWh]	x	295	230	324	76	210	376	350			
	Autonomía [km]	x	320	240	250	x	х	220	192			
	Voltaje [V]	624	563	540	400	х	х	x	x			
terio	Capacidad [Ah]	480	300	240	600	-	х	x	x			
80	Eficiencia [%]	х	x	x	х	x	x	x	x			
	Corriente de carga [A]	x	x	x	x	x	x	x	x			
1	Corriente de	Y	Y	Y	×	Y	Y	v	v			
	descarga [A]	^	*	^	^	^	^	^	^			
	N° de módulos	х	x	x	х	х	х	х	x			
	Tipo de transmisión	x	x	x	x	x	x	x	Allison			
Transmisión	Relación de transmisión	x	x	x	x	x	x	x	x			
	Eficiencia [%]	x	x	x	x	x	x	x	x			
که که	Voltaje [V]	х	х	х	х	х	х	х	х			
Noto, willa.	Potencia [kW]	x	x	x	x	x	x	x	x			
× 3 <sup>v</sup>	Torque [Nm]	x	x	x	x	x	x	x	x			
. o <sup>t</sup>	Voltaje [V]	x	x	x	x	x	x	x	x			
Inverse	Corriente máxima [A]	x	х	x	x	x	x	x	x			
	Potencia [kW]	х	х	х	х	х	х	х	х			
1830L	Voltaje [V]	х	х	х	х	х	х	х	х			
Car	Eficiencia [%]	x	x	x	x	x	x	x	x			

# 7.1 Parámetros de buses eléctricos según fichas técnicas

	Literatura										
	(Kim, Song, & Choi, 2015)	(Gao et al., 2017)	(Perrotta et al., 2014)	(Erkkilä et al., 2013)	(Lajunen, 2012)	(Halmeaho, Rahkola, & Tammi, 2015)	(Zhang, Xiong, Zhang, & Sun, 2016)	(Jun-Qiang, Guang- Ming, & Yan, 2008)	(Wang, Hou, Yu, & Lin, 2016)		
	n/d	n/d	Caetanobus	Caetanobus	n/d	n/d	n/d	JingHua	n/d		
	x	Optima LF-34	E.Cobus	E.Cobus	x	x	x	BK6122EV2	x		
Caracteristicas	x	x	Portugal	x	x	x	x	x	x		
	Asia	х	Europa	х	х	x	х	х	х		
	11055	x	11995	x	x	x	x	11850	x		
	2485	х	2500	х	х	х	x	2540	х		
	3490	х	3058	х	х	х	х	3300	х		
	x	x	70	x	x	x	x	x	x		
	50	х	35	х	x	x	x	50	х		
	x	8,5	10	x	6,2	6,2	7,5	x	x		
	x	0,79	1,17	х	0,6	0,5	0,8	х	х		
etros	х	0,0098	x	х	0,01	0,008	0,015	x	х		
Param	11550	10437	х	x	8500	12345	x	14500	x		
	x	x	0,5	x	x	x	0,48	x	x		
	x	x	х	x	x	x	x	x	x		
Not	Síncrono imanes permanentes	x	Síncrono imanes permanentes	Síncrono imanes permanentes	x	x	x	Síncrono imanes permanentes	x		
NO.	120	х	150	х	138-109-69		60/120	160	180-150		
	430	x	1500	x	1091	1100	х	1100	2900-850		
	X	98	x	X	х	х	х	х	х		
	litio	x	x	fosfato	Ion-litio	x	x	Ion-litio	x		
	48,62	X	250	56	x	56	x	x	X		
	X 650	X	200	X 614.4	X 614.4	X 614.4	X	X 200	x		
etias	80	x	×	280	280	280	x	360	x		
Bat	x	98	x	x	x	x	x	x	x		
	160	x	x	x	x	90@125A	x	×	x		
	400	x	x	x	x	180@270A	x	x	x		
	x	x	x	х	24	x	x	х	х		
	x	x	x	x	x	x	x	4A110	x		
Transmisión	x	x	Primera: 3,5 Segunda: 1,75 Diferencial: 8,83	x	Primera: 3,5 Segunda: 1,75	Primera: 3,5 Segunda: 1,75	Primera: 3,5 Segunda: 1,75	Primera: 4,403 Segunda: 2,446 Tercera: 1,507	Primera: 4,403 Segunda: 2,446 Tercera: 1,507		
	x	98	x	x	x	x	x	x	x		
لاهر بد	450-650	х	х	х	x	x	x	х	х		
Motoruxilie	20	х	х	x	2,5	x	x	x	x		
	120@90A	x	х	x	х	x	x	x	x		
nuersor	300-750	×	×	× 24	×	×	×	×	×		
<b>N</b>	~~~~	90_490	150								
ador	×	600-750	× 130	×	×	×	x	×	×		
Care	x	97	x	x	x	x	x	x	x		

## 7.2 Parámetros de los buses eléctricos según la literatura revisada

## **BIBLIOGRAFÍA**

Asín, J. (2012). Infraestructura de Recarga para Vehículos Eléctricos.

- Astudillo Bravo, R. (2016). Obtención de ciclos de conducción para la flota de buses urbanos del cantón Cuenca.
- Benz, M., Gürges, K., & Borufka, S. (2015). Techview Report Electric Buses, 45.
- Busworld academy. (2016). Strategic Analysis of Global Hybrid and Electric Heavy-Duty Transit Bus Market.
- BYD. (2017). BYD.
- BYD ebus. (2017).
- Cengel, Y., & Boles, M. (2012). Termodinámica. (Mcgraw Hill, Ed.) (Séptima). México.
- Cordero, D. (2015). Metodología para minimizar el consumo de combustible en autobuses, que sirven rutas fijas, mediante la reconfiguración del tren motriz.
- Erkkilä, K., Nylund, N., Pellikka, A., Kallio, M., Kallonen, S., Kallio, M., ... Lajunen, A. (2013). eBUS Electric bus test platform in Finland, 1–10.
- Eshani, M., Gao, Y., Gay, S., & Emadi, A. (2010). Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles 2nd. Edition. Fundamentals, Theory, and Design. Boca Raton, .... https://doi.org/10.1201/9781420037739
- Filippo, G. De, Marano, V., & Sioshansi, R. (2014). Simulation of an electric transportation system at The Ohio State. *Applied Energy*, *113*, 1686–1691. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.09.011
- Gao, Z., Lin, Z., Laclair, T. J., Liu, C., Li, J., Birky, A. K., & Ward, J. (2017). Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service. *Energy*, *122*, 588–600. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.101
- Global Green Growth Institute. (2015). Electric Buses in India : Technology, Policy and Benefits. *Electric Buses in India: Technology, Policy and Benefits, GGGI, Seoul, Republic of Korea*.
- Göhlich, D., Kunith, A., & Ly, T. (2014). Technology assessment of an electric urban bus system for Berlin, *138*, 137–149. https://doi.org/10.2495/UT140121
- Halmeaho, T., Rahkola, P., & Tammi, K. (2015). Electric City Bus Energy Flow Model and Its Validation by Dynamometer Test.
- Halmeaho, T., Rahkola, P., Tammi, K., Pippuri, J., Pellikka, A.-P., Manninen, A., & Ruotsalainen, S. (2017). Experimental validation of electric bus powertrain model under city driving cycles. *IET Electrical Systems in Transportation*, 7(1), 74–83. https://doi.org/10.1049/iet-est.2016.0028
- Ilustre Municipalidad de Cuenca. (2015). *Plan de movilidad de cuenca 2015-2025. Ilustre Municipalidad de Cuenca*. Cuenca.

- INAMHI. (2016). *Boletin Climatologico Anual 2015*. Retrieved from http://www.serviciometeorologico.gob.ec/clima/
- International Energy Agency. (2014). World Energy Outlook 2015. Electronics and Power (Vol. 23). https://doi.org/10.1049/ep.1977.0180

Irizar. (2017). Autobuses eléctricos irizar.

- JAC ANHUI ANKAI AUTOMOBILE CO., L. (2017). AnkaiBus\_Catalog.
- Jun-Qiang, X., Guang-Ming, X., & Yan, Z. (2008). Application of automatic manual transmission technology in pure electric bus. 2008 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference, VPPC 2008, 5–8. https://doi.org/10.1109/VPPC.2008.4677583
- Kim, J., Song, I., & Choi, W. (2015). An Electric Bus with a Battery Exchange System, 6806–6819. https://doi.org/10.3390/en8076806
- Kumar, L., & Jain, S. (2014). Electric propulsion system for electric vehicular technology: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 29, 924–940. https://doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.014
- Lajunen, A. (2012a). Evaluation of battery requirements for hybrid and electric city buses. *World Electric Vehicle Journal*, *5*, 340–349.
- Lajunen, A. (2012b). EVS26 Evaluation of battery requirements for hybrid and electric city buses, *5*, 340–349.
- Lajunen, A. (2012c). Powertrain Design Alternatives for Electric City Bus.
- Lajunen, A. (2014). Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses. *TRANSPORTATION RESEARCH PART C*, 38, 1–15. https://doi.org/10.1016/j.trc.2013.10.008
- Lajunen, A. (2017). Lifecycle costs and charging requirements of electric buses with different charging methods. *Journal of Cleaner Production*. https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.10.066
- Lajunen, A., & Lipman, T. (2016). Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel, natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses. *Energy*, 106, 329–342. https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.03.075
- Laurikko, J., Pihlatie, M., Nylund, N., Halmeaho, T., Kukkonen, S., Lehtinen, A., ... Ahtiainen, S. (2015). Electric city bus and infrastructure demonstration environment in Espoo, Finland, 1–11.
- Lindgren, L. (2015). Full electrification of Lund city bus traffic.
- Maeso, E., González, G., & Pérez, P. (2012). Combustibles y Sistemas de Propulsión en el Transporte Público Urbano en Autobús. 6th International Conference on Industrial Engineering and Industrial Management, 734–741.

Mercedes Benz. (2012). Ficha técnica modelo OF-1721.

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

- Ministerio Coordinador de Sectores Estratégicos. (2015). *Balance Energético Nacional*. Quito. Retrieved from http://www.sectoresestrategicos.gob.ec/wpcontent/uploads/downloads/2016/01/Balance-Energético-Nacional-2015.pdf
- Mohamed, M., Farag, H., El-taweel, N., & Ferguson, M. (2017). Simulation of electric buses on a full transit network : Operational feasibility and grid impact analysis. *Electric Power Systems Research*, 142, 163–175. https://doi.org/10.1016/j.epsr.2016.09.032
- New Flyer. (2017). Autobuses eléctricos New Flyer.
- NTE INEN. Vehículos Automotores. Bus Urbano. Requisitos., 1 Nte Inen 2 205:2010 § (2010). Retrieved from http://www.usfq.edu.ec/sobre\_la\_usfq/servicios/autoclub/Documents/descargas/IN EN-NormaTecnicaBusUrbano.pdf

NTE INEN. (2015). Norma técnica ecuatoriana NTE INEN 1668.

- Perez, A. (n.d.). Nomenclatura de un neumático.
- Perrotta, D., Luís, J., Rossetti, R. J. F., De, J. F., Kokkinogenis, Z., Ribeiro, B., & Afonso, J. L. (2014). Route planning for electric buses : a case study in Oporto. *Procedia -Social and Behavioral Sciences*, *111*, 1004–1014. https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2014.01.135
- Riba, J. R., López-Torres, C., Romeral, L., & Garcia, A. (2016). Rare-earth-free propulsion motors for electric vehicles: A technology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 57, 367–379. https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.121
- Seijo, M. B. (2006). Del tren al autobús: la modernización del transporte público en España en la década del desarrollismo. *IV Congreso Historia Ferroviaria*, 1–23.
- Solaris. (2017). Autobuses eléctricos Solaris.
- Suh, B., Chang, Y. H., Han, S. B., & Chung, Y. J. (2012). SIMULATION OF A POWERTRAIN SYSTEM FOR THE DIESEL HYBRID ELECTRIC BUS, 13(5), 701–711. https://doi.org/10.1007/s12239

SUMO MD - TM4. (2016).

- TM4 SUMO. (2017). Direct-drive electric powertrain systems.
- Tzeng, G., Lin, C., & Opricovic, S. (2005). Multi-criteria analysis of alternative-fuel buses for public transportation. *Energy Policy*, 33, 1373–1383. https://doi.org/10.1016/j.enpol.2003.12.014
- Volvo Bus Corporation. (2015). Volvo electric concept bus.
- Wang, W., Hou, R., Yu, Q., & Lin, C. (2016). Comparative research on the transmission form of the electric bus. *Energy Procedia*, 88, 928–934. https://doi.org/10.1016/j.egypro.2016.06.114

Wu, G., Zhang, X., & Dong, Z. (2015). Powertrain architectures of electrified vehicles: Review, classification and comparison. *Journal of the Franklin Institute*, 352(2), 425–448. https://doi.org/10.1016/j.jfranklin.2014.04.018

Yasa motors. (2017). Yasa 750R Specifications (Vol. 44).

Yutong. (2014). Standard specification.

Zhong Tong Bus. (2017). Autobús eléctrico de ciudad.

- Zhou, B., Wu, Y., Zhou, B., Wang, R., Ke, W., & Zhang, S. (2016). Real-world performance of battery electric buses and their life-cycle bene fi ts with respect to energy consumption and carbon dioxide emissions. *Energy*, 96, 603–613. https://doi.org/10.1016/j.energy.2015.12.041
- Živanović, Z., & Nikolić, Z. (2015). The Application of Electric Drive Technologies in City Buses.