

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**DETERMINACIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS  
BÁSICAS DE UN SISTEMA MOTRIZ PARA UN BUS  
ARTICULADO DE 18 METROS ELÉCTRICO PARA LA CIUDAD  
DE LIMA**

**Tesis para optar por el Título de Ingeniero Mecánico,  
que presenta el bachiller:**

**JOSUÉ EDUARDO BOJÓRQUEZ VELIS**

**Asesor: Ing. Fernando Octavio Jiménez Ugarte**

Lima, Julio del 2018



A mis padres, Amanda y Rolando, y a mi hermano Jesús.

Por todos sus consejos, su apoyo constante y amor incondicional.

## RESUMEN

La presente tesis tiene como objetivo determinar las principales características de un bus eléctrico de 18 metros para cumplir los requerimientos de la ruta troncal del Sistema Metropolitano de Lima y definir las principales características técnicas del sistema de propulsión, de almacenamiento de energía y transmisión. El primer capítulo describe los tipos de vehículos de combustión interna, híbridos y eléctricos. Este capítulo también describe los parámetros más importantes de las baterías y las diferencias entre los diferentes tipos de baterías.

El segundo capítulo describe los requerimientos de un ciclo de conducción del bus articulado a gas natural de 18 metros que actualmente opera en la ruta COSAC I, muestra los valores medios de aceleración, desaceleración y velocidad máxima controlada. Estos valores son  $0.54 \text{ m/s}^2$ ,  $-1.34 \text{ m/s}^2$  y  $60 \text{ km/hora}$  respectivamente. Se definen los principales requerimientos de aceleración que deberá cumplir el vehículo eléctrico y se describen las principales características de los tramos del corredor y las diferencias de los distintos tipos de servicio de los buses que operan actualmente.

En el tercer capítulo se seleccionan los principales sistemas del vehículo eléctrico. El sistema de propulsión son dos motores eléctricos de imanes permanentes de  $275 \text{ kW}$  cada uno, el sistema de transmisión es de una sola relación de transmisión igual a  $11.7$  y el sistema de almacenamiento de energía está compuesto de módulos de baterías de Iones de Litio Fosfato de Hierro. Esta propuesta considera un sistema de intercambio de baterías ubicadas en el techo del bus, de esta manera se puede reducir el peso del vehículo, se incrementa la eficiencia energética y es posible superar el principal problema de los vehículos eléctricos, la autonomía de sus baterías.

Finalmente, el último capítulo muestra un análisis económico entre los costos de operación del bus eléctrico respecto a un bus a gas natural para un periodo de 12 años. A pesar de que el bus eléctrico tiene un costo mayor de adquisición de sistemas (debido al costo de las baterías), el costo del mantenimiento y la energía es menor que los buses a gas natural. El vehículo propuesto tiene un consumo de energía eléctrica entre  $1.5$  y  $2.7 \text{ kW-h}$  dependiendo del tipo de servicio y costos de manutención bajos. Para el periodo de comparación, se concluye que el vehículo eléctrico es una alternativa económicamente viable respecto al vehículo de gas natural.



PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA

TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

DETERMINACIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS BÁSICAS DE UN  
SISTEMA MOTRIZ PARA UN BUS ARTICULADO DE 18 METROS  
ELÉCTRICO PARA LA CIUDAD DE LIMA

Introducción

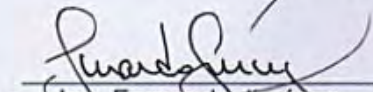
1. Estado del arte de la tecnología de los vehículos eléctricos.
2. Definición de la operación de buses articulados en la ruta troncal del COSAC I de Lima
3. Selección de los principales componentes del sistema motriz del bus
4. Análisis económico de la utilización del bus eléctrico

Conclusiones

Bibliografía

Anexos

*Máximo: 100 páginas*

  
Ing. Fernando Jiménez  
Asesor

*XV*

*Q*





**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ**  
**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**

**TEMA DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**TÍTULO** : **DETERMINACIÓN DE LAS ESPECIFICACIONES TÉCNICAS BÁSICAS DE UN SISTEMA MOTRIZ PARA UN BUS ARTICULADO DE 18 METROS ELÉCTRICO PARA LA CIUDAD DE LIMA**

**ÁREA** : **Energía # 413**

**PROPUESTO POR** : **Ing. Fernando Jiménez Ugarte**

**ASESOR** : **Ing. Fernando Jiménez Ugarte**

**TESISTA** : **Josué Eduardo Bojórquez Velis**

**CÓDIGO** : **20111523**

**FECHA** : **21/07/2017**



**DESCRIPCIÓN Y OBJETIVOS:**

El sector transporte representa uno de los principales consumidores de energía en el Perú siendo superior al 40% del consumo final de energía. Por otro lado la reforma del transporte en Lima busca reducir el número de rutas, renovar la flota vehicular y retirar de circulación vehículos antiguos. Para este objetivo, se planifica la creación de rutas de tránsito rápido, donde los buses juegan un papel muy importante ya que aún utilizan combustibles fósiles y el costo de operación es elevado en comparación con otras localidades de Latinoamérica. Por ambas razones los vehículos eléctricos representan una alternativa económica y ecológicamente viable para su uso en el transporte público.

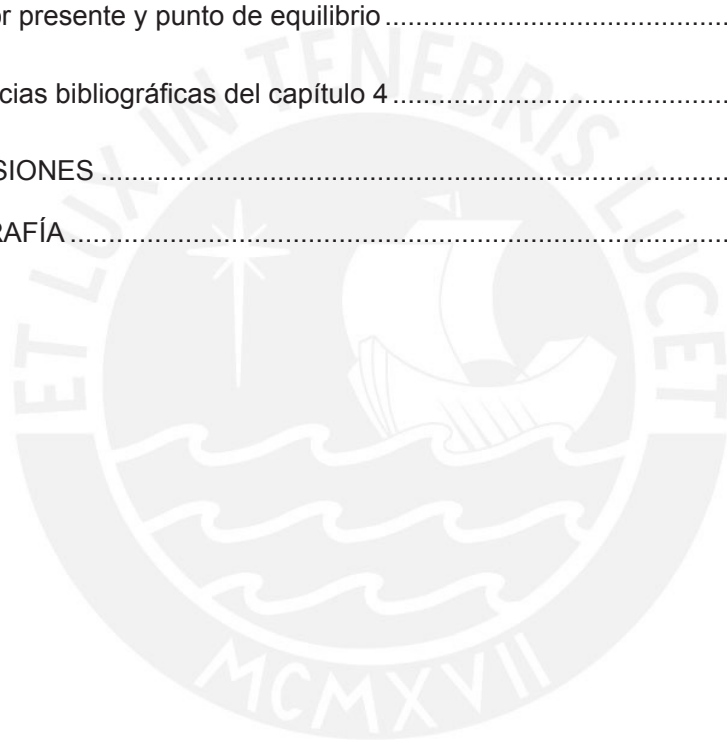
El presente trabajo de tesis tiene como objetivo determinar las especificaciones técnicas del sistema de propulsión, el sistema de transmisión y el sistema de almacenamiento de energía de un bus articulado de 18 metros eléctrico para cumplir con los requerimientos de la ruta troncal del Metropolitano de Lima (COSAC I).. El análisis se realizará tomando en cuenta la eficiencia energética como parámetro fundamental para la selección. Además, se realizará un análisis económico comparativo entre la operación actual de los buses a gas natural y la propuesta.

## ÍNDICE

Índice de tablas .....	vi
Índice de figuras.....	viii
Lista de símbolos .....	x
INTRODUCCIÓN .....	1
Capítulo 1 : ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS .....	2
1.1 Vehículos de combustión interna.....	2
1.2 Vehículos híbridos .....	6
1.2.1 Vehículo híbrido en serie.....	7
1.2.2 Vehículo híbrido en paralelo.....	8
1.2.3 Vehículo híbrido de potencia dividida ( <i>power-split</i> ).....	8
1.3 Vehículos eléctricos.....	8
1.4 Configuraciones de los vehículos eléctricos.....	11
1.5 Sistemas más importantes de los vehículos eléctricos .....	13
1.5.1 Sistema de propulsión .....	13
1.5.2 Sistema de transmisión .....	20
1.5.3 Sistemas de almacenamiento de energía .....	23
Referencias bibliográficas del capítulo 1 .....	28
Capítulo 2 : DEFINICIÓN DE LA OPERACIÓN DE BUSES ARTICULADOS EN LA RUTA TRONCAL DEL COSAC 1 DE LIMA .....	32
2.1 Características de la ruta del Corredor Segregado de Alta Capacidad 1.....	32
2.1.1 Horario y destinos de los buses de la ruta troncal .....	34

2.1.2 Perfil de elevación de la ruta.....	35
2.2 Características de los buses que circulan actualmente en el COSAC 1 .....	38
2.3 Características de la operación de los buses .....	40
2.4    Requerimientos de los sistemas.....	43
Referencias bibliográficas del capítulo 2 .....	46
Capítulo 3 : SELECCIÓN DE LOS PRINCIPALES COMPONENTES DEL SISTEMA MOTRIZ DEL BUS .....	48
3.1 Estimación de la potencia requerida por el sistema de propulsión .....	48
3.2 Preselección del sistema de propulsión .....	52
3.3 Selección del tipo de sistema de transmisión.....	54
3.4 Selección del sistema de propulsión y transmisión .....	57
3.4.1 Procedimiento y ejemplo de cálculo .....	60
3.5 Sistema de propulsión y sistema de transmisión .....	65
3.6 Sistemas auxiliares del vehículo .....	67
3.7 Sistema de almacenamiento de energía .....	68
3.7.1 Energía para la propulsión del vehículo.....	68
3.7.2 Energía recuperada por el freno regenerativo .....	72
3.7.3 Energía de los sistemas auxiliares del vehículo .....	76
3.7.4 Energía requerida para un ciclo de conducción y en un día de operación ...	76
3.7.5 Peso bruto del vehículo .....	79
3.7.6 Sistema de carga de las baterías .....	80
3.7.7 Selección de las baterías.....	82

3.8 Características del vehículo .....	85
Referencias bibliográficas del capítulo 3 .....	85
Capítulo 4: ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA UTILIZACIÓN DEL BUS ELÉCTRICO ...	90
4.1 Costos de los sistemas principales y la energía.....	90
4.2 Costo total para un periodo de 12 años .....	91
4.3 Valor presente y punto de equilibrio.....	93
Referencias bibliográficas del capítulo 4 .....	95
CONCLUSIONES .....	96
BIBLIOGRAFÍA.....	98

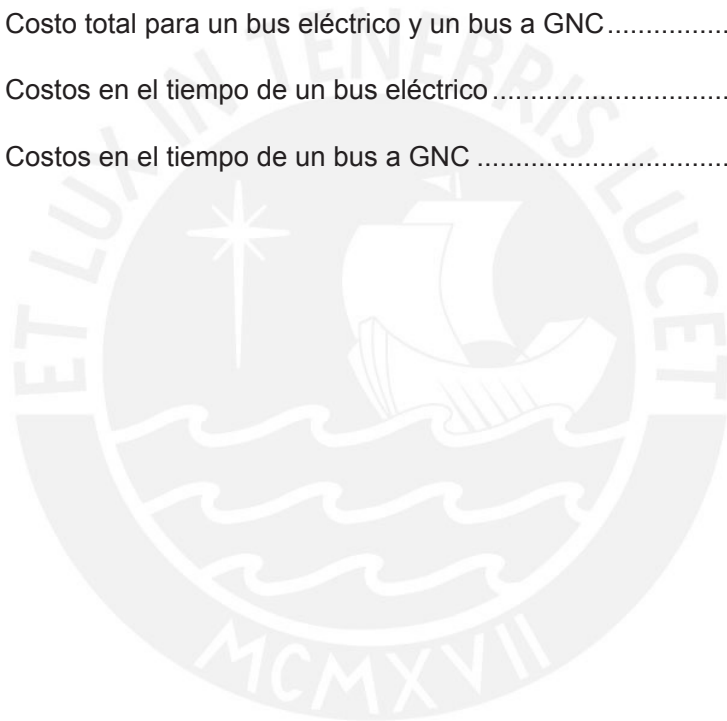




## Índice de Tablas

Tabla 2-1: Horario de operación de los buses .....	34
Tabla 2-2: Estación de partida y llegada de los buses articulados .....	35
Tabla 2-3: Tiempo por vuelta de cada servicio .....	35
Tabla 2-4: Pendiente entre las estaciones del Metropolitano .....	37
Tabla 2-5: Características de los buses articulados King Long .....	38
Tabla 2-6: Características del motor CUMMINS ISLG EEV 320 .....	39
Tabla 2-7: Características de la transmisión ALLISON T375 .....	39
Tabla 2-8: Requisitos del desempeño de buses articulados.....	43
Tabla 2-9: Recorrido diario de cada servicio del Metropolitano .....	45
Tabla 3-1: Coeficiente de rodadura para distintos tipos de carretera .....	50
Tabla 3-2: Coeficiente aerodinámico y área de incidencia para distintos tipos de vehículos.....	50
Tabla 3-3: Potencia requerida del sistema de propulsión en los tramos Benavides – Ricardo Palma y el tramo España – Quilca .....	51
Tabla 3-4: Comparación de motores para vehículos eléctricos .....	53
Tabla 3-5: Especificaciones técnicas de motores eléctricos, elaboración propia .....	54
Tabla 3-6: Comparación del sistema de transmisión .....	56
Tabla 3-7: Torque de los motores en función a su velocidad .....	59
Tabla 3-8: Aceleración de las opciones de sistema de propulsión .....	65
Tabla 3-9: Coeficiente de rozamiento estático .....	72
Tabla 3-10: Torque máximo de frenado regenerativo .....	74
Tabla 3-11: Energía regenerada y eficiencia del frenado regenerativo .....	75
Tabla 3-12: Energía de propulsión en cada tramo de ruta.....	78
Tabla 3-13: Energía requerida por ciclo de conducción.....	79

Tabla 3-14: Masa del vehículo eléctrico sin batería.....	80
Tabla 3-15: Comparación de baterías de iones de litio .....	83
Tabla 3-16: Características de las baterías para el bus.....	84
Tabla 3-17: Características de la carga de las baterías.....	84
Tabla 4-1: Costo de la energía eléctrica y combustible para el bus eléctrico .....	91
Tabla 4-2: Costo total para un bus eléctrico a GNC .....	92
Tabla 4-3: Costo total para un bus eléctrico y un bus a GNC.....	92
Tabla 4-4: Costos en el tiempo de un bus eléctrico .....	93
Tabla 4-5: Costos en el tiempo de un bus a GNC .....	94



## Índice de Figuras

Figura 1-1: Ciclo de operación de un motor de 4 tiempos .....	3
Figura 1-2: Disposición de los cilindros en motores de combustión. En línea, en “v”, en estella, de cilindros opuestos, en “u” y de émbolos opuestos.....	4
Figura 1-3: Mapa de operación de un motor de combustión interna sin transmisión y con transmisión de 4 marchas .....	6
Figura 1-4: Curvas características del torque y velocidad de motores de combustión y eléctricos .....	7
Figura 1-5: Componentes principales de un vehículo eléctrico .....	9
Figura 1-6: Configuración del vehículo eléctrico con pila de combustible .....	10
Figura 1-7: Configuraciones de vehículos eléctricos en función a la ubicación del sistema de propulsión y fuente de energía .....	11
Figura 1-8: Configuraciones de vehículos eléctricos en función al sistema de almacenamiento de energía .....	12
Figura 1-9: Curvas características de un motor DC en derivación .....	16
Figura 1-10: Curva característica de un motor DC en serie .....	17
Figura 1-11: Curvas características de un motor DC compuesto acumulativo .....	18
Figura 1-12: Transmisión automática convencional de sistema planetario .....	21
Figura 1-13: Transmisión continuamente variable .....	22
Figura 1-14: Densidad de energía de diversos tipos de almacenamiento de energía ..	23
Figura 1-15: Potencia específica y energía específica de baterías, combustibles y pilas de combustible .....	25
Figura 1-16: Comparación entre las baterías recargables más utilizadas .....	27
Figura 2-1: Estaciones de la ruta troncal del Metropolitano de Lima .....	33
Figura 2-2: Pendiente de una recta .....	36
Figura 2-3: Perfil de elevación zona norte del COSAC I.....	36
Figura 2-4: Curvas características del motor CUMMINS ISLG 320 .....	38
Figura 2-5: Pantalla típica del GPS GARMIN NUVI .....	40

Figura 2-6: Intervalo de confianza con un nivel de confianza del 95% .....	41
Figura 2-7: Histograma de velocidad máxima.....	41
Figura 2-8: Histograma de aceleración media .....	42
Figura 2-9: Distribución de aceleración media.....	42
Figura 2-10: Histograma de desaceleración media .....	42
Figura 2-11: Distribución de desaceleración media .....	43
Figura 3-1: Diagrama de cuerpo libre de un bus en movimiento .....	48
Figura 3-2: Potencia requerida entre cada paradero del Metropolitano, de sur a norte .....	51
Figura 3-3: Estimación de potencia entre cada paradero del Metropolitano, de norte a sur .....	52
Figura 3-4: Gráfico torque-velocidad de un motor de imanes permanentes .....	53
Figura 3-5: Aceleración del bus en superficie plana, opción 4 .....	63
Figura 3-6: Aceleración del vehículo en pendiente 6.5%, opción 4 .....	64
Figura 3-7: Curva torque y rotación del motor Remy HVM410-075-DOM .....	66
Figura 3-8: Transmisión simple de reducción para vehículo eléctrico .....	66
Figura 3-9: Energía requerida para la aceleración del vehículo en una superficie plana .....	71
Figura 3-10: Bus articulado del Metropolitano, figura modificada .....	73
Figura 3-11: Energía recuperada y disipada durante el frenado .....	75
Figura 3-12: Ejemplos de sistemas de carga rápida .....	80
Figura 3-13: Ejemplos de sistemas de carga rápida .....	81
Figura 4-1: Diferencia entre el costo de operación de un bus GNC y eléctrico .....	93
Figura 4-2: Punto de equilibrio del uso de un bus eléctrico .....	94

## Lista de símbolos

$\theta$	[°]	:	Pendiente de la carretera
$\varphi_{\text{ejes}}$	[kg-m2]:		Inercia rotacional de los ejes, igual a 63.6 kg-m2
$\varphi_{\text{mot}}$	[kg-m2]:		Inercia rotacional de un motor
$\varphi_{\text{red}}$	[kg-m2]:		Inercia rotacional total
$\varphi_{\text{rueda}}$	[kg-m2]:		Inercia rotacional de una rueda, se considera igual a la de un disco
$\varphi_{\text{t}}$	[kg-m2]:		Inercia rotacional de la transmisión, se considera nulo
$\rho$	[kg/m3]:		Densidad del aire a 1.013 bar, 60% HR y 20°C, 1.199 kg/m3
$\mu$	[-]	:	Coefficiente de tracción entre las ruedas y el pavimento
$a$	[m/s2]	:	Aceleración del vehículo
$a_f$	[m/s2]	:	Desaceleración del vehículo
$a_{f,\text{max}}$	[m/s2]	:	Desaceleración máxima
$alt_f$	[m]	:	Altitud sobre el nivel del mar de la estación de llegada
$alt_i$	[m]	:	Altitud sobre el nivel del mar de la estación de partida
$A$	[m2]	:	Área del vehículo para el cálculo de resistencia
$c_w$	[-]	:	Coefficiente aerodinámico del vehículo
$d$	[m]	:	Distancia entre las estaciones
$E_{\text{acel}}$	[kW-h]	:	Energía desde el reposo hasta la velocidad máxima
$E_c$	[kJ]	:	Energía cinética del vehículo en movimiento
$E_{\text{cel}}$	[W-h]	:	Energía unitaria de cada celda
$E_{\text{ciclo}}$	[W-h]	:	Energía requerida por ciclo
$E_{\text{demand}}$	[kW-h]	:	Energía de recarga requerida
$E_{\text{dia}}$	[W-h]	:	Energía requerida en un día
$E_{\text{prop}}$	[kW-h]	:	Energía para la propulsión del vehículo entre cada estación
$E_{\text{reg}}$	[J]	:	Energía recuperada por el freno regenerativo
$E_{\text{req}}$	[W-h]	:	Energía requerida
$E_s$	[W-h]	:	Energía de cada conjunto de baterías en serie
$E_{\text{vel-c}}$	[kW-h]	:	Energía durante la velocidad constante del vehículo
$f_r$	[-]	:	Coefficiente de rodadura
$F_a$	[N]	:	Fuerza producto de la masa por aceleración
$F_{a,b,c}$	[N]	:	Fuerza en las ruedas
$F_{\text{drag}}$	[N]	:	Fuerza de resistencia del viento
$F_{\text{fre,max}}$	[N]	:	Fuerza máxima de frenado
$F_{\text{grad}}$	[N]	:	Fuerza gravitacional del vehículo
$F_{\text{reg}}$	[N]	:	Fuerza de frenado regenerativo en las ruedas traseras
$F_{rr}$	[N]	:	Fuerza de resistencia a la rodadura
$F_t$	[N]	:	Fuerza de tracción efectiva del vehículo
$F_x$	[N]	:	Fuerza de frenado en las ruedas, eje x
$F_y$	[N]	:	Fuerza normal en las ruedas, eje y
$g$	[m/s2]	:	Aceleración de la gravedad, 9.81 m/s2
$i_a$	[-]	:	Relación de transmisión total
$i_s$	[-]	:	Relación de transmisión del embrague o convertidor de torque



$i_g$	[-]	:	Relación de transmisión de la caja de transmisiones
$i_e$	[-]	:	Relación de transmisión del diferencial
$I_{grid}$	[A]	:	Corriente de la red
$m_{eq}$	[kg]	:	Masa equivalente total del vehículo
$m_{rueda}$	[kg]	:	Masa de una rueda, igual a 43 kg.
$m_v$	[kg]	:	Masa total del vehículo
$n_{bat}$	[-]	:	Eficiencia de carga de baterías
$n_m$	[-]	:	Eficiencia del motor
$n_g$	[-]	:	Eficiencia del motor funcionando como generador
$n_{reg}$	[-]	:	Eficiencia del freno regenerativo
$n_{req}$	[-]	:	Eficiencia de la conversión en la estación de carga
$n_t$	[%]	:	Eficiencia de la transmisión, se considera 95%
$N$	[-]	:	Cantidad de motores
$N_c$	[-]	:	Cantidad de recorridos diarios
$N_{bat}$	[-]	:	Cantidad de celdas o módulos en total
$N_{bat,s}$	[-]	:	Cantidad de celdas o módulos en serie
$N_p$	[-]	:	Número de conjunto de baterías en paralelo
$P_{aux}$	[W]	:	Potencia de los sistemas auxiliares
$P_{charge,req}$	[kW]	:	Potencia de carga requerido
$P_{charge,grid}$	[kW]	:	Potencia de la red
$P_{dis}$	[kW]	:	Potencia disponible en las ruedas
$P_{reg}$	[W]	:	Potencia generada por el freno regenerativo
$P_{req}$	[kW]	:	Potencia requerida del sistema de propulsión
$r_{dyn}$	[m]	:	Radio dinámico de la rueda, 0.465 m
$SOC_{min}$	[-]	:	Estado de carga mínimo
$t_1$	[s]	:	Tiempo transcurrido hasta alcanzar la máxima velocidad
$t_2$	[s]	:	Tiempo de circulación a máxima velocidad
$t_3$	[s]	:	Tiempo transcurrido hasta la desaceleración
$t_4$	[s]	:	Tiempo transcurrido hasta la detención del vehículo
$t_c$	[h]	:	Tiempo por ciclo de conducción
$T_{charge,av}$	[h]	:	Tiempo mínimo de recarga solicitado
$T_m$	[N-m]	:	Torque del motor
$T_{reg}$	[N-m]	:	Torque en el motor para el freno regenerativo
$v$	[m/s]	:	Velocidad del vehículo
$v_{max}$	[km/h]	:	Velocidad máxima del vehículo, igual a 60km/hora
$V_{cel}$	[V]	:	Voltaje de celda o módulo unitario
$V_{LL}$	[V]	:	Voltaje de la corriente trifásica
$V_{prop}$	[V]	:	Voltaje DC requerido por el sistema de propulsión
$w$	[rad/s]	:	Velocidad angular del motor
$w_{maxef}$	[rad/s]	:	Velocidad del motor para la máxima eficiencia

## INTRODUCCIÓN

El consumo energético a nivel mundial está creciendo notablemente en los últimos años. El 81.3% del consumo energético a nivel mundial procede de combustibles fósiles como el carbón, aceite, petróleo y gas natural, según indicadores del Banco Mundial hacia el 2012. El sector transporte, una de las principales actividades para el desarrollo económico y social de los países, representa uno de los principales consumidores de energía. En el caso de Perú, donde el consumo de energía en el sector transporte asciende al 40% del total, la planificación del transporte público es un problema de gran impacto social y económico en el país.

El transporte público en Lima se caracteriza por ser de gran congestión, falta de seguridad y contaminación; por ello, la reforma del transporte busca reducir el número de rutas de transporte, renovar la flota vehicular y retirar de circulación vehículos antiguos. Para este objetivo se planifica la creación de rutas de tránsito rápido, donde los buses de transporte público juegan un papel muy importante debido a que aún utilizan combustibles fósiles para su funcionamiento y el costo de operación es elevado en comparación con otras localidades de Latinoamérica.

En la actualidad, los vehículos eléctricos representan una alternativa económicamente y ecológicamente viable para su uso en el transporte público, teniendo en cuenta que son más eficientes energéticamente frente al transporte privado, considerando un análisis de MJ/pasajero-kilómetro. En tal sentido, es posible determinar las características principales o también llamados componentes principales de buses eléctricos para las condiciones de una ruta de tránsito rápido y el ciclo de conducción correspondiente para la ciudad de Lima.

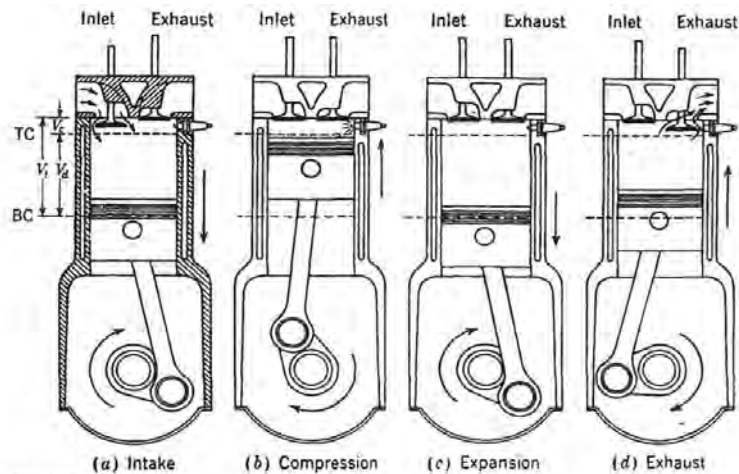
El presente trabajo está dedicado a identificar y caracterizar los principales componentes de un bus eléctrico para cumplir con los requerimientos de la ciudad de Lima, en este caso, la ruta del Corredor Segregado de Alta Capacidad I como parte del Sistema Metropolitano de Lima. Esta caracterización incluye solamente las especificaciones técnicas del sistema de propulsión o motor eléctrico, el sistema de transmisión y el sistema de almacenamiento de energía (baterías). El análisis se realizará tomando en cuenta la eficiencia energética como parámetro fundamental para la selección. Además, se realizará un análisis económico comparativo entre la operación actual de los buses y la propuesta solución.

## **CAPÍTULO 1 : ESTADO DEL ARTE DE LA TECNOLOGÍA DE LOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS**

La clasificación de los vehículos depende del sistema de propulsión que utilizan, en otras palabras, del motor que genera el movimiento de las ruedas. Los vehículos con mayor participación del mercado internacional y nacional son los de motor de combustión interna; sin embargo, actualmente existen vehículos eléctricos que representan una alternativa económicamente y ecológicamente viable para su uso en el transporte. También son comercializados los vehículos híbridos, los cuales combinan las características de ambos tipo de motores. En este capítulo se describe el funcionamiento de los tres tipos de vehículos mencionados y se explican los sistemas más importantes de los vehículos eléctricos.

### **1.1 Vehículos de combustión interna**

Este tipo de vehículos son propulsados por un motor de combustión interna que utiliza algún tipo de combustible, por lo general derivado del petróleo, como fuente de almacenamiento de energía. El motor de combustión interna es una máquina que transforma la energía química de un combustible y lo convierte en energía mecánica mediante la combustión. Los dos ciclos más representativos y utilizados son el ciclo Otto y el ciclo Diesel. Los motores de ciclo Otto son del tipo de encendido por chispa debido a que es necesaria la generación de una chispa para encender la mezcla de aire y combustible. Los motores de ciclo Diesel son del tipo encendidos por compresión ya que el combustible se enciende por sí mismo al elevar la presión en la cámara de combustión. Los motores de combustión interna cumplen un ciclo de cuatro fases: admisión, compresión, expansión y escape. Los motores pueden ser de dos tiempos o cuatro tiempos, en el primer caso, el ciclo se completa en cuatro movimientos del pistón equivalente a dos vueltas del cigüeñal, mientras que en el caso del motor de dos tiempos, en dos movimientos del pistón [1].



**FIGURE 1-2**  
The four-stroke operating cycle.<sup>10</sup>

### Figura 1-1: Ciclo de operación de un motor de 4 tiempos [2]

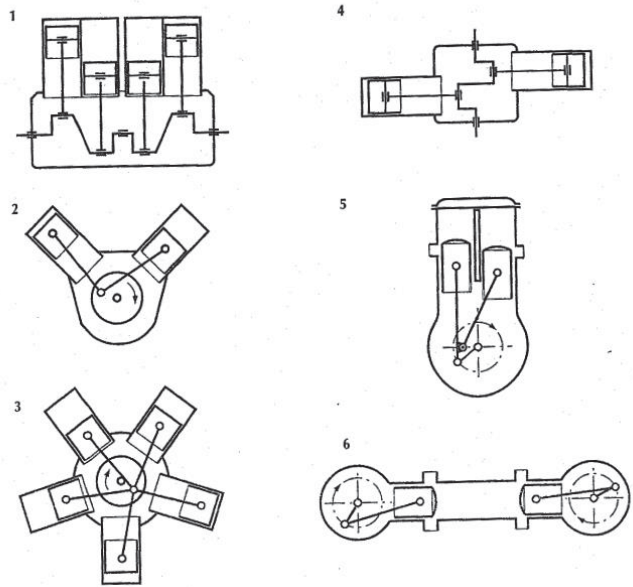
El motor de ciclo Otto y ciclo Diesel de cuatro tiempos tienen la siguiente secuencia de operación [3]:

- **Admisión:** El pistón inicia en el punto muerto superior (PMS) y finaliza el trayecto en el punto muerto inferior (PMI), en esta etapa se aspira mezcla de aire y combustible, la válvula de admisión permanece abierta, mientras que la válvula de escape permanece cerrada.
- **Compresión:** El pistón comprime la mezcla en su ascenso desde el PMI hasta el PMS, ambas válvulas permanecen cerradas. Hacia el fin de la compresión, se realiza la combustión de la mezcla y la presión se incrementa rápidamente.
- **Expansión:** A una alta temperatura y presión, los gases se expanden empujando el pistón hacia abajo, ambas válvulas permanecen cerradas. Aproximadamente se genera cinco veces el trabajo requerido para que el pistón realice la compresión.
- **Escape:** Los gases de combustión son expulsados mientras el pistón sube hacia el PMS, cuando el pistón se aproxima a este punto se cierra la válvula de escape y se abre la válvula de admisión para iniciar otra vez el ciclo.

Los motores de los vehículos utilizan varios cilindros, entre dos y doce, con la finalidad de obtener una mayor potencia, uniformizar las revoluciones del cigüeñal y compensar los momentos de inercia de las masas en movimiento. La disposición de los cilindros

puede ser en línea, en “v”, en estrella, de cilindros opuestos, en “u” y de émbolos opuestos [4].

*Formas de los motores alternativos (de émbolos)*



**Figura 1-2: Disposición de los cilindros en motores de combustión. En línea, en “v”, en estrella, de cilindros opuestos, en “u” y de émbolos opuestos [5]**

La configuración típica del tren de tracción de un vehículo de motor de combustión interna incluye un motor de varios cilindros, un sistema de transmisión y un diferencial. La función del tren de tracción es asegurar el funcionamiento del vehículo desde el estado de reposo hasta el punto de operación deseado, incluyendo todas las etapas intermedias, teniendo en cuenta las siguientes consideraciones: inicio de marcha, variación del torque y velocidad en los neumáticos, marcha hacia atrás y adelante y diferencia de revoluciones de las ruedas en la conducción en curvas. La conversión de par, velocidad y dirección de marcha se realiza en la transmisión. El diferencial compensa en las ruedas la diferencia de velocidades y también distribuye proporcionalmente el par del motor [6].



Las ventajas de la utilización de vehículos de motor de combustión interna incluyen alta potencia específica, relativa buena eficiencia y almacenamiento de combustible compacto. A pesar de ello, tiene tres desventajas fundamentales [7]:

- Es incapaz de producir torque desde el estado de reposo del vehículo.
- Solo alcanza su máxima potencia para una determinada velocidad de giro del motor.
- El consumo de combustible es dependiente del punto de operación en el mapa de rendimiento del motor.

La hipérbola ideal de fuerza de tracción representa la utilización de la máxima potencia del motor de un vehículo, es decir, es el límite del funcionamiento del vehículo y el sistema ideal de funcionamiento. La función de la transmisión es regular las necesidades de torque y velocidad según las necesidades del vehículo de tal manera que la potencia sea constante. En el caso de un motor de combustión interna, la curva de tracción y velocidad no corresponde a una hipérbola y es por ello que necesariamente requiere de una transmisión. La hipérbola ideal de fuerza de tracción puede ser hallada con la siguiente fórmula para una potencia conocida [8]:

$$F_z = \frac{P_{\max}}{v} * n_{\text{tot}}$$

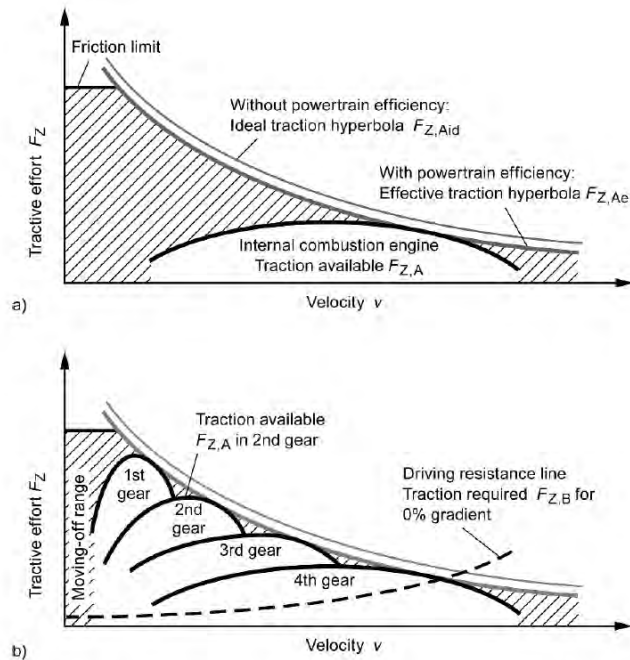
Donde:

$F_z$  [N-m] : Tracción disponible en las ruedas

$P_{\max}$  [kW] : Potencia máxima del motor

$v$  [rad/s] : Velocidad de rotación de las ruedas

$n_{\text{tot}}$  [%] : Eficiencia del tren de tracción



**Fig. 2.20.** *a* Secondary map of an internal combustion engine without a gearbox; *b* Secondary map of an internal combustion engine with rear-mounted 4-speed gearbox: traction diagram

**Figura 1-3: Mapa de operación de un motor de combustión interna sin transmisión y con transmisión de 4 marchas [9]**

## 1.2 Vehículos híbridos

Los vehículos híbridos utilizan por lo menos un motor de combustión interna y un motor eléctrico para su funcionamiento. El complemento más importante que aporta un motor eléctrico a un motor de combustión es la posibilidad de entregar un torque mayor durante el inicio de marcha. Las ventajas de este tipo de vehículos residen en la combinación de las ventajas de ambos tipos de motores, entre estas se pueden señalar: cero emisiones y ruido durante la utilización solamente del motor eléctrico, recuperación de energía por frenado regenerativo almacenado en acumuladores de energía, soporte de torque al motor de combustión por el motor eléctrico, motor de combustión apagado durante el tiempo de espera en un semáforo o en el tráfico, generación de energía eléctrica a bordo para el motor eléctrico sin la necesidad de fuentes de recarga de energía externa más que el combustible del motor de combustión [10].

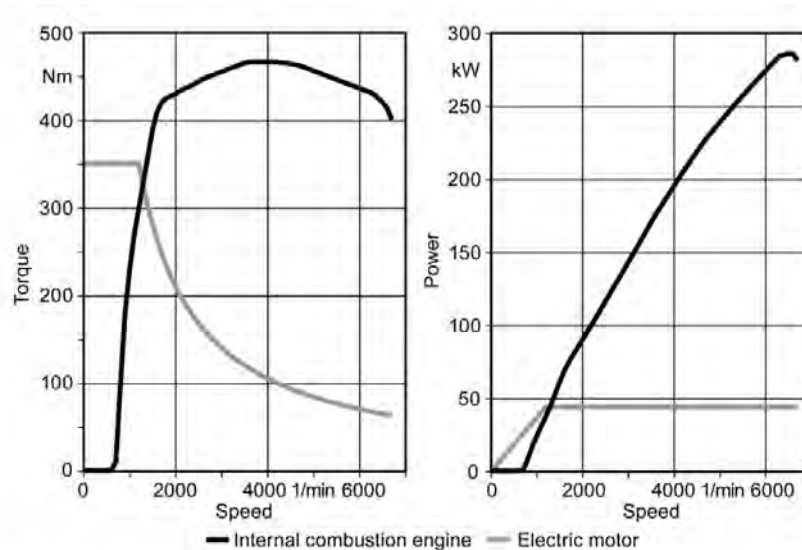


Fig. 3.12. Characteristic curves of torque and performance for electric motors and internal combustion engines

#### Figura 1-4: Curvas características del torque y velocidad de motores de combustión y eléctricos [11]

Estas ventajas dependen del tipo de configuración o estructura del vehículo híbrido, existen tres configuraciones principales, en serie, en paralelo y de potencia dividida (*power-split*) [12]:

##### 1.2.1 Vehículo híbrido en serie

Este tipo de vehículo es conocido también como vehículo eléctrico de autonomía extendida debido a que un motor eléctrico es el que propulsa el vehículo, mientras que un conjunto de motor de combustión y generador eléctrico suministra la energía eléctrica para la propulsión del vehículo, esta energía es previamente almacenada en las baterías del vehículo. Las características más importantes de estos vehículos son:

- El motor de combustión no tiene acoplamiento alguno con las ruedas.
- La transmisión del motor eléctrico hacia las ruedas no es imprescindible.
- El motor de combustión y el generador forman parte integral del sistema de producción de energía.
- Incluye dos motores eléctricos de alto performance (uno que actúa solamente como generador y el otro desempeña las funciones de motor y generador).

### **1.2.2 Vehículo híbrido en paralelo**

En esta configuración, ambos motores pueden trabajar a la vez, suministrando una mayor potencia cuando es requerido. Ambos motores están unidos mecánicamente en paralelo de tal manera que se suma el torque de ambos sistemas. Estos vehículos se identifican por las siguientes características:

- Ambos tipos de conducción son permitidos.
- Se requiere de una transmisión especial.
- Solo requiere de un motor eléctrico, si el motor de combustión no puede alcanzar los requerimientos de la resistencia durante la conducción, el motor eléctrico aporta energía extra, el motor eléctrico cumple la función de generador para la regeneración de energía por el frenado.

### **1.2.3 Vehículo híbrido de potencia dividida (*power-split*)**

En los vehículos híbridos de propulsión dividida, también llamados de configuración serie-paralela, la transmisión divide la potencia del motor de combustión en energía mecánica y energía eléctrica mediante un conjunto de engranajes planetarios. Utiliza un generador eléctrico adicional para recargar las baterías y es posible utilizar el motor eléctrico y el motor de combustión en paralelo. Sus características más importantes son:

- La energía del motor de combustión se divide en energía eléctrica y mecánica.
- Tiene engranajes especiales para la transmisión de potencia y conversión de velocidad.
- Son necesarios dos motores eléctricos, sin embargo no alcanzan su potencia nominal al combinar ambos motores (*boost*) en un trabajo en paralelo.

### **1.3 Vehículos eléctricos**

Los vehículos eléctricos son propulsados por motores eléctricos, los cuales transforman la energía eléctrica en energía mecánica. Para un determinado rango de velocidad, los motores eléctricos cumplen con la característica ideal de un motor, potencia constante. Debido a ello, un convertidor de torque y velocidad no es

imprescindible. En el tipo de vehículo eléctrico más utilizado, el de baterías, se deben cargar previamente al uso del vehículo y recargarlos cuando sea necesario. Es decir, requieren de una infraestructura para la recarga, por esta razón y porque la autonomía de estos vehículos es limitada, su utilización se ve restringida a las ciudades. Los vehículos eléctricos actualmente utilizan baterías o pilas de combustible para el almacenamiento de energía [13].

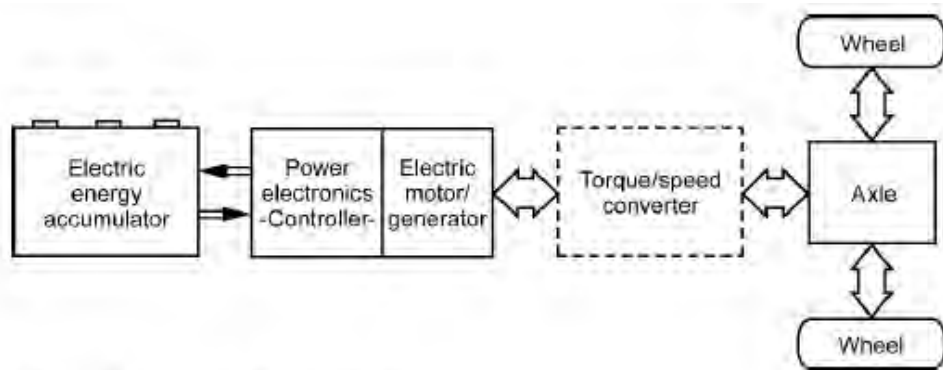


Fig. 3.9. Components of an electric drive

Figura 1-5: Componentes principales de un vehículo eléctrico [14]

En el vehículo eléctrico con pila de combustible, el acumulador de energía corresponde a una celda con metanol o hidrógeno donde se genera una reacción química controlada del combustible y el oxígeno del ambiente. De esta manera se suministra corriente eléctrica directamente al circuito de propulsión. En comparación con los vehículos eléctricos a baterías, la ventaja reside en que pueden ser reabastecidos de forma rápida. El funcionamiento consiste en un ánodo y cátodo separados por una membrana selectiva, solo permeable para iones  $H^+$ , donde el hidrógeno (ánodo) es oxidado y libera electrones. El cátodo (oxígeno atmosférico) sirve como agente oxidante, reacciona con los iones de hidrógeno y forma agua o vapor. Aún existen algunas dificultades en cuanto al almacenamiento del hidrógeno, por su alta volatilidad, y la formación de hielo si la temperatura exterior es muy baja. Por ello, no son muy utilizados en la actualidad [15].



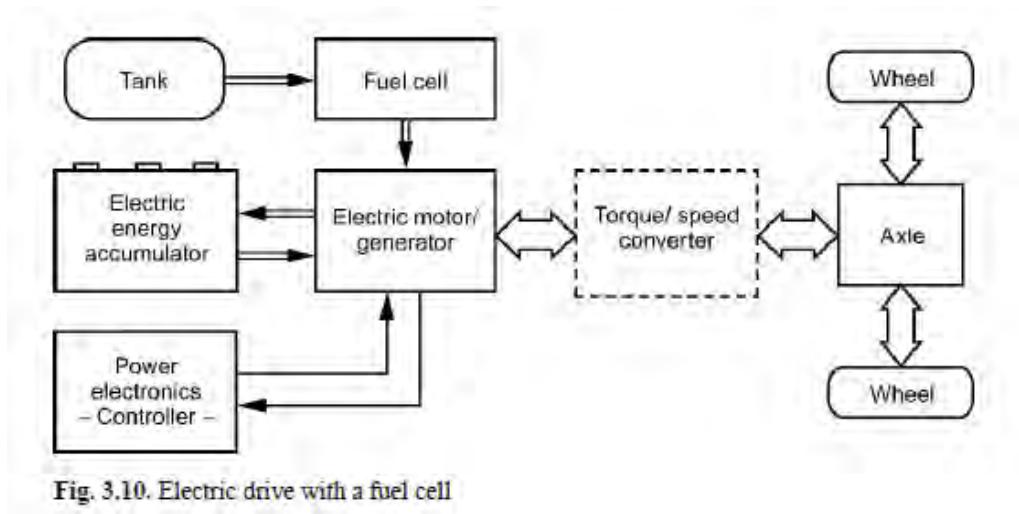


Fig. 3.10. Electric drive with a fuel cell

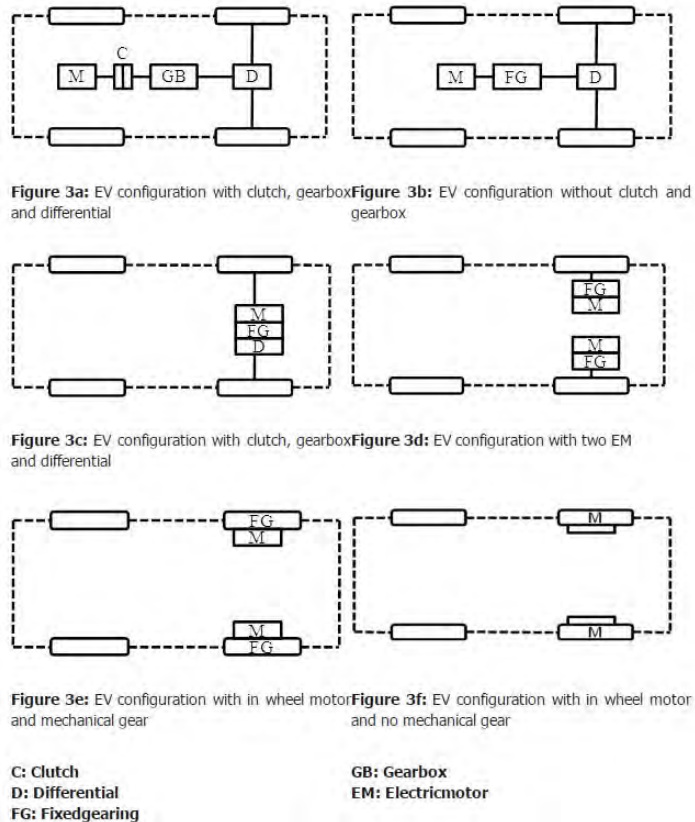
Figura 1-6: Configuración del vehículo eléctrico con pila de combustible [16]

En la presente tesis solo se desarrollarán y explicarán procesos de vehículos eléctricos con baterías como acumuladores de energía. Los sistemas más importantes de los vehículos eléctricos son: el sistema de propulsión, el sistema de almacenamiento de energía y el sistema de transmisión de potencia. Sus componentes más importantes son [17]:

- El controlador electrónico
- El convertidor de potencia
- El motor eléctrico
- La transmisión mecánica
- Las ruedas de giro
- El sistema de almacenamiento de energía
- Unidad de administración de la energía
- Unidad de regeneración de energía
- Sistemas auxiliares propios de los vehículos

## 1.4 Configuraciones de los vehículos eléctricos

Existen varias configuraciones posibles para los vehículos eléctricos. A continuación se describen 6 combinaciones de acuerdo al sistema de propulsión y fuente de energía eléctrica [18]:

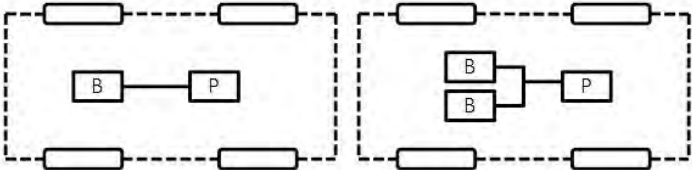


**Figura 1-7: Configuraciones de vehículos eléctricos en función a la ubicación del sistema de propulsión y fuente de energía [19]**

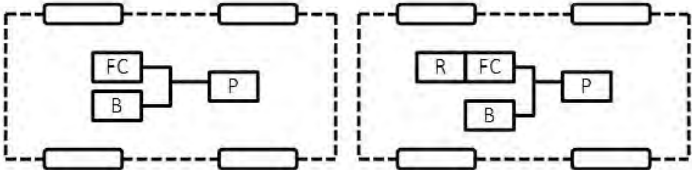
La primera configuración incluye la utilización de una caja de cambios y embrague, este último sirve para conectar y desconectar el flujo de potencia. La caja de cambios incluye relaciones de transmisión de tal manera que las ruedas tengan un par alto para velocidades bajas y un par bajo para velocidades elevadas. La segunda configuración no incluye caja de cambios ni embrague, el peso de la transmisión es reducida ya que el sistema de transmisión es del tipo engranaje-fijo. En la tercera configuración, se utiliza un único motor eléctrico acoplado a una transmisión de engranaje-fijo y

diferencial integrado. La cuarta configuración corresponde a dos motores, uno en cada rueda delantera. El control durante la conducción en curvas se puede realizar solamente electrónicamente para esta configuración. En la quinta configuración, el motor se encuentra dentro de la rueda y utiliza una transmisión de engranaje-fijo, el sistema de control de la velocidad es electrónico. La sexta y última configuración no utiliza ningún sistema de transmisión, el motor se encuentra dentro de la rueda y el control de velocidad se realiza mediante el control en el motor solamente [20].

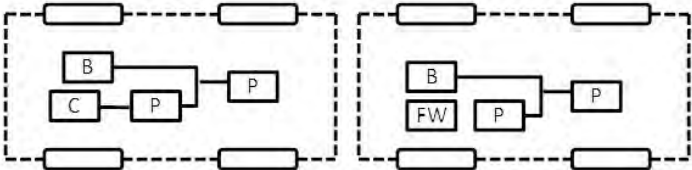
Por otro lado, de acuerdo a la variación de la fuente de energía, hay 5 posibilidades de configuraciones para vehículos eléctricos [21]:



**Figure 4a:** EV configuration with battery source **Figure 4b:** EV configuration with two battery sources



**Figure 4c:** EV configuration with battery and fuel cell sources **Figure 4d:** EV configuration with multiple energy sources



**Figure 4e:** EV configuration with battery and capacitor sources **Figure 4f:** EV configuration with battery and flywheel sources

**B:** Battery  
**C:** Capacitor  
**FC:** Fuel cell  
**FW:** Flywheel  
**P:** Power converter  
**R:** Reformer

**Figura 1-8: Configuraciones de vehículos eléctricos en función al sistema de almacenamiento de energía [22]**

En la primera configuración, la batería o banco de baterías se encuentra distribuido alrededor del vehículo, envasado o debajo del vehículo. Los requerimientos para la batería en este caso son una razonable energía específica, potencia específica y debe ser capaz de aceptar la energía del frenado regenerativo. En la práctica, la batería debe tener además una alta potencia específica para un buen desempeño durante la aceleración y en la subida de pendientes. En la segunda configuración, se utilizan dos baterías distintas, mientras que una posee alta potencia específica, la otra tiene alta energía específica. En la tercera configuración, se utiliza una pila de combustible como fuente de energía y una batería como almacenamiento para esta energía. Si bien la pila de combustible tiene una alta energía específica, no puede aceptar la energía del frenado regenerativo y es por ello que se combina con una batería de alta potencia específica y que es capaz de aceptar la energía del frenado. La generación de hidrógeno se logra con un regenerador a bordo del vehículo en la cuarta configuración. De esta manera se puede alimentar la pila de combustible con combustibles líquidos. En la configuración número 5 se utiliza una batería además de un supercapacitor como fuente de energía. En este caso la batería posee alta densidad de energía, el supercapacitor ofrece una elevada potencia y es recargado por el frenado. Debido al bajo voltaje de los supercapacitores, se requerirá de un convertidor DC-DC para elevar el voltaje [23].

## **1.5 Sistemas más importantes de los vehículos eléctricos**

A continuación se describen los componentes más importantes de los vehículos eléctricos:

### **1.5.1 Sistema de propulsión**

Los motores eléctricos son máquinas que se utilizan para convertir la potencia eléctrica en potencia mecánica, mientras que los generadores eléctricos son máquinas que se utilizan para convertir la potencia mecánica en potencia eléctrica. Ambos son físicamente iguales.

### 1.5.1.1 Máquinas de corriente alterna

Existen dos clases principales de máquinas de corriente alterna, las máquinas síncronas y las máquinas asíncronas, también llamadas máquinas de inducción. La principal diferencia entre ambos es que para una máquina síncrona (sea motor o generador) el campo magnético es suministrado por una fuente de potencia de corriente directa separada y para una máquina de inducción, la corriente de campo magnético es suministrada a sus devanados por medio de inducción magnética. El principio fundamental del funcionamiento de estas máquinas consiste en generar un campo magnético en el estator y otro en el rotor, de tal manera que se induce en el rotor un par que produce el movimiento del rotor. En otras palabras, el campo del rotor “intenta” alienarse al del estator y se genera un movimiento rotacional continuo. Las pérdidas de potencia de estos motores es consecuencia principalmente de las pérdidas en el cobre, en el núcleo, pérdidas mecánicas y dispersas. Cabe resaltar que un motor síncrono es físicamente igual a un generador síncrono, la diferencia reside en la dirección del flujo de potencia [24].

- Motores síncronos: La velocidad de rotación del motor está directamente relacionada a la frecuencia y la cantidad de polos, por lo tanto, para una frecuencia constante la velocidad es invariable independiente a la potencia o carga. Este tipo de motores se utiliza para máquinas de carga variable y que requieren velocidad constante. La carga determina el factor de potencia de la máquina solamente, sin embargo, cuando el par de la carga excede al par máximo del rotor, se produce la pérdida de sincronización y la falla de la máquina, este fenómeno se conoce como deslizamiento de polos. Debido a que este tipo de motores no tiene un par de arranque neto, es necesario utilizar uno de los siguientes métodos para el arranque: reducir la frecuencia del sistema hasta un valor de arranque seguro, utilizar un motor primario externo y disponer de devanados de atenuación para elevar la velocidad hasta un valor cercano al de sincronismo. Los parámetros más importantes de una máquina síncrona son el voltaje, la frecuencia, la velocidad, la potencia aparente, el factor de potencia, la corriente de campo y el factor de servicio [25].

- Motores de inducción: Si bien estas máquinas se pueden utilizar como generador, presentan ciertas desventajas por las que actualmente no se utilizan como tal. El rotor utilizado para estas máquinas puede ser del tipo de jaula de ardilla y rotor devanado. La velocidad de este tipo de motores tiende a ser igual al de sincronismo, sin embargo, no alcanzan esta velocidad debido a que para una frecuencia de rotor y estator iguales, el rotor se bloquearía. En estos motores se define una velocidad de deslizamiento, que es la diferencia entre la velocidad de sincronismo y la velocidad del rotor para una determinada frecuencia. En el rango de la operación normal de estos motores, para un aumento en la carga, la velocidad decrece casi linealmente con la carga, a esta región se le conoce como región de bajo deslizamiento de carga y el factor de potencia es cercano a 1. Las formas de controlar la velocidad de estas máquinas es variando la frecuencia eléctrica o el número de polos de la máquina. La variación de polos de la máquina se puede realizar mediante el método de polos consecuentes donde se cambian las posiciones de las bobinas, mientras que el método de devanados múltiples consiste en energizar un grupo a la vez. Los valores más importantes de los motores de inducción son el voltaje, la corriente, el factor de potencia, la velocidad, eficiencia nominal, clase NEMA de diseño y el código de arranque [26].

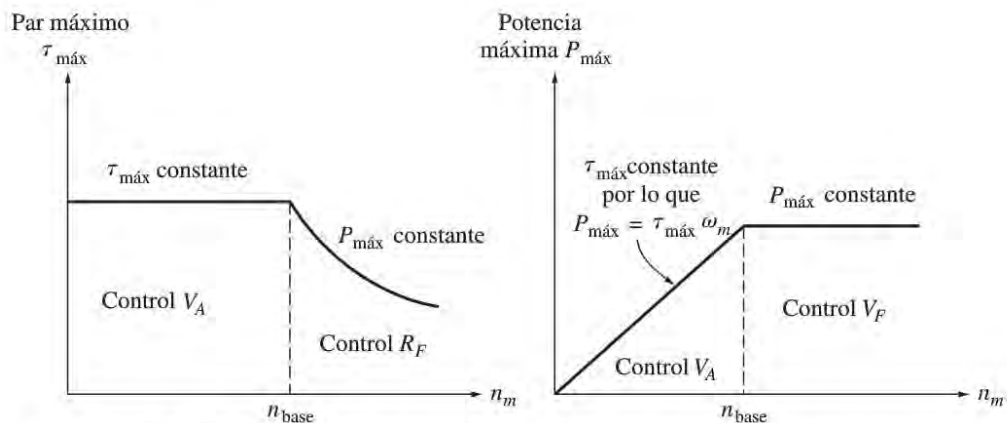
El método más efectivo y más utilizado para variar la velocidad de estos motores es variando la frecuencia y el voltaje de línea. La velocidad de rotación del campo magnético en el estator depende proporcionalmente de la frecuencia. Si bien con esta relación se podrían obtener todas las velocidades deseadas, es necesario mantener los valores de voltaje y par adecuados para una operación segura. Si esto no se realiza, se saturaría el núcleo y fluirían corrientes de magnetización excesivas. Por lo tanto, es necesario también variar el voltaje linealmente con la frecuencia (degradación), hay que tener en cuenta que el cuadrado de este es proporcional al par resultante. Actualmente se utilizan controladores de estado sólido, los cuales son capaces de variar la frecuencia entre 0 y 120 Hz y el voltaje de 0 hasta el nominal del motor [27].



### 1.5.1.2 Máquinas de corriente directa

Las máquinas DC son semejantes a las máquinas AC con la diferencia que cuentan con una salida de este tipo de corriente debido a que tienen un conmutador que convierte los voltajes internos de AC a DC, por ello se les conoce también como máquinas de conmutación. Los motores AC se aplican cuando se requieren amplias variaciones de velocidad. Los tipos de motores DC son de excitación separada, de excitación en derivación, de imán permanente, en serie y compuesto.

- Motor de excitación separada y de excitación en derivación: la diferencia entre estos motores es que en la primera el circuito de campo es alimentado por una fuente de potencia separada, mientras que en la segunda, este campo se obtiene directamente de los terminales del inducido del motor. El comportamiento de ambos motores es muy similar, por ello cuando se habla de un motor en derivación también se incluye a los motores de excitación separada. La característica de estos motores respecto a la carga es que cuando se incrementa esta última, la velocidad disminuye. El control de velocidad de estos tipos de motores se realiza por uno de los siguientes métodos: variando la resistencia de campo, regulando el voltaje en los terminales del inducido e insertando una resistencia en serie con el circuito inducido [28].



**FIGURA 8-16** Límites del par y de la potencia en función de la velocidad de un motor en derivación con control de voltaje del inducido y de resistencia de campo.

**Figura 1-9: Curvas características de un motor DC en derivación [29]**

- Motor de imán permanente: En este tipo de motores, los polos están hechos de imanes permanentes, por esta razón, no tienen pérdidas en el cobre del circuito de campo, lo que significa una mayor eficiencia. En general los estos motores son menos costosos, más pequeños, más sencillos y más eficientes que los motores de excitación separada. Su desventaja es que no pueden producir una densidad de flujo tan alta como los motores de campo magnético independiente y puede desmagnetizarse. En estos motores, el flujo es constante y por lo tanto el control de velocidad solo se realiza variando el voltaje o la resistencia en el inducido [30].
- Motor en serie: El flujo es directamente proporcional a la corriente en el inducido. De la misma manera que el motor de derivación, la velocidad del motor en serie se reduce conforme aumenta la carga, con la excepción que esta caída es aún más pronunciada. Se caracteriza por producir más toque por corriente que cualquier otro motor DC, así mismo, su curva característica cumple con la relación par-velocidad ideal. Se deben tener las siguientes consideraciones en este tipo de motores: nunca se debe descargar completamente y la carga no se debe conectar mediante elementos como correas o bandas, debido a que para un torque muy pequeño, la velocidad tiende a elevarse al infinito y el motor fallaría. El único método del control de velocidad de un motor DC en serie es variar el voltaje en los terminales [31].

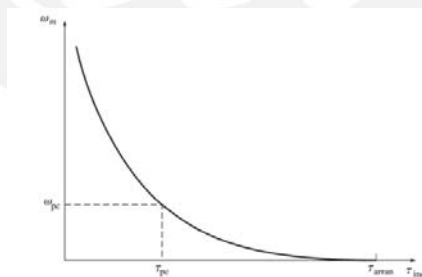
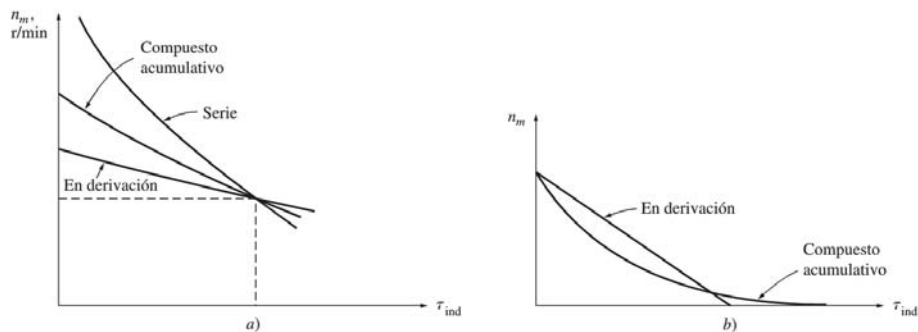


FIGURA 8-21 Característica par-velocidad de un motor de cd en serie.

**Figura 1-10: Curva característica de un motor DC en serie [32]**

- Motor compuesto: El motor compuesto acumulativo, incluye un campo en derivación y otro en serie que se suman, por lo tanto tendrá un par de arranque menor al motor en serie y mayor al motor en derivación. Este motor no presenta problemas al trabajar en vacío, se puede decir que tiene las mejores

características de ambos motores. El control de velocidad se realiza mediante el cambio en la resistencia de campo, cambio en el voltaje de inducido o cambio de la resistencia del inducido. En el motor compuesto diferencial, en cambio, los campos se restan y la velocidad genera un aumento en la carga. Estos motores no son utilizados frecuentemente debido al problema de estabilidad, de la misma manera no es posible utilizarlo como generador [33].



**FIGURA 8-25** a) Característica par-velocidad de un motor de cd compuesto acumulativo en comparación con los motores en serie y en derivación con los mismos valores nominales a plena carga. b) Característica par-velocidad de un motor de cd compuesto acumulativo en comparación con un motor en derivación a la misma velocidad en vacío.

### Figura 1-11: Curvas características de un motor DC compuesto acumulativo [34]

El problema en el arranque de los motores DC se debe a que en ese instante el motor no gira, y la corriente es muy elevada. Para solucionar este problema se utiliza una resistencia en serie con el inducido cuya incidencia se disminuye hasta que el voltaje actúe como limitante. El método para variar la velocidad en los motores DC, excepto el de imán permanente, más utilizado y útil es el de variar el voltaje en el inducido, ya que de este modo se logra un gran rango de velocidades [35].

#### 1.5.1.3 Motores monofásicos y de uso especial

El motor universal es el más utilizado en la industria y en los hogares debido a que por lo general cuentan con energía monofásica, estos motores son del tipo DC y son alimentados de una fuente AC, su comportamiento es similar al de un motor DC en serie. Los motores de inducción monofásicos se caracterizan por no tener un par de arranque intrínseco, además este tipo de motores durante la operación tienen características par-velocidad similares a los motores trifásicos de igual tamaño. Los motores de capacitor de arranque tienen un par de arranque elevado, mientras que los de polos sombreados tienen un par de arranque bajo. Los motores de avance paso a paso se usan para el posicionamiento controlado de dispositivos. Se utilizan en

sistemas de control y para la ubicación de objetos con precisión. Los motores DC sin escobillas son similares a los de avance paso a paso con la diferencia que tienen un sensor de posición para mantener la conmutación y el rotor girando. Si bien son más caros que los de DC, requieren poco mantenimiento, tienen larga vida útil pero solo están disponibles en tamaños pequeños [36].

#### **1.5.1.4 Comparación de motores utilizados en vehículos eléctricos**

Los requerimientos más importantes para la selección del sistema de propulsión de un vehículo eléctrico son los siguientes [37]:

- Alta potencia instantánea y alta densidad de potencia
- Torque elevado a velocidades bajas iniciando la marcha y subiendo pendientes
- Alta potencia para alcanzar la máxima velocidad deseada
- Respuesta de torque rápida
- Amplio rango de velocidad para las condiciones de torque constante y potencia constante
- Buena eficiencia para el rango de velocidad más utilizado del vehículo
- Elevada eficiencia para el freno regenerativo
- Confiabilidad y flexibilidad para diferentes condiciones de operación
- Costo razonable

Por otro lado, las principales características que se debe tener en cuenta para la construcción de motores eléctricos para vehículos eléctricos respecto a los motores industriales son los siguientes [38]:

- Durante la aceleración se requiere de un par de hasta 4 o 5 veces el par nominal, mientras que los motores industriales ofrecen un par máximo igual al doble del par nominal.
- Los motores eléctricos de vehículos requieren una velocidad de 4 a 5 veces la velocidad nominal para alcanzar la velocidad crucero del vehículo, mientras que en los motores industriales se requiere duplicar su velocidad para funcionar a potencia constante.

- Requieren alta potencia específica y un buen mapa de eficiencia, alta eficiencia durante un amplio rango de torque y velocidad, mientras que los motores industriales brindan un alto rendimiento para un punto de operación específico.
- Los motores necesitan ser utilizados bajo condiciones de alta temperatura, mal clima, vibraciones frecuentes mientras que los motores industriales se localizan fijos en un lugar.

### 1.5.2 Sistema de transmisión

Las transmisiones más utilizadas en vehículos se clasifican en los siguientes diseños y formatos [39]:

- Transmisión manual (MT): este tipo de transmisión incluye a todas aquellas en donde el accionamiento del embrague y los cambios de marcha son realizados por el conductor. En general, la transmisión de potencia se realiza con engranajes rectos y las relaciones de transmisión son invariables. Se caracteriza por tener una alta eficiencia.
- Transmisión automática manual (AMT): en este sistema el cambio de marcha es manual y está acoplado al accionamiento del embrague, por lo que se le conoce como semiautomático. La caja de cambios tiene como propósito permitir el arranque en cualquier marcha, refinar el cambio entre marchas y amortiguar las vibraciones de torsión al enganchar el embrague.
- Transmisiones automáticas con varias relaciones de transmisión:
  - Transmisión de doble embrague (DCT): Este tipo de transmisión incluye las características de las transmisiones automáticas y las transmisiones manuales. Mientras que una transmisión automática se caracteriza por su alta eficiencia y amplias relaciones de transmisión, la transmisión automática permite la facilidad de manejo y el cambio automático sin interrupción.
  - Transmisión automática convencional (AT) (consiste en un convertidor de par hidrodinámico y usan transmisión planetaria de montaje trasera): Consta de un convertidor de par con una caja del tipo planetario. Este tipo de transmisión se caracteriza por tener una elevada densidad de

potencia y mayor eficiencia que las transmisiones que utilizan ejes intermedios. Sin embargo, las relaciones de transmisión es más limitada debido a que un solo engranaje dentado se utiliza para varios engranajes.

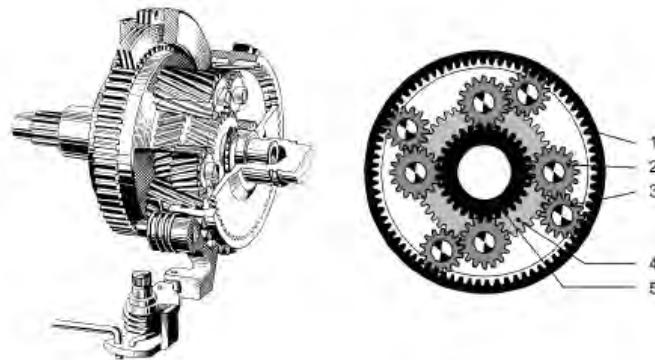


Fig. 6.28. Ravigneaux planetary gear set. 1 Common ring gear; 2 narrow planetary gear; 3 broad planetary gear; 4 large sun gear; 5 small sun gear [6.5]

#### Figura 1-12: Transmisión automática convencional de sistema planetario [40]

- Transmisiones automáticas de contra-eje: tienen la ventaja de permitir la elección de la relación de transmisión, constan de un contra-eje entre el de entrada y salida.
- Transmisiones híbridas: Las transmisiones de los vehículos híbridos dependerán directamente de la estructura y disposición de los motores de combustión y eléctrico. Para el vehículo híbrido de estructura paralela, por ejemplo, la transmisión permite que el motor eléctrico actúe como generador durante el tiempo en que el vehículo se encuentra encendido y en reposo. En otras transmisiones de vehículos híbridos completos el motor de combustión proporciona en general la energía para el movimiento del vehículo y la energía diferencial es suministrada al generador eléctrico.
- Transmisión mecánica continuamente variable (CVT): Con este tipo de transmisión, se logra alcanzar el funcionamiento ideal para alcanzar el rendimiento ideal según el requerimiento del sistema. No está limitada a un pequeño número de relaciones de transmisión. Su funcionamiento se basa en el principio de la transmisión mediante toroides, el ancho interior de estos elementos determina la relación de transmisión y es controlada mediante algún



embrague o dispositivo electrohidráulico aplicando presión. Con la finalidad de incrementar el rango de relaciones de transmisión, el vehículo es equipado con una transmisión de sistema planetario de engranajes.

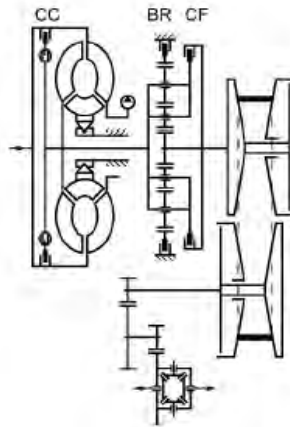


Fig. 6.43. CVT for front-transverse drive (ZF), production design Figure 12.32

#### Figura 1-13: Transmisión continuamente variable [41]

Los elementos complementarios del sistema de transmisión como el diferencial, embrague, convertidor de torque y en el caso de engranajes fijos tienen valores recomendados según fabricantes y diseñadores, a continuación se describe estos elementos y se indica la relación de transmisión recomendada de cada uno [42]:

- Embrague: es un conjunto de elementos que permiten la interrupción de transmisión de potencia para realizar cambios de marcha o iniciar la marcha del vehículo desde el reposo, la relación de transmisión para este sistema es igual a 1.
- Convertidor de torque: es utilizada previamente a la caja de transmisión con el objetivo de realizar un cambio de marcha sin interrumpir la transmisión con el motor, de la misma manera permite “enlazar” al motor que está girando a velocidad ralentí y el vehículo en reposo para iniciar la marcha. La relación de transmisión del convertidor está en el siguiente rango 1.8 – 2.8.
- Diferencial: elemento necesario para permitir la conducción del vehículo en curvas, transmite la potencia a cada rueda y en las curvas brinda un mayor torque a una de ellas, la relación de transmisión depende del tipo de engranajes utilizados. Para engranajes de dientes rectos la relación de transmisión se encuentra en el rango 3 – 5.5, para engranajes de dientes

helicoidales el rango es 2.5 – 5 y para un tornillos sin fin el rango de valores está entre 5 – 7.

- Reducción de transmisión simple para vehículos eléctricos: los vehículos eléctricos, debido a que por lo general no requieren de un sistema complejo de caja de transmisiones utilizan una reducción de una sola relación de transmisión, el valor para esta relación dependerá del requerimiento del sistema solamente.

### 1.5.3 Sistemas de almacenamiento de energía

El contenido de energía de cualquier material o combustible refiere a la energía que puede ser extraída de esta. El parámetro para el contenido de energía es evaluada con la energía específica o densidad de energía. En la siguiente tabla se puede observar la diferencia entre las fuentes de energía utilizadas.

**TABLE 4.1**  
Nominal Energy Densities of Sources

Energy Source	Nominal Specific Energy (W h/kg)
Gasoline	12,500
Diesel	12,000
Biodiesel	10,900
Natural gas	9,350
Ethanol	8,300
Methanol	6,050
Hydrogen	33,000
Coal (bituminous)	8,200
Lead-acid battery	35
Li-polymer battery	200
Flywheel (carbon-fiber)	200

Figura 1-14: Densidad de energía de diversos tipos de almacenamiento de energía [43]

En el presente capítulo se muestran las principales características de las baterías eléctricas utilizadas como fuente de energía para los vehículos eléctricos.

#### 1.5.3.1 Baterías secundarias

Una batería es un dispositivo que transforma la energía química en energía eléctrica. En pocas palabras, una batería está compuesta por electrodos y un electrolito en una

celda o contenedor donde ocurren reacciones químicas. Una ventaja de la energía electroquímica es la alta eficiencia en la conversión de energía química a eléctrica, elevada potencia de salida y la variedad de elementos para su manufactura. Existen dos tipos de baterías, las primarias o no recargables son aquellas donde las reacciones químicas internas son irreversibles y por lo tanto son descartadas; por otro lado, las baterías recargables son aquellas donde el proceso químico es reversible cuando una corriente eléctrica es aplicada en sentido contrario al flujo normal en estado de descarga de la batería. Para los vehículos eléctricos, por lo tanto, solo son adecuadas las baterías recargables. Para una evaluación del desempeño de baterías para vehículos eléctricos se deben tener en cuenta los siguientes factores: alto poder específico, alta energía específica, alta aptitud para ser recargada mediante medios convencionales o por freno regenerativo y elevado tiempo de vida útil. Así mismo, el costo de las baterías debe ser razonable para la viabilidad de su utilización [44].

#### **1.5.3.2 Parámetros de las baterías**

A continuación se realiza una lista de los parámetros más importantes de las baterías [45]:

- Capacidad de la batería: es la cantidad de carga que puede suministrar desde el momento en que el material está completamente cargado hasta que se descarga. Se expresa en Coulombs, donde 1 Coulumb representa la carga suministrada en 1s para una corriente de 1 Amperio.
- Voltaje en los terminales: es el voltaje disponible en los terminales conectados a la carga, varía desde el voltaje a carga completa hasta el voltaje de corte que ocurre cuando las reacciones químicas en descarga ya no son posibles.
- Capacidad práctica: la capacidad práctica de una batería es menor a la teórica debido a ciertas limitaciones como el voltaje de corte. Es posible afirmar que esta capacidad dependerá de la magnitud de la descarga de corriente, por ello se debe especificar la constante de descarga por corriente.
- Ratio de descarga: corresponde al valor en amperios de la división entre la capacidad de la batería y el tiempo en que se descarga completamente.
- Estado de carga: es el porcentaje de energía remanente del total en un instante dado.

- Estado de descarga: es el porcentaje de descarga realizada hasta el momento indicado.
- Profundidad de descarga: es el porcentaje de capacidad de energía en la batería para la cual está descargada. En otras palabras, es la capacidad de la batería menos el estado de carga sobre el total de capacidad. El retiro de por lo menos un 80% de la capacidad se considera de descarga profunda.
- Energía de la batería: es la cantidad de energía almacenada en la batería, se determina por el valor nominal en los terminales por la capacidad en coulomb, su unidad es el kW-h.
- Energía específica: corresponde a la energía que puede ser almacenada en las baterías por cada kilogramo de esta.
- Potencia de la batería: es la potencia que utiliza la carga en cada instante de tiempo. Cabe resaltar que la potencia continua medida es la del valor máximo de la batería para prolongados lapsos de tiempo sin dañar la batería. De la misma manera la potencia instantánea medida es el máximo valor de potencia que puede alcanzar la batería en cortos periodo de tiempo.
- Potencia específica: es la potencia entregada por la batería por cada kilogramo de masa de esta.

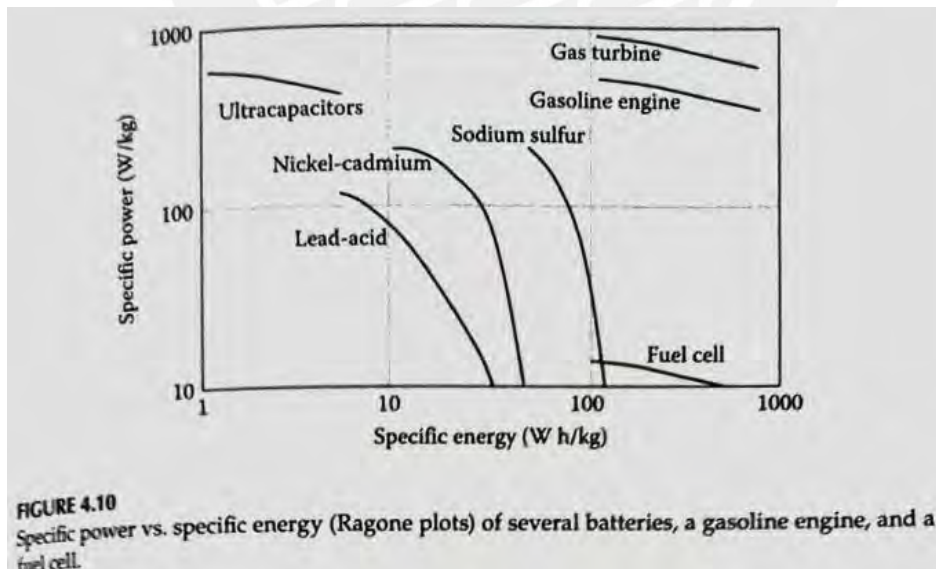


Figura 1-155: Potencia específica y energía específica de baterías, combustibles y pilas de combustible [46]

### **1.5.3.3 Bateria Plomo-Ácido**

Fue la primera batería recargable para uso comercial, actualmente se utiliza en sillas de ruedas, coches de golf, sistemas de emergencia, sistema de alimentación ininterrumpida y vehículos. Algunas de las ventajas de este tipo de batería son: bajo costo por watt-hora, sencillez de manufactura, alta potencia específica y buena performance en altas y bajas temperaturas. Por otro lado, las desventajas incluyen: baja energía específica, carga lenta, tiempo de vida limitado (repetidas descargas profundas reducen su vida útil) y la toxicidad del plomo [47].

El problema de la acumulación del sulfato reduce sustancialmente el desempeño de las baterías de Plomo-Ácido, la carga parcial y el paso del tiempo son responsables de la intensidad de este fenómeno. Este problema se resuelve adicionando carbono a la placa negativa, lo que permite una rápida recarga durante el uso de freno regenerativo. De esta manera puede operar entre un estado de carga de 30% y 70% sin el riesgo de sulfatarse. Su principal desventaja es la caída de tensión durante la descarga [48].

### **1.5.3.4 Bateria de níquel cadmio y níquel-metal hidruro**

Algunas ventajas de las baterías de níquel cadmio son la facilidad y rapidez de su recarga, una larga vida útil, costo económico por ciclo y está disponible en un amplio rango de tamaños y características de desempeño. Entre sus limitaciones se puede destacar la baja energía específica, elevada auto-descarga y un bajo voltaje por celda. Las baterías de níquel-metal hidruro, a diferencia de las de níquel cadmio, tienen una capacidad entre un 30-40% más que estas pero un tiempo de vida útil menor y requiere de un complejo sistema para la carga. Ambos tipos de batería, la batería de NiMH en menor medida, presentan un fenómeno de memoria lo que limita la energía entregada de acuerdo a la rutina de descarga previa [49].

### **1.5.3.5 Baterías de ion litio**

Las baterías de iones de litio tienen una diversa variedad, sin embargo tienen algo en común que es la estructura propia de este tipo de baterías lo cual les da las siguientes ventajas: alta energía específica, vida útil extendida, buena capacidad, buena eficiencia de coulomb, relativa rapidez de la carga y facilidad de realizar este proceso,

baja auto-descarga. Algunos inconvenientes son que requieren circuitos de protección, se degrada a altas temperaturas y se debe tener cuidado durante su transporte [50].

### 1.5.3.6 Comparación de baterías

La siguiente tabla muestra las principales diferencias entre las baterías utilizadas actualmente:

Specifications	Lead Acid	NiCd	NiMH	Li-ion <sup>1</sup>		
				Cobalt	Manganese	Phosphate
<b>Specific energy</b> (Wh/kg)	30–50	45–80	60–120	150–250	100–150	90–120
<b>Internal resistance</b>	Very Low	Very low	Low	Moderate	Low	Very low
<b>Cycle life<sup>2</sup></b> (80% DoD)	200–300	1,000 <sup>3</sup>	300–500 <sup>3</sup>	500–1,000	500–1,000	1,000–2,000
<b>Charge time<sup>4</sup></b>	8–16h	1–2h	2–4h	2–4h	1–2h	1–2h
<b>Overcharge tolerance</b>	High	Moderate	Low	Low. No trickle charge		
<b>Self-discharge/month</b> (room temp)	5%	20% <sup>5</sup>	30% <sup>5</sup>	<5% Protection circuit consumes 3%/month		
<b>Cell voltage</b> (nominal)	2V	1.2V <sup>6</sup>	1.2V <sup>6</sup>	3.6V <sup>7</sup>	3.7V <sup>7</sup>	3.2–3.3V
<b>Charge cutoff voltage</b> (V/cell)	2.40 Float 2.25	Full charge detection by voltage signature		4.20 typical Some go to higher V		3.60
<b>Discharge cutoff voltage</b> (V/cell, 1C)	1.75V	1.00V		2.50–3.00V		2.50V
<b>Peak load current</b> Best result	5C <sup>8</sup> 0.2C	20C 1C	5C 0.5C	2C <1C	>30C <10C	>30C <10C
<b>Charge temperature</b>	–20 to 50°C (–4 to 122°F)	0 to 45°C (32 to 113°F)		0 to 45°C <sup>9</sup> (32 to 113°F)		
<b>Discharge temperature</b>	–20 to 50°C (–4 to °F)	–20 to 65°C (–4 to 49°F)		–20 to 60°C (–4 to 140°F)		
<b>Maintenance requirement</b>	3–6 months <sup>10</sup> (toping chg.)	Full discharge every 90 days when in full use		Maintenance-free		
<b>Safety requirements</b>	Thermally stable	Thermally stable, fuse protection		Protection circuit mandatory <sup>11</sup>		
<b>In use since</b>	Late 1800s	1950	1990	1991	1996	1999
<b>Toxicity</b>	Very high	Very high	Low	Low		
<b>Coulombic efficiency<sup>12</sup></b>	~90%	~70% slow charge ~90% fast charge		99%		
<b>Cost</b>	Low	Moderate		High <sup>13</sup>		

Table 1: Characteristics of commonly used rechargeable batteries. The figures are based on average ratings of commercial batteries at time of publication. Specialty batteries with above-average ratings are excluded.

Figura 1-16: Comparación entre las baterías recargables más utilizadas [51]



## Referencias bibliográficas del capítulo 1

- [1] HEYWOOD, Jhon B.  
1988 "Engine types and their operation". Internal Combustion Engine Fundamentals. Nueva York: McGraw-Hill, pp. 1-37.
- [2] HEYWOOD, Jhon B.  
1988 Internal Combustion Engine Fundamentals. Nueva York: McGraw-Hill, pp. 10.
- [3] Ídem
- [4] BOSCH  
1999 Manual de la Técnica del Automóvil. Tercera edición. Barcelona: Reverté, pp. 382.
- [5] Ídem
- [6] BOSCH  
1999 "Tren de Tracción". Manual de la Técnica del Automóvil. Tercera edición. Barcelona: Reverté, pp. 554-579.
- [7] NAUNHEIMER, Harald y otros  
2011 Automotive Transmissions. Segunda edición. Nueva York: Springer, pp. 49.
- [8] Ídem
- [9] Ibídem, pp. 50
- [10] Ibídem, pp. 91
- [11] Ibídem, pp. 91
- [12] Ibídem, pp. 92
- [13] Ibídem, pp. 87
- [14] Ibídem, pp. 87
- [15] Ibídem, pp. 87

- [16] Ibídem, pp. 88
- [17] NPTEL  
2013 “Basic Architecture of Electric Drive Trains”. Introduction to Hybrid and Electric Vehicles. Consulta: 24 de Abril de 2017.  
<http://nptel.ac.in/courses/108103009/8>
- [18] Ídem
- [19] Ídem
- [20] Ídem
- [21] Ídem
- [22] Ídem
- [23] Ídem
- [24] CHAPMAN, Stephen J.  
2012 “Principios básico de las máquinas de corriente alterna”. Máquinas Eléctricas. Quinta edición. Mexico D.F.: McGraw-Hill, pp. 119-146.
- [25] CHAPMAN, Stephen J.  
2012 “Motores síncronos”. Máquinas Eléctricas. Quinta edición. Mexico D.F.: McGraw-Hill, pp. 205-230.
- [26] CHAPMAN, Stephen J.  
2012 “Motores de inducción”. Máquinas Eléctricas. Quinta edición. Mexico D.F.: McGraw-Hill, pp. 231-300.
- [27] CHAPMAN, Stephen J.  
2012 Máquinas Eléctricas. Quinta edición. Mexico D.F.: McGraw-Hill, pp. 278.
- [28] Ibídem, pp. 348
- [29] Ibídem, pp. 360
- [30] Ibídem, pp. 364
- [31] Ibídem, pp. 366

- [32] Ibídem, pp. 368
- [33] Ibídem, pp. 371
- [34] Ibídem, pp. 372
- [35] Ibídem, pp. 375
- [36] CHAPMAN, Stephen J.  
2012 "Motores Monofásicos y de Uso Especial". Máquinas Eléctricas. Quinta edición. Mexico D.F.: McGraw-Hill, pp. 415-448.
- [37] ZERAOULIA, Mounir y otros  
2010 Electric motor drive selection issues for HEV propulsión systems: A comparative study. 2010 IEEE.
- [38] Ídem
- [39] NAUNHEIMER, Harald y otros  
2011 "Vehicle Transmission Systems: Basic Design Principles". Automotive Transmissions. Segunda edición. Nueva York: Springer, pp. 140-236.
- [40] NAUNHEIMER, Harald y otros  
2011 Automotive Transmissions. Segunda edición. Nueva York: Springer, pp. 140-236.
- [41] Ibídem, pp. 188
- [42] NAUNHEIMER, Harald y otros  
2011 "Moving-off Elements". Automotive Transmissions. Segunda edición. Nueva York: Springer, pp. 371-419
- [43] HUSAIN, Iqbal  
2011 Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals. Segunda edición. Boca Ratón: CRC Press, pp. 100.
- [44] Ídem
- [45] Ibídem, pp. 110
- [46] Ibídem, pp. 119

[47] BATTERY UNIVERSITY

2016 BU-201: How does the Lead Acid Battery Work? Consulta: 15 de Abril de 2017.

[http://batteryuniversity.com/learn/article/lead\\_based\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/lead_based_batteries)

[48] BATTERY UNIVERSITY

2016 BU-202: New Lead Acid Systems. Consulta: 15 de Abril de 2017.

[http://batteryuniversity.com/learn/article/new\\_lead\\_acid\\_systems](http://batteryuniversity.com/learn/article/new_lead_acid_systems)

[49] BATTERY UNIVERSITY

2016 BU-203: Nickel-based Batteries. Consulta: 15 de Abril de 2017.

[http://batteryuniversity.com/learn/article/nickel\\_based\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/nickel_based_batteries)

[50] BATTERY UNIVERSITY

2016 BU-204: How do Lithium Batteries Work? Consulta: 15 de Abril de 2017.

[http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium\\_based\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries)

[51] BATTERY UNIVERSITY

2016 BU-107: Comparison Table of Secondary Batteries. Consulta: 15 de Abril de 2017.

[http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries)

## **CAPÍTULO 2 : DEFINICIÓN DE LA OPERACIÓN DE BUSES ARTICULADOS EN LA RUTA TRONCAL DEL COSAC 1 DE LIMA**

En este capítulo se selecciona y describe una ruta en particular en operación del actual sistema de transporte de Lima, el Corredor Segregado de Alta Capacidad 1. Así mismo se describen las características de los vehículos de transporte público que recorren dicha ruta, se indican los aspectos más relevantes para la operación de un vehículo eléctrico y se determinan los requerimientos del sistema para la selección de los sistemas más importantes.

### **2.1 Características de la ruta del Corredor Segregado de Alta Capacidad 1**

La ruta del COSAC 1 o Sistema Metropolitano de Lima, es la primera vía de tránsito rápido en la ciudad, recorre 16 distritos limeños, desde Chorrillos hasta Independencia. El sistema se compone de dos tipos de vías: la ruta troncal y las rutas alimentadoras. Las rutas alimentadoras conectan diversos puntos de gran concurrencia de personas hacia las estaciones de Matellini y Naranjal, mientras que la ruta troncal recorre 25.8 kilómetros desde y hacia las estaciones mencionadas. La ruta troncal está diseñada para autobuses de tránsito rápido, lo cual indica que la utilización es exclusiva a otros medios de transporte [1].

Para la presente tesis se determinarán las especificaciones técnicas de un bus articulado de 18 metros en base a los datos de la operación actual de unidades de transporte público impulsados a gas natural en la ruta troncal del COSAC 1, este recorrido es considerado a la fecha como una de las rutas más importantes de la ciudad de Lima y de mayor afluencia de personas en cuanto a vehículos de transporte público.

La ruta troncal del COSAC 1 comprende 38 paraderos en total, entre ellas, las estaciones más importantes y de mayor concurrencia de personas son:

- Estación Matellini: ubicada en la intersección de la prolongación de Paseo de la República y la avenida Matellini en el distrito de Chorrillos.
- Estación Central: ubicada debajo de Paseo de los Héroes Navales en la intersección de la avenida Grau y Paseo de la República.
- Estación Naranjal: ubicada en la intersección de las avenidas Túpac Amaru y Chinchaysuyo entre los distritos de Independencia y Comas, es actualmente la estación de mayor afluencia de pasajeros.

De la misma manera, la ruta troncal se subdivide en 3 tramos principales:

- Tramo Norte: entre las estaciones Naranjal y Caquetá.
- Tramo Centro: incluye a las bifurcaciones A y B desde las estaciones Caquetá y Estación Central.
- Tramo Sur: desde la estación Central hasta la Estación Matellini.



Figura 2-1: Estaciones de la ruta troncal del Metropolitano de Lima [2]

El tramo Sur y el tramo Norte se caracterizan por ser de tránsito ligero, es decir, con pocas intersecciones, semáforos y curvas. Por el contrario, el tramo Centro, el cual recorre el Centro de Lima es de tránsito lento o pesado, donde existen gran cantidad de cruces y semáforos.



### 2.1.1 Horario y destinos de los buses de la ruta troncal

Los buses de la ruta troncal del Metropolitano se dividen de acuerdo al servicio que brindan en dos tipos [3]:

- Servicios regular: se detienen en todas las estaciones intermedias en su ruta, a este servicio pertenecen los servicios regulares A, B y C.
- Servicios expreso y súper expreso: se detienen solamente en las estaciones de mayor afluencia de personas, actualmente existen cinco servicios expresos y dos servicios súper expresos que funcionan solo por las mañanas y las noches.

El horario de operación de cada servicio está determinado en función a la cantidad de pasajeros por ruta, a continuación se muestra el horario normal de los servicios:

**Tabla 2-1: Horario de operación de los buses [4]**

Servicio	Días	Horarios	
		Mañana	Tarde
Regular A	Lunes a domingo*	5:00 - 23:00	
Regular B	Lunes a domingo*	5:00 - 23:00	
Regular C	Lunes a domingo*	5:00 - 23:00	
Expreso 1	Lunes a viernes	5:00 - 9:00	17:00 - 21:30
Expreso 2	Lunes a viernes	5:00 - 9:00	17:00 - 21:30
Expreso 3	Lunes a viernes	5:00 - 9:00	17:00 - 21:30
Expreso 4	Sábados	6:00 - 21:30	
Expreso 5	Lunes a viernes	9:00 - 17:00	
Súper expreso	Lunes a viernes	6:30 - 9:30	-
Súper expreso norte	Lunes a viernes	5:30 - 9:00	17:30 - 21:30

\*Servicios regulares los domingos solo hasta las 20:00

Entre los servicios mostrados, es evidente que el horario entre los servicios regulares y expresos se diferencia en que mientras los servicios regulares operan continuamente, los servicios expresos operan solamente en las mañanas y las noches, cuando la afluencia de pasajeros es mayor y se requiere de una mayor desempeño en cuanto a velocidad para poder cubrir las necesidades de transporte del público.

La estación de partida y llegada de cada servicio se indica a continuación:

**Tabla 2-2: Estación de partida y llegada de los buses articulados [5]**

Servicio	Estación de partida	Estación de llegada
Regular A	Naranjal	Central
Regular B	Naranjal	Matellini
Regular C	Ramón Castilla	Matellini
Expreso 1	Central	Matellini
Expreso 2	Naranjal	Plaza de Flores
Expreso 3	Naranjal	Benavides
Expreso 4	Naranjal	Plaza de Flores
Expreso 5	Naranjal	Plaza de Flores
Súper expreso	Naranjal	Plaza de Flores
Súper expreso norte	Naranjal	Central

El tiempo que tarda cada bus en completar una vuelta en la ruta designada es la siguiente:

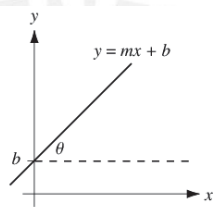
**Tabla 2-3: Tiempo por vuelta de cada servicio [6]**

Servicio	Tiempo por ciclo	
Regular A	68	min
Regular B	140	min
Regular C	100	min
Expreso 1	116	min
Expreso 2	80	min
Expreso 3	80	min
Expreso 4	78	min
Expreso 5	83	min
Súper Expreso	72	min

### 2.1.2 Perfil de elevación de la ruta

La ciudad de Lima comprende las regiones de costa y sierra, sin embargo, la mayor parte de la población habita en la región de la costa. En esta zona predominan pampas desérticas y valles costeros, en otras palabras el relieve de la ciudad de Lima Metropolitana tiene pendientes poco pronunciadas del orden de 2% a 3% de inclinación.

La pendiente de una carretera, expresada por lo general en porcentaje, es el cociente entre la distancia vertical y la distancia horizontal de la proyección en una carretera, por ejemplo, para un tramo de carretera de 100 metros donde se tiene una diferencia de elevación a favor del punto final de 5 metros se tendrá una pendiente de 5%. Utilizando el software Google Earth se puede obtener la distancia entre las estaciones del Metropolitano y la altitud de las estaciones inicial y final. Con estos datos, es posible determinar la pendiente de la carretera entre cada estación del recorrido de los buses utilizando la siguiente ecuación:



**Figura 2-2: Pendiente de una recta [7]**

$\theta = \arctan\left(\frac{alt_f - alt_i}{d}\right)$	(2.1)
--	-------

Donde:

- $\theta$  [°] : Pendiente de la carretera
- $alt_f$  [m] : Altitud sobre el nivel del mar de la estación de llegada
- $alt_i$  [m] : Altitud sobre el nivel del mar de la estación de partida
- $d$  [m] : Distancia entre las estaciones



**Figura 2-3: Perfil de elevación zona norte del COSAC I**

[Elaboración propia utilizando el software Google Earth]

Con los datos obtenidos de Google Earth para determinar la pendiente entre las estaciones se obtiene la siguiente tabla:

**Tabla 2-4: Pendiente entre las estaciones del Metropolitano  
[Elaboración propia utilizando el software Google Earth]**

Ruta	Paradero de inicio	Paradero de llegada	Distancia (m)	Altitud en m.s.n.m.		Dirección: Sur - Norte	Dirección: Norte - Sur
				Inicial	Final	Pendiente	
<b>Ruta troncal del Metropolitano - Tramo Sur</b>							
1	Matellini	Rosario de Villa	665	40	44	0.6%	-0.6%
2	Plaza Lima Sur	Terán	679	44	48	0.6%	-0.6%
3	Terán	Escuela Militar	853	48	55	0.8%	-0.8%
4	Escuela Militar	Estadio Unión	920	55	65	1.1%	-1.1%
5	Estadio Unión	Bulevar	547	65	69	0.7%	-0.7%
6	Bulevar	Balta	773	69	77	1.0%	-1.0%
7	Balta	Plaza de Flores	852	77	82	0.6%	-0.6%
8	Plaza de Flores	28 de Julio	772	82	85	0.4%	-0.4%
9	28 de Julio	Benavides	493	85	88	0.6%	-0.6%
10	Benavides	Ricardo Palma	707	88	94	0.8%	-0.8%
11	Ricardo Palma	Angamos	640	94	99	0.8%	-0.8%
12	Angamos	Domingo Orué	574	99	107	1.4%	-1.4%
13	Domingo Orué	Aranburú	653	107	112	0.8%	-0.8%
14	Aranburú	Canaval y Moreyra	693	112	123	1.6%	-1.6%
15	Canaval y Moreyra	Javier Prado	681	123	136	1.9%	-1.9%
16	Javier Prado	Canadá	826	136	131	-0.6%	0.6%
17	Canadá	México	693	131	133	0.3%	-0.3%
18	México	Estadio Nacional	906	133	138	0.6%	-0.6%
19	Estadio Nacional	Estación Central	1190	138	144	0.5%	-0.5%
<b>Ruta troncal del Metropolitano - Tramo Centro Ruta A</b>							
20	Estación Central	Colmena	543	144	157	2.4%	-2.4%
21	Colmena	Jirón de la unión	685	157	160	0.4%	-0.4%
22	Jirón de la unión	Tacna	397	160	152	-2.0%	2.0%
23	Tacna	Ramón y Castilla	518	152	141	-2.1%	2.1%
24	Ramón y Castilla	Caquetá	915	141	129	-1.3%	1.3%
<b>Ruta troncal del Metropolitano - Tramo Centro Ruta B</b>							
25	Estación Central	España	724	144	138	-0.8%	0.8%
26	España	Quilca	598	138	140	0.3%	-0.3%
27	Quilca	2 de Mayo	607	140	138	-0.3%	0.3%
28	2 de Mayo	Caquetá	1043	138	129	-0.9%	0.9%
<b>Ruta troncal del Metropolitano - Tramo Norte</b>							
29	Caquetá	Parque del trabajo	840	129	125	-0.5%	0.5%
30	Parque del trabajo	UNI	772	125	118	-0.9%	0.9%
31	UNI	Honorio Delgado	858	118	107	-1.3%	1.3%
32	Honorio Delgado	El Milagro	617	107	98	-1.5%	1.5%
33	El Milagro	Tomás Valle	597	98	87	-1.8%	1.8%
34	Tomás Valle	Los Jazmines	525	87	83	-0.8%	0.8%
35	Los Jazmines	Independencia	400	83	76	-1.8%	1.8%
36	Independencia	Pacífico	498	76	76	0.0%	0.0%
37	Pacífico	Izaguirre	525	76	71	-1.0%	1.0%
38	Izaguirre	Naranjal	768	71	72	0.1%	-0.1%

En el caso del tramo central, entre las estaciones Caquetá y Central, se puede observar que se registran las mayores pendientes del sistema.

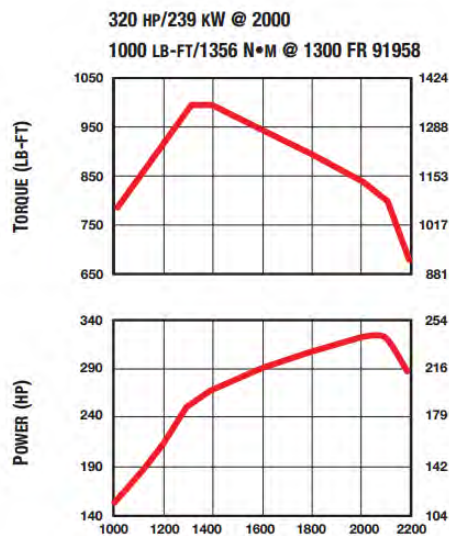
## 2.2 Características de los buses que circulan actualmente en el COSAC 1

Los buses que transitan actualmente en la ruta troncal del Metropolitano son buses articulados de 18 metros de largo con la capacidad de transportar a 161 personas. Estos buses son de la marca King Long y sus características se muestran a continuación:

**Tabla 2-5: Características de los buses articulados King Long [8]**

Especificaciones técnicas del bus articulado 18 m.	
Modelo	XMQ6181G
Largo* ancho* alto (mm)	17900×2550×3030
Distancia entre ejes (mm)	5800+6000
Voladizo delantero (mm)	2670
Voladizo trasero (mm)	3430
Combustible	Gas Natural Vehicular
Capacidad del tanque (L)	250
Motor	DONGFENG CUMMINS
Modelo	ISLGEEV 320 (GNC)
Estándar de emisiones	EEV
Embrague	Sin embrague
Transmisión	Transmisión automática Allison T375R (con retardador hidráulico)
Neumáticos	275/70R22.5, fabricado en China

El motor de estos buses tiene las siguientes curvas características:



**Figura 2-4: Curvas características del motor CUMMINS ISLG 320 [9]**

Las características más relevantes de este motor son:

**Tabla 2-6: Características del motor CUMMINS ISLG EEV 320 [10]**

Especificaciones técnicas del motor Cummins 320 HP	
Tipo de motor	Motor de 4 tiempos, encendido por chispa
Combustible	Gas Natural Vehicular (metano número 75 o más)
Configuración del motor	6 cilindros en línea
Cilindrada	8.9 litros
Aspiración normal/turbocargado	Con turbocompresor
Torque máximo	1356 N-m @ 1300 RPM
Potencia máxima	239 kW @ 2000 RPM
Peso	737 kg

Las características de la transmisión son:

**Tabla 2-7: Características de la transmisión ALLISON T375 [11]**

Especificaciones técnicas de la transmisión automática	
Torque de entrada nominal	1450 N-m
Potencia de entrada nominal	268 kW
Rango de velocidad de entrada a máxima potencia	1950-2800 rpm
Rango de velocidad de entrada a velocidad ralentí	500-800 rpm
Máxima velocidad de salida	3600 rpm
Convertidor de torque	Sí
Relaciones de transmisión	
1ra marcha	3.49:1
2da marcha	1.86:1
3ra marcha	1.41:1
4ta marcha	1.00:1
5ta marcha	0.75:1
6ta marcha	0.65:1
Reversa	-5.03:1

La masa total del vehículo corresponde a la masa del vehículo más la masa de 161 personas cuya masa en promedio es igual a 68 kg. De esta manera, para un bus de la marca Kinglong de 13,500 kilogramos y 10,950 kg adicionales correspondientes a la masa total de los pasajeros, la masa del vehículo será de 24,450 kg. [12]

### 2.3 Características de la operación de los buses

Con la finalidad de hallar el valor de la velocidad máxima, tiempo de aceleración y desaceleración de los buses se realizó el levantamiento de información con la ayuda de un GPS modelo GARMIN NUVI, utilizado por conductores para la ubicación de lugares específicos y la obtención de los datos antes mencionados.



Figura 2-5: Pantalla típica del GPS GARMIN NUVI [13]

Los siguientes conceptos de estadística son utilizados para este fin [14]:

- Moda: en un grupo de datos, es aquel que más se repite.
- Media aritmética: es aquel valor que caracteriza a un grupo de datos con poca dispersión.

$$\bar{x} = \frac{x_1 + \dots + x_n}{n} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n x_i$$

- Rango: es la diferencia entre los valores máximo y mínimo de un conjunto de datos.
- Varianza: es el promedio de la diferencia al cuadrado de todos los datos respecto a su media. Indica la dispersión de los valores respecto al valor de la media.

$$V = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$



- Desviación estándar: representa el promedio de las desviaciones de cada uno de los datos, la mayor cantidad de datos se encontrará a una distancia igual a la desviación estándar de la media.

$$s = \sqrt{\bar{V}}$$

- Intervalo de confianza: representa la estimación de que un número pertenezca a un rango de valores conocido con cierta probabilidad de acierto. El nivel de confianza representa esta probabilidad. El intervalo se determina sumando y restando a la media aritmética, el valor del error estándar por el estimador multiplicado por 1.96 para un nivel de confianza de 95% por ejemplo.

$$\left[ \bar{x} - 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}}; \bar{x} + 1.96 \frac{\sigma}{\sqrt{n}} \right]$$

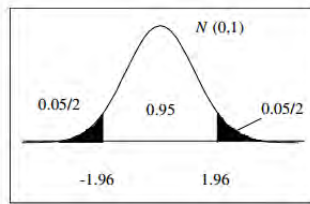
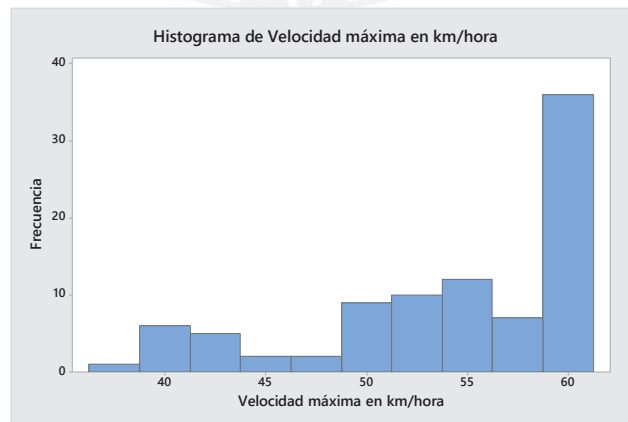


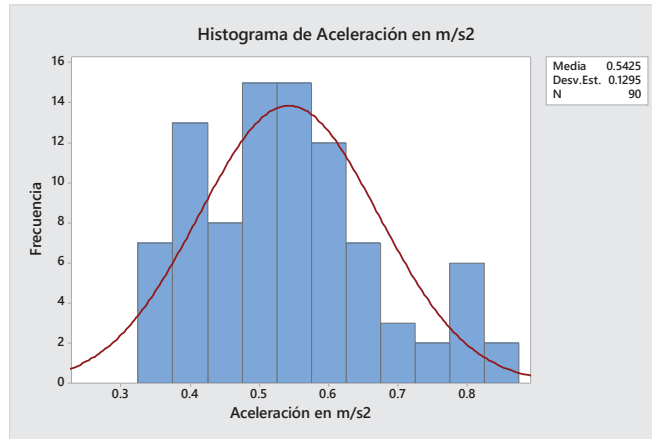
Figura 8.3. Intervalos para  $\mu$  al nivel de confianza 95%

**Figura 2-6: Intervalo de confianza con un nivel de confianza del 95% [15]**

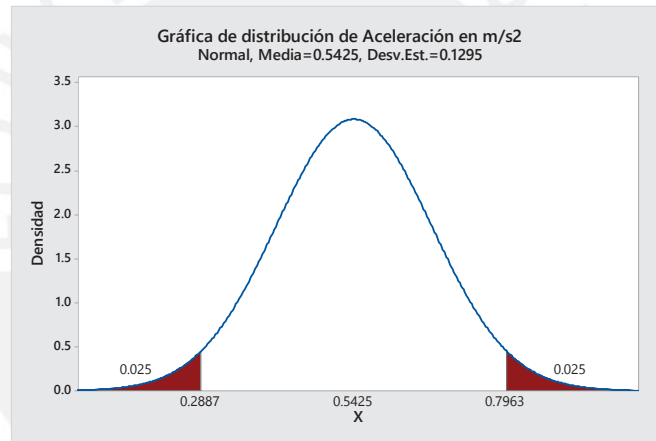
Se realizó la toma de 80 datos en total, tanto para la velocidad máxima, aceleración hasta alcanzar la máxima velocidad y la desaceleración previa a cada estación. Los recorridos incluyen ambos tipos de ruta, regulares y expresos. Los gráficos mostrados son elaborados con el software Minitab 17. Los datos se muestran en el Anexo 1.



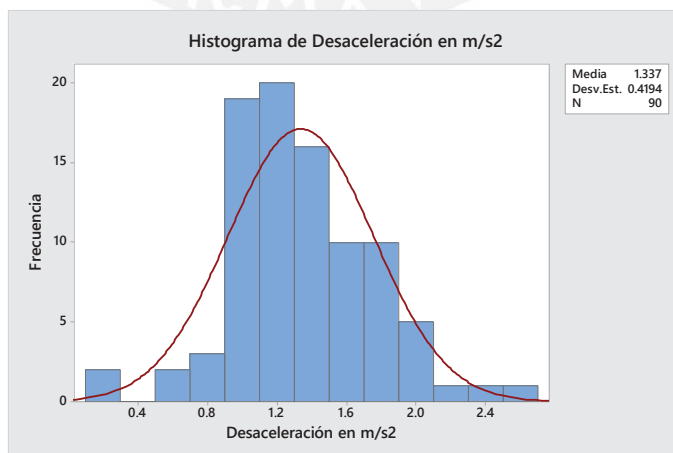
**Figura 2-7: Histograma de velocidad máxima [Elaboración propia]**



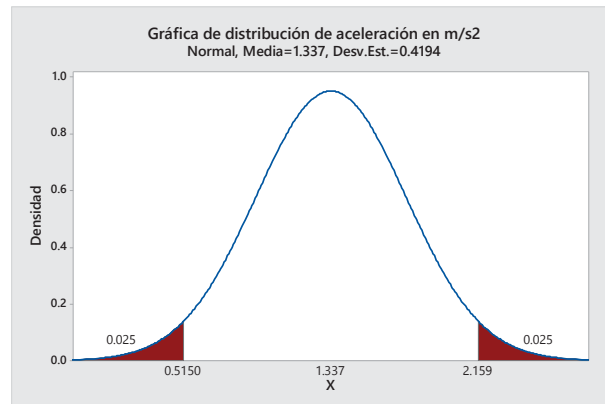
**Figura 2-8: Histograma de aceleración media [Elaboración propia]**



**Figura 2-9: Distribución desaceleración media [Elaboración propia]**



**Figura 2-10: Histograma de desaceleración media [Elaboración propia]**



**Figura 2-11: Distribución de desaceleración media [Elaboración propia]**

La velocidad máxima en cualquier tramo de la ruta es de 60 km/hora, debido a aspectos de seguridad durante la operación. También se registran valores bajos de velocidad máxima alrededor de 35 km/hora, los cuales corresponden al tramo Centro debido al tráfico en este espacio. La aceleración media es igual a 0.54 m/s<sup>2</sup>, lo que equivale a alcanzar la velocidad de 60 km/hora en 31 segundos para una aceleración constante y la desaceleración media es 1.34 m/s<sup>2</sup>, equivalente a detenerse en 12 segundos desde la velocidad máxima para una desaceleración constante.

## 2.4 Requerimientos de los sistemas

Previamente a la operación actual de los buses, por el Instituto Metropolitano de Protransporte de Lima determinó una lista de requerimientos que debía cumplir cualquier vehículo que fuera a operar en esta ruta.

**Tabla 2-8: Requisitos del desempeño de buses articulados [16]**

REQUISITOS MÍNIMOS DE DESEMPEÑO		
Parámetro	Condición a Peso Bruto	Requisito Mínimo
Aceleración	Superficie plana, promedio	3.0 km./h/s. aprox.
	0 a 10 km./h.	4 s. máximo
	0 a 20 km./h.	8 s. máximo
	0 a 30 km./h.	15 s. máximo
	0 a 40 km./h.	22 s. máximo
	0 a 60 km./h.	38 s. máximo
	6.5% inclinación, 0.15 km./h.	10 s. máximo
Desaceleración	Superficie plana y solo frenos dinámicos	13.0 km./h/s. (de velocidad máxima a 5 km./h.)
Pendiente	Capacidad de subir pendiente empezando de 0 km./h.	16% mínimo

Fuente: PROTRANSPORTE.

En la tabla 2.8 se muestran el tiempo mínimo para alcanzar cierta velocidad en una superficie plana. Para alcanzar la velocidad de 10 km/hora en 4 segundos, la aceleración media 0.69 m/s<sup>2</sup>, de la misma manera para alcanzar las velocidades de 20, 30, 40 y 60 km/hora la aceleración media es de 0.69, 0.56, 0.51 y 0.44 m/s<sup>2</sup> respectivamente. Estos valores serán por lo tanto incluidos en los requerimientos del bus eléctrico.

De los datos estadísticos obtenidos y los perfiles de elevación se determinan los siguientes requisitos de la operación de los buses:

- Carga útil: el peso bruto máximo del vehículo es igual a 30,450 kilogramos. La capacidad de carga del vehículo corresponde a 161 personas como mínimo, cuyo peso aproximado se estima de 68 kilogramos, es decir, cada bus deberá ser capaz de transportar como mínimo 10,950 kilogramos de peso. Los buses que actualmente operan en el Metropolitano tienen un peso de 13,500 kg.
- Velocidad máxima: la velocidad máxima de los buses es de 60 km/hora, esta velocidad no puede ser excedida en ningún momento ni lugar, ya que los buses deberán contar con un controlador de velocidad. De esta manera se evitan accidentes por la pérdida de control del vehículo a excesiva velocidad.
- Aceleración hasta la velocidad máxima: el valor de la aceleración media en la operación es igual a 0.54 m/s<sup>2</sup>. Sin embargo, para alcanzar velocidades de 10 km/hora y 20 km/hora, la aceleración media requerida es igual a 0.69 m/s<sup>2</sup>. Debido a ello, será necesario incluir los valores de la tabla 2.8, el cual indica que para una superficie plana, se debe alcanzar la velocidad de 10, 20, 30, 40 y 60 km/hora en un tiempo máximo de 4, 8, 15, 22 y 38 segundos respectivamente. De la misma manera para una pendiente de 6.5%, el bus debe poder alcanzar la velocidad de 25 km/hora en un tiempo no mayor a 10 segundos.
- Ascenso en la mayor pendiente: el bus también deberá ser capaz de ascender un pendiente de 16%.
- Desaceleración: si bien la capacidad de desaceleración depende de tanto de los frenos convencionales como del freno regenerativo, se toma en cuenta para los cálculos una desaceleración desde la velocidad máxima hasta el reposo en 12 segundos de acuerdo al valor medio de desaceleración.

- Autonomía: la autonomía del vehículo dependerá del tipo de carga de baterías que utilice. En este aspecto, se puede indicar que la autonomía deberá ser como mínimo la suficiente para realizar un ciclo de conducción o todo un recorrido de ida y vuelta. Por otro lado, si es considerado un sistema de carga para una operación discontinua en el sistema, se deberá tomar en cuenta los horarios de operación de los buses mostrados en la tabla 2.1. De acuerdo al horario de operación se estima la siguiente cantidad de recorridos al día por servicio:

**Tabla 2-9: Recorrido diario de cada servicio del Metropolitano [Elaboración propia]**

Servicio	Horas total	# Recorridos	Distancia por recorrido (km)	Recorrido diario (km)
Regular A	18.0	15.0	18.9	283.7
Regular B	18.0	7.0	47.0	328.8
Regular C	18.0	10.0	32.5	325.2
Expreso 1	8.5	4.0	28.2	112.9
Expreso 2	8.5	6.0	36.4	218.4
Expreso 3	8.5	6.0	33.9	203.2
Expreso 4	15.5	11.0	36.4	400.4
Expreso 5	8.0	5.0	36.4	182.0
Súper expreso	3.0	2.0	36.4	72.8

## Referencias bibliográficas del capítulo 2

- [1] INSTITUTO METROPOLITANO PROTRANSPORTE DE LIMA  
S/F Sistema Metropolitano de Lima. Consulta: 02 de Abril de 2017.  
<http://www.metropolitano.com.pe/conocenos/sistema/>
- [2] Ídem
- [3] Ídem
- [4] Ídem
- [5] Ídem
- [6] INSTITUTO METROPOLITANO PROTRANSPORTE DE LIMA  
2016 Reporte sobre los ciclos de conducción, autonomía y características de los buses articulados del Metropolitano. Lima
- [7] WOLFRAM MATHWORLD  
2016 Slope. Consulta: 15 de Abril de 2017.  
<http://mathworld.wolfram.com/Slope.html>
- [8] KING LONG  
2015 Especificaciones técnicas bus King Long XMQ6180G1. Consulta: 15 de Octubre de 2016.  
<http://www.kinglong-bus.es/3-1-2-18m-city-bus.html>
- [9] CUMMINS  
S/F Especificaciones técnicas motores ISLG.
- [10] Ídem
- [11] ALLISON TRANSMISSIONS  
S/F Especificaciones técnicas transmisión automática T375.

- [12] INSTITUTO METROPOLITANO PROTRANSPORTE DE LIMA
- 2008 Anexos del Contrato de Concesión de la Operación del Servicio de Transporte de Pasajeros Mediante Buses Troncales y Alimentadores en el sistema de Corredores Segregados de Buses de Alta Capacidad (COSAC I). Lima.
- [13] GARMIN
- S/F Catálogo de productos.
- [14] VÉLIZ, Carlos
- 2000 Estadística: aplicaciones. Cuarta edición. Lima: Copias Gráficas, 2000.
- [15] Ídem
- [16] INSTITUTO METROPOLITANO PROTRANSPORTE DE LIMA
- 2008 Anexos del Contrato de Concesión de la Operación del Servicio de Transporte de Pasajeros Mediante Buses Troncales y Alimentadores en el sistema de Corredores Segregados de Buses de Alta Capacidad (COSAC I). Lima.



### CAPÍTULO 3 : SELECCIÓN DE LOS PRINCIPALES COMPONENTES DEL SISTEMA MOTRIZ DEL BUS

En el presente capítulo se selecciona el sistema de propulsión, sistema de transmisión y el sistema de almacenamiento de energía del bus eléctrico, de tal manera que cumpla con los requisitos definidos en el capítulo 2. Para la selección de los sistemas se define a la eficiencia energética como el parámetro más importante. Además, se presentan las características más relevantes de los sistemas y sus componentes. De esta manera, se caracteriza de forma general al bus eléctrico.

#### 3.1 Estimación de la potencia requerida por el sistema de propulsión

Para estimar la potencia del sistema de propulsión, se determina la potencia máxima requerida por el bus a velocidad máxima. La fuerza de tracción del vehículo en cualquier punto de operación se puede determinar aplicando la Segunda Ley de Newton al siguiente diagrama de cuerpo libre de un vehículo en movimiento [1]:

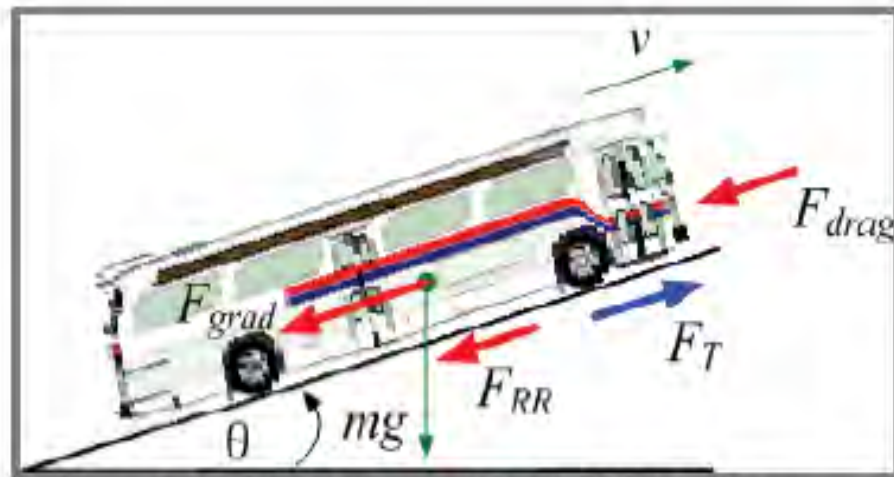


Figure 1: Free Body Diagram of the Bus Vehicle Movement

Figura 3-1: Diagrama de cuerpo libre de un bus en movimiento [2]

$F_t = F_{rr} + F_{drag} + F_{grad} + F_a$	(3.1)
$F_t = [f_r * m_v * g * \cos(\theta)] + \left[ c_w * A * \frac{1}{2} * \rho * v^2 \right] + [m_v * g * \sin(\theta)] + [m_{eq} * a]$	(3.2)

Donde:

$F_t$	[N]	:	Fuerza de tracción efectiva del vehículo
$F_{rr}$	[N]	:	Fuerza de resistencia a la rodadura
$F_{drag}$	[N]	:	Fuerza de resistencia del viento
$F_{grad}$	[N]	:	Fuerza gravitacional del vehículo
$F_a$	[N]	:	Fuerza producto de la masa por aceleración
$m_v$	[kg]	:	Masa total del vehículo
$m_{eq}$	[kg]	:	Masa equivalente total del vehículo
$v$	[m/s]	:	Velocidad del vehículo
$a$	[m/s <sup>2</sup> ]	:	Aceleración del vehículo
$\theta$	[°]	:	Pendiente de la carretera
$f_r$	[-]	:	Coefficiente de rodadura
$g$	[m/s <sup>2</sup> ]	:	Aceleración de la gravedad, 9.81 m/s <sup>2</sup>
$c_w$	[-]	:	Coefficiente aerodinámico del vehículo
$A$	[m <sup>2</sup> ]	:	Área del vehículo para el cálculo de resistencia
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	:	Densidad del aire a 1.013 bar, 60% HR y 20°C, 1.199 kg/m <sup>3</sup>

En el estado transitorio o de aceleración del vehículo, además de la aceleración de la masa del vehículo, es necesario acelerar las partes rotativas del vehículo (ruedas, transmisión y motor). La masa equivalente del vehículo representa la masa del bus y la inercia de sus partes rotativas [3].

Considerando una eficiencia de la transmisión de 95%, se obtiene la potencia requerida por el sistema de propulsión [4]:

$P_{req} = \frac{v * F_t}{\eta_t}$	(3.3)
$P_{dis} = v * F_t$	(3.4)

Donde:

$P_{req}$	[kW]	:	Potencia requerida del sistema de propulsión
$P_{dis}$	[kW]	:	Potencia disponible en las ruedas
$F_t$	[kN]	:	Fuerza de tracción efectiva del vehículo
$v$	[m/s]	:	Velocidad del vehículo
$\eta_t$	[%]	:	Eficiencia de la transmisión, se considera 95%

Para velocidades menores a 60 km/hora, el coeficiente de rodadura se considera constante. Para una carretera de superficie firme de hormigón liso este coeficiente es igual a 0.011.

**Tabla 3-1: Coeficiente de rodadura para distintos tipos de carretera [5]**

**Table 3.1.** Reference values for the rolling resistance coefficient  $f_R$ . For road speeds below 60 km/h,  $f_R$  can be assumed to be constant. (See also Table 5.1)

Road surface	Rolling resistance coefficient $f_R$
<i>Firm road surface</i>	
Smooth tarmac road	0.010
Smooth concrete road	0.011
Rough, good concrete surface	0.014
Good stone paving	0.020
Bad, worn road surface	0.035
<i>Unmade road surface</i>	
Very good earth tracks	0.045
Bad earth tracks	0.160
Tracked tractor on acre soil	0.070–0.120
Clamp wheels on acre soil	0.140–0.240
Loose sand	0.150–0.300

Los valores del coeficiente aerodinámico del vehículo y el área de resistencia se consideran los valores máximos para vehículos articulados, estos valores son 0.75 y 10 m<sup>2</sup> respectivamente.

**Tabla 3-2: Coeficiente aerodinámico y área de incidencia para distintos tipos de vehículos [6]**

**Table 3.4.** Reference values for drag coefficient  $c_w$ . In the case of goods trucks, the  $c_w$  coefficient and the maximum vehicle cross-section are very much dependent on the particular design. \*) Driver sitting and with fitting clothing

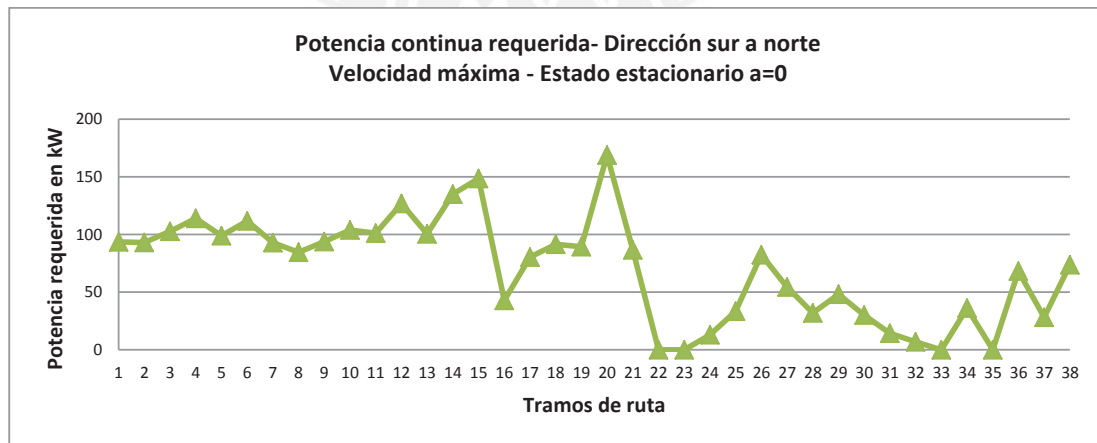
Vehicle	$c_w$	$A$ (m <sup>2</sup> )	$c_w \cdot A$ (m <sup>2</sup> )
<i>Van</i>	<i>0.35–0.40</i>	<i>3.1–4.2</i>	<i>1.1–1.7</i>
Opel Vivaro Life	0.37	3.38	1.24
Ford Transit MWB, MJ06	0.35	4.14	1.45
<i>Bus</i>	<i>0.4–0.8</i>	<i>6.0–10.0</i>	<i>2.4–8.0</i>
Setra 415 HD	0.44	8.26	3.63
<i>Light trucks</i>	<i>0.40–0.60</i>	<i>4.5–6.0</i>	<i>1.8–3.6</i>
<i>Truck (Solo)</i>	<i>0.45–0.80</i>	<i>6.0–10.0</i>	<i>2.7–8.0</i>
<i>Truck with trailer</i>	<i>0.55–0.85</i>	<i>7.0–10.0</i>	<i>3.9–8.5</i>
<i>Articulated vehicle</i>	<i>0.45–0.75</i>	<i>7.0–10.0</i>	<i>3.2–7.5</i>

Para estimar la potencia del sistema de propulsión, se halla la potencia utilizando las ecuaciones 3.1, 3.2, 3.3 y 3.4 a condiciones de aceleración nula ( $a=0$ ) y velocidad máxima, igual a 60 km/hora [7]. En la siguiente tabla se muestran los valores de la potencia requerida en dos tramos de ruta de distinta pendiente de las zonas sur y centro de la ruta del Metropolitano.

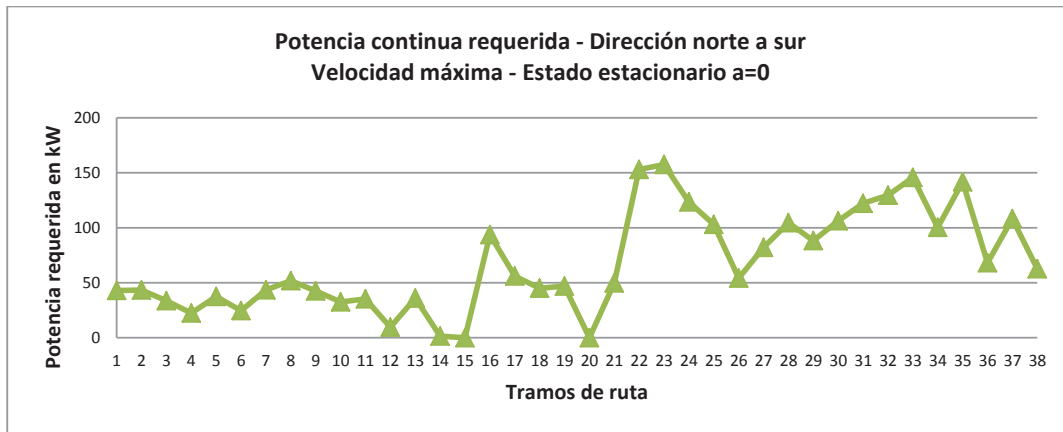
**Tabla 3-3: Potencia requerida del sistema de propulsión en los tramos Benavides – Ricardo Palma y el tramo España – Quilca [Elaboración propia]**

Potencia del sistema de propulsión	Ruta	Benavides - Ricardo Palma	España - Quilca
Descripción	Unidad	Pendiente promedio	Pendiente promedio
Peso bruto del vehículo	kg	24,450	
Coefficiente de rodadura	-	0.011	
Aceleración de la gravedad	m/s <sup>2</sup>	9.81	
Ángulo de la pendiente	-	0.8%	2.3%
Coefficiente aerodinámico	-	0.75	
Área de resistencia del viento	m <sup>2</sup>	10	
Densidad del aire	kg/m <sup>3</sup>	1.199	
Velocidad del vehículo	km/hora	60	
Aceleración del vehículo	m/s <sup>2</sup>	Estado estacionario a=0	
Eficiencia de la transmisión	-	95%	
Fuerza de resistencia a la rodadura	N	2,638	2,638
Fuerza de resistencia al viento	N	1,249	1,249
Fuerza gravitacional	N	1,919	5,515
Fuerza de tracción efectiva	N	5,806	9,402
Potencia disponible	kW	97	157
Potencia requerida	kW	102	165

Se puede observar que la fuerza de resistencia a la rodadura tiende a ser constante, esto se debe a que para valores bajos de pendiente, se puede realizar la aproximación  $\cos(\theta) = 1$ . La fuerza gravitacional, por otro lado, varía en gran medida debido al peso elevado del vehículo. Para cada tramo de ruta del Metropolitano se tendrá lo siguiente:



**Figura 3-2: Potencia requerida entre cada paradero del Metropolitano, de sur a norte [Elaboración propia]**



**Figura 3-3: Estimación de potencia entre cada paradero del Metropolitano, de norte a sur [Elaboración propia]**

Los gráficos 3.2 y 3.3 muestran la potencia requerida a lo larga de cada uno de los tramos del Metropolitano para la velocidad máxima de 60 km/hora, donde cada número en el eje x representa un tramo de ruta según la tabla 2.4. El valor máximo registrado es 169 kW entre los paraderos de Estación Central y Colmena con dirección de sur a norte. Los valores de potencia menores a cero se muestran en la tabla con un valor nulo, esto indica que una vez alcanzada la máxima velocidad, el vehículo puede mantener dicha velocidad por sí misma, debido a la fuerza gravitacional que compensa los valores de la fuerza de resistencia del viento y rodadura. Dado que los motores eléctricos poseen curvas de desempeño tanto para potencia máxima y potencia nominal o continua, para la preselección del sistema de propulsión se estima que la potencia nominal debe ser mayor a 169 kW. Los valores de potencia disponible en las ruedas y requerida por el sistema de propulsión de cada tramo se muestran en el Anexo 2.

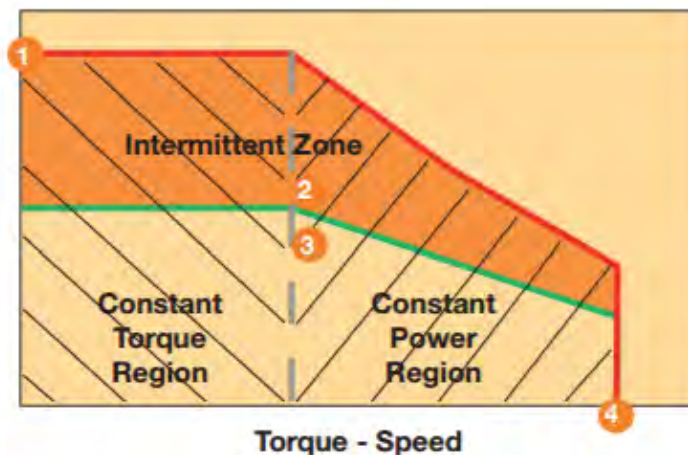
### 3.2 Preselección del sistema de propulsión

La cantidad de motores de un vehículo eléctrico depende de su configuración, existen vehículos con un solo motor y hasta con cuatro motores. El tipo de motor eléctrico a utilizar se selecciona de acuerdo a los siguientes factores: alta densidad de potencia, alto torque a baja velocidad, amplio rango de velocidades para la potencia máxima, elevada eficiencia, alta confiabilidad, alta flexibilidad y costo razonable.

**Tabla 3-4: Comparación de motores para vehículos eléctricos [8]**

Parámetros	Motor DC	Motor de inducción asíncrono	Motor de imanes permanentes	Motor de reluctancia conmutada
Densidad de potencia	Malo	Regular	Bueno	Regular
Torque inicial	Bueno	Malo	Muy Bueno	Bueno
Rango de velocidad	Malo	Regular	Regular	Bueno
Eficiencia	Malo	Regular	Muy Bueno	Regular
Confiabilidad y flexibilidad	Malo	Bueno	Bueno	Regular
Costo razonable	Bueno	Muy Bueno	Regular	Bueno
Madurez tecnológica	Bueno	Bueno	Regular	Regular

Entre los motores utilizados para vehículos eléctricos, los más destacados son el motor de imanes permanentes y el motor de reluctancia conmutada. Si bien el motor de reluctancia conmutada puede representar una alternativa para el bus eléctrico, aún tiene desventajas como ruido excesivo, fluctuaciones del par del motor, la necesidad de una topología especial del convertidor e interferencia electromagnética [9]. El motor de imanes permanentes representa actualmente la mejor alternativa como sistema de propulsión de vehículos eléctricos debido a su rendimiento, alto torque inicial y rango de velocidad. Este motor asíncrono de corriente alterna no requiere de escobillas para la conmutación de polos debido a que los controladores electrónicos permiten realizar esta función, de esta manera se incrementa la eficiencia. En general el desempeño de estos motores es como se muestra en la siguiente figura:



**Figura 3-4: Gráfico torque-velocidad de un motor de imanes permanentes [10]**



De la figura 3.4, el punto 1 corresponde al máximo torque del motor, el punto 2 y 3 son la potencia máxima y torque nominal respectivamente y el punto 4 es la velocidad máxima que puede alcanzar el motor. Algunos de los motores del mercado que cumplen con el requerimiento de potencia continua mayor a 169 kW y pertenecen a este tipo de motores eléctricos de imanes permanentes sin escobillas son:

**Tabla 3-5: Especificaciones técnicas de motores eléctricos, elaboración propia [11]**

Descripción	Unidad	Remy HVM 410-150-DOM	Parker GVM210-400-DPW	Powerphase HD 950T (x2)	Remy HVH410-075-DOM (x2)
Potencia máxima	kW	290	279	280 (2x140)	550 (2x275)
Potencia nominal	kW	250	170	200 (2x100)	450 (2x225)
Torque máximo	N-m	1700	710	1900 (2x950)	1700 (2x850)
Torque nominal	N-m	1400	306	800 (2x400)	1300 (2x650)
Velocidad máxima	rpm	5250	7950	4500	6000
Máxima eficiencia	-	95.9%	96.3%	94.0%	95.0%
Peso total	kg	148	100	170	196
Densidad de potencia	kW/kg	1.7	1.7	1.2	2.3
Voltaje de operación	V	200-700	320-640	250-440	200-700
Velocidad máx. eficiencia (rango)	rpm	1500-2500	3000-6000	2250-3250	1500-5000
Velocidad máx. eficiencia (cálculo)	rpm	2000	4500	2750	4000
Rango de torque constante	rpm	0-1750	0-5310	0-1000	0-3000
Rango de potencia constante	rpm	1750-5250	5310-7950	1000-4500	3000-6000
Inercia rotacional por motor	kg-m <sup>2</sup>	1.09	0.07	0.62	0.62

Entre los motores mostrados en la tabla 3.5, cabe resaltar que el motor Remy HVM 410-150-DOM Y Powerphase HD 950T son más eficientes a bajas velocidades, mientras que los motores Parker y Remy HVM 410-075-DOM tienen un mayor rango de velocidad y operan a una mayor eficiencia a alta velocidad. Se considera la inercia del motor Powerphase HD 950T igual al del motor Remy HVH410-075-DOM. Los catálogos de estos motores se muestran en el Anexo 3.

### 3.3 Selección del tipo de sistema de transmisión

El sistema de transmisión y el controlador del motor deben brindar las siguientes características al vehículo: inicio de marcha en condiciones difíciles como pendientes elevadas, aceleración elevada, el vehículo debe poder alcanzar la máxima velocidad operativa igual a 60 km/hora y operar en rangos de velocidad donde la eficiencia del sistema de propulsión sea elevado. [12]



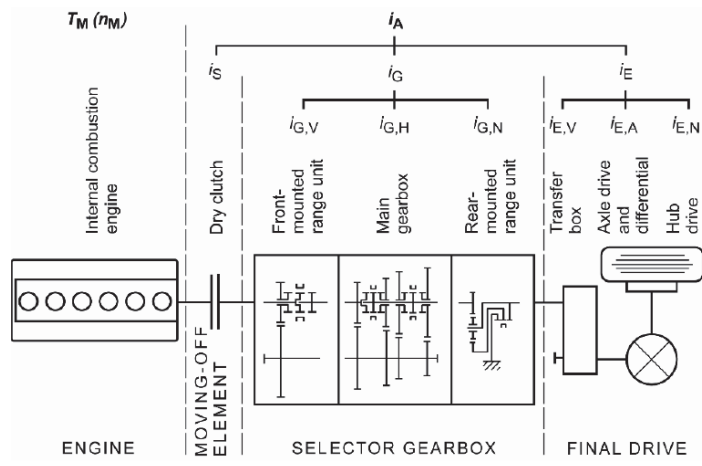


Fig. 4.2. Hierarchical structure of the powertrain ratio  $i_A$  using the example of a commercial vehicle with standard drive, i.e. front-mounted engine with rear-wheel drive

**Figura 3-5: Sistema de transmisión de un vehículo con motor de combustión interna [13]**

La figura 3.5 muestra el sistema de transmisión de un vehículo estándar con motor de combustión donde se identifican las partes que lo conforman y la relación de transmisión de cada una de sus partes. La relación de transmisión total del vehículo corresponde a la siguiente fórmula:

$i_a = i_s * i_g * i_e$	(3.5)
-------------------------	-------

Donde:

- $i_a$     [-]    :    Relación de transmisión total
- $i_s$     [-]    :    Relación de transmisión del embrague o convertidor de torque
- $i_g$     [-]    :    Relación de transmisión de la caja de transmisiones
- $i_e$     [-]    :    Relación de transmisión del diferencial

Un sistema de transmisión con amplificación del torque es esencial para los vehículos con motores de combustión, esto se debe a que a bajas revoluciones el torque es tan bajo que no es suficiente para impulsar el vehículo desde el reposo. En el caso de los vehículos eléctricos, intrínsecamente se genera un alto torque en las condiciones de reposo y se suministra la potencia máxima para un amplio rango de velocidad. Por ello, la mayoría de vehículos eléctricos están equipados solamente con una relación de transmisión fija, lo que aparenta que varias relaciones de transmisión serían redundantes para el vehículo. [14]

Las configuraciones posibles para el vehículo eléctrico mostradas en el capítulo 1 se pueden agrupar en dos conjuntos: configuración de un solo motor con relación de transmisión variable (caja de transmisiones) y configuración de uno o dos motores con relación de transmisión fija. La siguiente tabla muestra las principales diferencias de utilizar una caja de transmisiones y utilizar una sola relación de transmisión:

**Tabla 3-6: Comparación del sistema de transmisión [Elaboración propia]**

Configuración: un motor, convertidor de torque o embrague, caja de transmisiones y diferencial	Configuración: uno o dos motores, relación de transmisión fija, con o sin diferencial
<p>-El motor puede operar en un rango de eficiencia elevado para varias velocidades del vehículo.</p> <p>-Una caja de transmisiones incrementa el peso del vehículo y la inercia rotacional, incrementando el consumo de energía.</p> <p>-Es necesario utilizar un diferencial, lo cual genera pérdidas de eficiencia adicionales.</p> <p>-Permite tener un cambio para ir en reversa.</p>	<p>-El motor o motores operan en un rango de alto rendimiento en rutas de velocidad controladas.</p> <p>-Para una sola relación de transmisión, la inercia rotacional es constante y al tener un peso reducido, se incrementa la eficiencia.</p> <p>-Para la configuración de dos motores, se puede prescindir del diferencial, conectando los motores directamente a las ruedas.</p> <p>-Un control electrónico permite invertir el sentido de giro del motor.</p>

Prescindir de un sistema de transmisión con varias relaciones de transmisión resulta en una mejora de la eficiencia del vehículo, por ello se utilizará un sistema de una sola relación de transmisión. Para determinar dicha relación de transmisión, se tiene en cuenta las siguientes consideraciones de diseño, las cuales son aplicadas en vehículos con motores de combustión interna [15]:

- **Diseño óptimo:** En este diseño, para la máxima potencia del motor, corresponde la máxima velocidad que puede alcanzar el vehículo. Para un motor eléctrico, el cual posee un rango de velocidad amplio para la potencia máxima, bajo los conceptos de este diseño la máxima velocidad del motor correspondería a la máxima velocidad del bus.
- **Diseño a sobremarcha (*overrevving*):** en este caso la relación de transmisión es mayor a la del diseño óptimo; de esta manera, el exceso de potencia será una “reserva” para ser utilizada en la aceleración. Este diseño es propio de diseños deportivos.

- Diseño a baja marcha (*underrevving*): En este caso, la relación de transmisión es menor que la del diseño óptimo. De esta manera, es posible obtener un menor consumo de energía desplazando el punto de operación a este valor en el gráfico torque-velocidad, es decir, se obtiene un mayor rendimiento.

Los vehículos de transporte de pasajeros en vías de tránsito rápido, la mayor parte del tiempo total de conducción operan a una velocidad controlada máxima, en este caso 60 km/hora. Teniendo en cuenta los conceptos del diseño a baja marcha, la relación de transmisión única del vehículo eléctrico corresponderá a la velocidad del motor de mayor eficiencia. En otras palabras, para la máxima velocidad de operación del vehículo, 60 km/hora, el motor deberá operar a su máxima eficiencia. Para esta condición se halla la relación de transmisión de la siguiente manera:

$v = \frac{w * r_{dyn}}{i_a}$	(3.6)
$i_a = \frac{w_{maxef} * r_{dyn}}{v_{max}}$	(3.7)

Donde:

$v$	[m/s]	:	Velocidad del vehículo
$w$	[rad/s]	:	Velocidad angular del motor
$r_{dyn}$	[m]	:	Radio dinámico de la rueda, 0.465 m
$i_a$	[-]	:	Relación de transmisión total
$w_{maxef}$	[rad/s]	:	Velocidad del motor para la máxima eficiencia
$v_{max}$	[km/h]	:	Velocidad máxima del vehículo, igual a 60km/hora

El radio dinámico de los neumáticos 275/70R22.5 es igual a 0.465 m, el cual corresponde a la distancia recorrida por el vehículo por cada revolución de las ruedas, sin deslizamiento [16].

### 3.4 Selección del sistema de propulsión y transmisión

La selección de ambos sistemas se debe realizar como un conjunto, debido a que las características de cada uno influyen en el desempeño del otro sistema. La aceleración es un indicador clave de un vehículo, el desempeño de este conjunto de sistemas está relacionado con la capacidad de subir pendientes y alcanzar valores de velocidad en tiempos límite, estos requisitos se muestran en la tabla 2.8.

La fuerza de tracción del vehículo en función al torque del motor es:

$F_t = \frac{T_m * i_a * \eta_t}{r_{dyn}}$	(3.8)
--	-------

Donde:

$F_t$	[N]	:	Fuerza de tracción efectiva del vehículo
$T_m$	[N-m]	:	Torque del motor
$i_a$	[-]	:	Relación de transmisión
$\eta_t$	[%]	:	Eficiencia de la transmisión, se considera 95%
$r_{dyn}$	[m]	:	Radio dinámico de la rueda, 0.465 m

La masa equivalente total del vehículo incluye la masa del vehículo y la inercia rotacional de sus componentes rotativos, considerando la inercia de cada rueda igual a la de un disco, se puede calcular de la siguiente manera [17,18,19]:

$m_{eq} = m_v + \frac{\varphi_{red}}{r_{dyn}^2}$	(3.9)
$\varphi_{rueda} = 0.5 * m_{rueda} * r_{dyn}^2$	(3.10)
$\varphi_{red} = 10 * \varphi_{rueda} + \varphi_{ejes} + i_a^2 * (N * \varphi_{mot} + \varphi_t)$	(3.11)

Donde:

$m_{eq}$	[kg]	:	Masa equivalente total del vehículo
$m_v$	[kg]	:	Masa total del vehículo
$\varphi_{red}$	[kg-m <sup>2</sup> ]	:	Inercia rotacional total
$r_{dyn}$	[m]	:	Radio dinámico de la rueda, 0.465 m
$\varphi_{rueda}$	[kg-m <sup>2</sup> ]	:	Inercia rotacional de una rueda, se considera igual a la de un disco
$m_{rueda}$	[kg]	:	Masa de una rueda, igual a 43 kg.
$\varphi_{ejes}$	[kg-m <sup>2</sup> ]	:	Inercia rotacional de los ejes, igual a 63.6 kg-m <sup>2</sup>
$\varphi_{mot}$	[kg-m <sup>2</sup> ]	:	Inercia rotacional de un motor
$N$	[-]	:	Cantidad de motores
$\varphi_t$	[kg-m <sup>2</sup> ]	:	Inercia rotacional de la transmisión, se considera nulo
$i_a$	[-]	:	Relación de transmisión total

El torque de un motor eléctrico se puede aproximar a una función de su velocidad de rotación. En general, a bajas revoluciones el torque máximo se mantiene constante hasta alcanzar un valor crítico de velocidad, denominado  $w_c$  que representa la velocidad de transición entre la zona de torque constante y potencia constante, para velocidades mayores a este valor, el torque disminuye con el incremento de la velocidad [20]. Para los motores mostrados en la tabla 3.5 se muestran a continuación las ecuaciones que describen el comportamiento del torque respecto a la velocidad:

**Tabla 3-7: Torque de los motores en función a su velocidad [Elaboración propia]**

Configuración y tipo de motor	Ecuaciones que describen el comportamiento del torque del sistema de propulsión
<p>Configuración: un solo motor y relación de transmisión fija</p> <p>Motor: Remy HVM 410-150-DOM</p>	<p><math>w_c = 1750 \text{ rpm (183.26 rad/s)}</math></p> <p><u>Torque máximo:</u>                      Para <math>w_c &gt; w</math>,  <math display="block">T_m = 1700 \text{ [N.m]}</math>                     Para <math>w_c &lt; w &lt; 3000 \text{ rpm (3000 rpm = 314.16 rad/s)}</math>  <math display="block">T_m = (1700 - 6.875 * (w - 183.26)) \text{ [N.m]}</math> </p> <p><u>Torque nominal:</u>                      Para <math>w_c &gt; w</math>,  <math display="block">T_m = 1500 - 0.545 * w \text{ [N.m]}</math>                     Para <math>w_c &lt; w &lt; 3000 \text{ rpm (3000 rpm = 314.16 rad/s)}</math>  <math display="block">T_m = (1500 - 5.348 * (w - 183.26)) \text{ [N.m]}</math> </p>
<p>Configuración: un solo motor y relación de transmisión fija</p> <p>Motor: Parker GVM210-400-DPW</p>	<p><math>w_c = 5310 \text{ rpm (556.06 rad/s)}</math></p> <p><u>Torque máximo:</u>                      Para <math>w_c &gt; 4500 \text{ rpm} &gt; w</math> (<math>4500 \text{ rpm} = 471.24 \text{ rad/s}</math>)  <math display="block">T_m = 710 \text{ [N.m]}</math> </p> <p><u>Torque nominal:</u>                      Para <math>w_c &gt; 4500 \text{ rpm} &gt; w</math> (<math>4500 \text{ rpm} = 471.24 \text{ rad/s}</math>)  <math display="block">T_m = 306 \text{ [N.m]}</math> </p>
<p>Configuración: dos motores y relación de transmisión fija</p> <p>Motores: Powerphase HD 950</p>	<p><math>w_c = 1000 \text{ rpm (104.72 rad/s)}</math></p> <p><u>Torque máximo:</u>                      Para <math>w_c &gt; w</math>,  <math display="block">T_m = 2 * 950 = 1900 \text{ [N.m]}</math>                     Para <math>w_c &lt; w &lt; 3000 \text{ rpm (3000 rpm = 314.16 rad/s)}</math>  <math display="block">T_m = 2 * (950 - 2.387 * (w - 104.72)) \text{ [N.m]}</math> </p> <p><u>Torque nominal:</u>                      Para <math>w_c &gt; w</math>,  <math display="block">T_m = 2 * 400 = 800 \text{ [N.m]}</math>                     Para <math>w_c &lt; w &lt; 3000 \text{ rpm (3000 rpm = 314.16 rad/s)}</math>  <math display="block">T_m = 2 * (400 - 0.358 * (w - 104.72)) \text{ [N.m]}</math> </p>
<p>Configuración: dos motores y relación de transmisión fija</p> <p>Motores: Remy HVM 410-075-DOM</p>	<p><math>w_c = 3000 \text{ rpm (314.16 rad/s)}</math></p> <p><u>Torque máximo:</u>                      Para <math>w_c &gt; w</math>,  <math display="block">T_m = 2 * 850 = 1700 \text{ [N.m]}</math>                     Para <math>w_c &lt; w &lt; 5500 \text{ rpm (5500 rpm = 575.96 rad/s)}</math>  <math display="block">T_m = 2 * (850 - 1.719 * (w - 314.16)) \text{ [N.m]}</math> </p> <p><u>Torque nominal:</u>                      Para <math>w_c &gt; w</math>,  <math display="block">T_m = 2 * (850 - 0.637 * w) \text{ [N.m]}</math>                     Para <math>w_c &lt; w &lt; 5500 \text{ rpm (5500 rpm = 575.96 rad/s)}</math>  <math display="block">T_m = 2 * (650 - 1.337 * (w - 314.16)) \text{ [N.m]}</math> </p>

### 3.4.1 Procedimiento y ejemplo de cálculo

Con la finalidad de comparar el desempeño de las cuatro opciones de configuración y tipo de motor, se utilizan las ecuaciones mostradas previamente en este capítulo para determinar el desempeño de la aceleración y comparar los valores obtenidos con los requerimientos del capítulo 2. Entre estos requerimientos, se indica que el vehículo debe acelerar hasta 10, 20, 30, 40 y 60 km/hora en 4, 8, 15, 22 y 38 segundos respectivamente para una superficie plana. De la misma manera, el vehículo debe alcanzar la velocidad de 15 km/hora en al menos 10 segundos en una pendiente de 6.5%. Finalmente, debe ser capaz de subir una pendiente de 16%.

El procedimiento para evaluar el desempeño del vehículo es el siguiente: determinar la relación de transmisión de tal manera que el motor o motores operen a máxima eficiencia para la máxima velocidad de operación del bus, con este valor hallado es posible determinar la masa equivalente total del vehículo y finalmente, utilizando las ecuaciones que describen el comportamiento del motor a torque máximo (tabla 3.7) y las ecuaciones del diagrama de cuerpo libre del bus (3.1 y 3.2) es posible determinar el comportamiento del vehículo en el estado transitorio o de aceleración. A continuación se muestra el procedimiento de cálculo para la configuración de dos motores y relación de transmisión fija, utilizando motores Remy HVM 410-075-DOM:

- Se determina la relación de transmisión utilizando la ecuación 3.14:

$$i_a = \frac{W_{\max ef} * r_{dyn}}{v_{\max}} \quad (3.7)$$

$$i_a = \frac{4000 \text{ rpm} * 0.465 \text{ m}}{60 \text{ km/hora}} = 11.7$$

- Con el valor de la relación de transmisión y utilizando las ecuaciones 3.9, 3.10 y 3.11 se halla la masa equivalente del vehículo:

$$\varphi_{rueda} = 0.5 * m_{rueda} * r_{dyn}^2 \quad (3.10)$$

$$\varphi_{rueda} = 0.5 * 43 \text{ kg} * (0.465 \text{ m})^2 = 4.65 \text{ kg} - \text{m}^2$$

$$\varphi_{\text{red}} = 10 * \varphi_{\text{rueda}} + \varphi_{\text{ejes}} + i_a^2 * (N * \varphi_{\text{mot}} + \varphi_t) \quad (3.11)$$

$$\varphi_{\text{red}} = 10 * 4.65 \text{ kg} - \text{m}^2 + 63.6 \text{ kg} - \text{m}^2 + 11.7^2 * (2 * 0.62 \text{ kg} - \text{m}^2) = 279.84 \text{ kg} - \text{m}^2$$

$$m_{\text{eq}} = m_v + \frac{\varphi_{\text{red}}}{r_{\text{dyn}}^2} \quad (3.9)$$

$$m_{\text{eq}} = 24450 \text{ kg} + \frac{279.84 \text{ kg} - \text{m}^2}{(0.465 \text{ m})^2} = 25744 \text{ kg}$$

- Despejando la aceleración en la ecuación 3.2 y reemplazando el valor de la fuerza de tracción efectiva por la ecuación 3.8 se obtiene:

$$F_t = [f_r * m_v * g * \cos(\theta)] + \left[ c_w * A * \frac{1}{2} * \rho * v^2 \right] + [m_v * g * \text{sen}(\theta)] + [m_{\text{eq}} * a] \quad (3.2)$$

$$F_t = \frac{T_m * i_a * n_t}{r_{\text{dyn}}} \quad (3.8)$$

$$a = \frac{\left[ \frac{T_m * i_a * n_t}{r_{\text{dyn}}} \right] - \left[ [f_r * m_v * g * \cos(\theta)] + \left[ c_w * A * \frac{1}{2} * \rho * v^2 \right] + [m_v * g * \text{sen}(\theta)] \right]}{m_{\text{eq}}}$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \left[ \frac{T_m * i_a * n_t}{r_{\text{dyn}} * m_{\text{eq}}} - \frac{m_v * g * (f_r + \text{sen}(\theta))}{m_{\text{eq}}} \right] - \left[ \frac{c_w * A * \frac{1}{2} * \rho}{m_{\text{eq}}} \right] * v^2$$

- De la tabla 3.7 se obtiene el torque máximo del motor en función de su velocidad de rotación, la velocidad de rotación del motor se relaciona con la velocidad del vehículo utilizando la ecuación 3.6:

$$v = \frac{w * r_{\text{dyn}}}{i_a} \quad (3.6)$$

$$w_c = 3000 \text{ rpm} (314.16 \text{ rad/s})$$

Para  $w_c > w$ ,

$$T_m = 2 * 850 = 1700 \text{ [N.m]}$$

Para  $w_c < w < 5500 \text{ rpm} (5500 \text{ rpm} = 575.96 \text{ rad/s})$

$$T_m = 2 * (850 - 1.719 * (w - 314.16)) \text{ [N.m]}$$

$$T_m = 2 * \left( 850 - 1.719 * \left( \frac{v * i_a}{r_{\text{dyn}}} - 314.16 \right) \right)$$



- Reemplazando estos valores en la ecuación de la aceleración previamente hallada y para una pendiente plana, se obtiene :

Para  $314.16 \text{ rad/s} > w$ ;  $12.5 \text{ m/s} > v$

$$a = \frac{dv}{dt} = \left[ \frac{1700 * 11.7 * 0.95}{0.465 * 25744} - \frac{24450 * 9.81 * (0.011 + 0)}{25744} \right] - \left[ \frac{0.75 * 10 * \frac{1}{2} * 1.199}{25744} \right] * v^2$$

$$\frac{dv}{dt} = 1.476 - 0.000175 * v^2$$

$$\frac{v_{n+1} - v_n}{dt} = 1.476 - 0.000175 * v^2$$

$$v_{n+1} = v_n + dt * (1.476 - 0.000175 * v^2)$$

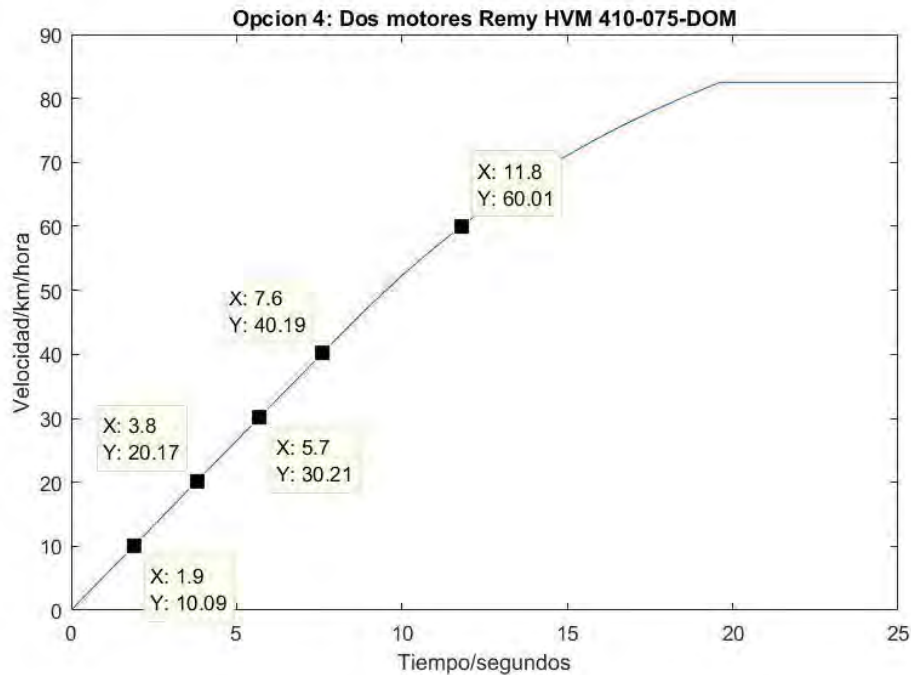
Para  $314.16 \text{ rad/s} < w < 575.96 \text{ rad/s}$ ,  $12.5 \text{ m/s} < v < 22.9 \text{ m/s}$

$$a = \frac{dv}{dt} = \left[ \frac{(1700 + 3.438 * 314.16) * 11.7 * 0.95}{0.465 * 25744} - \frac{24450 * 9.81 * (0.011 + 0)}{25744} \right] - \left[ \frac{3.438 * 11.7^2 * 0.95}{0.465^2 * 25744} \right] * v - \left[ \frac{0.75 * 10 * \frac{1}{2} * 1.199}{25744} \right] * v^2$$

$$v_{n+1} = v_n + dt * (2.479 - 0.080 * v - 0.000175 * v^2)$$

- Se utiliza MATLAB para desarrollar las ecuaciones de aceleración y se grafica la velocidad del vehículo respecto al tiempo [21]:

```
% Aceleración del bus eléctrico en superficie plana
t=linspace(0,25,251); % de 0 a 25 s, en 0.1 s pasos
vel=zeros(1,251); % 251 lecturas de velocidad
dT=0.1; % 0.1 segundos, paso
for n= 1:250
% De acuerdo a las ecuaciones de aceleración
if vel(n)<12.5 % Torque constante hasta este punto
vel(n+1) = vel(n) + dT*(1.476 - (0.000175*(vel(n)^2)));
elseif vel(n)<22.9
vel(n+1)=vel(n)+dT*(2.479-(0.080*vel(n))-(0.000175*(vel(n)^2)));
elseif vel(n)>=22.9 %Limite de la velocidad para las ecuaciones mostradas
vel(n+1)=vel(n);
end;end;
vel=vel.*3.6; % Se multiplica la velocidad por 3.6 para convertir de m/s a kph
plot(t,vel);
xlabel('Tiempo/segundos');
ylabel('Velocidad/km/hora')
title('Opcion 4: Dos motores Remy HVM 410-075-DOM');
```



**Figura 3-5: Aceleración del bus en superficie plana, opción 4**  
**[Elaboración propia utilizando MATLAB]**

- De la misma manera, para una pendiente de 6.5% (3.71°) se tendrá lo siguiente:

$$a = \frac{dv}{dt} = \left[ \frac{1700 * 11.7 * 0.95}{0.465 * 25744} - \frac{24450 * 9.81 * (0.011 + \sin(3.71^\circ))}{25744} \right] - \left[ \frac{0.75 * 10 * \frac{1}{2} * 1.199}{25744} \right] * v^2$$

$$\frac{dv}{dt} = 0.873 - 0.000175 * v^2$$

% Aceleración del bus eléctrico en pendiente 6.5%  
 t=linspace(0,15,151); % de 0 a 15 s, en 0.1 s pasos  
 vel=zeros(1,151); % 151 lecturas de velocidad  
 dT=0.1; % 0.1 segundos, paso

for n= 1:150

% De acuerdo a las ecuaciones de aceleración

if vel(n)<12.5 % Torque constante hasta este punto

vel(n+1) = vel(n) + dT\*(0.837- (0.000175\*(vel(n)^2));

end;end;

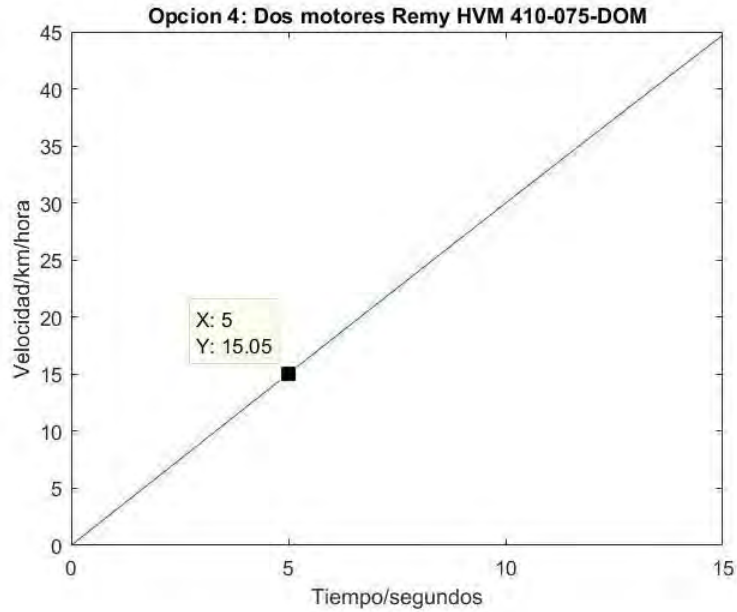
vel=vel.\*3.6; % Se multiplica la velocidad por 3.6 para convertir de m/s a kph

plot(t,vel);

xlabel('Tiempo/segundos');

ylabel('Velocidad/km/hora')

title('Opcion 4: Dos motores Remy HVM 410-075-DOM');



**Figura 3-6: Aceleración del vehículo en pendiente 6.5%, opción 4**  
[Elaboración propia utilizando MATLAB]

- Finalmente, para ascender una pendiente de 16%, el valor de la aceleración debe ser positivo y por lo tanto, se determina este valor utilizando nuevamente las ecuaciones 3.2 y 3.8:

$$F_t = [f_r * m_v * g * \cos(\theta)] + \left[ c_w * A * \frac{1}{2} * \rho * v^2 \right] + [m_v * g * \sin(\theta)] + [m_{eq} * a] \quad (3.2)$$

$$F_t = \frac{T_m * i_a * n_t}{r_{dyn}} \quad (3.8)$$

$$a = \frac{\left[ \frac{T_m * i_a * n_t}{r_{dyn}} \right] - \left[ [f_r * m_v * g * \cos(\theta)] + \left[ c_w * A * \frac{1}{2} * \rho * v^2 \right] + [m_v * g * \sin(\theta)] \right]}{m_{eq}}$$

$$a = \frac{\left[ \frac{1700 * 11.7 * 0.95}{0.465} \right] - \left[ [0.011 * 24450 * 9.81] + [24450 * 9.81 * \sin(9^\circ)] \right]}{25744}$$

$$a = 0.02 \frac{m}{s^2}$$

De la misma manera, para las demás opciones se utiliza el mismo procedimiento para determinar el desempeño del bus para las condiciones requeridas. Los cálculos y gráficos de estas opciones se muestran en el Anexo 4.

### 3.5 Sistema de propulsión y sistema de transmisión

Realizando el mismo procedimiento para las otras tres opciones que se muestran en la tabla 3.5 y las ecuaciones de la tabla 3.7 se obtiene:

**Tabla 3-8: Aceleración de las opciones de sistema de propulsión [Elaboración propia]**

Descripción	Unidad	Remy HVM 410-150-DOM	Parker GVM210-400-DPW	Powerphase HD 950T (x2)	Remy HVH410-075-DOM (x2)
Relación de transmisión	-	5.8	13.1	8.0	11.7
Masa equivalente inercia rotacional	kg	679	565	876	1294
<b>Desempeño en superficie plana</b>					
Aceleración a 10 km/h (4 s. max.)	s	4	4	3	2
Aceleración a 20 km/h (8 s. max.)	s	8	9	5	4
Aceleración a 30 km/h (15 s. max.)	s	12	13	8	6
Aceleración a 40 km/h (22 s. max.)	s	16	17	11	8
Aceleración a 60 km/h (38 s. max.)	s	25	26	19	12
<b>Desempeño en superficie inclinada 6.5%</b>					
Aceleración a 15 km/h (10 s. max.)	s	54	126	8	5
<b>Aceleración en una pendiente igual a 16%</b>					
Aceleración inicial del vehículo	m/s <sup>2</sup>	-0.80	-0.85	-0.36	0.02

En la tabla 3.8 se muestran los valores correspondientes a la aceleración para una superficie plana, una superficie de pendiente igual a 6.5% y la aceleración inicial para una pendiente 16%. Si bien las cuatro opciones poseen un buen desempeño para una superficie plana, el motor Parker GVM210-400-DPW (opción 2) no puede alcanzar el valor requerido de 20 km/hora en 8 segundos. De la misma manera, este motor y el motor Remy HVM 410-150-DOM (opción 1) no tienen un buen desempeño a elevadas pendientes, dado que para una pendiente de 6.5% aceleran a la velocidad de 15 km/hora en 126 y 54 segundos respectivamente, esto se debe a la baja fuerza de tracción que poseen en las ruedas producto de la baja relación torque-velocidad del motor. A pesar del buen desempeño de la opción 3 en superficie plana y superficies elevadas, el motor Powerphase HD 950T no cumple la condición de poder ascender una pendiente de 16%. Finalmente, debido a que la opción 4 de usar dos motores Remy HVM410-075-DOM brinda un excelente desempeño sobre las demás opciones y cumple con todos los requerimientos del sistema es escogida como sistema de propulsión.

Se muestra a continuación el gráfico torque respecto a la velocidad de rotación del motor Remy HVVM-075-DOM.

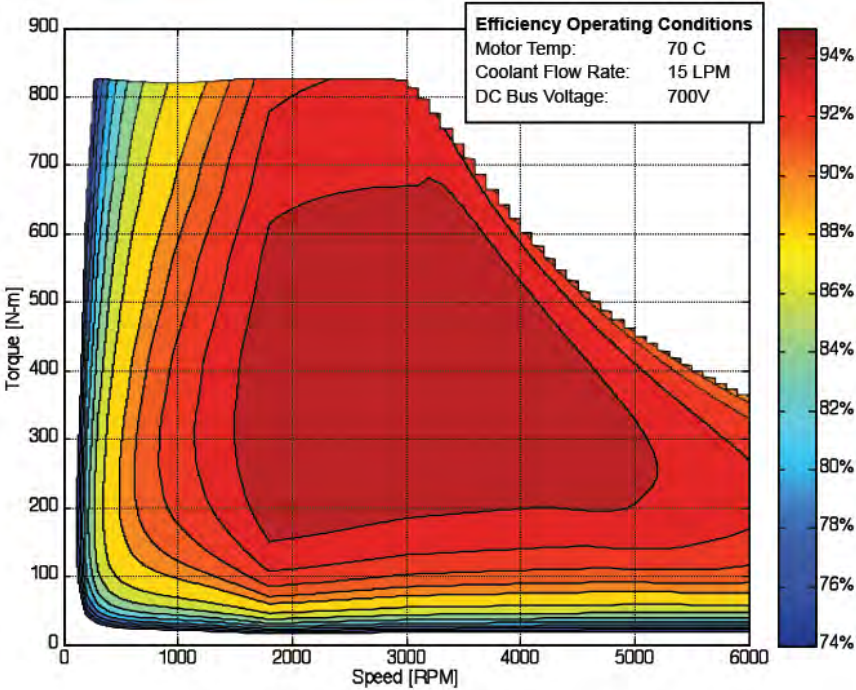


Figura 3-7: Curva torque y rotación del motor Remy HVM410-075-DOM [22]



Figura 3-8: Transmisión simple de reducción para vehículo eléctrico [23]

### 3.6 Sistemas auxiliares del vehículo

En esta sección se describen los principales sistemas auxiliares del bus eléctrico, los cuales se mantienen en operación aun cuando el vehículo está detenido [24]:

- Inversor DC/AC: convierte el voltaje de corriente directa de la batería en corriente alterna para el funcionamiento del motor. También administra el flujo de potencia hacia las baterías durante el freno regenerativo.
- Convertidor DC/DC: convierte el alto voltaje de las baterías en bajo voltaje para poder suministrar energía a los componentes de bajo voltaje del vehículo como son los controladores electrónicos, bombas, ventiladores y otros sistemas auxiliares.
- Cargador: el cargador a bordo del vehículo rectifica el voltaje de la red AC a voltaje DC para poder cargar las baterías. Este dispositivo se selecciona de acuerdo al voltaje de red, voltaje de las baterías y el ratio de carga requerido.
- Sistema de gestión de la batería: es utilizado para monitorear el estado de las baterías. Con la ayuda de un *display* es posible mostrar el estado de carga de las baterías en la cabina del conductor.
- Unidad de distribución de alto voltaje: es un dispositivo compuesto de contactores, fusibles y resistencias para la distribución de la energía del vehículo. Conecta a las baterías con el inversor de corriente y convertidor de corriente. Una de sus funciones es desconectar el circuito de las baterías de los sistemas de propulsión o auxiliares ante cualquier evento crítico de sobrecarga, cortocircuito o estado de reposo del vehículo.
- Controlador del vehículo eléctrico: el controlador electrónico está conectado con los demás sistemas auxiliares y está encargado de gestionar su funcionamiento. Convierte la señal de los pedales, calibra el voltaje hacia el motor en función de la posición del pedal, limita la corriente en función a los parámetros de funcionamiento y su programación y administra la carga de las baterías.
- Bomba de refrigerante: para mantener la temperatura de trabajo tanto del motor, el inversor y las baterías es necesario utilizar una bomba de aceite o refrigerante para mantener una temperatura adecuada de los componentes.

### 3.7 Sistema de almacenamiento de energía

Las baterías son la única fuente de energía para para la propulsión del bus eléctrico y los sistemas auxiliares del vehículo. La energía requerida en un día de operación depende directamente del servicio; por ejemplo, para el servicio Súper Expreso, cuyo horario de operación es en las mañanas y noches solamente, la energía requerida será menor que el servicio regular, el cual opera desde las 5:00 a.m. hasta las 11:00 p.m. Evidentemente algunos de los buses del servicio regular no operan 18 horas continuas, la cantidad de buses en operación y las horas de circulación por día dependen de la afluencia de pasajeros y las horas de trabajo de los conductores, igual a 6 horas diarias. Por otro lado, la energía requerida depende de la ruta de operación, mientras que en una ruta con mayor pendiente requerirá mayor energía, en las rutas de pendientes bajas requerirá menos energía.

#### 3.7.1 Energía para la propulsión del vehículo

Para determinar la autonomía del vehículo, se determina primero la energía requerida entre cada tramo de ruta y luego la energía total requerida por cada servicio en una vuelta o ciclo de conducción. La energía requerida para la propulsión del vehículo se puede determinar con las siguientes ecuaciones:

$E_{prop} = E_{acel} + E_{vel=c}$	(3.12)
$E_{acel} = \int_0^{t1} P_{req} dt$	(3.13)
$E_{vel=c} = P_{req} * t2$	(3.14)

Donde:

$E_{prop}$	[kW-h]	:	Energía para la propulsión del vehículo entre cada estación
$E_{acel}$	[kW-h]	:	Energía desde el reposo hasta la velocidad máxima
$E_{vel=c}$	[kW-h]	:	Energía durante la velocidad constante del vehículo
$P_{req}$	[kW]	:	Potencia requerida del sistema de propulsión
$t1$	[s]	:	Tiempo transcurrido hasta alcanzar la máxima velocidad
$t2$	[s]	:	Tiempo de circulación a máxima velocidad

La energía para la aceleración del vehículo hasta la velocidad máxima se puede obtener integrando la potencia instantánea del vehículo respecto al tiempo, ecuación 3.13. Dado que es posible obtener la potencia requerida en cada instante de tiempo el siguiente procedimiento permite determinar esta energía.



- Utilizando la ecuación 3.6, 3.8 y los datos de la tabla 3.7 del torque nominal de los motores Remy HVM 410-075-DOM se obtiene la fuerza de tracción en función a la velocidad:

$$v = \frac{W * r_{dyn}}{i_a} \quad (3.6)$$

$$F_t = \frac{T_m * i_a * n_t}{r_{dyn}} \quad (3.8)$$

$$w_c = 3000 \text{ rpm (314.16 rad/s)}$$

Para  $w_c > w$ ,

$$T_m = 2 * (850 - 0.637 * w) \text{ [N.m]}$$

$$T_m = 1700 - \frac{1.274 * 11.7}{0.465} * v = 1700.000 - 32.055 * v \text{ [N.m]}$$

Para  $w_c < w < 5500 \text{ rpm (5500 rpm = 575.96 rad/s)}$

$$T_m = 2 * (650 - 1.337 * (w - 314.16)) \text{ [N.m]}$$

$$T_m = 1300 - 2.674 * \left( \frac{v * 11.7}{0.465} - 314.16 \right) = 2140.063 - 67.281 * v \text{ [N.m]}$$

- De la misma manera que en la sección 3.3.2 para obtener la aceleración en función de la velocidad se determina nuevamente la aceleración en función de la pendiente de la carretera y la velocidad del bus:

$$w_c = 3000 \text{ rpm (314.16 rad/s)}$$

Para  $w_c > w$ ,

$$T_{m,1} = 2 * (850 - 0.637 * w) \text{ [N.m]}$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \left[ \frac{T_m * i_a * n_t}{r_{dyn} * m_{eq}} - \frac{m_v * g * (f_r + \text{sen}(\theta))}{m_{eq}} \right] - \left[ \frac{c_w * A * \frac{1}{2} * \rho}{m_{eq}} \right] * v^2$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \left[ \frac{1700 * 11.7 * 0.95}{0.465 * 25744} - \frac{24450 * 9.81 * (0.011 + \text{sen}(\theta))}{25744} \right] - \left[ \frac{1.274 * 11.7^2 * 0.95}{0.465^2 * 25744} \right] * v - \left[ \frac{0.75 * 10 * \frac{1}{2} * 1.199}{25744} \right] * v^2$$

$$v_{n+1} = v_n + dt * \left[ (1.4760 - 9.3169 * \text{sen}(\theta)) - 0.0298 * v - 0.000175 * v^2 \right]$$

Para  $w_c < w < 5500$  rpm (5500 rpm = 575.96 rad/s)

$$T_m = 2 * (650 - 1.337 * (w - 314.16)) \text{ [N.m]}$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \left[ \frac{T_m * i_a * n_t}{r_{dyn} * m_{eq}} - \frac{m_v * g * (f_r + \text{sen}(\theta))}{m_{eq}} \right] - \left[ \frac{c_w * A * \frac{1}{2} * \rho}{m_{eq}} \right] * v^2$$

$$a = \frac{dv}{dt} = \left[ \frac{(1300 + 2.674 * 314.16) * 11.7 * 0.95}{0.465 * 25744} - \frac{24450 * 9.81 * (0.011 + \text{sen}(\theta))}{25744} \right] - \left[ \frac{2.674 * 11.7^2 * 0.95}{0.465^2 * 25744} \right] * v - \left[ \frac{0.75 * 10 * \frac{1}{2} * 1.199}{25744} \right] * v^2$$

$$v_{n+1} = v_n + dt * [(1.8850 - 9.3169 * \text{sen}(\theta)) - 0.0625 * v - 0.000175 * v^2]$$

- Utilizando MATLAB para resolver la integral de la ecuación 3.13 se obtiene la energía requerida para alcanzar la máxima velocidad en función de la pendiente, utilizando también la ecuación 3.3:

$$P_{req} = \frac{v * F_t}{n_t} \quad (3.3)$$

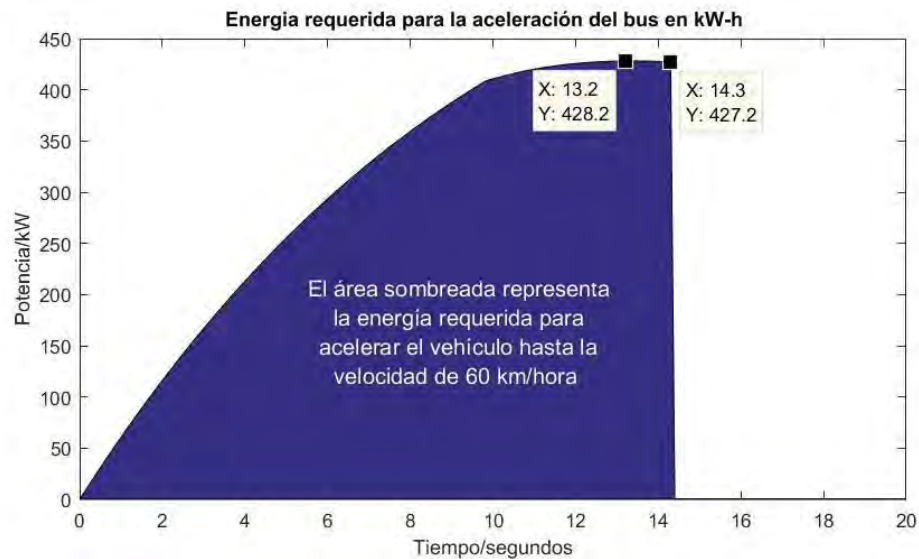
$$E_{acel} = \int_0^{t1} P_{req} dt \quad (3.13)$$

```
% Energía para alcanzar la maxima velocidad en funcion de la pendiente
t=linspace(0,20,201); % de 0 a 20 s, en 0.1 s pasos
vel=zeros(1,201); % 201 lecturas de velocidad
pot=zeros(1,201); % 201 lecturas de potencia
tra=zeros(1,201); % 201 lecturas de fuerza de tracción
d=zeros(1,201); % Matriz obtener la distancia recorrida
en=zeros(1,201); % Matriz para obtener la energía
dT=0.1; % 0.1 segundos, paso
theta=0; % Valor de la pendiente en porcentaje
theta=atan(theta/100); % Convierte el valor de la pendiente en radianes
for n= 1:200
% De acuerdo a las ecuaciones de aceleración y fuerza de tracción
if vel(n)<12.5
tra(n)=11.7*0.95/0.465*(1700-32.055*vel(n));
vel(n+1) = vel(n) + dT*(1.4760-9.3169*sin(theta)-0.0298*vel(n)-
0.000175*(vel(n)^2));
d(n+1)=d(n) + 0.1*vel(n);
elseif vel(n)<16.7
tra(n)=11.7*0.95/0.465*(2140.063-67.281*vel(n));
vel(n+1)=vel(n)+dT*(1.8855-9.3169*sin(theta)-0.0625*vel(n)-0.000175*(vel(n)^2));
d(n+1)=d(n) + 0.1*vel(n);
```

```

elseif vel(n)>=16.7 % Limite de la velocidad del bus, igual a 60km/hora
tra(n)=0;
vel(n+1)=vel(n);
end;
pot(n)=vel(n)*tra(n)/1000/0.95;% Ecuacion 3.3, convierte la potencia a kW
en(n+1)=en(n) + 0.1*pot(n);%Integra la potencia para obtener la energía
end;
en=en./3600; %Convierte la energía en kW-h
plot(t,pot);
xlabel('Tiempo/segundos'); ylabel('Potencia/kW');
title('Energía requerida para la aceleración del bus en kW-h');
max(en)%Indica el valor de la energía necesaria para la aceleración
max(d)%Indica la distancia que se recorre para alcanzar la maxima velocidad

```



**Figura 3-9: Energía requerida para la aceleración del vehículo en una superficie plana [Elaboración propia utilizando MATLAB]**

La energía de propulsión correspondiente a la aceleración del vehículo se muestra en la figura 3.10, usando los comandos de Matlab mostrados es posible obtener la energía requerida y la distancia recorrida hasta alcanzar la velocidad de 60 km/hora. Para los comandos mostrados, se obtuvieron valores de 1.18 kW-h y 131.20 m respectivamente para una aceleración del motor a torque nominal en una superficie plana. Utilizando los comandos de Matlab para cada pendiente de la tabla 2.4 se obtiene la energía utilizada para la aceleración del vehículo. Luego de alcanzar la máxima velocidad, el vehículo mantiene su velocidad y la potencia durante este periodo de tiempo se muestra en las figuras 3.2 y 3.3. La energía de propulsión se muestra en el Anexo 5.

### 3.7.2 Energía recuperada por el freno regenerativo

La capacidad de recuperación de energía mediante el frenado regenerativo es una de las principales ventajas de los vehículos híbridos y eléctricos. El objetivo principal es convertir la energía cinética del vehículo en energía eléctrica, la cual será almacenada para posteriormente ser utilizada en la propulsión del vehículo. Durante el proceso de frenado para la reducción de velocidad del vehículo o la detención de este, los frenos convencionales disipan la energía cinética en forma de calor; en el caso del frenado regenerativo la energía es recuperada utilizando el motor o los motores eléctricos como generadores de electricidad.

Existen dos limitantes físicos para la fuerza de frenado máximo: la fuerza adherente y la fuerza de frenado de los frenos durante la desaceleración. La fuerza adherente corresponde a la máxima fuerza de frenado que puede realizar el vehículo antes de que las ruedas se bloqueen [25].

$$F_{fre,max} = \mu * m_v * g = a_{f,max} * m_{eq} \quad (3.15)$$

Donde:

$F_{fre,max}$ [N]	:	Fuerza máxima de frenado
$\mu$ [-]	:	Coefficiente de tracción entre las ruedas y el pavimento
$g$ [m/s <sup>2</sup> ]	:	Aceleración de la gravedad, 9.81 m/s <sup>2</sup>
$m_v$ [kg]	:	Masa total del vehículo
$a_{f,max}$ [m/s <sup>2</sup> ]	:	Desaceleración máxima
$m_{eq}$ [kg]	:	Masa equivalente total del vehículo

**Tabla 3-9: Coeficiente de rozamiento estático [26]**

**Table 3.2.** Static coefficient of friction  $\mu_H$  of new pneumatic tyres on road surfaces [3.1]

Road speed (km/h)	Static coefficient of friction $\mu_H$	
	Dry road surface	Wet road surface
50	0.85	0.65
90	0.80	0.60
130	0.75	0.55

Resolviendo al ecuación 3.15 para una masa del vehículo igual a 24450 kg, masa equivalente igual a 25744 kg, se obtiene un valor máximo de fuerza de frenado igual a 204 kN y una desaceleración máxima igual a 7.9 m/s<sup>2</sup>.



Figura 3-10: Bus articulado del Metropolitano, figura modificada [27]

Un limitante adicional de la fuerza de frenado es el torque máximo del motor respecto a su velocidad de rotación funcionando como generador. Durante la desaceleración las siguientes ecuaciones son aplicadas con la finalidad de hallar la fuerza del freno regenerativo en el eje trasero [28]:

$$F_a = (-F_{ax}; F_{ay}); F_b = (-F_{bx}; F_{by}); F_c = (-F_{cx}; F_{cy})$$

$\sum F_x = -m_{eq} * a_f = -(F_{ax} + F_{bx} + F_{cx}) - F_{drag} - F_{rr}$	(3.16)
$\sum F_y = 0; F_{na} + F_{nb} + F_{nc} = m_v * g$	(3.17)
$T_{reg} = \frac{F_{reg} * r_{dyn} * n_t}{i_a}$	(3.18)

Donde:

$F_{a,b,c}$	[N]	:	Fuerza en las ruedas
$F_{-x}$	[N]	:	Fuerza de frenado en las ruedas, eje x
$F_{-y}$	[N]	:	Fuerza normal en las ruedas, eje y
$F_{reg}$	[N]	:	Fuerza de frenado regenerativo en las ruedas traseras
$F_{drag}$	[N]	:	Fuerza de resistencia del viento
$F_{rr}$	[N]	:	Fuerza de resistencia a la rodadura
$m_v$	[kg]	:	Masa total del vehículo
$a_f$	[m/s <sup>2</sup> ]	:	Desaceleración del vehículo
$T_{reg}$	[N-m]	:	Torque en el motor para el freno regenerativo
$r_{dyn}$	[m]	:	Radio dinámico de la rueda
$i_a$	[-]	:	Relación de transmisión total
$n_t$	[-]	:	Eficiencia de la transmisión, considerara 95%

Considerando una distribución del peso del vehículo en cada eje de acuerdo a la capacidad de carga de cada uno y para la fuerza de frenado, equiadherencia en los 3 ejes  $\left(\frac{F_{ax}}{F_{ay}} = \frac{F_{bx}}{F_{by}} = \frac{F_{cx}}{F_{cy}}\right)$ , donde las ruedas de cada eje del bus frenan proporcionalmente al peso en dicho eje se obtienen los siguientes resultados para una desaceleración detención del vehículo en 12 segundos (capítulo 2) [29]:

**Tabla 3-10: Torque máximo de frenado regenerativo [Elaboración propia]**

Descripción	Unidad	Valor
Velocidad máxima del vehículo	km/hora	60
Tiempo de desaceleración hasta la detención	s	12
Desaceleración media del vehículo	m/s <sup>2</sup>	1.4
Masa del vehículo	kg	24450
Masa equivalente del vehículo	kg	24744
Fuerza de resistencia a la rodadura	N	2638
Fuerza de resistencia al viento media (v=30km/hora)	N	312
Fuerza de frenado	N	31416
Carga máxima en el eje A	kg	11550
Carga máxima en el eje B	kg	11550
Carga máxima en el eje C	kg	7000
Fuerza normal en el eje A	N	92037
Fuerza normal en el eje B	N	92037
Fuerza normal en el eje C	N	55780
Fuerza de frenado regenerativo, eje A	N	12055
Fuerza de frenado convencional, eje B	N	12055
Fuerza de frenado convencional, eje C	N	7306
Radio dinámico de la rueda	m	0.465
Relación de transmisión total	-	11.7
Eficiencia de la transmisión	-	95%
Torque de frenado regenerativo en los motores	N-m	455
Torque de frenado regenerativo en cada motor	N-m	228

Dado que el torque de frenado regenerativo en los motores es menor al torque nominal de los motores para cualquier velocidad, se realizan los siguientes cálculos para hallar la energía recuperada mediante el frenado regenerativo para una desaceleración constante y torque de frenado regenerativo constante:

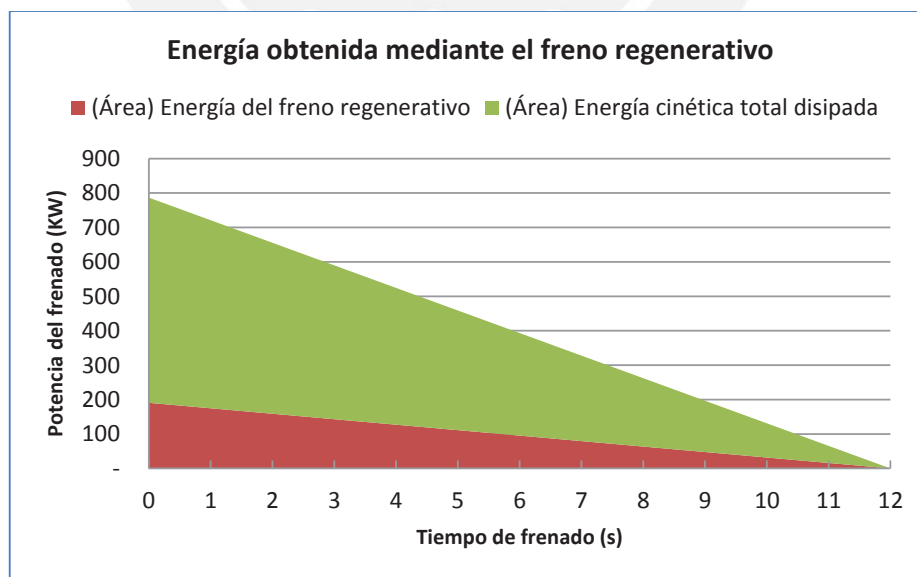
$n_{reg} = \frac{E_{reg}}{E_c}$	(3.19)
$E_c = \frac{1}{2} * m_{eq} * v^2$	(3.20)
$P_{reg} = T_{reg} * \omega$	(3.21)
$E_{reg} = \int_{t_3}^{t_4} P_{reg} dt$	(3.22)

Donde:

$E_c$	[kJ]	:	Energía cinética del vehículo en movimiento
$n_{reg}$	[-]	:	Eficiencia del freno regenerativo
$m_{eq}$	[kg]	:	Masa equivalente total del vehículo
$v$	[m/s]	:	Velocidad del vehículo
$P_{reg}$	[W]	:	Potencia generada por el freno regenerativo
$T_{reg}$	[N-m]	:	Torque en el motor para el freno regenerativo
$\omega$	[rad/s]	:	Velocidad de rotación del motor
$E_{reg}$	[J]	:	Energía recuperada por el freno regenerativo
$t_3$	[s]	:	Tiempo transcurrido hasta la desaceleración
$t_4$	[s]	:	Tiempo transcurrido hasta la detención del vehículo

**Tabla 3-11: Energía regenerada y eficiencia del frenado regenerativo [Elaboración propia]**

Descripción	Unidad	Valor
Masa equivalente total del vehículo	kg	25,744.00
Torque de frenado regenerativo en los motores	N-m	455.15
Velocidad del motor para la máxima velocidad del bus	rpm	4,000.00
Potencia del freno regenerativo a máxima velocidad	kW	190.65
Tiempo de detención del vehículo	s	12.00
Energía del freno regenerativo	kJ	1,143.92
Energía del freno regenerativo	kW-h	0.32
Energía cinética total del vehículo a máxima velocidad	kJ	3,575.56
Eficiencia del frenado regenerativo	-	32%
Distancia recorrida durante el frenado	m	100.00



**Figura 3-11: Energía recuperada y disipada durante el frenado [Elaboración propia]**



La figura 3.12 muestra la potencia del frenado, el área sombreada de color rojo representa la integral de la potencia respecto al tiempo para obtener la energía recuperada por el freno regenerativo, igual a 0.32 kW-h. El área de color verde representa la energía cinética total que es disipada debido a las pérdidas por rodadura, resistencia del viento y frenado convencional donde se transforma la energía cinética en calor mediante la fricción entre los frenos y las ruedas. La eficiencia del frenado regenerativo en las ruedas traseras es 32% de la energía cinética total del vehículo a máxima velocidad.

### **3.7.3 Energía de los sistemas auxiliares del vehículo**

Los componentes auxiliares del vehículo más relevantes son los que se muestran a continuación [30]:

- Inversores DC/AC: potencia aproximada entre 14-28 W para inversores de corriente de marca UQM Powerphase
- Bomba para refrigeración: teniendo en cuenta dos bombas EMP OP40 de 4 galones por minuto cada uno para el enfriamiento de los motores, la potencia será de 800 W.
- Sistema de dirección hidráulico: teniendo en cuenta un sistema de dirección accionado por un motor Parker GVM 142 de potencia entre 1.5 y 7.5 kW
- Compresor de aire para aire acondicionado: sea un compresor MI-EV36-BNX de hasta 6.5 kW

Dado que los sistemas auxiliares como los anteriormente mencionados operan intermitentemente a potencia máxima, y que las puertas y luces laterales son accionadas solamente al aproximarse a las estaciones, se considera un valor constante de 3 kW para la alimentación de todos los sistemas auxiliares del vehículo.

### **3.7.4 Energía requerida para un ciclo de conducción y en un día de operación**

Para todos los tipos de batería se debe tener en cuenta un estado de carga mínima del 20%, con la finalidad de calcular la energía por ciclo de conducción se utiliza la siguiente ecuación:

$E_{\text{ciclo}} = \left( \frac{\sum_{i=1}^n E_{\text{prop}}}{n_m} + n_g * \sum_{i=1}^n E_{\text{reg}} + P_{\text{aux}} * t \right) * \left( \frac{1}{1 - \text{SOC}_{\text{min}}} \right)$	(3.23)
$E_{\text{dia}} = E_{\text{ciclo}} * N$	(3.24)

Donde:

$n_m$	[-]	:	Eficiencia del motor
$n_g$	[-]	:	Eficiencia del motor funcionando como generador
$E_{\text{reg}}$	[W-h]	:	Energía recuperada por el freno regenerativo
$P_{\text{aux}}$	[W]	:	Potencia de los sistemas auxiliares
$t_c$	[h]	:	Tiempo por ciclo de conducción
$E_{\text{prop}}$	[W-h]	:	Energía para la propulsión del vehículo
$N_c$	[-]	:	Cantidad de recorridos diarios
$E_{\text{dia}}$	[W-h]	:	Energía requerida en un día
$E_{\text{ciclo}}$	[W-h]	:	Energía requerida por ciclo
$\text{SOC}_{\text{min}}$	[-]	:	Estado de carga mínimo

Entre cada estación del recorrido es posible determinar la energía de propulsión del vehículo, como ejemplo se muestra el desarrollo de las ecuaciones para el tramo entre las estaciones Matellini y Rosario de Villa:

- Utilizando los comandos en MATLAB mostrados en la sección 3.6.1 para resolver la ecuación 3.13 y para una pendiente igual a 0.6% se obtiene:

$$E_{\text{acel}} = \int_0^{t_1} P_{\text{req}} dt \quad (3.13)$$

$$E_{\text{acel}} = 1.24 \text{ kW} - \text{h}$$

- Se obtiene que la energía de propulsión durante la aceleración es igual a 1.24 kW-h y se recorre una distancia igual a 138 metros. Si durante el frenado, el bus recorre 100 metros y la distancia total entre las estaciones es 665 metros, entonces utilizando la ecuación 3.14 se obtiene la energía de propulsión del vehículo a velocidad constante en dicho tramo:

$$E_{\text{vel=c}} = P_{\text{req}} * t_2 \quad (3.14)$$

$$E_{\text{vel=c}} = 94 \text{ kW} * \left( \frac{665\text{m} - 138\text{m} - 100\text{m}}{60 \frac{\text{km}}{\text{hora}}} \right) = 0.67 \text{ kW} - \text{h}$$

- Utilizando la ecuación 3.12 se obtiene finalmente la energía requerida para la propulsión del vehículo para cada tramo de ruta del recorrido del bus eléctrico:

$$E_{prop} = E_{acel} + E_{vel=c} \quad (3.12)$$

$$E_{prop} = 1.24 \text{ kW} - h + 0.67 \text{ kW} - h = 1.91 \text{ kW} - h$$

De la misma manera para cada tramo de ruta del recorrido se realiza este procedimiento y se obtiene la tabla mostrada a continuación, los datos se muestran en el Anexo 6.

**Tabla 3-12: Energía de propulsión en cada tramo de ruta [Elaboración propia]**

Energía para la propulsión del vehículo							
Ruta	Paradero de inicio	Paradero de llegada	Distancia (m)	DIRECCION: SUR - NORTE		DIRECCION : NORTE-SUR	
				Pendiente	Energía para la propulsión del vehículo en kW-h	Pendiente	Energía para la propulsión del vehículo en kW-h
Ruta troncal del Metropolitano - Tramo Sur							
1	Matellini	Rosario de Villa	665	0.6%	1.91	-0.6%	1.43
2	Plaza Lima Sur	Terán	679	0.6%	1.92	-0.6%	1.44
3	Terán	Escuela Militar	853	0.8%	2.31	-0.8%	1.45
4	Escuela Militar	Estadio Unión	920	1.1%	2.58	-1.1%	1.33
5	Estadio Unión	Bulevar	547	0.7%	1.77	-0.7%	1.31
6	Bulevar	Balta	773	1.0%	2.28	-1.0%	1.31
7	Balta	Plaza de Flores	852	0.6%	2.19	-0.6%	1.57
8	Plaza de Flores	28 de Julio	772	0.4%	1.98	-0.4%	1.60
9	28 de Julio	Benavides	493	0.6%	1.64	-0.6%	1.30
10	Benavides	Ricardo Palma	707	0.8%	2.07	-0.8%	1.36
11	Ricardo Palma	Angamos	640	0.8%	1.93	-0.8%	1.35
12	Angamos	Domingo Orué	574	1.4%	2.02	-1.4%	1.11
13	Domingo Orué	Aranburú	653	0.8%	1.95	-0.8%	1.36
14	Aranburú	Canaval Moreyra	693	1.6%	2.36	-1.6%	1.04
15	Canaval Moreyra	Javier Prado	681	1.9%	2.46	-1.9%	1.00
16	Javier Prado	Canadá	826	-0.6%	1.54	0.6%	2.16
17	Canadá	México	693	0.3%	1.81	-0.3%	1.58
18	México	Estadio Nacional	906	0.6%	2.26	-0.6%	1.62
19	Estadio Nacional	Estación Central	1190	0.5%	2.65	-0.5%	1.88
Ruta troncal del Metropolitano - Tramo Centro Ruta A							
20	Estación Central	Colmena	543	2.4%	2.27	-2.4%	0.97
21	Colmena	Jirón de la unión	685	0.4%	1.87	-0.4%	1.51
22	Jirón de la unión	Tacna	397	-2.0%	1.00	2.0%	1.77
23	Tacna	Ramón y Castilla	518	-2.1%	0.99	2.1%	2.11
24	Ramón y Castilla	Caquetá	915	-1.3%	1.20	1.3%	2.69
Ruta troncal del Metropolitano - Tramo Centro Ruta B							
25	Estación Central	España	724	-0.8%	1.38	0.8%	2.09
26	España	Quilca	598	0.3%	1.70	-0.3%	1.47
27	Quilca	2 de Mayo	607	-0.3%	1.48	0.3%	1.71
28	2 de Mayo	Caquetá	1043	-0.9%	1.53	0.9%	2.67
Ruta troncal del Metropolitano - Tramo Norte							
29	Caquetá	Parque del trabajo	840	-0.5%	1.61	0.5%	2.12
30	Parque del trabajo	UNI	772	-0.9%	1.37	0.9%	2.21
31	UNI	Honorio Delgado	858	-1.3%	1.20	1.3%	2.56
32	Honorio Delgado	El Milagro	617	-1.5%	1.08	1.5%	2.14
33	El Milagro	Tomás Valle	597	-1.8%	1.01	1.8%	2.23
34	Tomás Valle	Los Jazmines	525	-0.8%	1.28	0.8%	1.73
35	Los Jazmines	Independencia	400	-1.8%	1.01	1.8%	1.74
36	Independencia	Pacífico	498	0.0%	1.48	0.0%	1.48
37	Pacífico	Izaguirre	525	-1.0%	1.22	1.0%	1.80
38	Izaguirre	Naranjal	768	0.1%	1.84	-0.1%	1.73

Para cada servicio del sistema de buses articulados, se determina la energía requerida en un ciclo y en un día de operación utilizando las ecuaciones 3.23 y 3.24, en este caso se considera un valor de 90% de eficiencia para los motores y 75% de eficiencia funcionando como generadores, el recorrido de cada servicio se muestra en la tabla 2.2 y el desarrollo de las ecuaciones en el Anexo 7.

**Tabla 3-13: Energía requerida por ciclo de conducción [Elaboración propia]**

Servicio	Tiempo por ciclo (min)	Km por ciclo	Energía para la propulsión (kW-h)	Energía recuperada (kW-h)	Energía sistemas auxiliares (kW-h)	Energía eléctrica ciclo (kW-h)	Energía baterías por ciclo (kW-h)	Máximo número de recorridos diarios	Energía total de las baterías en un día (kW-h)	Ratio de consumo energético kWh/km
Regular A	68	19	49.2	9.6	3.4	50.9	64	15	955	2.69
Regular B	140	47	113.7	21.1	7.0	117.5	147	7	1028	2.50
Regular C	100	33	79.3	14.7	5.0	82.1	103	10	1026	2.52
Expreso 1	116	28	54.0	7.7	5.8	60.0	75	4	300	2.12
Expreso 2	80	36	54.6	5.1	4.0	60.8	76	6	456	1.67
Expreso 3	80	34	43.8	1.6	4.0	51.5	64	6	386	1.52
Expreso 4	78	36	61.6	7.0	3.9	67.1	84	11	922	1.84
Expreso 5	83	36	63.7	7.7	4.2	69.2	86	5	432	1.90
Súper Expreso	72	24	34.6	1.9	3.6	40.6	51	2	101	1.71

De la tabla mostrada se puede observar que la máxima energía por ciclo corresponde al valor de 147 kW-h del servicio regular B y el valor máximo requerido a lo largo del día es igual a 1228 kW-h para el mismo servicio. La gestión del proceso de carga de estas baterías se revisará en las siguientes secciones para determinar la capacidad de las baterías del bus.

### 3.7.5 Peso bruto del vehículo

La ubicación de las baterías y su peso son factores importantes al momento de seleccionar la capacidad de estas. De la ecuación 3.1 se puede deducir que el peso del vehículo es prácticamente proporcional a la energía requerida. Para determinar un peso adecuado de las baterías se tiene en cuenta la diferencia entre el peso actual del vehículo de combustión interna y el peso del vehículo eléctrico. En un vehículo de combustión, el motor, la transmisión, diferencial y el tanque de combustible tienen una masa elevada; mientras que en el caso de vehículos eléctricos estos componentes son de menor masa.

**Tabla 3-14: Masa del vehículo eléctrico sin baterías [Elaboración propia]**

Vehículo de combustión interna	Masa kg	Vehículo eléctrico	Masa kg
Peso del chasis sin motor ni transmisión	12,284	Peso del chasis	12,284
Motor Cummins ISLG 320	737	Motores Remy	196
Transmisión automática Allison T375	279	Reductores de velocidad	80
Tanques de combustible	200	Inversor de potencia	80
Masa de 161 pasajeros	10,950	Masa de 161 pasajeros	10,950
Masa del vehículo	24,450	Masa del vehículo sin baterías	23,590
Diferencia a favor del vehículo eléctrico			860

Para un tanque de combustible de aproximadamente 200 kg y considerando la masa de los reductores de velocidad igual a 80 kg, se puede determinar que la masa del vehículo eléctrico sin baterías es igual a 23,590 kilogramos, para un peso bruto máximo de 30,450 kg., por lo tanto se tiene un margen de aproximadamente 7 toneladas para las baterías. Sin embargo, tal y como se indica anteriormente, un menor peso de baterías representará una mayor capacidad de pasajeros y mayor eficiencia del bus eléctrico.

### 3.7.6 Sistema de carga de las baterías

Existen distintos tipo de carga para vehículos eléctricos; los vehículos livianos son cargados con la potencia disponible en los hogares, los vehículos de mayor tamaño son cargados en infraestructuras de carga rápida. Otros tipos de carga para los vehículos de mayor tamaño involucran cargar el vehículo en estaciones de baja o media tensión. Las principales desventajas de la recarga rápida que el estado de carga de la batería se limita a un 70% máximo y solamente es compatible con algunas baterías especiales.

**Table 2.** Examples of current fast charging systems [17–20].

Supplier	System	Technology	Charging power
Proterra	FastFill	conductive	500 kW
Bombardier	Primove	inductive	200 kW
ABB	TOSA	conductive	200 kW; 400 kW (15 s)
Conductix Wampfler	IPT charger	inductive	60–180 kW

**Figura 3-12: Ejemplos de sistemas de carga rápida [31]**

Para el caso en que la recarga de las baterías no es a bordo del vehículo y con la finalidad de reducir el peso de las baterías, se utilizan los sistemas de recambio de baterías montadas en el techo. De esta manera, cuando el bus llega a su destino final, las baterías son intercambiadas por baterías cargadas y mientras el bus se encuentra en operación, los paquetes de baterías intercambiables son cargados. De esta manera se reduce el peso del vehículo pero se incrementa el número de ciclos de recarga de las baterías, lo que se traduce en una reducción de la vida útil de las baterías. Este sistema de recambio de baterías representa la mejor alternativa porque reduce el peso total del vehículo, lo que se traduce en un ahorro de energía y posibilita realizar la carga de las baterías a lo largo del día. De esta manera se obtiene un uso adecuado de la infraestructura de recarga de baterías a lo largo del día y la potencia de carga es menor respecto a las infraestructuras de carga rápida.



**Figure 1.** Illustration of the battery exchange process.

**Figura 3-13:** Ejemplos de sistemas de carga rápida [32]

Para este caso, de recarga convencional de paquetes de baterías, se utiliza corriente trifásica para cargar las baterías. En el Perú la corriente trifásica es igual a 380 Voltios. Para determinar el valor de la potencia de la red requerida se deben utilizar las siguientes ecuaciones [33]:



$P_{\text{charge,req}} = \frac{E_{\text{demand}}}{T_{\text{charge,av}}} * \frac{1}{n_{\text{bat}}}$	(3.25)
$P_{\text{charge,grid}} = \frac{P_{\text{charge,req}}}{n_{\text{req}}}$	(3.26)
$P_{\text{charge,grid}} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} * V_{\text{LL}} * I_{\text{grid}}$	(3.27)

Donde:

$P_{\text{charge,req}}$	[kW]	:	Potencia de carga requerido
$E_{\text{demand}}$	[kW-h]	:	Energía de recarga requerida
$T_{\text{charge,av}}$	[h]	:	Tiempo mínimo de recarga solicitado
$n_{\text{bat}}$	[-]	:	Eficiencia de carga de baterías
$P_{\text{charge,grid}}$	[kW]	:	Potencia de la red
$n_{\text{req}}$	[-]	:	Eficiencia de la conversión en la estación de carga
$V_{\text{LL}}$	[V]	:	Voltaje de la corriente trifásica
$I_{\text{grid}}$	[A]	:	Corriente de la red

### 3.7.7 Selección de las baterías

El tipo de batería conveniente para su utilización en buses eléctricos es el de iones de litio debido a su elevada energía específica, corto tiempo de recarga y prolongado tiempo de vida útil. Entre las baterías de iones de litio se enumeran los 6 tipos más utilizados, los cuales fueron clasificados según el material activo: litio óxido de cobalto, litio óxido de manganeso, litio níquel manganeso óxido de cobalto, litio fosfato de hierro, níquel cobalto de litio óxido de aluminio y titanato de litio [34].

Entre las configuraciones para el sistema de almacenamiento se puede resaltar la utilización de dos tipos de batería distintos, de tal manera que uno tenga mayor potencia específica para el arranque del vehículo y el otro tipo de batería tenga mayor energía específica para obtener una mayor autonomía. Este es el caso de las baterías de litio manganeso que se utilizan junto con las baterías de litio níquel manganeso óxido de cobalto utilizados en los vehículos Nissan Leaf, Chevy Bolt y BMW i3 . Para las configuraciones de un solo tipo de batería se descartan las baterías de óxido de cobalto, níquel cobalto de litio óxido de aluminio y titanato de litio por la baja energía específica, poca seguridad y alto costo respectivamente, a continuación se realiza una comparación de las baterías más utilizadas en vehículos eléctricos:



**Tabla 3-15: Comparación de baterías de iones de litio [35,36]**

Descripción	Unidad	LiMn2O4	LiNiMnCoO2	LiFePO4
Potencia específica	W/kg	Regular	Alta	Muy alta
Energía específica	Wh/kg	100-150	150-220	90-120
Carga (C-ratio)	-	0.7-1	0.7-1	1
Ciclos de vida en vehículos eléctricos	Ciclos	1500+	2000+	5000+
Aplicaciones en general	-	Máquinas herramientas y propulsión eléctrica	Vehículos eléctricos, bicicletas eléctricas	Aplicaciones portátiles y estacionarias de alto voltaje
Comentarios	-	Seguro pero de baja capacidad	Elevada capacidad y poder específico	Alto voltaje a pesar de la baja energía específica
		Se combinan usualmente		

Las baterías de litio fosfato de hierro son la alternativa ideal para el bus eléctrico debido a su alta potencia específica y tiempo de vida. Los paquetes de baterías consisten en una combinación de celdas o módulos conectados en serie o paralelo, cuando las baterías están conectadas en serie es posible alcanzar altos voltajes y cuando están conectados el paralelo, el ratio de utilización Ah es mayor. Estos tipos de configuraciones requieren de un circuito de protección, el cual consiste en la desconexión de las baterías en caso de riesgo en función a lo indicado por la norma IEC 62133. Para determinar la cantidad de celdas o módulos en serie y paralelo se utilizan las siguientes ecuaciones [37]:

$N_{bat,s} = \frac{V_{prop}}{V_{cel}}$	(3.31)
$N_p = \frac{E_{req}}{E_s} = \frac{E_{req}}{N_{bat,s} * E_{cel}}$	(3.32)
$N_{bat} = N_{bat,s} * N_p$	(3.33)

Donde:

$N_{bat,s}$	[-]	:	Cantidad de celdas o módulos en serie
$V_{prop}$	[V]	:	Voltaje DC requerido por el sistema de propulsión
$V_{cel}$	[V]	:	Voltaje de celda o módulo unitario
$N_p$	[-]	:	Número de conjunto de baterías en paralelo
$E_{cel}$	[W-h]	:	Energía unitaria de cada celda
$E_{req}$	[W-h]	:	Energía requerida
$E_s$	[W-h]	:	Energía de cada conjunto de baterías en serie
$N_{bat}$	[-]	:	Cantidad de celdas o módulos en total

**Tabla 3-16: Características de las baterías para el bus [Elaboración propia]**

Requerimientos de los sistemas de propulsión y almacenamiento		
Voltaje mínimo de operación	V	200.0
Voltaje máximo de operación	V	700.0
Energía requerida kW-h	kW-h	64.3
Modulo de baterías y configuración		
Tipo de batería	-	LiFePO4
Proveedor	-	Optimum Nano
Voltaje de cada celda	V	3.20
Ratio de corriente por celda	A-h	5.00
Energía por celda	W-h	15.87
Peso de celda kg	kg	0.21
Celdas en serie	-	218
Voltaje máximo	V	698
Peso de cada serie	kg	45.4
Energía por cada serie kW-h	kW-h	3.5
Cantidad de series	-	19
Celdas en total	-	4,142.0
Energía total	kW-h	65.7
Peso total kg	kg	863

Se selecciona el módulo de baterías para el valor de 64.3 kW-h correspondientes al servicio regular A, cuyo ratio de consumo energético es mayor. Se seleccionan baterías de la marca Optimum Nano para el vehículo de configuración 218S19P. La capacidad de las baterías es igual a 65.7 kW-h y la masa total es 863 kg. Valores típicos del tiempo de recarga de las baterías de buses eléctricos varían entre 3 y 5 horas de carga. En este caso se considera el valor de 4 horas para la carga completa de las baterías del vehículo.

**Tabla 3-17: Características de la carga de las baterías [Elaboración propia]**

Descripción	Unidad	Valor
Energía eléctrica por ciclo	kW-h	51.5
Tiempo de recarga	hora	4
Eficiencia de carga de baterías	-	Se considera 95%
Potencia de carga requerida	kW	14
Eficiencia de la rectificación	-	Se considera 95%
Potencia del centro de carga	kW	14
Voltaje trifásico	V	380
Corriente de carga	A	23

### 3.8 Características del vehículo

A continuación, se muestran las especificaciones básicas del bus eléctrico de 18 m.

**Tabla 3-18: Especificaciones básicas del bus eléctrico [Elaboración propia]**

Descripción	Unidad	Valores
<b>Características del vehículo</b>		
Masa total del vehículo	kg	24,450
Velocidad máxima	km/hora	90
Velocidad máxima en operación	km/hora	60
Capacidad de pasajeros	-	161 de 68kg cada uno
Máxima pendiente	%	16%
Neumáticos	-	275/70R22.5
<b>Sistema de propulsión</b>		
Motores	-	Remy HVH410-075-DOM (x2)
Potencia máxima	kW	550 (2x275)
Potencia continua	kW	450 (2x225)
Máximo torque	N-m	1700 (2x850)
Torque continuo	N-m	1300 (2x625)
Velocidad máxima	rpm	6000
Máxima eficiencia	-	95.0%
Peso	kg	196
Densidad de potencia	kW/kg	2.3
Voltaje de operación	V	200-700
Rango de torque máximo	rpm	0-3000
Rango de potencia máxima	rpm	3000-6000
Posición de los motores	-	Eje posterior
<b>Sistema de transmisión</b>		
Cantidad de reductores de velocidad	-	2
Relación de transmisión	-	Fija 11.7:1
Sentido de rotación	-	Horario y antihorario
Torque máximo	N-m	850
Velocidad máxima	rpm	6000
<b>Sistema de almacenamiento de energía</b>		
Tipo de batería	-	Iones de Litio Fosfato de Hierro
Capacidad de las baterías	kW-h	66
Tiempo de carga de las baterías	hora	4
Sistema de carga	-	Recambio de baterías
Cantidad de baterías extra para cambio	-	2
Voltaje de las baterías	V	698
Masa de las baterías	kg	863
Configuración	-	218S19P

### Referencias bibliográficas del capítulo 3

- [1] NAUNHEIMER, Harald y otros  
2011 Automotive Transmissions. Segunda edición. Nueva York: Springer, pp. 81.
- [2] KULWORAWANICHPONG, Thanatchai  
2014 Dynamic Simulation of Electric Bus Vehicle. Consulta: 18 de octubre de 2016.  
<http://www.thesij.com/papers/CSEA/2014/May/CSEA-0203180401.pdf>
- [3] HEIBING, Berndt  
2011 Chassis Handbook. Primera Edición. Wiesbaden: Springer, pp.45
- [4] NAUNHEIMER, Harald y otros  
2011 Automotive Transmissions. Segunda edición. Nueva York: Springer, pp. 75.
- [5] Ibídem pp. 75.
- [6] Ibídem pp. 78.
- [7] Ibídem pp. 80.
- [8] BALTATANU ADRIAN y otros  
2013 "Comparison of Electric Motors Used for Electric Vehicles Propulsion". International Conference of Scientific Paper Afases 2013. Brasov, pp.7.
- [9] Ídem
- [10] PARKER  
2016 GVM Global Vehicle Motor. Consulta: 19 de junio de 2017.  
[http://www.parker.com/Literature/Electromechanical%20Europe/Literature/192\\_300108\\_GVM\\_catalogue.pdf](http://www.parker.com/Literature/Electromechanical%20Europe/Literature/192_300108_GVM_catalogue.pdf)

- [11] NEW EAGLE  
s/f Catálogo de motores eléctricos. Consulta: 20 de Mayo de 2017.  
<https://www.neweagle.net/support/wiki/index.php?title=EV-Components>
- [12] NAUNHEIMER, Harald y otros  
2011 Automotive Transmissions. Segunda edición. Nueva York: Springer, pp. 102.
- [14] MAHALA, Manoj y DEB, Anindya  
2011 "Development of Transmisión Specifications for an Electric Vehicle". Proceedings of the 3rd International Conference on Research into Design Engineering, Bangalore, India, pp. 292-299
- [15] NAUNHEIMER, Harald y otros  
2011 Automotive Transmissions. Segunda edición. Nueva York: Springer, pp. 106.
- [16] Ibídem pp. 77.
- [17] HEIBING, Berndt  
2011 Chassis Handbook. Primera Edición. Wiesbaden: Springer, pp.45
- [18] JEONG, Lee  
2005 Rotating Inertia Impact on Propulsion and Regenerative Braking for Electric motor Driven Vehicles. Consulta: 20 de Junio de 2017  
<https://theses.lib.vt.edu/theses/available/etd-01042006-151811/unrestricted/ETDJeongwooLee.pdf>
- [19] SHLADOVER, Steve y otros  
2006 Demonstration of Automated Heavy-Duty Vehicles . Consulta 20 de Junio de 2017.  
<http://escholarship.org/uc/item/6kc7m4jr#page-32>
- [20] LARMINIE., James  
2012 "Electric Vehicle Modelling". Electric Vehicle Technology Explained. Segunda edición. Oxford: Wiley, pp. 183-212

- [21] Ídem
- [22] NEW EAGLE  
s/f Catálogo de motores eléctricos. Consulta: 20 de Mayo de 2017.  
<https://www.neweagle.net/support/wiki/index.php?title=EV-Components>
- [23] Ídem
- [24] Ídem
- [25] GAO, Yimin  
2013 "Regenerative Braking". Transportation Technologies for Sustainability. Springer-Verlag: New York. pp. 882-889
- [26] NAUNHEIMER, Harald y otros  
2011 Automotive Transmissions. Segunda edición. Nueva York: Springer, pp. 75
- [27] INSTITUTO METROPOLITANO PROTRANSPORTE DE LIMA  
S/F Sistema Metropolitano de Lima. Consulta: 02 de Abril de 2017.  
<http://www.metropolitano.com.pe/conocenos/sistema/>
- [28] GAO, Yimin  
2013 "Regenerative Braking". Transportation Technologies for Sustainability. Springer-Verlag: New York. pp. 882-889
- [29] UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO ARGENTINA  
s/f Frenado de Vehículos. Consulta: 01 de Junio de 2017.  
[www.fceia.unr.edu.ar/fceia1/mecanica/Automotores/Frenado.ppt](http://www.fceia.unr.edu.ar/fceia1/mecanica/Automotores/Frenado.ppt)
- [30] NEW EAGLE  
s/f Catálogo de motores eléctricos. Consulta: 20 de Mayo de 2017.  
<https://www.neweagle.net/support/wiki/index.php?title=EV-Components>

- [31] ROGGE, Mathias  
2015 "Fast Charging Battery Buses for the Electrification of Urban Public Transport—A Feasibility Study Focusing on Charging Infrastructure and Energy Storage Requirements". *Energies*, Vol. 8, pp. 4587-4606.
- [32] GEONYONG, Kim y otros  
2015 "An Electric Bus with a Battery Exchange System". *Energies*, Vol. 8, pp. 6806-6819.
- [33] SOYLU, Seref  
2011 *Electric Vehicles – Modeling and simulations*. Rijeka: InTech. Consulta: 02 de mayo de 2016.  
<http://www.intechopen.com/books/electric-vehicles-modelling-and-simulations>
- [34] BATTERY UNIVERSITY  
2016 BU-205: Types of Lithium-ion. Consulta: 25 de Abril de 2017.  
[http://batteryuniversity.com/learn/article/types\\_of\\_lithium\\_ion](http://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion)
- [35] Ídem
- [36] CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD  
2016 *Advanced Clean Transit Battery Cost for Heavy-Duty Electric Vehicles*. Consulta: 20 de Junio de 2017.  
[https://www.arb.ca.gov/msprog/bus/battery\\_cost.pdf](https://www.arb.ca.gov/msprog/bus/battery_cost.pdf)
- [37] BATTERY UNIVERSITY  
2016 BU-302: Series and Parallel Battery Configurations. Consulta: 25 de Abril de 2017.  
[http://batteryuniversity.com/learn/article/serial\\_and\\_parallel\\_battery\\_configurations](http://batteryuniversity.com/learn/article/serial_and_parallel_battery_configurations)



## **CAPÍTULO 4: ANÁLISIS ECONÓMICO DE LA UTILIZACIÓN DEL BUS ELÉCTRICO**

La implementación de un bus articulado de 18 m. eléctrico para la ciudad de Lima incluye los costos de adquisición de los sistemas principales, definidos en el capítulo 3, y los costos de operación del vehículo. Para determinar la viabilidad de esta alternativa, desde el punto de vista económico, se realiza un análisis comparativo respecto de la operación actual de un bus articulado con motor de combustión interna. Para este análisis se utilizan los datos del servicio expreso 3, cuyo horario de operación inicia a las 5:00 a.m. y termina a las 9:30 p.m. de lunes a viernes y corresponde al servicio de menor consumo de energía por kilómetro.

### **4.1 Costos de los sistemas principales y la energía**

Los costos más importantes para la construcción del bus son: los motores eléctricos, los reductores de velocidad y las baterías. El costo de operación del vehículo es principalmente el valor de la energía eléctrica de la red utilizada para la recarga de las baterías, este dato se expresa en kW-h. Las características de la operación de un bus del servicio expreso 3 se indican a continuación:

- Recorrido por ciclo : 33.9 kilómetros
- Ciclos diarios : 6 (203 km. por día)
- Recorrido por año : 74,175 kilómetros (2,190 ciclos por año)
- Ciclos en 12 años : 26,260 ciclos

Debido a la vida útil de las baterías, expresada en ciclos, es necesario determinar el tiempo para el cual deben ser reemplazadas las baterías. En esta caso, teniendo en cuenta que para una profundidad de descarga de 80% el tiempo de vida de la batería es 2,000 ciclos por módulo de batería (se utilizan 3 módulos), el tiempo para el cambio de las baterías es cada 4 años. El consumo de energía es igual a 1.7 kW-h/km (son necesarios 51 Kw-h para el recorrido del expreso 3 de 34 kilometros).

El costo de la energía activa de la red fuera de punta en Lima Sur se considera igual a 0.218 S/./kW-h, costo obtenido de la empresa Luz del Sur para media tensión el mes de Octubre de 2017 [1].

**Tabla 4-1: Costo de la energía eléctrica y combustible para el bus eléctrico [Elaboración propia]**

Bus eléctrico	Valor	Unidad
Energía requerida en un ciclo del servicio expreso 3	51.46	kW-h
Distancia recorrida en un ciclo en el servicio expreso 3	33.87	km
Ratio de consumo energético	1.67	kW-h/km
Eficiencia de la recarga de las baterías	90%	-
Energía eléctrica requerida de la red	1.68	kW-h/km
Costo unitario energía eléctrica T.C. 3.3 (Costo 0.173 S/./kW-h)	0.07	\$/kW-h
Costo por kilómetro	0.11	\$/km
Bus GNC	Valor	Unidad
Eficiencia combustible	0.67	m3/km
Costo Unitario Combustible	0.45	\$/m3
Costo por kilómetro	0.30	\$/km

El costo del combustible por kilómetro para el bus a GNC es igual a 0.3 \$/km, para un precio aproximado del m3 de gas natural comprimido de 1.5 S/./km [2]. En el caso del bus eléctrico el costo es igual a 0.11 \$/km.

#### 4.2 Costo total para un periodo de 12 años

Si bien, el costo inicial de un bus eléctrico es mayor al de un bus a gas natural debido al costo de las baterías, la principal diferencia del costo operacional entre ambos vehículos es el costo de la energía y el mantenimiento de los sistemas. Para un bus eléctrico, el costo del mantenimiento es mucho menor al de un bus a gas natural. El costo de mantenimiento de un bus eléctrico se estima en 0.18 \$/milla y de un bus a gas natural 0.85\$/milla [3]. El costo total de ambos tipos de vehículos para un periodo aproximado de 12 años se muestra a continuación. En ambos casos no se considera el costo del chasis del vehículo, debido a que es muy similar para ambos. Los costos de los motores eléctricos y reductores se consideran \$60,000.00 y \$4,000.00 respectivamente en función a la información en la página web del proveedor New Eagle. El costo por kW-h de las baterías es aproximadamente \$320.00/kW-h. [4,5]

**Tabla 4-2: Costo total para un bus eléctrico a GNC [Elaboración propia]**

Descripción	Valor	Unidad
<b>Costos bus eléctrico estándar (2000 ciclos de vida estimados para la batería)</b>		
Recorrido por ciclo	34	kilómetros
Recorridos diarios	6	ciclos
Recorridos al año	2,190	ciclos
Distancia recorrida al año	74,175	kilómetros
Periodo de estudio	12	años
Ciclos en 12 años	26,280	ciclos
Precio de 2 motores eléctricos PowerPhase 950T	80,000	\$
Precio de dos reductores de velocidad	4,000	\$
Costo de mantenimiento	0.112	\$/km
Costo de energía por kilómetro	0.11	\$/km
Adquisición de 1 módulos de baterías de 66 kW-h , el costo de las batería es \$320/kW-h	21,120	\$
Tiempo de vida de cada módulos de baterías	2,000	ciclos
Costo total de las baterías en 12 años	274,560	ciclos
<b>Costos totales</b>		
Costo de sistemas	358,560	\$
Costo energía	98,994	\$
Costo mantenimiento	99,692	\$
Costo total en 12 años	557,246	\$

**Tabla 4-3: Costo total para un bus eléctrico y un bus a GNC [Elaboración propia]**

Descripción	Valor	Unidad
<b>Costos bus a gas natural</b>		
Recorrido por ciclo	34	kilómetros
Recorridos diarios	6	ciclos
Recorridos al año	2,190	ciclos
Distancia recorrida al año	74,175	kilómetros
Periodo de estudio	12	años
Ciclos en 12 años	26,280	ciclos
Precio motor de combustión	15,000	\$
Precio de transmisión automática	3,000	\$
Costo de mantenimiento	0.528	\$/km
Costo de energía por kilómetro	0.30	\$/km
<b>Costos totales</b>		
Costo de sistemas	18,000	\$
Costo energía	269,728	\$
Costo mantenimiento	469,975	\$
Costo total en 12 años	757,703	\$

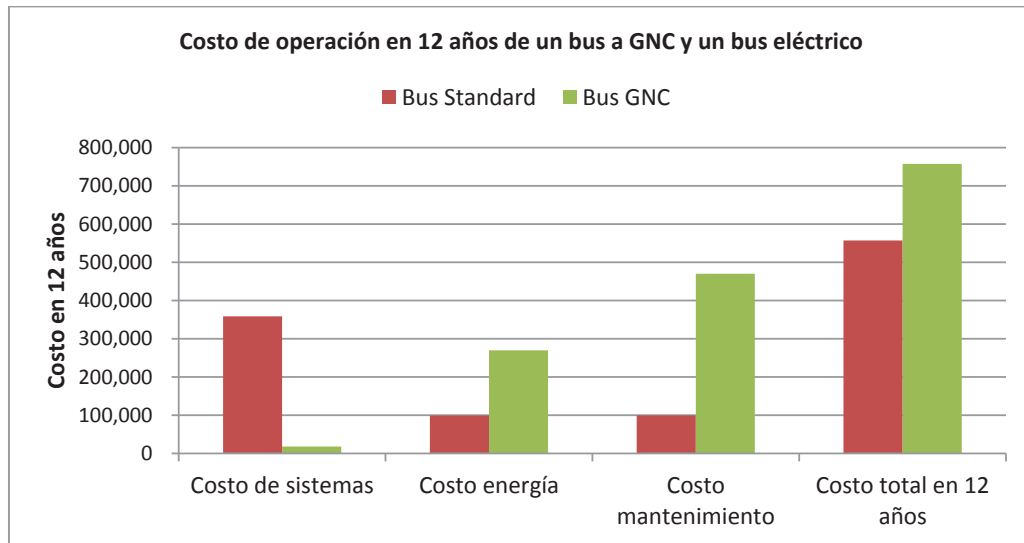


Figura 4-1: Diferencia entre el costo de operación de un bus GNC y eléctrico [Elaboración propia]

#### 4.3 Valor presente y punto de equilibrio

Para cuantificar el valor de la propuesta del bus eléctrico se determina el valor presente de la diferencia ente la operación con un bus eléctrico y con un bus a gas natural.

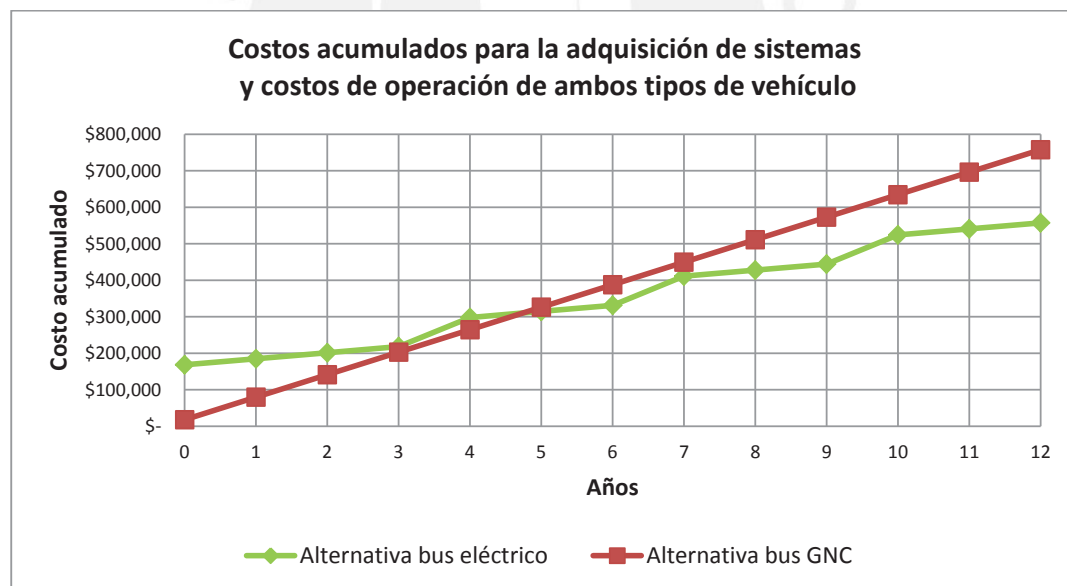
Tabla 4-4: Costos en el tiempo de un bus eléctrico [Elaboración propia]

Costos de un bus eléctrico			
Costos de adquisición inicial (año 0)		Tiempo de vida	Costo
Dos motores de imanes permanentes sin escobillas de alto desempeño	Remy HVM410-075-DOM	12 años	\$ 80,000.00
4 Paquetes de baterías de iones de litio LiFePO4	Optimum nano	8000 ciclos en total	\$ 84,480.00
Dos reductores de velocidad de una sola relación de transmisión	-	12 años	\$ 4,000.00
		Subtotal	\$ 168,480.00
Costos de adquisición (año 3, 6 y 9)		Tiempo de vida	Costo
3 Paquetes de baterías de iones de litio LiFePO4	Optimum nano	6 000 ciclos en total	\$ 63,360.00
		Subtotal	\$ 63,360.00
Costos anuales		Tiempo de vida	Costo
Costo del mantenimiento	-	1 año	\$ 8,307.63
Costo de la energía eléctrica	-	1 año	\$ 8,249.49
		Subtotal	\$ 16,557.13

**Tabla 4-5: Costos en el tiempo de un bus a GNC [Elaboración propia]**

Costos de un bus a gas natural			
Costos de adquisición inicial (año 0)		Tiempo de vida	Costo
Motor de combustión	Cummins ISLG 320	12 años	\$ 15,000.00
Precio de la transmisión automática	Allison	12 años	\$ 3,000.00
		Subtotal	\$ 18,000.00
Costos anuales		Tiempo de vida	Costo
Costo del mantenimiento	-	1 año	\$ 39,164.56
Costo de la energía (combustible)	-	1 año	\$ 22,477.36
		Subtotal	\$ 61,641.92

Considerando una tasa del 10%, en 12 años se obtiene un valor presente de \$56,500.00 de la alternativa del bus eléctrico sobre la alternativa del bus a GNC.



**Figura 4-2: Punto de equilibrio del uso de un bus eléctrico [Elaboración propia]**

Durante el tiempo de vida útil del bus eléctrico, estimado en 12 años, el costo acumulado asciende a un valor alrededor de \$550,000.00 entre la adquisición de sistemas y costos de operación. Por otro lado, para el bus a GNC el costo asciende a un valor de aproximadamente \$750,000.00 y por lo tanto el punto de equilibrio es alcanzado en el año 5 de la operación.

#### Referencias bibliográficas del capítulo 4

- [1] OSINERGMIN  
2017 Pliego Tarifario Máximo del Servicio Público de Electricidad. Consulta: 01 de Noviembre de 2017.  
<http://www2.osinergmin.gob.pe/tarifas/electricidad/PliegosTarifariosUsuarioFinal.aspx?Id=150000>
- [2] INSTITUTO METROPOLITANO PROTRANSPORTE DE LIMA  
2016 Reporte sobre los ciclos de conducción, autonomía y características de los buses articulados del Metropolitano. Lima
- [3] SCALZI, Justin  
2015 BYD's Green City Solution [Diapositiva]. Consulta: 8 de Junio de 2017.  
[http://www.calstart.org/Libraries/SoCal-Green-Airports-2015-docs/9\\_BYD\\_Capabilities\\_Presentation\\_Short.sflb.ashx](http://www.calstart.org/Libraries/SoCal-Green-Airports-2015-docs/9_BYD_Capabilities_Presentation_Short.sflb.ashx)
- [4] CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD  
2016 Advanced Clean Transit Battery Cost for Heavy-Duty Electric Vehicles. Consulta: 20 de Junio de 2017.  
[https://www.arb.ca.gov/msprog/bus/battery\\_cost.pdf](https://www.arb.ca.gov/msprog/bus/battery_cost.pdf)
- [5] OPTIMUM NANO  
2017 Information requirement for an electric bus project concept for Lima Perú. Correo electrónico del 1 de agosto a Josue Bojorquez.

## CONCLUSIONES

- Debido a las favorables condiciones de la ruta, como son pendientes poco pronunciadas y velocidad controlada máxima de 60 km/hora, así como también a la disponibilidad de motores eléctricos de alto desempeño en cuanto a torque y velocidad, es posible prescindir de un sistema de transmisión con varias relaciones de transmisión. De esta manera, para una configuración con dos motores eléctricos de 225 kW cada uno, es posible obtener un sistema de propulsión de torque elevado, hasta 1700 N-m y amplio rango de velocidades utilizando una sola relación de transmisión igual a 11.7.
- El desempeño en cuanto a aceleración del bus propuesto alcanza y supera los requerimientos del sistema y el desempeño actual de los buses, tanto para superficies planas y superficies de pendiente moderada, 6.5%. Esto se debe al elevado torque de los motores, así como también a las propiedades intrínsecas de los motores eléctricos de proporcionar el torque máximo a bajas revoluciones. Este tipo de motores, de imanes permanentes sin escobillas, desde el punto de vista de eficiencia energética, representan la mejor opción para ser usados en el sistema de propulsión de vehículos eléctricos con una eficiencia de 95%, pese al alto costo de los materiales para su construcción.
- El frenado regenerativo para el vehículo propuesto brinda la gran ventaja de poder recuperar 0.32 kW-h durante el frenado para la detención en cada estación, esto involucra un incremento de la autonomía del vehículo de un aproximado de 14%, para el servicio regular A por ejemplo.
- La energía de propulsión del vehículo es afectado en gran medida por la pendiente y el peso del vehículo. Debido a ello, tomando como parámetro fundamental a la eficiencia se buscó demostrar la importancia de estos valores para estimar la energía necesaria para la propulsión. Para la aceleración, hasta la velocidad de 60 km/h. por ejemplo, utiliza 1.50 kW-h para una pendiente de 2.4%, mientras para una superficie plana este valor es igual a 1.18 kW-h.



- El sistema de carga de baterías intercambiables ofrece una alternativa para reducir la masa de las baterías y permitir un incremento de la eficiencia energética del bus. De esta manera, se evita además utilizar sistemas de alta potencia para la carga rápida de buses que disminuyen la capacidad de las baterías y evitar las cargas convencionales a bordo del vehículo donde las baterías son utilizadas para realizar todo el recorrido de un día de operación.
- Los costos comparativos entre un bus a gas natural y bus eléctrico brindan una clara idea del ahorro económico que significa realizar una transición del actual sistemas de vehículos impulsados por combustibles a los sistemas de vehículos eléctricos. Las principales diferencias en este aspecto son la eficiencia energética del gas natural y la electricidad en kW-h/km y el costo de mantenimiento de los sistemas. La eficiencia para el servicio expreso 3 es 1.68 kW-h/km a un costo de 0.11 \$/km mientras que el costo de utilizar gas natural es 0.30 \$/km. En el aspecto económico, el elevado costo de las baterías, su tiempo de vida útil y el sistema de carga sigue siendo el factor determinante de la utilización de vehículos eléctricos. El tiempo de vida útil de una batería depende del estado de carga mínimo y otros parámetros de utilización, el tiempo de vida útil de las baterías se incrementa para un estado de carga mínimo mayor. Para el caso de una profundidad de descarga del 80%, el tiempo de vida de la batería es de aproximadamente 2000 ciclos.
- Si bien el alto costo y la masa de las baterías actualmente son una desventaja de esta propuesta, la tendencia hacia el futuro es obtener paquetes de baterías de mayor energía específica y menor costo por kW-h. De esta manera, la propuesta de utilizar vehículos eléctricos en un sistema de transporte público de velocidad controlada, será una alternativa aún más aceptable desde el punto de vista económico y ecológico al reducir las emisiones de gases causantes del efecto invernadero.

## BIBLIOGRAFÍA

- ALLISON TRANSMISSIONS  
S/F Especificaciones técnicas transmisión automática T375.
- BATTERY UNIVERSITY  
2016 Battery University.  
[http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary\\_batteries](http://batteryuniversity.com/learn/article/secondary_batteries)
- BOSCH  
1999 Manual de la Técnica del Automóvil. Tercera edición. Barcelona: Reverté
- CALIFORNIA AIR RESOURCES BOARD  
2016 Advanced Clean Transit Battery Cost for Heavy-Duty Electric Vehicles.  
[https://www.arb.ca.gov/msprog/bus/battery\\_cost.pdf](https://www.arb.ca.gov/msprog/bus/battery_cost.pdf)
- CHAPMAN, Stephen J.  
2012 Máquinas Eléctricas. Quinta edición. Mexico D.F.: McGraw-Hill
- CUMMINS  
S/F Especificaciones técnicas motores ISLG.
- GAO, Yimin  
2013 “Regenerative Braking”. Transportation Technologies for Sustainability. Springer-Verlag: New York.
- HEIBING, Berndt  
2011 Chassis Handbook. Primera Edición. Wiesbaden: Springer
- HEYWOOD, Jhon B.  
1988 “Engine types and their operation”. Internal Combustion Engine Fundamentals. Nueva York: McGraw-Hill

- HUSAIN, Iqbal
 

2011 Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals. Segunda edición. Boca Ratón: CRC Press
- INSTITUTO METROPOLITANO PROTRANSPORTE DE LIMA
 

2008 Anexos del Contrato de Concesión de la Operación del Servicio de Transporte de Pasajeros Mediante Buses Troncales y Alimentadores en el sistema de Corredores Segregados de Buses de Alta Capacidad (COSAC I). Lima.
- INSTITUTO METROPOLITANO PROTRANSPORTE DE LIMA
 

S/F Sistema Metropolitano de Lima.  
<http://www.metropolitano.com.pe/conocenos/sistema/>
- JEONG, Lee
 

2005 Rotating Inertia Impact on Propulsion and Regenerative Braking for Electric motor Driven Vehicles.  
<https://theses.lib.vt.edu/theses/available/etd-01042006-151811/unrestricted/ETDJeongwooLee.pdf>
- KULWORAWANICHPONG, Thanatchai
 

2014 Dynamic Simulation of Electric Bus Vehicle.  
<http://www.thesij.com/papers/CSEA/2014/May/CSEA-0203180401.pdf>
- LARMINIE., James
 

2012 “Electric Vehicle Modelling”. Electric Vehicle Technology Explained. Segunda edición. Oxford: Wiley
- NAUNHEIMER, Harald y otros
 

2011 Automotive Transmissions. Segunda edición. Nueva York: Springer
- NEW EAGLE
 

s/f Catálogo de motores eléctricos. Consulta: 20 de Mayo de 2017.  
<https://www.neweagle.net/support/wiki/index.php?title=EV-Components>

- NPTEL
 

2013 “Basic Architecture of Electric Drive Trains”. Introduction to Hybrid and Electric Vehicles.

<http://nptel.ac.in/courses/108103009/8>
- PARKER
 

2016 GVM Global Vehicle Motor.

[http://www.parker.com/Literature/Electromechanical%20Europe/Literature/192\\_300108\\_GVM\\_catalogue.pdf](http://www.parker.com/Literature/Electromechanical%20Europe/Literature/192_300108_GVM_catalogue.pdf)
- SOYLU, Seref
 

2011 Electric Vehicles – Modeling and simulations. Rijeka: InTech.

<http://www.intechopen.com/books/electric-vehicles-modelling-and-simulations>
- UNIVERSIDAD NACIONAL DE ROSARIO ARGENTINA
 

s/f Frenado de Vehículos. Consulta: 01 de Junio de 2017.

[www.fceia.unr.edu.ar/fceia1/mecanica/Automotores/Frenado.ppt](http://www.fceia.unr.edu.ar/fceia1/mecanica/Automotores/Frenado.ppt)
- VÉLIZ, Carlos
 

2000 Estadística: aplicaciones. Cuarta edición. Lima: Copias Gráficas, 2000.
- ZERAOULIA, Mounir y otros
 

2010 Electric motor drive selection issues for HEV propulsión systems: A comparative study. 2010 IEEE.