

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA
**UNIVERSIDAD
CATÓLICA**
DEL PERÚ

PROPUESTA DE LAS CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO PARA USO PRIVADO EN LIMA METROPOLITANA

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

VÍCTOR ANDRÉS ZÚÑIGA LARCO

ASESOR: Ing. Fernando Jiménez

Lima, Octubre del 2014

RESUMEN

La presente tesis tiene como objetivo definir el tipo de vehículo eléctrico adecuado para los requerimientos de un usuario privado típico de Lima Metropolitana y determinar las principales características de los sistemas técnicos que debe utilizar el mismo. La presente tesis consta de tres partes. En la primera parte se realiza una descripción de los tipos de vehículos híbridos y vehículos eléctricos. Se da a conocer los componentes que caracterizan a estos vehículos y se define los componentes principales; rectificador y convertidor AC/DC, sistema de almacenamiento, inversor DC/AC, sistema de propulsión, sistema de transmisión.

En la segunda parte de la tesis, se da a conocer los vehículos ligeros más vendidos y en consecuencia, los más utilizados en Lima Metropolitana; Toyota Yaris y Kia Rio. Además, se definen las características del ciclo de conducción en Lima Metropolitana en base a datos levantados. Obteniendo velocidades promedio de $(15.1 \pm 4.8) \text{ km/h}$ en horas de la mañana, entre 9:00 am y 11:00 am, realizando recorridos promedio de 3.7 km en periodos de 15 minutos. Se realizan encuestas a usuarios de vehículos dedicados a gasolina y diesel, determinando un promedio de recorrido diario de 34.8 km . Se propone que el vehículo eléctrico debe tener una autonomía mínima de 50 km diarios.

En la tercera y última parte de la tesis, se definen las características técnicas de los componentes del vehículo eléctrico para uso en Lima Metropolitana. Dicho vehículo eléctrico debe contar con un mínimo de 56 kW de potencia y la capacidad de almacenamiento de las baterías debe ser $20.5 \text{ kW} - h$, para cumplir con los requerimientos de los usuarios. Se selecciona un motor eléctrico de 75 kW de potencia y un pack de baterías de iones de litio de $23 \text{ kW} - h$, dicha selección se realiza en base al peso bruto de 1708 kilogramos , de un vehículo ligero. Finalmente, se elabora una comparación de costos del uso de un vehículo eléctrico y un vehículo dedicado a gasolina, para un recorrido anual de $16\,500 \text{ km}$. Se determina que el vehículo eléctrico demanda 2360 Nuevos Soles anuales para recorrer $16\,500 \text{ km}$ y el vehículo dedicado a gasolina demanda 9955 Nuevos Soles anuales para el mismo recorrido.

DEDICATORIA



A mis padres por su apoyo incondicional y
a mis hermanos por creer en mi

INDICE

RESUMEN	i
DEDICATORIA.....	ii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA EMPLEADA ACTUALMENTE EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS.....	3
1.1. Vehículos Híbridos Eléctricos (HEV).....	3
1.1.1. Sistema en Serie	4
1.1.1.1. Componentes principales	4
1.1.2. Sistema Paralelo	5
1.1.2.1. Componentes principales	5
1.1.3. Sistema Combinado	6
1.1.3.1. Componentes principales	6
1.2. Vehículos Híbridos Eléctricos Enchufables (PHEV).....	7
1.2.1. Componentes principales	7
1.3. Vehículos Eléctricos (VE)	9
1.3.1. Componentes principales	9
1.4. Vehículos de Celda de Combustible (FCV).....	10
1.4.1. Componentes principales	10
1.5. Sistemas y componentes más importantes de los HEV/PHEV/EV	12
1.5.1. Sistemas de propulsión	12
1.5.1.1. Motor de combustión interna	12
1.5.1.2. Máquina eléctrica	15
1.5.2. Sistemas de almacenamiento.....	17
1.5.2.1. Baterías.....	17

1.5.2.2. Ultra capacitor	18
1.5.3. Sistemas de transmisión.....	19
1.5.3.1. Transmisión manual	19
1.5.3.2. Transmisión automática.....	19
1.5.3.3. Transmisión continuamente variable – CVT	21
1.6. Emisiones de CO2.....	23
Referencias Bibliográficas del Capítulo 1	25
CAPÍTULO 2. REQUERIMIENTOS DEL USUARIO PRIVADO DE VEHÍCULO EN LIMA METROPOLIANA.....	29
2.1. Vehículos en el mercado nacional	29
2.1.1. Segmentación de vehículos.....	29
2.1.2. Ventas de vehículos	30
2.1.3. Vehículos más vendidos en los años 2012 y 2013	30
2.1.3.1. Características técnicas – Toyota Yaris.....	31
2.1.3.2. Características técnicas – Kia Rio	32
2.2. El tráfico en Lima Metropolitana.....	32
2.2.1. Ruta A – Tráfico pesado	34
2.2.1.1. Ruta A1	35
2.2.1.2. Ruta A2	37
2.2.2. Ruta B – Tráfico moderado.....	39
2.2.2.1. Ruta B1	39
2.2.2.2. Ruta B2	41
2.2.3. Ruta A y Ruta B.....	43
2.2.4. Ciclos de conducción en Lima Metropolitana (usuarios)	44
2.3. Requerimientos básicos del vehículo para uso en Lima Metropolitana	45
Referencias Bibliográficas del Capítulo 2	48

CAPÍTULO 3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO PROPUESTO PARA USO PRIVADO EN LIMA METROPOLITANA	50
3.1. Selección del tipo de vehículo adecuado	50
3.2. Sistema de Propulsión - Máquina eléctrica	53
3.2.1. Requerimientos	53
3.2.2. Par torsor o torque de tracción	53
3.2.3. Pre-selección del motor eléctrico	58
3.3. Sistema de Transmisión	59
3.3.1. Primera opción - CVT y Diferencial	60
3.3.1.1. Rel. Transmisión CVT y Potencia del ME para condiciones críticas	60
3.3.1.2. Rel. Transmisión CVT y Potencia del ME para condiciones de manejo en Lima Metropolitana.....	62
3.3.2. Segunda opción - Diferencial.....	66
3.3.2.1. Torque y Potencia del ME para condiciones críticas.....	66
3.3.2.2. Torque y Potencia del ME para condiciones de manejo en Lima Metropolitana	67
3.3.3. Elección de sistema de transmisión.....	69
3.4. Inversor DC/AC	69
3.4.1. Pérdidas en el inversor DC/AC	70
3.5. Sistema de almacenamiento – Baterías.....	70
3.5.1. Capacidad de almacenamiento para 1 ciclo de conducción.....	71
3.5.2. Capacidad de almacenamiento total.....	74
3.5.3. Parámetros de selección de Baterías	75
3.5.4. Tiempo de recarga de baterías	76
3.6. Rectificador.....	77
3.6.1. Resistencia del rectificador	77
3.6.2. Parámetros de selección de rectificador	78

3.7. Convertidor AC/DC	78
3.7.1. Potencia y resistencia del convertidor.....	79
3.7.2. Parámetros de selección del convertidor	79
3.8. Características técnicas vehículo eléctrico.....	80
3.9. Costos	81
3.9.1. Costos de sistemas principales.....	82
3.9.2. Costos de recorridos anuales	82
3.9.3. Tiempo de recuperación de inversión inicial	84
Referencias Bibliográficas del Capítulo 3	86
CONCLUSIONES	91
RECOMENDACIONES	93
BIBLIOGRAFÍA	94

INDICE DE FIGURAS

Capítulo 1

Figura 1.1 Diagrama de bloque de HEV, sistema en serie	5
Figura 1.2 Diagrama de bloque de HEV, sistema paralelo	6
Figura 1.3 Diagrama de bloque de HEV, sistema combinado	7
Figura 1.4 Diagrama de bloque de PHEV, sistema en serie	8
Figura 1.5 Diagrama de bloques de VE	9
Figura 1.6 Diagrama de bloques de FCV	10
Figura 1.7 Diagrama p-v, ciclo Atkinson y ciclo Otto	14
Figura 1.8 Sistema planetario de engranajes	21
Figura 1.9 CVT sistema polea-correa	22
Figura 1.10 CVT sistema toroidal	23

Capítulo 2

Figura 2.1 Estadísticas de ventas de vehículos ligeros	30
Figura 2.2 Histograma de velocidad promedio (km/h), ruta A1	36
Figura 2.3 Gráfica de distribución de velocidad promedio (km/h), ruta A1	37
Figura 2.4 Histograma de velocidad promedio (km/h), ruta A2	38
Figura 2.5 Gráfica de distribución de velocidad promedio (km/h), ruta A2	38
Figura 2.6 Histograma de velocidad promedio (km/h), ruta B1	40
Figura 2.7 Gráfica de distribución de velocidad promedio (km/h), ruta B1	41
Figura 2.8 Histograma de velocidad promedio (km/h), ruta B2	42
Figura 2.9 Gráfica de distribución de velocidad promedio (km/h), ruta B2	42
Figura 2.10 Histograma de velocidades promedio de las rutas A y B	43
Figura 2.11 Gráfica de distribución de velocidad promedio (km/h) de encuestas realizadas	45
Figura 2.12 Medición de pendiente av. Raúl Ferrero - Cerro Centinela	46
Figura 2.13 Medición de pendiente av. Armendáriz – Costa Verde	47

Capítulo 3

Figura 3.1 Diagrama de bloque, vehículo eléctrico	52
Figura 3.2 DCL del vehículo en pendiente	54
Figura 3.3 Rosa de viento diurno	57
Figura 3.4 Intervalo Velocidad vs. Tiempo, ciclo de conducción en L.M	63
Figura 3.5 Velocidad vs. Tiempo, ciclo de conducción en L.M.....	63
Figura 3.6 Torque [Nm] vs. Velocidad [rpm/10] - primera opción	66
Figura 3.7 Torque [Nm] vs. Velocidad [rpm/10] - segunda opción	68
Figura 3.8 Motor Eléctrico PowerPhase Select 75	69
Figura 3.9 Intervalo Potencia vs. Tiempo, ciclo de conducción en L. M	72
Figura 3.10 Potencia vs. Tiempo, ciclo de conducción en L.M	72
Figura 3.11 Pack de Baterías, marca A123SYSTEMS	76

INDICE DE TABLAS

Capítulo 1

Tabla 1.1 Diferentes funciones de los tipos de sistemas de HEV	9
Tabla 1.2 Características de VE, HEV y FCV	11
Tabla 1.3 Comparación motores eléctricos, tabla modificada	17
Tabla 1.4 Propiedades de baterías, elaboración propia	18
Tabla 1.5 Comparación Baterías y Ultra capacitores, elaboración propia	18
Tabla 1.6 Cantidad de CO2 emitido, tabla modificada	23
Tabla 1.7 Consideraciones de estudio realizado, tabla modificada	24

Capítulo 2

Tabla 2.1 Especificaciones técnicas Toyota Yaris 2012-2013	31
Tabla 2.2 Especificaciones técnicas Kia Rio HB 2012-2013	32
Tabla 2.3 Estadísticas de la ruta A1	35
Tabla 2.4 Estadísticas de la ruta A2	37
Tabla 2.5 Estadísticas de la ruta B1	40
Tabla 2.6 Estadísticas de la ruta B2	41
Tabla 2.7 Estadísticas de encuestas realizadas	44
Tabla 2.8 Comparación de ruta A1 y encuestas realizadas	44

Capítulo 3

Tabla 3.1 Comparación de VE, HEV, PHEV	51
Tabla 3.2 Torque de tracción, situaciones críticas	58
Tabla 3.3 Especificaciones de motores eléctricos, elaboración propia	59
Tabla 3.4 Rel. Transmisión CVT y Potencia ME, situaciones críticas	62
Tabla 3.5 Torque de tracción, ciclo de conducción en L.M	64
Tabla 3.6 Rel. Transmisión CVT y Potencia ME, ciclo de conducción en Lima Metropolitana	65
Tabla 3.7 Torque y Potencia ME, situaciones críticas	67

Tabla 3.8 Torque y Potencia ME, ciclo de conducción en L.M.....	68
Tabla 3.9 Características técnicas de vehículo eléctrico	81
Tabla 3.10 Costos sistemas principales	82
Tabla 3.11 Costo anual de recorrer 16 500 km	83



INTRODUCCIÓN

El sector transporte, a nivel mundial, es uno de los sectores con mayor índice de consumo de combustibles fósiles tales como diesel, gasolina, GLP y gas natural. Se puede recalcar dos aspectos negativos del uso de combustibles fósiles. El primero, debido al creciente parque automotor, se demanda mayor uso de los combustibles fósiles, específicamente petróleo y derivados, lo que a futuro se ve reflejado en escasez del mismo y por consiguiente una alza de los precios de comercialización del petróleo y derivados. El segundo aspecto está relacionado a las emisiones de gases, los vehículos que utilizan combustibles fósiles emiten gases causantes de la contaminación ambiental y también perjudiciales para la salud.

Actualmente, se comercializan Vehículos Híbridos Eléctricos, Vehículos Híbridos Eléctricos Enchufables y Vehículos Eléctrico, los cuales son una opción viable para la reducción de uso de combustibles fósiles y reducción de emisiones; además, son una opción para mejorar la calidad de aire. Algunos de estos vehículos ya se han introducido al Perú, específicamente a Lima, sin obtener una gran demanda por parte de los usuarios.

En este contexto, el presente tema de tesis está dedicado a identificar técnicamente el tipo de vehículo adecuado para cumplir con los requerimientos de los usuarios privados de Lima Metropolitana, así como también, caracterizar los sistemas que debería tener el mismo, considerando el consumo energético como parámetro relevante. Para poder determinar las principales características técnicas de los sistemas, se cuenta con información levantada sobre las características del tráfico de Lima Metropolitana. La Fundación Transitemos, indica que la velocidad promedio vehicular en Lima se encuentra entre 14 km/h y 16 km/h¹ lo cual se contrastará con los resultados de pruebas realizadas por el Servicio de Análisis Energético y Ambiental de la PUCP. Además, se realizan los cálculos para determinar la potencia y torque que debe tener el vehículo para las condiciones de manejo de los usuarios, el tipo de vehículo para el estudio es eléctrico.

¹ Fuente: Fundación Transitemos, <http://www.capital.com.pe/2012-03-13-vehiculos-avanzan-en-lima-a-14-km-h-en-promedio-noticia_460780.html> Consulta: 30 de setiembre de 2014

Objetivos de la tesis

Objetivo General

Definir el tipo de vehículo eléctrico adecuado para los requerimientos de un usuario privado típico de Lima Metropolitana y determinar las principales características de los sistemas técnicos que debe utilizar el mismo.

Objetivos Específicos

- ❖ Describir las características técnicas de los sistemas que operan en vehículos eléctricos (VE) y vehículos híbridos eléctricos (HEV).
- ❖ Definir las características técnicas de vehículos convencionales en rutas tipificadas en Lima Metropolitana.
- ❖ Seleccionar el tipo adecuado de vehículo para uso privado y determinar las principales características técnicas de los sistemas necesarios en vehículos eléctricos, para cumplir con los requerimientos de rutas en Lima Metropolitana.
- ❖ Evaluar el costo de la utilización de vehículos eléctricos para uso privado en Lima Metropolitana.

CAPÍTULO 1. DESCRIPCIÓN DE LA TECNOLOGÍA EMPLEADA ACTUALMENTE EN VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Actualmente se comercializan vehículos híbridos eléctricos (HEV), vehículos híbridos eléctricos enchufables (PHEV), y vehículos eléctricos (VE). Además, en algunos estados de Estados Unidos, se comercializan vehículos de celda de combustible (FCV). En este capítulo se describe el funcionamiento de los vehículos antes mencionados y se describe los sistemas más importantes de los mismos.

1.1. Vehículos Híbridos Eléctricos (HEV)

Los vehículos híbridos eléctricos son vehículos que tienen dos o más fuentes de energía para ser impulsados, usualmente se utiliza un motor eléctrico y además un motor de combustión interna. Estos vehículos se caracterizan por ahorrar energía y tener un bajo nivel de emisiones, en comparación con un vehículo convencional. Se llama vehículo convencional a aquel vehículo que utiliza un motor de combustión interna para propulsarse, alimentados por combustibles fósiles. En el HEV el motor de combustión interna permite recorrer largas distancias, mientras que el motor eléctrico aumenta la

eficiencia y permite el ahorro de combustibles fósiles, ya que regenera energía durante el tiempo de frenado y almacena la energía que se genera en exceso en el MCI (Motor de Combustión Interna) durante el tiempo que el vehículo está detenido, posteriormente esta energía almacenada es utilizada por el motor eléctrico para propulsar el vehículo [1]. La mayoría de vehículos híbridos utilizan un MCI de ciclo Atkinson, véase 1.5.1.1.

Se puede categorizar a los vehículos híbridos eléctricos, de acuerdo a la trayectoria que recorre el flujo de la energía transmitida de las baterías o del MCI hacia las ruedas. Se dividen en configuración o sistema paralelo y configuración o sistema en serie, a partir de estas dos configuraciones se desarrolló el sistema combinado.

1.1.1. Sistema en Serie

En este tipo de configuración, el vehículo es propulsado únicamente por el motor eléctrico. El motor de combustión interna genera energía mecánica, la cual posteriormente es transformada a energía eléctrica. Esta transformación se logra realizar ya que el MCI está acoplado a un generador. La energía eléctrica es utilizada para cargar las baterías de los vehículos, las mismas que luego darán movimiento al motor eléctrico y este a su vez, propulsará el vehículo; además, la energía eléctrica generada puede utilizarse directamente para dar movimiento al motor eléctrico, en este caso se efectúa un bypass a las baterías. Los sistemas en serie requieren tres motores, un MCI y dos motores eléctricos [2].

1.1.1.1. Componentes principales

- Motor de Combustión Interna: Es el encargado de generar la energía mecánica.
- Generador: Transforma la energía mecánica en energía eléctrica.
- Convertidor: Convierte la energía eléctrica de salida del generador a DC para poder cargar las baterías.
- Baterías: Almacenan la energía eléctrica para propulsar el motor eléctrico.
- Inversor: Convierte la energía de las baterías DC en AC para propulsar el motor eléctrico.
- Motor Eléctrico: Es el encargado de dar la propulsión al vehículo.

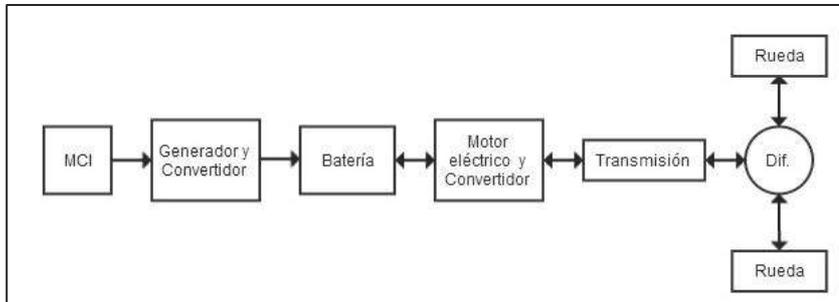


Figura 1.1 Diagrama de bloque de HEV, sistema en serie [3]

1.1.2. Sistema Paralelo

En el sistema paralelo, la propulsión del vehículo puede darse solo por el motor de combustión interna, solo por el motor eléctrico o los dos motores pueden actuar conjuntamente. Cuando el motor de combustión interna genera mayor cantidad de energía mecánica que la requerida para propulsar el vehículo, esta energía se transforma a energía eléctrica y es almacenada en las baterías. Además, durante el frenado se genera energía, la misma que es utilizada para cargar las baterías. Los sistemas paralelos a diferencia de los sistemas en serie, solo requieren dos motores, un MCI y un motor eléctrico [4].

1.1.2.1. Componentes principales

- Al igual que el sistema en serie, en el sistema paralelo interviene el motor de combustión interna, baterías y motor eléctrico.
- Acoplamiento: Es el que permite la conexión entre el MCI y el motor eléctrico hacia el eje de transmisión. Pueden ser sistema de embrague, engranajes, etc.

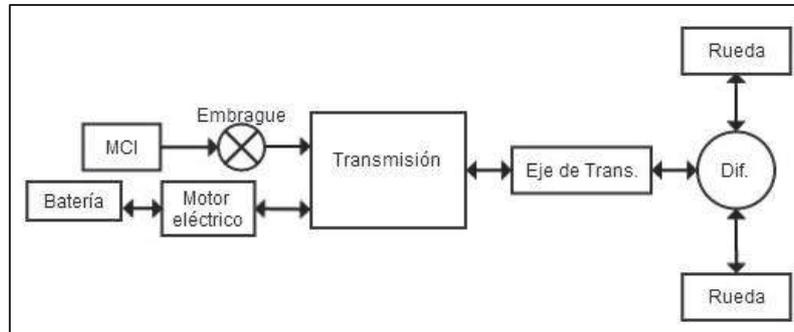


Figura 1.2 Diagrama de bloque de HEV, sistema paralelo [5]

1.1.3. Sistema Combinado

A este tipo de vehículo también se le conoce como power-split hybrid vehicle, lo cual significa vehículo híbrido con divisor de potencia. Los sistemas combinados utilizan los beneficios de los sistemas en serie y paralelo, y permite una capacidad de carga sostenible. En este tipo de sistema, el MCI da propulsión a las ruedas y además da energía al generador, para que luego el mismo cargue las baterías o alimente el motor eléctrico según sea el caso de manejo. Los sistemas combinados se han desarrollado para mejorar el consumo de combustible y aumentar la eficiencia de los vehículos [6].

1.1.3.1. Componentes principales

- El sistema combinado cuenta con un motor de combustión interna, un generador, convertidor / inversor, baterías y motor eléctrico.
- Power-split (Divisor de Potencia): Divide la potencia generada por el motor en mecánica y eléctrica. Utiliza una transmisión del tipo planetaria.

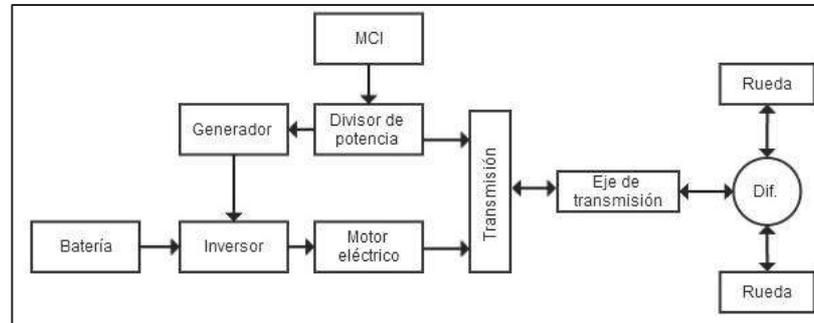


Figura 1.3 Diagrama de bloque de HEV, sistema combinado [7]

1.2. Vehículos Híbridos Eléctricos Enchufables (PHEV)

Estos vehículos son similares a los vehículos híbridos eléctricos ya que pueden cargar las baterías por medio del MCI, pero a diferencia de los HEV, en los PHEV las baterías tienen densidad de energía alta, lo que les permite un mayor recorrido que los HEV. Las baterías en los PHEV pueden ser cargadas por el motor de combustión interna o pueden cargarse al conectar el vehículo a una toma de corriente de la red eléctrica. La energía utilizada de la red eléctrica, deja de lado la energía generada al combustionar los combustibles fósiles en el MCI; esta es una ventaja frente a los HEV ya que estos necesitan un MCI para poder cargar las baterías. El PHEV es un vehículo que puede utilizarse en distancias cortas – aproximadamente 60 km – sin necesidad de utilizar el MCI, lo cual lo convierte en un ZEV (Vehículo de cero emisiones) [8].

1.2.1. Componentes principales

- De manera similar a los HEV, utiliza un motor de combustión interna, un generador y motor eléctrico.
- Interfaz y convertidor: Utilizados para poder conectar el vehículo a la toma de corriente y convertir de AC a DC para cargar las baterías.

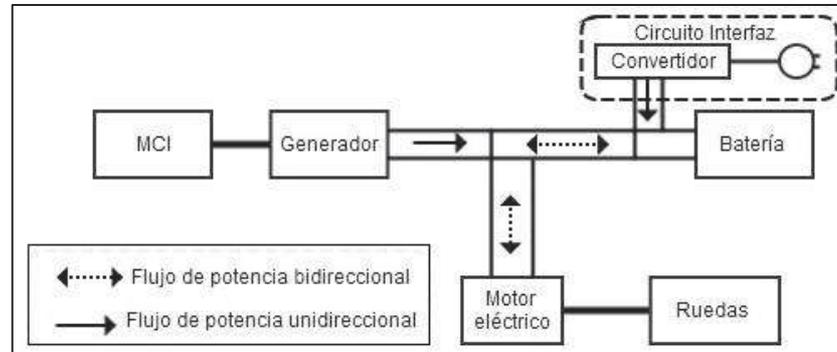


Figura 1.4 Diagrama de bloque de PHEV, sistema en serie [9]

Otra forma de categorizar a los vehículos híbridos eléctricos, es de acuerdo al nivel de hibridación de los mismos, se pueden dividir de la siguiente manera [10].

- Micro Hybrid: El MCI brinda la propulsión al vehículo, se utiliza un motor eléctrico de potencia limitada como alternador de arranque. Los micro hybrid emplean la función stop-and-go (pare-y-avance), lo que significa que el MCI se detiene cuando el vehículo está parado, es el caso de semáforos en rojo o tráfico pesado.
- Mild Hybrid: En este tipo de híbrido el motor eléctrico solo, no tiene la capacidad de propulsar el vehículo. Los mild hybrid tienen la función stop-and-go (pare-y-avance) y la función boost (impulso). El motor eléctrico da un impulso al MCI durante la aceleración o durante el frenado aplicando torque; es decir, el motor eléctrico ayuda a la operación que realiza el MCI. La batería puede recargarse a través del frenado regenerativo.
- Full Hybrid: Se refiere a los vehículos que pueden ser impulsados por un motor eléctrico. Se puede propulsar por medio del motor eléctrico solo, el motor de combustión solo o por los dos motores juntos. Al usar solo el motor eléctrico, se denomina ZEV (vehículo-cero-emisiones).
- Plug-in Hybrid: Pueden cargar las baterías externamente desde la red eléctrica. En algunos casos, este vehículo puede ser un vehículo eléctrico, si es que no se utiliza el MCI para cargar las baterías, lo cual lo convierte en un ZEV.

Tabla 1.1 Diferentes funciones de los tipos de sistemas de HEV [11]

	Micro HEV	Mild HEV	Full HEV	Plug-in HEV
Sistema Combinado			x	x
Sistema en Serie			x	x
Sistema Paralelo	x	x	x	

1.3. Vehículos Eléctricos (VE)

Los vehículos eléctricos no cuentan con un motor de combustión interna, la propulsión del vehículo es lograda por uno o hasta cuatro motores eléctricos. Es un vehículo de cero emisiones (ZEV). Es necesario recargar las baterías por medio de la red eléctrica o por medio de infraestructura dedicada; es decir, grifos de electricidad. En este tipo de vehículo también se puede cargar las baterías por medio del frenado regenerativo [12].

1.3.1. Componentes principales

- Controlador electrónico: Recibe la información del usuario, aceleración y frenado, para luego transmitirla al motor eléctrico y así propulsar el vehículo o detenerlo.
- Convertidor electrónico de potencia: Es un convertidor para DC a AC, un inversor AC a DC y convertidor DC a DC.
- Baterías: Suministran la energía necesaria para accionar el motor eléctrico.
- Motor eléctrico: Es el encargado de propulsar el vehículo.

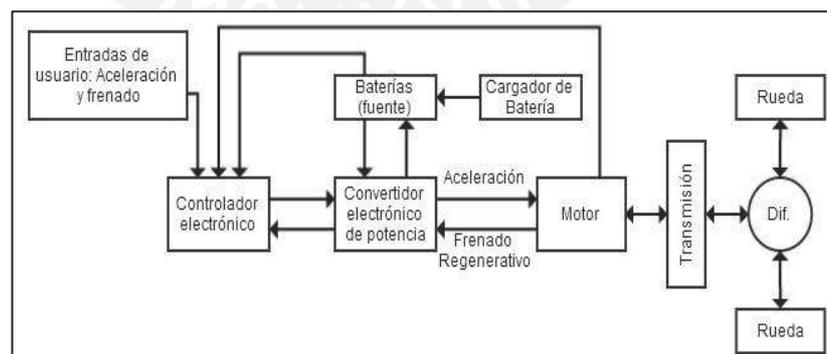


Figura 1.5 Diagrama de bloques de VE [13]

1.4. Vehículos de Celda de Combustible (FCV)

Es propulsado por uno o más motores eléctricos, lo cuales reciben la energía eléctrica de baterías o súper capacitores. Las baterías o súper capacitores son cargados por celdas de combustible, las cuales funcionan como generadores eléctricos que utilizan hidrógeno. Puede ser considerado un híbrido de configuración en serie. Este vehículo aún no se comercializa a gran escala, se encuentra en desarrollo; específicamente el proceso de obtención de hidrógeno y transporte del mismo hacia las infraestructuras necesarias para recargar los vehículos [14].

1.4.1. Componentes principales

- Procesador de combustible: Convierte el combustible crudo en hidrogeno.
- Celdas de combustible: Utilizan el hidrógeno para generar energía eléctrica y así cargar las baterías y/o súper capacitores o alimentar directamente el motor eléctrico.
- Convertidor DC/DC: Utilizado para aumentar y regular el voltaje de salida de la celda de combustible antes de alimentar el motor eléctrico y/o cargar la batería.
- Inversor: Utilizado para convertir el voltaje DC en AC para accionar el motor eléctrico.
- Baterías o súper capacitores: Almacenan la energía eléctrica para luego suministrarla al motor eléctrico.
- Motor eléctrico: Encargado de propulsar el vehículo.

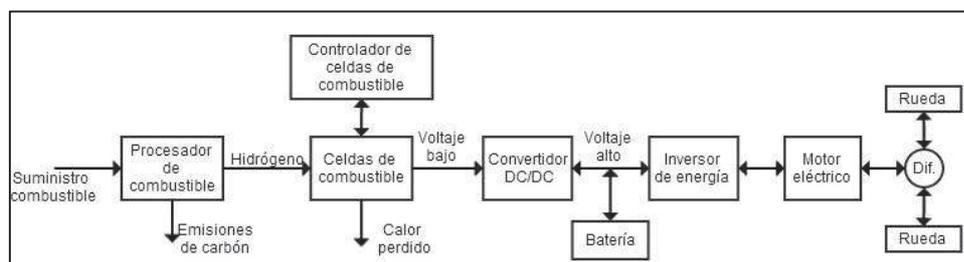


Figura 1.6 Diagrama de bloques de FCV [15]

Tabla 1.2 Características de VE, HEV y FCV [16]

COMPARACIÓN VE - HEV - FCV			
	VE	HEV	FCV
Propulsión	Motor Eléctrico	- Motor Eléctrico - Motor de combustión interna	Motor Eléctrico
Subsistema de almacenamiento de energía	- Batería - Ultra capacitor o súper capacitor	- Batería - Ultra capacitor súper capacitor - Combustibles fósiles	- Tanque de hidrógeno - Batería/Ultra capacitor o súper capacitor necesario para mejorar la densidad de potencia
Fuente de Energía e Infraestructura	Estaciones de carga eléctrica	- Estaciones de gasolina - Estaciones de carga eléctrica (para PHEV)	- Hidrógeno - Producción de hidrógeno e infraestructura para transporte de Hidrógeno
Características	- Cero emisiones locales - Alta eficiencia energética - Independiente de combustible fósil - Bajo rango de manejo - Alto costo Inicial - Comercialmente disponible	- Bajas emisiones locales - Alto ahorro de combustible - Alto rango de manejo - Depende de comb fósil - Costo mayor a vehículos MCI - Comercialmente disponible	- Cero emisiones locales - Alta eficiencia energética - Independiente de comb fósil - Alto costo - Aún bajo desarrollo
Problemática	- Tamaño y manejo de la batería - Instalaciones de carga - Costo - Tiempo de vida de batería	- Tamaño y manejo de la batería - Control, optimización y manejo de múltiples fuentes de energía	- Costo de "celda de combustible" , ciclo de vida y confiabilidad - Infraestructura para la producción y distribución de hidrógeno - Costo

1.5. Sistemas y componentes más importantes de los HEV/PHEV/EV

Se ha explicado brevemente los sistemas más importantes de los vehículos, a continuación se profundiza sobre los mismos.

1.5.1. Sistemas de propulsión

Son los encargados de propulsar el vehículo, dependiendo del tipo de vehículo eléctrico o híbrido eléctrico y dependiendo de la configuración, puede trabajar el motor eléctrico solo, el motor de combustión interna solo o los dos de forma conjunta.

1.5.1.1. Motor de combustión interna

Como se mencionó anteriormente, usualmente se utilizan motores de combustión interna de encendido por chispa de ciclo Atkinson para vehículos híbridos. Para comprender el ciclo Atkinson, primero es necesario comprender el ciclo Otto ideal. El motor de ciclo Otto es de cuatro tiempos: admisión, compresión, expansión y escape. La carrera de admisión inicia cuando el pistón se encuentra en el punto muerto superior (PMS), la válvula de admisión se abre, lo cual permite el ingreso de la mezcla aire-combustible al cilindro, se considera que la presión de entrada es la atmosférica y es constante. En un proceso de admisión de un motor real, la presión es ligeramente menor a la atmosférica, debido a las pérdidas de presión en el flujo de aire de entrada. La carrera de admisión termina cuando el pistón llega al punto muerto inferior (PMI) y da inicio a la carrera de compresión. En esta carrera el proceso es considerado reversible y adiabático, el pistón comprime la mezcla desde el PMI hasta el PMS. En una carrera de compresión de un motor real, la válvula de admisión se cierra por completo ligeramente después de alcanzar el PMI, y la chispa se genera antes de llegar al PMS. Durante esta carrera, la presión y la temperatura en el cilindro aumentan. Luego de la carrera de compresión, se suministra calor a volumen constante cuando el pistón se encuentra en el PMS, este proceso se llama combustión. En un motor real la combustión se da antes del PMS y termina luego del PMS. Durante la combustión se alcanzan presiones muy altas, las cuales dan inicio a la carrera de expansión, en dicha carrera el pistón desciende del PMS hasta el PMI, esta carrera también se conoce como carrera de potencia ya que produce el trabajo y potencia de salida del motor, se considera un proceso reversible y adiabático. Durante la carrera de

expansión, la presión disminuye mientras que el volumen aumenta de desde PMS hasta el PMI. En un ciclo Otto real, la carrera de expansión se ve afectada por la apertura de la válvula de escape antes de que el pistón llegue al PMI, lo cual genera una purga de los gases en el cilindro. Al purgar estos gases, una gran cantidad de entalpia es expulsada, lo que limita la eficiencia térmica del motor. Es necesario que la purga se complete antes de que el pistón llegue al PMI, para que no existan presiones altas que resistan el movimiento del pistón en la siguiente carrera de escape. En el ciclo ideal, la apertura de válvula de escape, lo que genera la purga de los gases, se representa como un proceso a volumen constante con reducción de presión. La última carrera es la de escape, en la cual el pistón asciende del PMI al PMS, este proceso se considera a presión atmosférica constante, ya que la válvula de escape se encuentra abierta. En un ciclo real, la carrera de escape se da a una presión ligeramente mayor. Luego de llegar al PMS, la válvula de escape se cierra y se abre la válvula de admisión, empezando así un nuevo ciclo [17].

El ciclo Atkinson se diferencia del ciclo Otto en la carrera de expansión, como se mencionó, en la carrera de expansión del ciclo Otto, la válvula de escape se abre antes de que el pistón llegue al PMI; en la carrera de expansión del ciclo Atkinson, la válvula de escape se abre luego que el gas en el cilindro se expanda por completo, logrando una presión cercana a la atmosférica. De esta forma, una mayor cantidad de trabajo se obtiene en la carrera de expansión, lo cual se traduce en un incremento de la eficiencia térmica [18]. Los vehículos con motores de ciclo Otto tienen relaciones de compresión de 10.5:1, en los vehículos con motores de ciclo Atkinson se puede obtener una relación de compresión de 13.4:1, relaciones de compresión del Toyota Yaris y el Toyota Prius respectivamente [19].

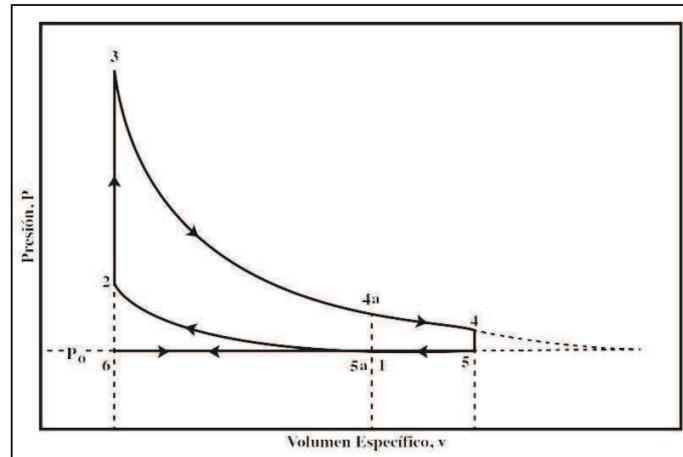


Figura 1.7 Diagrama p-v, ciclo Atkinson y ciclo Otto [20]

En la figura 1.7, se aprecia el ciclo Otto y el ciclo Atkinson. El ciclo Otto tiene las siguientes etapas, carrera de expansión (6-1), carrera de compresión (1-2), combustión (2-3), carrera de expansión (3-4a), apertura de válvula de escape (4a-5a), carrera de escape (5a-6). El ciclo Atkinson tiene las siguientes etapas, carrera de expansión (6-1), carrera de compresión (1-2), combustión (2-3), carrera de expansión (3-4), apertura de válvula de escape (4-5), carrera de escape (5-6) [21].

La eficiencia térmica (n_t) se puede obtener de [22]:

$$n_t = \frac{\dot{W}}{\dot{Q}_{in}} = \frac{\dot{W}}{\dot{m}_f Q_{HV} n_c} \quad (1.1)$$

Dónde:

- \dot{W} [kW] : Potencia
- \dot{m}_f [kg/seg] : Flujo de masa de combustible
- Q_{HV} [kJ/kg] : Poder calorífico del combustible
- n_c [%] : Eficiencia de combustión

1.5.1.2. Máquina eléctrica

A la maquina eléctrica utilizada en los vehículos híbridos y eléctricos, se le denomina motor eléctrico (ME) cuando convierten la energía eléctrica en mecánica, es decir, impulsan el vehículo. Cuando la maquina eléctrica convierte la energía mecánica en eléctrica, se le denomina generador, es el caso para el frenado regenerativo. Los motores eléctricos pueden entregar alto torque a bajas velocidades, lo cual significa una gran ventaja sobre los MCI [23]. Actualmente se utilizan varios tipos de motores eléctricos, depende del diseño del fabricante, entre los más utilizados se encuentran los siguientes:

- **Motor de inducción:** Existen dos tipos de motores de inducción; el motor de rotor jaula de ardilla y el motor de rotor bobinado. Los usados en vehículos híbridos y eléctricos son del tipo rotor jaula de ardilla, por lo tanto se explica sobre este motor. El rotor está formado por barras de cobre o aluminio a lo largo de la periferia, es decir en la dirección axial, las barras están en corto circuito pues a los extremos están unidas por anillos conductores, formando así una jaula de ardilla. Los devanados del estator son tres y se distribuyen de forma espaciada en 120 grados a lo largo de la circunferencia del estator. El devanado del rotor no está conectado al circuito excitación del motor, está aislado. El voltaje es aplicado al devanado del estator, produciendo un campo magnético que gira a velocidad síncrona; ya que el rotor gira a velocidad distinta a la síncrona (incluso a velocidad de rotor cero), los conductores del rotor cortan el campo magnético del estator y se genera una variación en el flujo del circuito del rotor, lo que induce un voltaje en las barras o devanado del rotor. El voltaje inducido en el rotor causa que las corrientes fluyan en el circuito del rotor, ya que el devanado o barras se encuentran cortocircuitadas. El torque se produce por la interacción del campo magnético del estator y del campo magnético inducido del rotor [24].
- **Motor síncrono de imanes permanentes:** Es un motor cuyo rotor está compuesto por imanes. El estator tiene tres devanados distribuidos cada 120 grados en la circunferencia del estator. La fuerza magneto motriz es producida por los imanes permanentes. Al utilizar imanes de materiales raros (neodimio, samario-cobalto), se incrementa la densidad de flujo en la brecha de aire y en consecuencia se incrementa la densidad de potencia del motor. Este motor, al

tener una densidad de potencia alta, es de menor tamaño en comparación a un motor de inducción de misma potencia. El motor síncrono de imanes permanentes es más fácil de enfriar que el motor de inducción, ya que no tiene pérdidas en el cobre del rotor. El torque electromecánico es producido por la interacción de los campos generados en el estator y en el rotor [25].

- **Motor sin escobillas de imanes permanentes:** La diferencia de este motor con el motor síncrono de imanes permanentes (MSIP) es la forma trapezoidal de la onda. La onda de este motor es trapezoidal debido a los devanados concentrados del mismo, en el motor síncrono de imanes permanentes los devanados están distribuidos de forma sinusoidal. El funcionamiento de este motor es igual al del MSIP [26].
- **Motor de reluctancia conmutada:** El rotor y el estator están hechos de láminas de acero magnético, el rotor no tiene bobinado ni imanes. Estos motores pueden tener varias combinaciones de polos en el estator – rotor. El devanado del estator que se encuentra en polos diametralmente opuestos, puede estar conectado en serie o en paralelo para formar una fase del motor. El torque se produce cuando una fase del estator es energizada y la pareja de polos más adyacente del rotor es atraída hacia el estator energizado, con el fin de disminuir la reluctancia del camino magnético. Al energizar fases consecutivas en sucesión, se puede desarrollar torque constante en cualquier sentido de rotación. Una gran ventaja sobre otros motores eléctricos es que la temperatura máxima permisible del rotor es mayor. Este tipo de motor eléctrico se usa en aplicaciones de tracción, ya que se pueden diseñar con una región amplia de potencia constante [27].

Tabla 1.3 Comparación motores eléctricos, tabla modificada [28]

Tipo de Motor	Experiencia	Rango de Potencia (kW)	Ventajas	Desventajas
Inducción	Muy amplia, más de un siglo	Hasta 180	- Robustos - De bajo costo	- Baja densidad de potencia
Síncrono de imanes permanentes	Media	Hasta 60	- Alta densidad de potencia	- Alto costo - Se pueden desmagnetizar los imanes
Sin escobillas de imanes permanentes	Mejora de una tecnología existente	Hasta 135	- Alta densidad de potencia - Son de fácil control electrónico	- Alto costo - Necesita sistema de detección de posición
Reluctancia conmutada	Tipología reciente	Hasta 10	- Elevado par de arranque - Fácil de fabricar	- Alto ruido - Alta ondulación de torque

El procedimiento de selección de características técnicas del motor eléctrico que se usa en la presente tesis sigue el siguiente orden: 1) Determinar torque y potencia requeridos por el vehículo; 2) Pre-selección de motor eléctrico; 3) Determinar tipo de transmisión; 4) Determinar potencia de motor eléctrico y selección del mismo.

1.5.2. Sistemas de almacenamiento

1.5.2.1. Baterías

Las baterías almacenan la energía eléctrica, la cual luego es suministrada al ME para propulsar el vehículo. Existen cuatro características técnicas importantes en las baterías para vehículos híbridos y eléctricos [29]:

- Energía específica o densidad de energía ($\frac{\text{Watt-hora}}{\text{kg}}$): Es la energía que suministra la batería por unidad de peso.
- Potencia específica ($\frac{\text{Watt}}{\text{kg}}$): Es la potencia capaz de aportar la batería por unidad de peso.
- Eficiencia energética: Indica la eficiencia de las baterías.

- Ciclo de vida: Indica el número de cargas y descargas de la batería, define la vida de servicio de la batería.

En los vehículos híbridos y eléctricos actuales, las baterías que se usan principalmente son las siguientes:

- Hidruro metálico de níquel (Ni-MH)
- Iones de litio (Li-ion)

Tabla 1.4 Propiedades de baterías, elaboración propia [30]

Tipo de Batería	Energía específica (W h / kg)	Potencia específica (W /kg)	Eficiencia energética (%)	Ciclo de vida
Hidruro metálico de níquel	60 - 80	200 - 400	70	1000
Iones de litio	90 -160	200 - 350	> 90	> 1000

1.5.2.2. Ultra capacitor

Los ultra capacitores son componentes alternativos para almacenar energía, a los capacitores convencionales se les ha aumentado la densidad de energía a costa de la reducción de densidad de potencia, con el objetivo de hacerlos funcionar de forma similar a las baterías. La densidad de potencia o potencia específica es de $10^6 \frac{W}{m^3}$ y la densidad de energía o energía específica es de $10^4 \frac{Wh}{m^3}$. Los ultra capacitores aún no pueden utilizarse en un HEV o VE como sistema de almacenamiento principal, pues no cuentan con la energía específica suficiente, pero si pueden utilizarse como intermedio de las baterías y motor eléctrico, ya que pueden proporcionar la potencia repentina que demanda el vehículo para situaciones de aceleración y subida de pendientes [31].

Tabla 1.5 Comparación Baterías y Ultra capacitores, elaboración propia [32]

Componente	Energía específica (Wh/m^3)	Potencia específica	Tiempo de descarga (seg.)	Ciclo de vida
Baterías	$5 - 25 \times 10^4$	$100 - 400 \frac{W}{kg}$	5×10^3	100 - 1000
Ultra capacitor	10^4	$10^6 \frac{W}{m^3}$	1 - 10	10^5

1.5.3. Sistemas de transmisión

La transmisión permite entregar la potencia generada por el MCI hacia el eje de transmisión y este transmite la potencia a las ruedas. Los vehículos híbridos y eléctricos cuya tracción es posterior, cuentan con un diferencial. Si el vehículo dobla en una esquina, la rueda posterior externa debe girar más rápido que la rueda posterior interna. El diferencial es un sistema planetario de engranajes, los cuales permiten que una rueda gire más rápido que la otra cuando sea necesario.

La transmisión permite operar en todo el rango de velocidad del vehículo, desde estar parado hasta la velocidad máxima del vehículo. La transmisión puede engranar distintas relaciones de transmisión con la finalidad de satisfacer el torque y velocidad requerida por el usuario. Existen tres tipos de transmisiones; manual, automática y continuamente variable [33].

1.5.3.1. Transmisión manual

Caja de cambios y embrague

La caja de cambios es un conjunto de ejes, engranajes, sincronizadores, los cuales permiten tener diferentes relaciones de transmisión para transmitir la potencia del motor al eje de transmisión. En la transmisión manual, el usuario debe embragar para poder realizar los cambios y así conseguir las distintas relaciones de transmisión. La potencia se transmite del eje de entrada, luego al eje secundario y por último al eje de salida por medio de engranajes.

1.5.3.2. Transmisión automática

Para la transmisión automática existen dos mecanismos importantes; el convertidor de torque y el sistema planetario de engranajes.

Convertidor de torque

Las partes de un convertidor de torque son una turbina, una bomba o impulsor y fluido de transmisión. La bomba o impulsor es de tipo centrífugo y está conectado al cigüeñal del motor, la turbina esta acoplada al eje de entrada de la transmisión. El fluido de

transmisión se encuentra dentro del convertidor y sirve como única conexión entre la bomba y la turbina. Cuando el motor gira, el fluido alojado en el convertidor ingresa a la bomba o impulsor por el centro y sale por la periferia del mismo. En la turbina, el fluido entra por los alabes en la periferia y sale por el centro. El fluido al ingresar por los alabes de la turbina, produce que la misma rote en el sentido de rotación de la bomba o impulsor. Al aumentar la velocidad del motor, más fluido de transmisión ingresa a la bomba o impulsor y este es bombeado a la turbina lo que genera que el torque transmitido aumente. El convertidor de torque tiene un estator que previene el retorno de fluido de transmisión de la turbina hacia la bomba o impulsor [34].

Sistema planetario de engranajes

El sistema planetario de engranajes está formado por tres componentes:

- El sol: Es el engranaje central.
- El porta-planetas: El cual sujeta uno o más engranajes planetas, del mismo tamaño y los cuales engranan con el sol.
- Corona o anillo: Es un anillo con dientes internos, el cual engrana con el o los planetas.

Este tipo de mecanismo es utilizado para vehículos híbridos eléctricos de configuración combinada (serie – paralelo). El eje de salida del MCI se conecta al porta-planetas, el generador se conecta al sol, el ME junto con las ruedas se conectan a la corona. La potencia mecánica se transmite del MCI hasta la transmisión final y las ruedas por medio de la corona, no hay un acoplamiento directo entre el MCI y la transmisión final. La potencia generada en el MCI se puede dividir, se transmite una parte a la transmisión final por medio de la corona y otra parte alimenta al generador por medio del engranaje sol. Ambas máquinas eléctricas pueden trabajar como generadores o motores eléctricos. En los casos de demanda pico de aceleración, el generador puede aportar torque a los planetas los cuales transmiten el torque a las ruedas por medio de la corona. Durante el frenado, el motor eléctrico opera como generador para capturar la energía del frenado regenerativo, la cual es transformada en energía eléctrica y almacenada en las baterías [35]. La ecuación que define la transmisión de potencia en los vehículos híbridos

eléctricos configuración combinada o también conocidos como power-split (divisor de potencia) es la siguiente:

$$P_{MCI} = P_{MCI \text{ a corona}} + P_{MCI \text{ a sol}} \quad (1.2)$$

$$T_p w_p = \frac{r_c w_c}{r_c + r_s} T_p + \frac{r_s w_s}{r_s + r_c} T_p \quad (1.3)$$

Dónde:

T_p : Torque del porta-planetas.

w_p : Velocidad del porta-planetas.

r_c, r_s : Radio de la corona y radio del sol respectivamente.

w_c, w_s : Velocidad de la corona y velocidad del sol respectivamente.

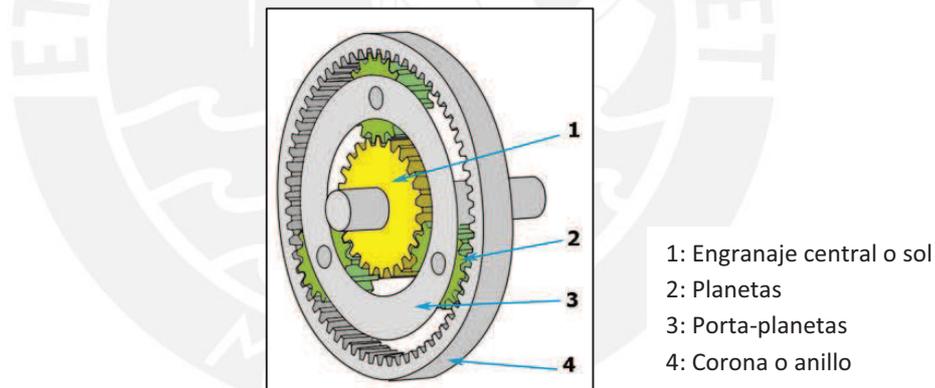


Figura 1.8 Sistema planetario de engranajes [36]

1.5.3.3. Transmisión continuamente variable – CVT

Este tipo de transmisión no cuenta con engranajes ni relaciones de transmisión fijas. Tiene un mecanismo deslizante que permite un número infinito de relaciones de transmisión. Existen dos sistemas de transmisiones continuamente variable; polea-faja y toroidal. El sistema polea-faja; está compuesto por una polea conductora que va acoplada al cigüeñal del motor, una polea conducida acoplada a la transmisión y una faja o correa que une las poleas. Las poleas están formadas, cada una, por dos partes de forma

cónica, las cuales se pueden alejar o acercar entre sí, lo que permite que varíe el diámetro de las poleas. Cuando las partes cónicas se alejan, la correa o faja se asienta en la parte baja de la polea, con un diámetro pequeño. Al variar las posiciones de las partes cónicas en las dos poleas, se puede obtener una variación continua de las relaciones de transmisión. La relación de transmisión máxima, es para velocidad baja, en este caso la polea conductora tiene el diámetro más pequeño y la polea conducida tiene el diámetro más grande. La relación de transmisión mínima, es para velocidad alta, en este caso la polea conductora tiene el diámetro más grande y la polea conducida tiene el diámetro más pequeño. El sistema toroidal tiene dos discos de forma cónica, uno de ellos conectado al motor (disco conductor) y el otro disco conectado a la transmisión (disco conducido). La transmisión de potencia se da por medio de rodillos o ruedas. Los rodillos cumplen la función de acoplar los dos discos cónicos, cumplen la función de la correa en el sistema polea-correa. La relación de transmisión es 1 cuando los rodillos están en el medio de los dos discos cónicos, rotando a la misma velocidad. La relación de transmisión es alta cuando los rodillos rotan cerca del centro del disco conductor y cerca al borde del disco conducido. Para la relación de transmisión baja, es el caso contrario, los rodillos rotan cerca al borde del disco conductor y cerca del centro del disco conducido [37].

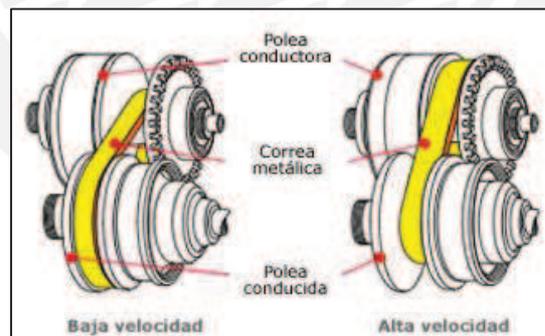


Figura 1.9 CVT sistema polea-correa [38]

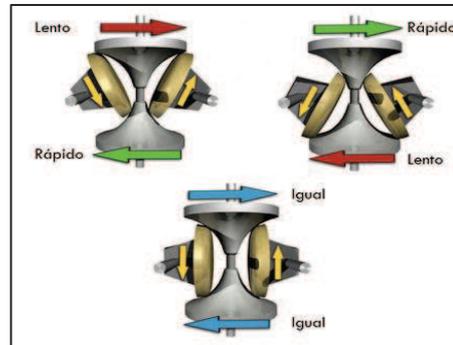


Figura 1.10 CVT sistema toroidal [39]

1.6. Emisiones de CO₂

Las emisiones de un vehículo pueden dividirse en dos; contaminantes del aire, los cuales producen smog, neblina y problemas de salud; y gases de efecto invernadero, los cuales son el dióxido de carbono (CO₂) y el metano (CH₄). Los gases de CO₂, emitidos luego de la combustión del MCI, son los principales causantes del efecto invernadero. Los HEV, PHEV y VE, emiten menor cantidad de CO₂. El Departamento de Energía de Estados Unidos realizó un estudio para determinar la cantidad de CO₂ emitido por los vehículos antes mencionados, en un viaje de 100 millas, lo que equivale a 160 kilómetros. Los resultados obtenidos por el Departamento de Energía de Estados Unidos se dan en unidades del sistema inglés (libras), por lo cual se realiza la conversión al sistema internacional (kilogramo).

Tabla 1.6 Cantidad de CO₂ emitido, tabla modificada [40]

Tipo de vehículo	Cantidad de CO ₂ emitido
Convencional	39.5 kg
Hibrido eléctrico enchufable	28.1 kg
Hibrido eléctrico	25.8 kg
Eléctrico	24.5 kg

Consideraciones [41]:

- Los vehículos eléctricos no emiten CO₂ directamente, ya que no cuentan con un motor de combustión interna. En la tabla anterior se muestra la cantidad de CO₂ que se ha emitido, para poder generar la energía eléctrica necesaria para cargar las baterías que alimentan al motor eléctrico del EV. Vehículo utilizado: Nissan Leaf.
- Se ha considerado que el vehículo híbrido eléctrico enchufable, recorre los primeros 56 kilómetros en modo eléctrico y los siguientes 104 kilómetros utilizando el motor de combustión interna. Vehículo utilizado: Chevrolet Volt.

Tabla 1.7 Consideraciones de estudio realizado, tabla modificada [42]

Parámetro	Valor
Recorrido en millas	100
Gasolina GHG/gal	24
Electricidad promedio Nacional GHG/kWh	1.58
Vehículo convencional mpg	27.6
HEV mi/gal	42
PHEV mi/gal	37
PHEV kWh/mi	0.36
PHEV Rango (mi) en Full Eléctrico	35
VE kWh/mi	0.34

Referencias Bibliográficas del Capítulo 1

- [1] CHAN, C.
2007 *The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles.*
Paper de la IEEE, volumen 5, número 4, pp. 708.
- [2] EMADI, Ali
2008 *Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles.* Paper de la IEEE, volumen 55, número 6, pp. 2238.
- [3] HUSAIN, Iqbal
2011 *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals.* Segunda edición. Boca Ratón: CRC Press, pp. 67.
- [4] CHAN, C.
2010 *Electric, Hybrid, and Fuel-Cell Vehicles: Architectures and Modeling*
Paper de la IEEE, volumen 59, número 2, pp. 591.
- [5] HUSAIN, Iqbal
2011 *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals.* Segunda edición. Boca Ratón: CRC Press, pp. 67.
- [6] Ídem, pp. 69
- [7] Ídem, pp.70
- [8] Ídem, pp.73
- [9] Ídem, pp.74
- [10] CHAN, C.
2010 *Electric, Hybrid, and Fuel-Cell Vehicles: Architectures and Modeling*
Paper de la IEEE, volumen 59, número 2, pp. 592.
- [11] Ibídem

- [12] HUSAIN, Iqbal
2011 *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals*. Segunda edición. Boca Ratón: CRC Press, pp. 63.
- [13] Ídem, pp. 64
- [14] CHAN, C.
2010 *Electric, Hybrid, and Fuel-Cell Vehicles: Architectures and Modeling*
Paper de la IEEE, volumen 59, número 2, pp. 591.
- [15] HUSAIN, Iqbal
2011 *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals*. Segunda edición. Boca Ratón: CRC Press, pp. 181.
- [16] CHAN, C.
2010 *Electric, Hybrid, and Fuel-Cell Vehicles: Architectures and Modeling*
Paper de la IEEE, volumen 59, número 2, pp. 590.
- [17] PULKRABEK, Willard
2004 *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*.
Segunda edición. Nueva York: Pearson Prentice-Hall, pp. 88.
- [18] Ídem, pp. 118
- [19] TOYOTA DEL PERÚ S.A
s/a *Brochure Toyota Yaris 2014*
Brochure Toyota Prius C 2014
- [20] PULKRABEK, Willard
2004 *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*.
Segunda edición. Nueva York: Pearson Prentice-Hall, pp. 119.
- [21] Ibídem
- [22] Ídem, pp. 68

- [23] HUSAIN, Iqbal
2011 *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals*. Segunda edición. Boca Ratón: CRC Press, pp. 197.
- [24] Ídem, pp. 226
- [25] Ídem, pp. 237
- [26] Ibidem
- [27] Ídem, pp. 249
- [28] JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN
2013 *Guía del vehículo eléctrico para Castilla y León [diapositivas]*. España.
- [29] HUSAIN, Iqbal
2011 *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals*. Segunda edición. Boca Ratón: CRC Press, pp. 110.
- [30] Ídem, pp. 149
- [31] Ídem, pp. 183
- [32] Ídem, pp. 186
- [33] Ídem, pp. 409
- [34] Ídem, pp. 412
- [35] Ídem, pp. 406
- [36] TÉCNICAS EN TRANSMISIONES AUTOMÁTICAS S.L
s/a *Engranaje Planetario [Imagen]*. Consulta: 08 de abril de 2014.
< <http://www.cambiosytransfers.es/p-51/Engranaje-planetario.htm>>

- [37] HUSAIN, Iqbal
2011 *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals*. Segunda edición. Boca Ratón: CRC Press, pp. 414.
- [38] AFICIONADOS A LA MECÁNICA
s/a *Cajas de cambios* [Imagen] Consulta: 08 de abril de 2014.
<<http://www.aficionadosalamecanica.net/caja-cambios9.htm>>
- [39] DIARIOMOTOR
s/a *La transmisión variable continua CVT* [Imagen].
Consulta: 08 de abril de 2014.
<<http://www.diariomotor.com/2008/09/17/la-transmision-variable-continua-cvt-esa-gran-desconocida/>>
- [40] DEPARTMENT OF ENERGY OF U.S.
s/a *Emissions from Hybrid and Plug-In Electric Vehicle*.
Estados Unidos. Consulta: 10 de marzo de 2014.
< http://www.afdc.energy.gov/vehicles/electric_emissions.php>
- [41] Ibídem
- [42] Ibídem

CAPÍTULO 2. REQUERIMIENTOS DEL USUARIO PRIVADO DE VEHÍCULO EN LIMA METROPOLIANA

En este capítulo se brinda información sobre los vehículos más vendidos y por ende, los más utilizados en el mercado nacional. Además, se detalla información levantada sobre las situaciones de tráfico en Lima Metropolitana, con dicha información es posible determinar las curvas velocidades promedios de los vehículos en las situaciones de tráfico.

2.1. Vehículos en el mercado nacional

2.1.1. Segmentación de vehículos

En el actual parque automotor, existe una gran variedad de vehículos, los cuales se pueden clasificar según el tipo de carrocería, uso de vehículo, gama del vehículo, entre otros tipos de clasificaciones. La Asociación de Representantes Automotrices del Perú (ARAPER), categoriza a los vehículos de la siguiente forma:

- Ligeros: Autos-Sw, van familiar, multipropósito y SUV.
- Comerciales Livianos: Microbús, minibús, pick-up, panel y furgón.

- Transporte de pasajeros: Ómnibus
- Transporte de carga: Camiones y remolcadores

La presente tesis se orienta a vehículos ligeros, los cuales son los vehículos más comercializados en el mercado nacional.

2.1.2. Ventas de vehículos

De acuerdo a la ARAPER, durante el año 2013 se vendieron 139 450 vehículos ligeros, mostrando un 9% de crecimiento respecto al año 2012, en el cual se vendieron 128 290 vehículos ligeros. Dicha información se muestra en la siguiente figura.

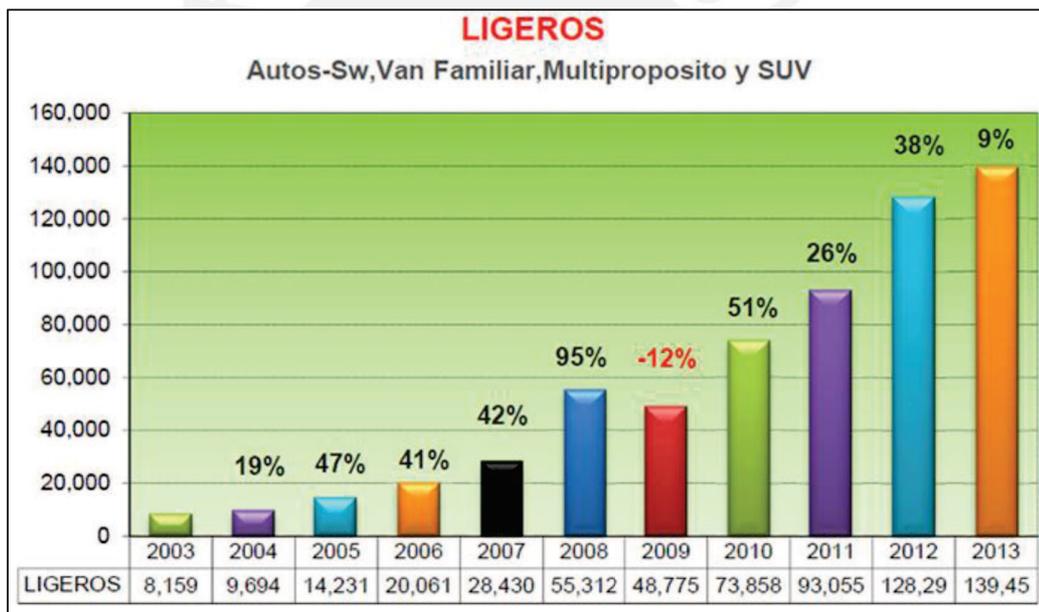


Figura 2.1 Estadísticas de ventas de vehículos ligeros [1]

2.1.3. Vehículos más vendidos en los años 2012 y 2013

Los vehículos más vendidos en el año 2012, según la Asociación Automotriz del Perú (AAP), son el Toyota Yaris, Kia Rio, Chevrolet Sail, Hyundai Accent, Nissan Tiida. Para el año 2013, los vehículos más vendidos según la Asociación de Representantes Automotrices del Perú, son el Toyota Yaris, Chevrolet Sail, Kia Picanto, Kia Rio, Hyundai

Accent. Los vehículos antes mencionados, son vehículos ligeros y tienen características técnicas similares. Su precio de lista se encuentra en el rango de 12 000 a 17 000 dólares americanos. Dado que los vehículos más vendidos tienen características técnicas similares, solo se detalla la información del Toyota Yaris y del Kia Rio.

2.1.3.1. Características técnicas – Toyota Yaris

El Toyota Yaris es un vehículo sedán de cuatro puertas, tracción delantera. Dicho vehículo se comercializa en dos versiones, una versión cuenta con un motor de combustión interna de encendido por chispa de 1 300 centímetros cúbicos (cc) y otra versión con motor de 1 500cc. Se muestran las especificaciones técnicas del Toyota Yaris versión 1 300cc, de los años 2012 y 2013, las especificaciones del vehículo para ambos años son iguales.

Tabla 2.1 Especificaciones técnicas Toyota Yaris 2012-2013, elaboración propia [2]

Versión	YARIS 1.3 MT FULL	YARIS 1.3 AT FULL
DIMENSIONES Y PESOS		
Longitud (mm.)	4,300	4,300
Ancho (mm.)	1,690	1,690
Alto (mm.)	1,460	1,460
Peso bruto (kg.)	1,450	1,450
Peso neto (kg.)	1,005	1,015
MOTOR		
Cilindrada/cilindros	1,298 / 4 en línea	1,298 / 4 en línea
Potencia (HP) @6000 rpm	87	87
Torque (kg.m) @4200 rpm	12.2	12.2
Válvulas	16, DOHC, VVT-i	16, DOHC, VVT-i
CARROCERÍA		
Neumáticos	175 / 65 R14	175 / 65 R14
Dirección	Piñón y cremallera, asistida electrónicamente (EPS)	Piñón y cremallera, asistida electrónicamente (EPS)
Frenos delanteros	Discos ventilados	Discos ventilados
Frenos posteriores	Tambores	Tambores
Tipo de transmisión	Mecánica de 5 velocidades	Automática de 4 velocidades

2.1.3.2. Características técnicas – Kia Rio

El vehículo Kia Rio tiene dos presentaciones de acuerdo al tipo de carrocería, estas son sedán y hatchback. Es un vehículo de tracción delantera, ambas presentaciones son de 4 puertas y tienen un motor de combustión interna de encendido por chispa de 1 400 centímetros cúbicos. Se muestra las especificaciones técnicas del Kia Rio de los años 2012 -2013.

Tabla 2.2 Especificaciones técnicas Kia Rio HB 2012-2013, elaboración propia [3]

Versión	RIO HB 1.4 MT - EX FULL D´LUXE	RIO HB 1.4 AT - EX FULL D´LUXE
DIMENSIONES Y PESOS		
Longitud (mm.)	4,045	4,045
Ancho (mm.)	1,720	1,720
Alto (mm.)	1,455	1,455
Peso bruto (kg.)	1570	1600
Peso neto (kg.)	1143	1170
MOTOR		
Cilindrada/cilindros	1,396 / 4 en línea	1,396 / 4 en línea
Potencia (HP) @6300 rpm	107	107
Torque (kg.m) @4200 rpm	14	14
Válvulas	16, DOHC	16, DOHC
CARROCERÍA		
Neumáticos	185 / 65 R15	185 / 65 R15
Dirección	Asistida electrónicamente (MDPS)	Asistida electrónicamente (MDPS)
Frenos delanteros	Discos ventilados	Discos ventilados
Frenos posteriores	Tambores	Tambores
Tipo de transmisión	Mecánica de 6 velocidades	Automática de 4 velocidades

2.2. El tráfico en Lima Metropolitana

Se levantó información de las situaciones de tráfico y manejo en Lima Metropolitana, para lograr esto se tipificaron dos rutas las cuales se recorrieron 44 veces cada una, cada ruta se recorrió 22 veces en la mañana y 22 veces en la tarde. Dicho número de recorridos es

suficiente para lograr obtener datos estadísticos, los cuales incluyen curvas de velocidades promedio. El objetivo de levantar información acerca de las situaciones de tráfico y manejo, es poder determinar las velocidades promedio del vehículo y el número de arranques o aceleraciones que se realizan cuando el vehículo se encuentra parado. Para entender los datos estadísticos que se muestran en este capítulo, es necesario definir medidas de tendencia central (media aritmética y moda), medidas de dispersión (varianza y desviación estándar) y definir intervalo de confianza:

- Media aritmética (\bar{X}): También conocida simplemente como media, es el valor número que se obtiene de dividir la suma total de los valores observados de una variable entre el número de observaciones [4]. Para calcular la media se utiliza la siguiente fórmula:

$$\bar{X} = \frac{\text{Suma Total}}{\# \text{ de datos}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (2.1)$$

- Moda (M_o): La moda en una serie de datos es el valor que se define como el dato que ocurre con mayor frecuencia [5].
- Varianza (S_n^2): Se define como la media aritmética de los cuadrados de las diferencias de los datos con respecto a su media aritmética. Cuantifica el nivel de dispersión o de variabilidad de los valores de una variable cuantitativa con respecto a su media aritmética [6]. Cálculo de la varianza:

$$S_n^2 = \frac{\text{Suma total de cuadrados de diferencias}}{\# \text{ de datos}} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \quad (2.2)$$

- Desviación estándar (S): La desviación estándar es la raíz cuadrada de la varianza [7].

$$S_n = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (2.3)$$

- Intervalo de confianza: Son estimadores entre los cuales se contiene un parámetro objetivo (θ). Los puntos extremos reciben el nombre de límites de confianza superior e inferior. La probabilidad que un intervalo incluya a θ , se llama coeficiente de confianza ($1 - \alpha$) [8]. El intervalo de confianza bilateral de $100(1 - \alpha)\%$ para una muestra grande, está dado por:

$$\hat{\theta}_L = \hat{\theta} - Z_{\alpha/2} \sigma_{\hat{\theta}} \quad (2.4)$$

$$\hat{\theta}_U = \hat{\theta} + Z_{\alpha/2} \sigma_{\hat{\theta}} \quad (2.5)$$

Dónde:

$\hat{\theta}_L$: Límite inferior

$\hat{\theta}_U$: Límite superior

$\hat{\theta}$: Media de la muestra

$Z_{\alpha/2}$: Valor crítico, 1.96 para $(1 - \alpha) = 0.95$

$\sigma_{\hat{\theta}}$: Desviación estándar de la población

Al no conocer la varianza poblacional, se utiliza la varianza de la muestra (S_n^2) como su valor estimado, entonces el intervalo de confianza bilateral tiene la forma [9]:

$$\hat{\theta}_L = \hat{\theta} - Z_{\alpha/2} \left(\frac{S}{\sqrt{n}} \right) \quad (2.6)$$

$$\hat{\theta}_U = \hat{\theta} + Z_{\alpha/2} \left(\frac{S}{\sqrt{n}} \right) \quad (2.7)$$

2.2.1. Ruta A – Tráfico pesado

La ruta inicia y finaliza en el mismo punto, en el cruce de la avenida La Marina y la avenida Riva Agüero. Se recorre la avenida La Marina, av. Sánchez Carrión (Pershing), av. Salaverry, jirón Washington, jr. Quilca, jr. R. Torrico, jr. Moquegua, jr. Camaná, av. Uruguay, av. Garcilazo de la Vega (Wilson), av. Arequipa, av. Jorge Basadre, av. Camino Real, av. Cavenecia, av. Comandante Espinar, av. José Pardo, av. Ricardo Palma, av. General Montagne, av. Alfredo Benavides, vuelta en U en la cuadra 50, av. Alfredo Benavides, cale Los Pinos, calle Berlín, av. Comandante Espinar, av. Los Conquistadores, av. Víctor Andrés Belaunde, av. Jorge Basadre, av. Las Flores, av. Javier Prado, av. Sánchez Carrión (Pershing), av. La Marina, av. Universitaria, calle Gallagher, av. Riva

Agüero. El objetivo de realizar esta ruta, es simular el tráfico pesado que se genera en Lima Metropolitana.

La distancia recorrida en esta ruta es de 40 kilómetros en promedio, y se realiza en un tiempo de 2 horas y 30 minutos, es decir 150 minutos, tanto para el recorrido del turno mañana como el recorrido del turno tarde. El recorrido de la mañana inicia en promedio a las 9:10 a.m. y el recorrido de la tarde inicia a la 1:15 p.m. Durante los recorridos realizados, cada 15 minutos se tomaron datos de kilómetros recorridos, velocidad promedio en el tiempo de 15 minutos y número de paradas realizadas en 15 minutos, por lo cual en cada recorrido de la ruta se obtienen 10 datos de velocidad promedio, diez datos de kilómetros recorridos y diez datos de números de paradas. Al recorrer la ruta 44 veces, se obtienen 220 datos para la mañana y 220 datos para la tarde.

2.2.1.1. Ruta A1

Esta ruta se realiza en la mañana, en condiciones de tráfico pesado. Tiene un tiempo de recorrido promedio de 150 minutos, el recorrido inicia a las 9:10 a.m. en promedio. Para obtener los datos estadísticos se hace uso del software Minitab 16, se muestra la información obtenida:

Tabla 2.3 Estadísticas de la ruta A1 [Elaboración propia]

Variable	N (número de datos)	Media	Moda	Desviación estándar	Varianza
Recorrido (km)	220	3.738	4	1.1753	1.3814
Número de paradas	220	8.045	7	2.073	4.299
Tiempo de paradas	220	5.711	5	1.815	3.294
Velocidad Promedio (km/h)	220	15.065	16	4.837	23.393

De los resultados estadísticos se puede afirmar que para condiciones de tráfico pesado de las mañanas en Lima Metropolitana, en un intervalo de 15 minutos, un vehículo recorre en promedio 3.738 kilómetros en un tiempo de recorrido de 9.28 minutos, obteniendo una

velocidad promedio de 15.065 km/h y realizando 8 paradas, el tiempo total de paradas es de 5.72 minutos.

El siguiente histograma, brinda información de la velocidad promedio durante el tráfico pesado de las mañanas. La velocidad promedio es de 15.065 km/h, con una desviación estándar de 4.837. La desviación estándar indica que los datos de velocidades que se encuentran en el rango de (15.065 ± 4.837) km/h, son datos normales o estándares.

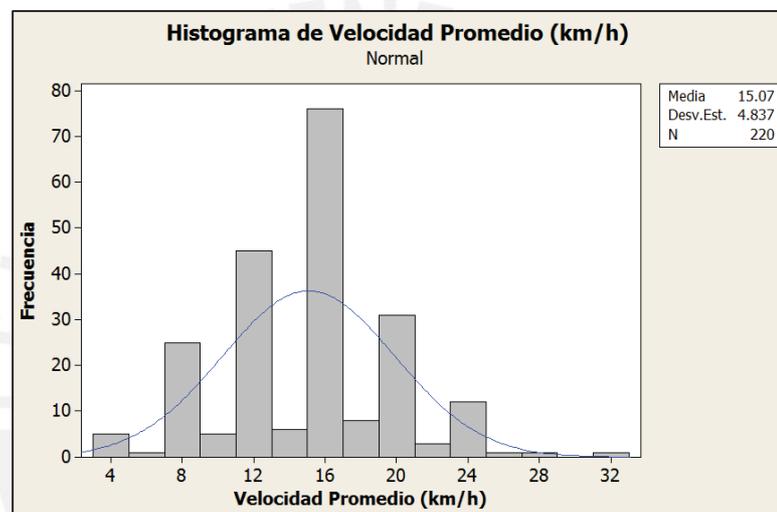


Figura 2.2 Histograma de velocidad promedio (km/h), ruta A1

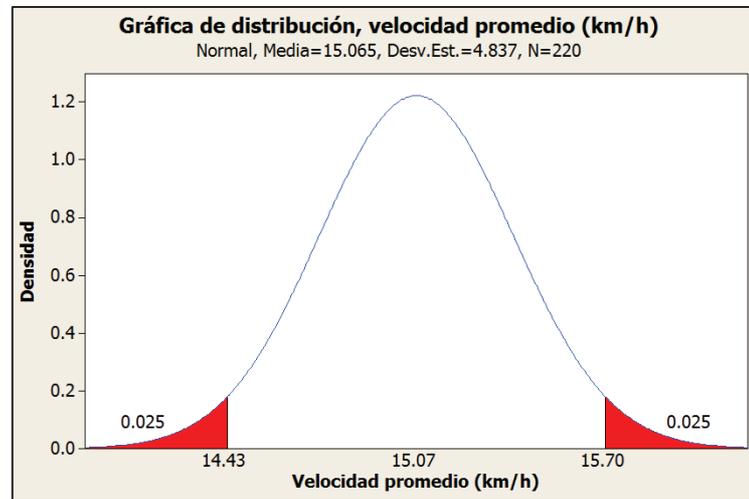


Figura 2.3 Gráfica de distribución de velocidad promedio (km/h), ruta A1

De la gráfica de distribución normal anterior, se puede afirmar con un 95% de confiabilidad, que la velocidad promedio real para condiciones de tráfico pesado (ruta A) entre las 9:10 a.m. y las 11:40 a.m., se encuentra entre 14.43 km/h y 15.70 km/h.

2.2.1.2. Ruta A2

Se obtienen los datos estadísticos de la ruta A2, hora de recorrido entre 1:15 p.m. y 3:45 p.m., utilizando el software Minitab 16.

Tabla 2.4 Estadísticas de la ruta A2 [Elaboración propia]

Variable	N (número de datos)	Media	Moda	Desviación estándar	Varianza
Recorrido (km)	220	3.755	4	1.264	1.598
Número de paradas	220	8.300	8	2.282	5.206
Tiempo de paradas	220	5.914	7	1.723	2.970
Velocidad Promedio (km/h)	220	15.519	16	6.470	41.860

En el siguiente histograma, se observan las velocidades promedio del recorrido en condiciones de tráfico pesado, para el turno de la tarde. La desviación estándar para la ruta A2 (6.470) es mayor que la ruta A1 (4.837), la diferencia se debe que durante la ruta de la tarde, aproximadamente a las 2:30 p.m., en la avenida Alfredo Benavides se muestra un menor flujo de vehículos, permitiendo de esta manera alcanzar velocidades promedio mayores a la media.

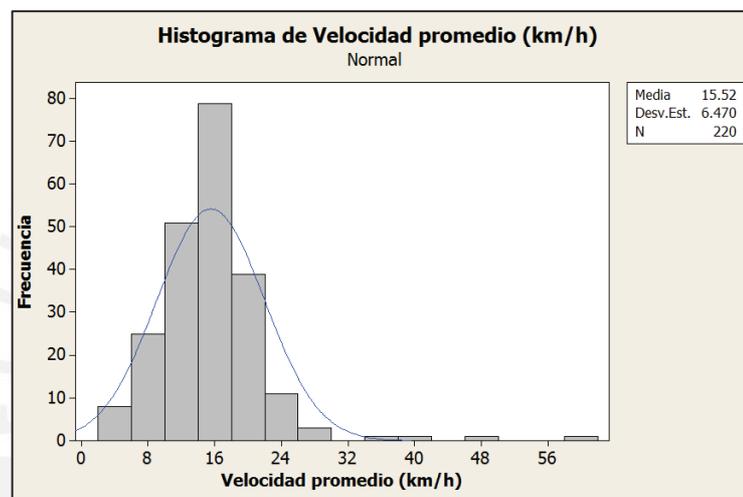


Figura 2.4 Histograma de velocidad promedio (km/h), ruta A2

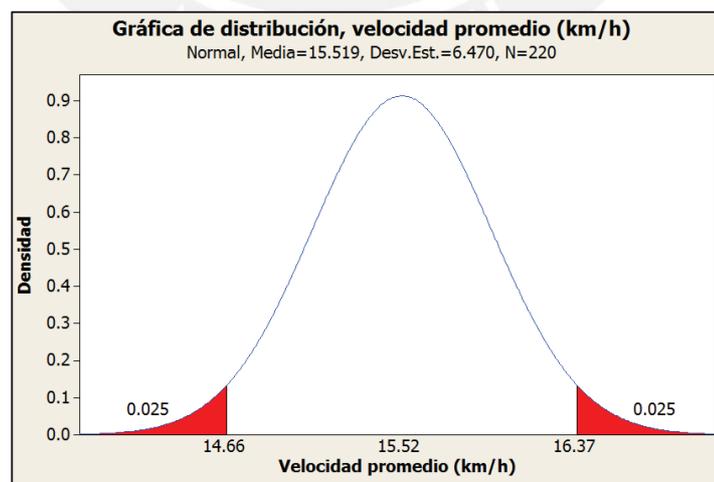


Figura 2.5 Gráfica de distribución de velocidad promedio (km/h), ruta A2

De acuerdo a la gráfica de distribución normal, la velocidad promedio real para la ruta A, en el turno tarde, entre la 1:15 p.m. y las 3:45 p.m., se encuentra en el intervalo de 14.66 km/h y 16.37 km/h con un nivel de confianza de 95%.

2.2.2. Ruta B – Tráfico moderado

La ruta inicia y finaliza en el mismo punto, en el cruce de la avenida La Marina y la avenida Riva Agüero. Se recorre la avenida La Marina, av. Guardia Chalaca (hasta Plaza Garibaldi), av. Retorno Guardia Chalaca, av. La Marina (hasta la avenida Sucre), retorno av. La Marina y se repite el circuito 5 veces. El objetivo de esta ruta, es simular el tráfico moderado o tráfico medio que se genera en Lima Metropolitana.

La distancia recorrida en esta ruta es de 84 kilómetros en promedio, y se realiza en un tiempo de 2 horas y 30 minutos, es decir 150 minutos, tanto para el turno de mañana como el turno de la tarde. El recorrido del turno mañana, inicia en promedio a las 9:20 a.m. y el recorrido del turno tarde inicia en promedio a las 2:00 p.m. De igual manera al recorrido de la ruta A, durante este recorrido se anotaron los datos de kilómetros recorridos, número de paradas y velocidad promedio en lapsos de 15 minutos, para cada recorrido se obtienen 10 datos de la información antes mencionada. Al recorrer 44 veces la ruta B (tráfico moderado), se pudo levantar 220 datos para el recorrido del turno mañana y 220 datos para el recorrido del turno tarde.

2.2.2.1. Ruta B1

Los siguientes datos estadísticos se obtienen utilizando el software Minitab 16, para el recorrido de tráfico moderado en el turno de la mañana, entre las 9:20 a.m. y las 11:50 a.m.

Tabla 2.5 Estadísticas de la ruta B1 [Elaboración propia]

Variable	N (número de datos)	Media	Moda	Desviación estándar	Varianza
Recorrido (km)	220	7.172	7	1.342	1.801
Número de paradas	220	6.364	6	1.665	2.771
Tiempo de paradas	220	4.033	4	1.422	2.022
Velocidad Promedio (km/h)	220	28.642	28	5.403	29.194

El siguiente histograma brinda la información necesaria para tener un punto de vista general de las velocidades promedio. Con una desviación estándar de 5.403, se observa que la media de las velocidades promedio es de 28.64 km/h.

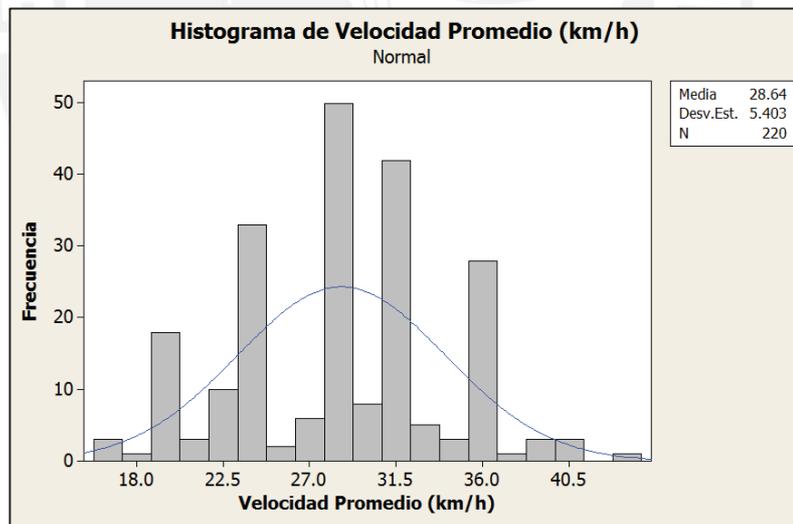


Figura 2.6 Histograma de velocidad promedio (km/h), ruta B1

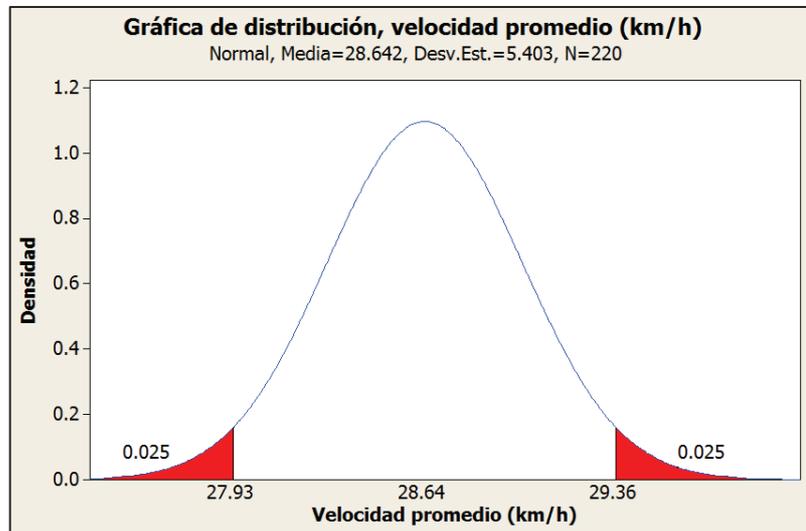


Figura 2.7 Gráfica de distribución de velocidad promedio (km/h), ruta B1

De la gráfica de distribución normal, se observa que la velocidad promedio real para el recorrido de tráfico moderado del turno mañana, entre las 9:20 a.m. y 11:50 a.m., con un nivel de confianza de 95% se encuentra en el intervalo de 27.93 km/h y 29.36 km/h.

2.2.2.2. Ruta B2

En la siguiente tabla se muestran los datos estadísticos, obtenidos utilizando el software Minitab 16, del recorrido en condiciones de tráfico moderado durante la tarde, entre las 2:00 p.m. y 4:30 p.m.

Tabla 2.6 Estadísticas de la ruta B2 [Elaboración propia]

Variable	N (número de datos)	Media	Moda	Desviación estándar	Varianza
Recorrido (km)	220	7.323	8	1.520	2.311
Número de paradas	220	6.655	7	1.693	2.866
Tiempo de paradas	220	4.255	4	1.584	2.508
Velocidad Promedio (km/h)	220	29.292	32	6.081	36.974

El histograma de velocidad promedio de la ruta B2, permite visualizar velocidades mayores a 42 km/h, las cuales no se obtienen en la ruta B1. Esto se debe, en que la ruta B muestra un menor flujo de vehículos durante el turno de la tarde, entre las 2:00 p.m. y 4:30 p.m.

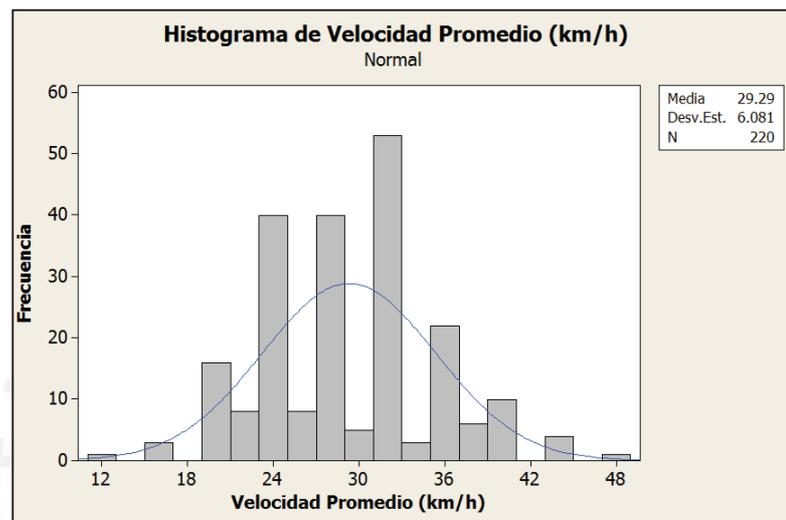


Figura 2.8 Histograma de velocidad promedio (km/h), ruta B2

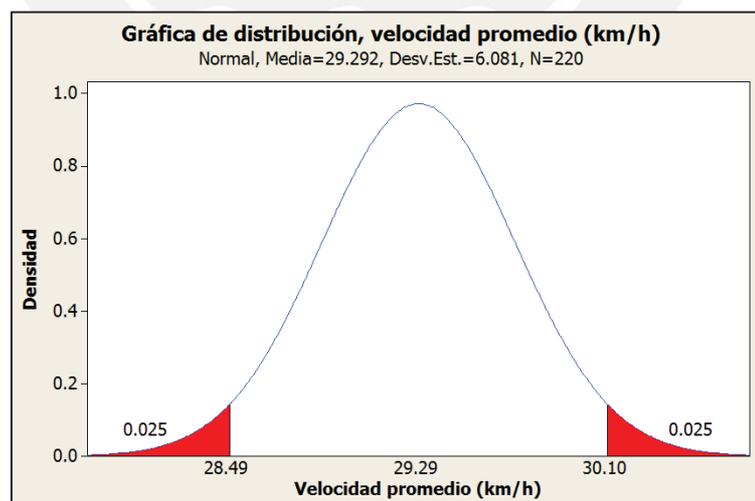


Figura 2.9 Gráfica de distribución de velocidad promedio (km/h), ruta B2

Para los recorridos de tráfico moderado durante las tardes, en horario de 2:00 p.m. a 4:30 p.m., se puede afirmar con un nivel de confianza de 95% que la velocidad promedio real se encuentra en el intervalo de 28.49 km/h y 30.10 km/h.

2.2.3. Ruta A y Ruta B

Para lograr visualizar las velocidades promedio de las rutas A y B, y las variaciones de velocidades promedio de las rutas, se muestra el siguiente histograma.

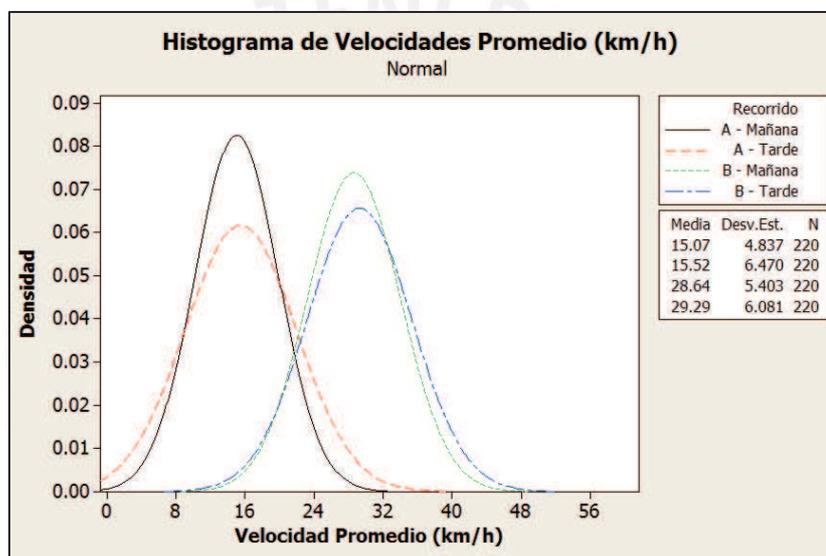


Figura 2.10 Histograma de velocidades promedio de las rutas A y B

Como se puede observar, la ruta B es una ruta que posee mayores velocidades promedio, esto se debe a que es una ruta de tráfico moderado, es una ruta que contiene gran cantidad de semáforos a lo largo de la avenida La Marina, pero presenta menor flujo vehicular que la ruta A. También se aprecia claramente, que ambas rutas de la tarde tienen una menor densidad con sus respectivas rutas de la mañana, es debido a que en las rutas del turno tarde se presenta un menor flujo de vehículos, con lo cual se pueden alcanzar velocidades promedio mayores a la media, esto se confirma al notar que las desviaciones estándar de las rutas de las tardes, tanto para A como para B, son mayores que las desviaciones estándar para las rutas del turno mañana.

2.2.4. Ciclos de conducción en Lima Metropolitana (usuarios)

Se realizaron encuestas a 35 conductores, los conductores llenaron las encuestas durante un recorrido matutino frecuente, de sus casas a sus respectivos lugares de trabajo o centros de estudios. Se realizaron estas encuestas con el fin de determinar la semejanza de las velocidades promedios de los conductores con las velocidades promedios de las rutas tipificadas y así darle validez a rutas tipificadas. Con las encuestas realizadas, también se puede determinar el recorrido diario promedio de los usuarios. Utilizando el software Minitab 16, se obtienen las estadísticas de las encuestas realizadas.

Tabla 2.7 Estadísticas de encuestas realizadas [Elaboración propia]

Variable	N (número de datos)	Media	Moda	Desviación estándar	Varianza
Recorrido de la mañana (km)	35	12.65	8	6.02	36.20
Recorrido diario total (km)	35	34.87	14,15,16	16.78	281.55
Velocidad Promedio (km/h)	35	15.88	13.71	3.160	9.98

La media de la velocidad promedio es 15.88 km/h y presenta una desviación estándar de 3.160. Es posible comparar los datos antes mencionados con los datos de las rutas tipificadas. Al realizar dicha comparación, se observa que la media de la velocidad promedio de los conductores que realizaron las encuestas, es similar a la media de la velocidad promedio del recorrido A1, tráfico pesado turno mañana.

Tabla 2.8 Comparación de ruta A1 y encuestas realizadas [Elaboración propia]

Variable	Ruta A1	Encuestas realizadas
Desviación estándar	4.837	3.160
Media de Velocidad promedio (km/h)	15.07	15.88

Además de comparar la media de velocidad promedio y desviación estándar, es posible comparar el intervalo de velocidades promedio de la gráfica de distribución normal. Para la ruta A1 el intervalo de confianza, en el cual se ubica la velocidad promedio real, es [14.43; 15.70] y el intervalo de confianza para las encuestas realizadas es de [14.83; 16.93].

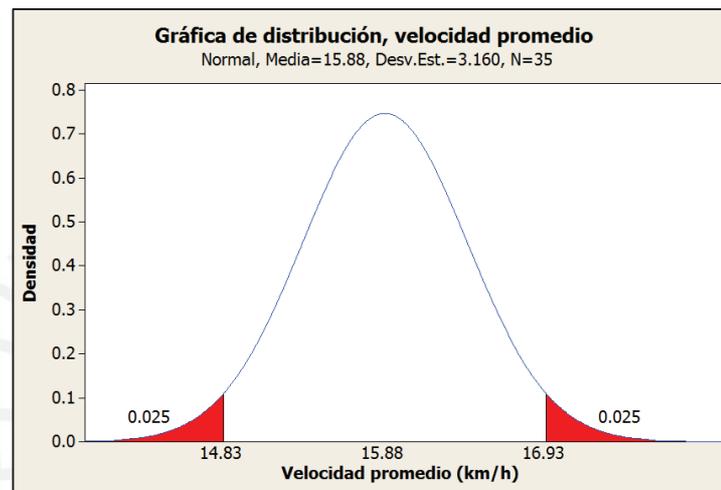


Figura 2.11 Gráfica de distribución de velocidad promedio (km/h) de encuestas realizadas

Los datos estadísticos y la gráfica de distribución normal de velocidades promedio de las encuestas realizadas, brindan la información necesaria para aceptar la ruta tipificada A.

2.3. Requerimientos básicos del vehículo para uso en Lima Metropolitana

Luego de revisar los datos obtenidos de las rutas tipificadas y de las encuestas realizadas a los 35 conductores, se pueden definir los siguientes requerimientos básicos que debe cumplir un vehículo para poder utilizarlo en Lima Metropolitana:

- Carga útil mínima: El vehículo debe ser capaz de transportar como mínimo dos pasajeros, y una respectiva carga adicional por pasajero. El peso promedio de mujeres mayores de 20 años es de 74.7 kg, el peso promedio de hombres mayores de 20 años es de 88.3 kg. El promedio de dichos pesos es 81.5 kg [10]. Se considera carga adicional 10 kg por persona. Por lo tanto, el vehículo debe ser capaz de transportar 183 kilogramos de carga útil.

- Recorrido diario: De las encuestas realizadas a los usuarios, se determinó que el recorrido diario total promedio es de 34.87 km. Para el desarrollo de esta tesis, se considera que el recorrido diario mínimo que debe proporcionar un vehículo es de 50 km.
- Torque: El torque que debe tener el vehículo debe ser el necesario para poder transitar por las rampas de acceso a estacionamientos en sótanos, la cual no debe tener una pendiente máxima de 15% [11], lo que se traduce en un ángulo de 8.53 grados. La pendiente máxima es de 5% para una velocidad de 80 km/h en ciudad y pendiente máxima de 4.5% para una velocidad de 100 km/h en autopista [12]. Además, se toman datos de la pendiente de la avenida Raúl Ferrero, específicamente en el tramo del Cerro Centinela que une los distritos de La Molina y Surco, obteniendo una medición de pendiente de 18.5% ó 10.5 grados. También se realiza la medición de la pendiente de la avenida Armendáriz en la Costa Verde, obteniendo una medición de pendiente de 8.5% ó 4.85 grados. La velocidad máxima permitida en ambas avenidas es de 60 km/h.



Figura 2.12 Medición de pendiente av. Raúl Ferrero - Cerro Centinela

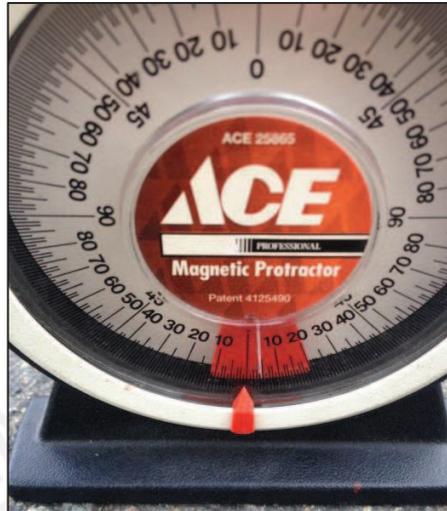


Figura 2.13 Medición de pendiente av. Armendáriz – Costa Verde

- Velocidad máxima: El vehículo que transita en Lima Metropolitana, de acuerdo al Reglamento de Tránsito y señales de tránsito en las vías, no debe exceder de 80 km/h en la vía expresa de Javier Prado y en la vía expresa de Paseo de la República. Para tránsito en autopista, el vehículo no debe exceder los 100 km/h.

Referencias Bibliográficas del Capítulo 2

- [1] ARAPER
s/a *Ventas Diciembre 2013*. Lima. Consulta: 10 de marzo de 2014.
< <http://araper.pe/index.php?item3=1&item4=93&item5=40>>
- [2] TODOAUTOS.PE
s/a *Ficha Técnica: Motor, equipamiento y seguridad del Toyota Yaris 2012 – 2013*. Lima. Consulta: 22 de abril de 2014.
< <http://www.todoautos.com.pe/portal/toyota/yaris/4858-autos>>
- [3] TODOAUTOS.PE
s/a *Ficha Técnica: Motor, equipamiento y seguridad del Kia Rio Hatchback 2012 – 2013*. Lima. Consulta: 22 de abril de 2014.
< <http://www.todoautos.com.pe/portal/kia/rio-hatchback/5503-autos>>
- [4] CÓRDOVA, Manuel
2003 *Estadística Descriptiva e Inferencial*. Quinta Edición.
Lima: Moshera S.R.L, pp. 43.
- [5] Ídem, pp. 41
- [6] Ídem, pp. 64
- [7] Ibídem
- [8] WACKERLY, Dennis; MENDENHALL III, William y SCHEAFFER, Richard
2010 *Estadística matemática con aplicaciones*. Séptima Edición.
México D.F: Cengage Learning Editores S.A. pp. 411
- [9] Ídem, pp. 413
- [10] DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES OF U.S.
2008 *Anthropometric Reference Data for Children and Adults*. National Health Statistics Reports. Estados Unidos. pp. 7 y 9.

- [11] MINISTERIO DE VIVIENDA, CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO DEL PERÚ
2006 *Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma A.010 Condiciones
generales de diseño.* Lima.
- [12] MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES DEL PERÚ
2001 *Manual de diseño geométrico de carreteras.* Lima. pp. 144.



CAPÍTULO 3. CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO PROPUESTO PARA USO PRIVADO EN LIMA METROPOLITANA

En este capítulo se define el tipo de vehículo adecuado para uso en Lima Metropolitana. Además, se dan a conocer las características técnicas de los componentes más importantes para el vehículo seleccionado. Dentro de los principales componentes se encuentran el sistema de transmisión, el sistema de propulsión, el inversor DC/AC, sistema de almacenamiento, el convertidor AC/DC, el rectificador. Se realiza la selección de los sistemas principales; sistema de propulsión y sistema de almacenamiento. Por último, se describe las características técnicas del vehículo eléctrico para las condiciones estudiadas.

3.1. Selección del tipo de vehículo adecuado

En el capítulo 1 se han definido los vehículos eléctricos (VE), híbridos eléctricos (HEV), híbridos eléctricos enchufables (PHEV) y vehículos de celda de combustible (FCV). En esta sección se realiza una evaluación para determinar el vehículo adecuado para las características de conducción de los usuarios en Lima Metropolitana.

La selección del vehículo adecuado depende de tres factores importantes; autonomía del vehículo, emisiones del vehículo, costos del vehículo. De los vehículos mencionados anteriormente es posible descartar el uso de FCV, ya que dichos vehículos se encuentran aún en desarrollo y por ende tienen costo inicial muy alto.

La selección del tipo de vehículo adecuado se reduce a VE, HEV y PHEV. Se realiza una comparación de estos vehículos en base a los factores mencionados anteriormente.

Tabla 3.1 Comparación de VE, HEV, PHEV [Elaboración propia]

	EV	HEV	PHEV
Autonomía	Baja	Alta	60 km apróx, carga eléctrica
Emisiones	Cero emisiones locales	Bajas emisiones locales	Bajas emisiones locales
Principales sistemas	- Baterías - Motor eléctrico	- Baterías - Motor eléctrico - MCI	- Baterías - Motor eléctrico - MCI
Costos de combustibles	Bajo, solo requiere carga eléctrica	Alto, requiere combustibles fósiles	Medio, requiere carga eléctrica los primeros 60km aprox. luego requiere combustibles fósiles

De la tabla anterior se puede destacar lo siguiente:

La autonomía requerida del vehículo se ha definido en 50 km, véase 2.3. Los tres vehículos cumplen con dicha característica. El PHEV presenta una ventaja frente a los VE y HEV, ya que tiene autonomía de 60 km utilizando la carga eléctrica; es decir, utilizando la capacidad de las baterías y luego utiliza la energía química generada en el MCI para cargar dichas baterías.

Respecto a las emisiones, el VE muestra una ventaja frente a los otros vehículos, pues presenta cero emisiones locales ya que solo utiliza energía eléctrica. Los HEV y PHEV, presentan bajos niveles de emisiones, respecto a los vehículos dedicados a gasolina o diesel.

En cuanto a costos iniciales, los HEV y PHEV, son ligeramente más costosos que los VE, ya que requieren de un motor de combustión interna. Además, las baterías de los PHEV más costosas que las baterías en VE, pues necesitan tener la misma capacidad de almacenamiento, pero en un menor tamaño. Para los costos de combustibles, está claro que los vehículos eléctricos presentan una ventaja frente a los HEV y PHEV, pues estos requieren combustibles fósiles. El costo de la energía eléctrica es mucho menor al costo de gasolinas y diesel.

Por lo expuesto anteriormente, es posible seleccionar y definir al vehículo eléctrico como el más adecuado para uso en Lima Metropolitana.

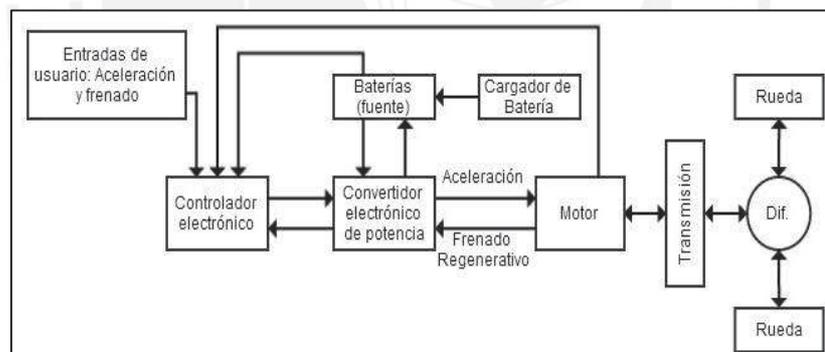


Figura 3.1 Diagrama de bloque, vehículo eléctrico [1]

Para la determinación de las características técnicas de los componentes, se realizan cálculos en base de un vehículo eléctrico de tracción posterior.

3.2. Sistema de Propulsión - Máquina eléctrica

En el capítulo 1.5.1.2 se dieron a conocer las máquinas eléctricas más usadas para dar propulsión a los vehículos eléctricos. Para determinar que máquina eléctrica es la mejor opción, es necesario considerar que dicha máquina debe tener alta densidad de potencia. Para esta tesis, se decide utilizar un motor sin escobillas de imanes permanentes, por su alta densidad de potencia y además por ser motores de fácil control electrónico.

3.2.1. Requerimientos

El ME y la transmisión deben de proporcionar el torque necesario para propulsar el vehículo en todo momento. Del capítulo 2.3, se detallan ciertas situaciones críticas de manejo y requerimientos:

- Vehículo estacionado en sótano: Pendiente 15% máx. Velocidad = 0 km/h
- Vehículo en movimiento, av. Raúl Ferrero en Cerro Centinela: Pendiente 18.5% máx. Velocidad 60 km/h.
- Vehículo en movimiento, av. Armendáriz en Costa Verde: Pendiente 8.5% máx. Velocidad 60 km/h.
- Vehículo en movimiento, Vía Expresa de Javier Prado y Vía Expresa de Paseo de la República: Pendiente 5% máx. Velocidad 80 km/h.
- Vehículo en movimiento, autopista: Pendiente 4.5% máx. Velocidad 100 km/h.
- Carga útil mínima: 183 kg

3.2.2. Par torsor o torque de tracción

El par torsor o torque, es la oposición que el sistema ejerce sobre el vehículo. Con los requerimientos mostrados anteriormente se puede determinar el par necesario para diferentes situaciones críticas de manejo.

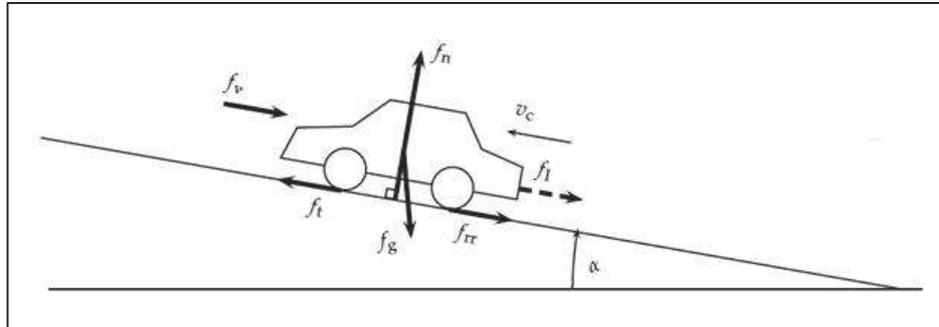


Figura 3.2 DCL del vehículo en pendiente [2]

Del DCL anterior se obtiene la ecuación [3]:

$$f_t = f_l + f_g * \text{sen}(\alpha) + f_{rr} + f_v \quad (3.1)$$

$$f_t = (M_c * \dot{v}_c) + [M_c * g * \text{sen}(\alpha)] + (f_n * c_{rr}) + \left[\frac{1}{2} * \rho_{\text{aire}} * C_{\text{aero}} * A_f * (v_c + v_v)^2 \right]$$

$$f_t = (M_c * \dot{v}_c) + [M_c * g * \text{sen}(\alpha)] + [M_c * g * \text{cos}(\alpha) * c_{rr}] + \left[\frac{1}{2} * \rho_{\text{aire}} * C_{\text{aero}} * A_f * (v_c + v_v)^2 \right]$$

Dónde:

- f_t [N] : Fuerza de tracción del vehículo
- f_l [N] : Fuerza inercial del vehículo
- f_{rr} [N] : Fuerza de resistencia a la rodadura de las ruedas
- f_g [N] : Fuerza gravitacional del vehículo
- f_n [N] : Fuerza normal del vehículo
- f_v [N] : Fuerza generada por la resistencia del viento
- α [rad] : Ángulo de la superficie de manejo

M_c [kg] : Masa del vehículo

v_c [m/s] : Velocidad del vehículo

\dot{v}_c [m/s²] : Aceleración del vehículo

g [m/s²] : Gravedad ; $g = 9.81$

ρ_{aire} [kg/m³] : Densidad del aire a 20°C ; $\rho_{aire} = 1.2041$

c_{rr} [-] : Coeficiente de resistencia a la rodadura

C_{aero} [-] : Coeficiente aerodinámico

A_f [m²] : Área frontal del vehículo

v_v [m/s] : Velocidad del viento

$$c_{rr} = 0.01 * \left(1 + \frac{3.6}{100} * v_c \right)$$

Luego de obtener la fuerza de tracción necesaria, es necesario obtener el par de tracción, el cual se calcula utilizando la ecuación [4]:

$$\tau_t = f_t * r_r \quad (3.2)$$

Dónde:

τ_t [Nm] : Torque de tracción

f_t [N] : Fuerza de tracción

r_r [m] : Radio de la rueda

Para realizar los cálculos de fuerza de tracción y par de tracción del vehículo, se toma como referencia el vehículo eléctrico Nissan Leaf 2010 [5].

M_c [kg] : 1525

C_{aero} [-] : 0.29

$$A_f \quad [m^2] : \quad 2.27$$

$$r_{rueda} \quad [m] : \quad 0.315$$

El valor de M_c a utilizar en la ecuación 3.1, es la masa del vehículo Nissan Leaf más la carga útil mínima, entonces $m_c = 1708 \text{ kg}$.

Durante el levantamiento de datos de la ruta tipificada A1, se observó que la velocidad máxima alcanzada era de 40 km/h. Para determinar la aceleración del vehículo, que realizaron pruebas cronometradas para llegar a la velocidad de 40 km/h. Estas pruebas se realizaron durante el día en condiciones de tráfico. El tiempo promedio para alcanzar la velocidad de 40 km/h es de 18 segundos. Con los datos de velocidad y tiempo es posible determinar la aceleración que debe tener el vehículo, utilizando la ecuación:

$$V_f = V_o + a * t \quad (3.3)$$

Dónde:

$$V_f \quad [m/s] : \quad \text{Velocidad final del vehículo ; } V_f = 11.11$$

$$V_o \quad [m/s] : \quad \text{Velocidad inicial del vehículo; } V_o = 0$$

$$a \quad [m/s^2] : \quad \text{Aceleración del vehículo}$$

$$t \quad [s] : \quad \text{Tiempo transcurrido de } V_o \text{ hasta } V_f ; t = 18$$

Al desarrollar la ecuación 3.3, se obtiene la aceleración del vehículo:

$$a = 0.61 \text{ m/s}^2$$

La velocidad del viento se obtiene del siguiente gráfico:

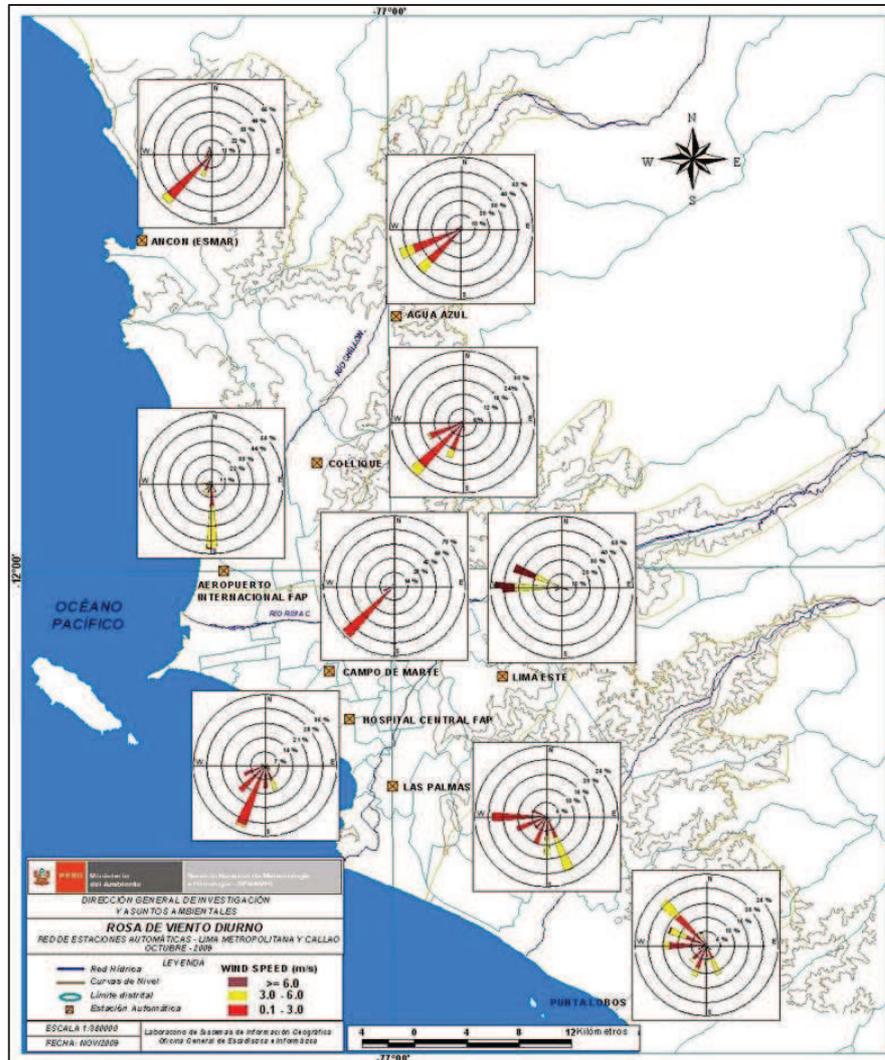


Figura 3.3 Rosa de viento diurno [6]

La velocidad promedio del viento, la cual es de $V_p = 3 \text{ m/s}$ para el horario diurno.

Se muestra una tabla con las respectivas variables y situaciones críticas definidas anteriormente, para resolver la ecuación 3.1 y ecuación 3.2. Además se incluye en la tabla el resultado de operar dichas ecuaciones; es decir, el torque de tracción necesario para propulsar al vehículo.

Tabla 3.2 Torque de tracción, situaciones críticas [Elaboración propia]

Variable \ Situación	Estacionado; sótano	Movimiento; Av. Raúl Ferrero, Cerro Centinela	Movimiento; Av. Armendáriz, Costa Verde	Movimiento; Vía Expresa, Javier Prado y Paseo de la República	Movimiento; autopista
M_c [kg]	1708				
g [m/s^2]	9.81				
ρ_{aire} [kg/m^3]	1.2041				
C_{aero} [-]	0.29				
A_f [m^2]	2.27				
r_{rueda} [m]	0.315				
v_v [m/s]	3				
a [m/s^2]	0.6	<i>Se considera velocidad constante del vehículo: $a = 0$</i>			
v_c [m/s]	0	16.67	16.67	22.22	27.78
α [rad]	0.148	0.174	0.083	0.05	0.045
c_{rr} [-]	0.01	0.016	0.016	0.018	0.02
τ_t [Nm]	1157.58	1047.80	573.68	438.01	461.15

3.2.3. Pre-selección del motor eléctrico

No es posible seleccionar el ME sin definir la transmisión, ya que el ME va acoplado a la transmisión y esta es la encargada de entregar el torque del motor a las ruedas. Es posible hacer una pre-selección del motor, en base a la potencia de motores eléctricos usados en vehículos eléctricos en el actual parque automotor. La potencia del motor eléctrico del Mitsubishi i-Miev es de 49 kW, la potencia del motor eléctrico del Nissan Leaf

es de 80 kW, la potencia del motor eléctrico del Renault Fluence Z.E. es de 70 kW, la potencia del motor eléctrico del BMW i3 es de 125 kW [7]. Para la pre-selección del motor eléctrico, se opta por tres opciones; un motor eléctrico sin escobillas de imanes permanentes de 50 kW, 75 kW y 100 kW. Véase anexo 1, anexo 2, anexo 3.

Tabla 3.3 Especificaciones de motores eléctricos, elaboración propia [8]

Motor Desempeño	PowerPhase Select 50	PowerPhase Select 75	PowerPhase Pro 100
Potencia máxima	50 kW 67 HP	75 kW 100 HP	100 kW 134 HP
Potencia continua [kW]	30 kW 40 HP	45 kW 60 HP	60 kW 80 HP
Torque máximo [Nm]	440	240	300
Torque continuo [Nm]	180	150	160
Revoluciones de torque máximo [rpm]	0 – 1000	0 - 3000	0 - 3000
Revoluciones máx. [rpm]	6500	8000	8000
Eficiencia máx.	93%	93%	95%
Densidad de potencia [kW/kg]	1.22	1.83	2

3.3. Sistema de Transmisión

Los motores eléctricos mencionados anteriormente, cuentan con un controlador y un inversor los cuales sirven para variar la velocidad y torque del motor eléctrico. Actualmente los vehículos eléctricos tienen dos tipos u opciones para el sistema de transmisión. La primera opción incluye una transmisión y un diferencial. La segunda opción incluye únicamente un diferencial.

3.3.1. Primera opción - CVT y Diferencial

En esta opción, el motor eléctrico es acoplado a la transmisión continuamente variable (CVT), esta es acoplada al diferencial y finalmente el diferencial transmite el torque a las ruedas de tracción. El diferencial cuenta con una relación de transmisión final, la cual es fija. Para obtener las velocidades y torques requeridos por el usuario, la CVT debe variar los diámetros de las poleas y así obtener las diferentes relaciones de transmisión para satisfacer los requerimientos, véase 1.5.3.3.

Para obtener el rango de relaciones de transmisión de la CVT, se asume un valor de relación de transmisión final del diferencial de 3.08 y además se considera que el motor eléctrico proporciona torque constante o continuo. Se asume ese valor ya que es un valor usual en relaciones de transmisión de diferenciales.

3.3.1.1. Rel. Transmisión CVT y Potencia del ME para condiciones críticas

Se asume un valor de relación de transmisión final del diferencial:

$$i_d \quad [-] : \quad \text{Relación de transmisión del diferencial, } i_d = 3.08$$

Además, se considera que el motor trabaja a torque de salida continuo $\tau_m = 150 \text{ Nm}$.

Es posible determinar las relaciones de transmisión de la CVT para cada situación crítica, la velocidad del motor eléctrico en rpm y la potencia del mismo, con las siguientes ecuaciones [9]:

$$\tau_m = \frac{\tau_t}{n_{TS} * G} \quad (3.4)$$

$$G = i_d * i_{cvt} \quad (3.5)$$

$$w_{rueda} = \frac{v_c}{r_{rueda}} \quad (3.6)$$

$$w_m = G * w_{rueda} \quad (3.7)$$

$$Vel_m = w_m * \frac{30}{\pi} \quad (3.8)$$

$$P_m = w_m * \tau_m \quad (3.9)$$

Dónde:

τ_m	[Nm] :	<i>Torque de salida del motor eléctrico</i>
τ_t	[Nm] :	<i>Torque de tracción</i>
n_{TS}	[%] :	<i>Eficiencia del sistema de transmisión</i>
G	[-] :	<i>Relacion de transmisión del sistema de transmisión</i>
i_d	[-] :	<i>Relacion de transmisión final del diferencial</i>
i_{cvt}	[-] :	<i>Relacion de transmisión de la CVT</i>
w_{rueda}	[rad/s] :	<i>Velocidad angular de la rueda</i>
w_m	[rad/s] :	<i>Velocidad angular del motor eléctrico</i>
Vel_m	[RPM] :	<i>Velocidad del motor eléctrico</i>
P_m	[kW] :	<i>Potencia del motor eléctrico</i>

La eficiencia del sistema de transmisión puede asumirse como 95% [10].

Resolviendo las ecuaciones 3.4 a 3.9 con los valores de torque de tracción para situaciones críticas de la tabla 3.2, véase 3.2.2, se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 3.4 Rel. Transmisión CVT y Potencia ME, situaciones críticas [Elaboración propia]

Variable \ Situación	Estacionado; sótano	Movimiento; Av. Raúl Ferrero, Cerro Centinela	Movimiento; Av. Armendáriz, Costa Verde	Movimiento; Vía Expresa, Javier Prado y Paseo de la República	Movimiento; Autopista
i_d [-]	3.08				
n_{TS} [%]	95				
τ_m [Nm]	150				
τ_t [Nm]	1157.58	1047.8	573.68	438.01	461.15
Vel_m [RPM]	246.30	3715.2	2034.5	2070.7	2725.1
i_{cvt} [-]	2.64	2.38	1.30	0.99	1.05
P_m [kW]	3.87	58.36	31.96	32.53	42.81

De los resultados de la tabla anterior se observa que la potencia máxima, para las condiciones críticas definidas en el capítulo 3.2.1, es de 58.36 kW. Con lo cual se puede descartar el motor PowerPhase Select 50, que brinda una potencia máxima de 50 kW. El motor PowerPhase Pro 100 brinda más potencia de la necesaria, por lo cual si se selecciona dicho motor, se considera un sobredimensionamiento del vehículo eléctrico. Se opta por seleccionar el PowerPhase Select 75, ya que se ajusta más a la potencia requerida.

3.3.1.2. Rel. Transmisión CVT y Potencia del ME para condiciones de manejo en Lima Metropolitana

Del capítulo 2.2.1.1, se obtienen los parámetros característicos de conducción en Lima Metropolitana en horas de la mañana, en situaciones de tráfico pesado (ruta tipificada A1), para un ciclo de manejo de 15 minutos:

- Recorrido promedio 3.74 kilómetros
- Tiempo promedio de recorrido: 9.28 minutos = 556.8 segundos

- Velocidad promedio: 15.065 km/h = 4.18 m/s
- Paradas realizadas: 8
- Tiempo promedio total de paradas: 5.72 minutos = 343.2 segundos

Además, durante las pruebas realizadas en la ruta tipificada se observó que la velocidad máxima alcanzada era de 40 km/h.

Con esta información es posible graficar el ciclo de conducción en Lima Metropolitana, para condiciones de tráfico pesado durante las mañanas. Para realizar dicho gráfico, se asume que cada parada del vehículo tiene el mismo tiempo y que por cada avance del vehículo se recorre la misma distancia y se realiza en el mismo tiempo. En una situación real de manejo estas asunciones son poco probables de darse, pero para el caso de estudio es posible realizar las asunciones mencionadas anteriormente.

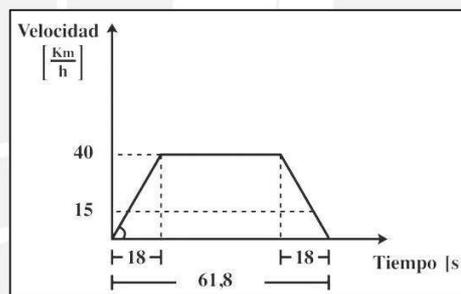


Figura 3.4 Intervalo Velocidad vs. Tiempo, ciclo de conducción en L.M [Elaboración propia]

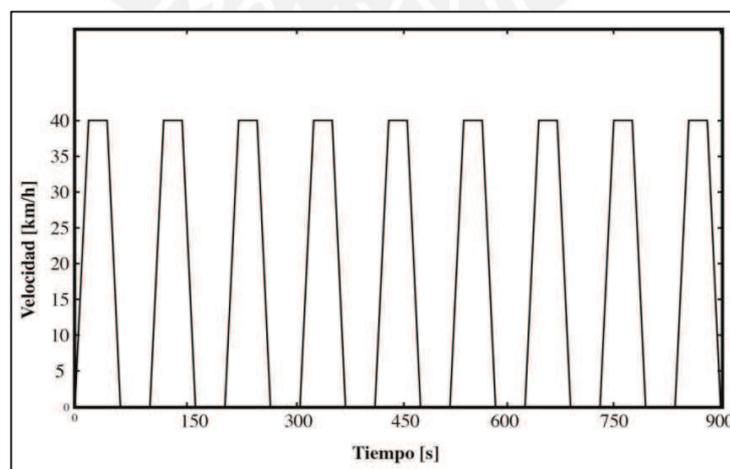


Figura 3.5 Velocidad vs. Tiempo, ciclo de conducción en L.M [Elaboración propia]

Para determinar las relaciones de transmisión de la CVT, la velocidad del ME en rpm y la potencia del motor eléctrico para las condiciones de manejo en Lima Metropolitana, primero es necesario determinar el torque de tracción requerido. Para los cálculos se considera que el vehículo transita en una pendiente máxima de 5%, ya que al realizar las pruebas para la ruta tipificada A1, no se recorrió por calles ni avenidas de gran pendiente. Se utilizan las ecuaciones 3.1 y 3.2, véase 3.2.2, para determinar el torque de tracción requerido. Se muestran los resultados.

Tabla 3.5 Torque de tracción, ciclo de conducción en L.M [Elaboración propia]

Variable \ Situación	Arranque	Vel. Promedio y aumentando	Vel. Máxima, constante
M_c [kg]	1708		
g [m/s^2]	9.81		
ρ_{aire} [kg/m^3]	1.2041		
C_{aero} [-]	0.29		
A_f [m^2]	2.27		
r_{rueda} [m]	0.315		
v_v [m/s]	3		
a [m/s^2]	0.6	0.6	0
v_c [m/s]	0	4.18	11.11
α [rad]	5% 2.86°	5% 2.86°	5% 2.86°
c_{rr} [-]	0.01	0.011	0.014
τ_t [Nm]	644.58	651.01	362.44

Luego de obtener el torque de tracción requerido, se utilizan las ecuaciones 3.4 a 3.9, véase 3.3.1.1, para obtener las relaciones de transmisión de la CVT, velocidad del motor eléctrico en rpm y la potencia del motor eléctrico. Se muestran los resultados.

Tabla 3.6 Rel. Transmisión CVT y Potencia ME, ciclo de conducción en Lima Metropolitana
[Elaboración propia]

Variable \ Situación	Arranque	Vel. Promedio y aumentando	Vel. Máxima, constante
i_d [-]	3.08		
n_{TS} [%]	95		
τ_m [Nm]	150		
τ_t [Nm]	644.58	651.01	362.44
Vel_m [RPM]	137.1	578.9	856.6
i_{cvt} [-]	1.47	1.48	0.83
P_m [kW]	2.15	9.09	13.46

Se muestra la curva de torque [Nm] versus velocidad [rpm/10] del motor eléctrico seleccionado, PowerPhase Select 75, en la cual se incluye la curva de torque del manejo en Lima Metropolitana para las condiciones de tráfico pesado durante las mañanas.

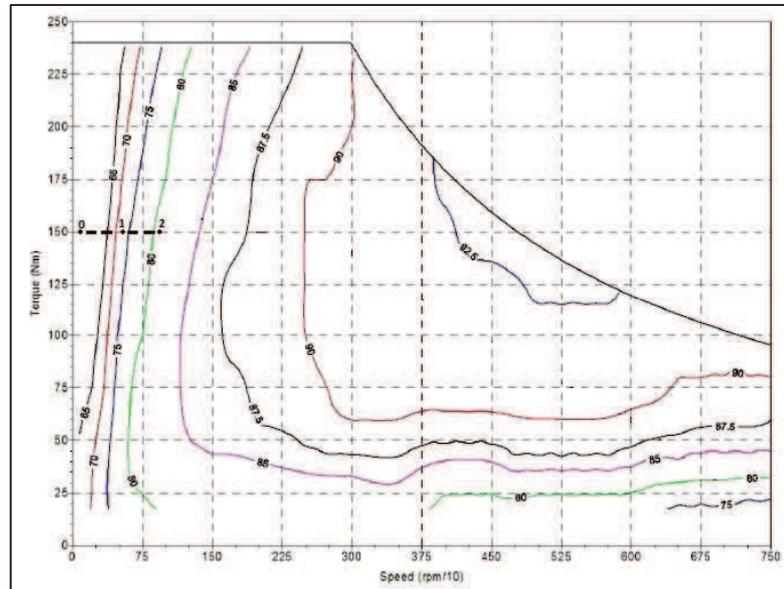


Figura 3.6 Torque [Nm] vs. Velocidad [rpm/10] - primera opción, figura modificada [11]

El punto 0 en la gráfica indica los parámetros de torque y velocidad, para salida o arranque del vehículo. En el punto 1 el vehículo se encuentra en aceleración a velocidad de 15 km/h, hasta alcanzar la velocidad constante de 40 km/h, punto 2. La curva 0-1-2 representa el ciclo de manejo en Lima Metropolitana para las condiciones de tráfico pesado durante las mañanas. La curva es lineal constante, ya que el torque del motor eléctrico es continuo. En este caso, el motor eléctrico es acoplado a una CVT, y esta es acoplada a un diferencial que transmite el torque a las ruedas.

3.3.2. Segunda opción - Diferencial

La segunda opción para el sistema de transmisión, consiste únicamente en un diferencial. Es decir, el motor eléctrico se acopla al diferencial y este transmite el torque a las ruedas. Al no contar con una CVT, la relación de transmisión final de este diferencial es más alta que en la primera opción de sistema de transmisión.

3.3.2.1. Torque y Potencia del ME para condiciones críticas

Para esta opción de sistema de transmisión, en la ecuación 3.4, véase 3.3.1.1, se denomina G a la relación de transmisión final del diferencial, y de referencia del Nissan

Leaf tiene un valor de 7.94. Se toma como referencia el Nissan Leaf, ya que este vehículo eléctrico no cuenta con una transmisión, es un vehículo de una sola marcha o cambio.

Resolviendo las ecuaciones 3.4, 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9, con los valores de torque de tracción para situaciones críticas de la tabla 3.2, véase 3.2.2, y con la relación de transmisión final del diferencial, se obtienen los siguientes resultados.

Tabla 3.7 Torque y Potencia ME, situaciones críticas [Elaboración propia]

Variable \ Situación	Estacionado; sótano	Movimiento; Av. Raúl Ferrero, Cerro Centinela	Movimiento; Av. Armendáriz, Costa Verde	Movimiento; Vía Expresa, Javier Prado y Paseo de la República	Movimiento; Autopista
G [-]	7.94				
n_{TS} [%]	95				
τ_t [Nm]	1157.58	1047.8	573.68	438.01	461.15
Vel_m [RPM]	240.70	4011.80	4012.52	5348.90	6686.25
τ_m [Nm]	153.49	138.91	76.05	58.07	61.14
P_m [kW]	3.87	58.36	31.96	32.53	42.81

Como se ve en los resultados, el motor PowerPhase Select 50 no cumple con los requerimientos de potencia, ya que la potencia máxima de este motor es de 50 kW. El motor PowerPhase Pro 100, entrega una potencia máxima de 100 kW, la cual es mucho más alta que la potencia requerida. Por estos motivos se selecciona el motor PowerPhase Select 75.

3.3.2.2. Torque y Potencia del ME para condiciones de manejo en Lima Metropolitana

Con los valores de torque de tracción requerido de la tabla 3.5, véase 3.3.1.2, y las ecuaciones 3.4, 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9, se obtiene el torque y potencia del motor eléctrico. Se muestran los resultados.

Tabla 3.8 Torque y Potencia ME, ciclo de conducción en L.M [Elaboración propia]

Variable \ Situación	Arranque	Vel. Promedio y aumentando	Vel. Máxima, constante
G [-]	7.94		
n_{TS} [%]	95		
τ_t [Nm]	644.58	651.01	362.44
Vel_m [RPM]	240.70	1006.14	2674.21
τ_m [Nm]	85.45	86.31	48.05
P_m [kW]	2.15	9.09	13.46

Se muestra la curva de torque [Nm] versus velocidad [rpm/10] del motor eléctrico seleccionado, PowerPhase Select 75, en la cual se incluye la curva de torque del manejo en Lima Metropolitana para las condiciones de tráfico pesado durante las mañanas.

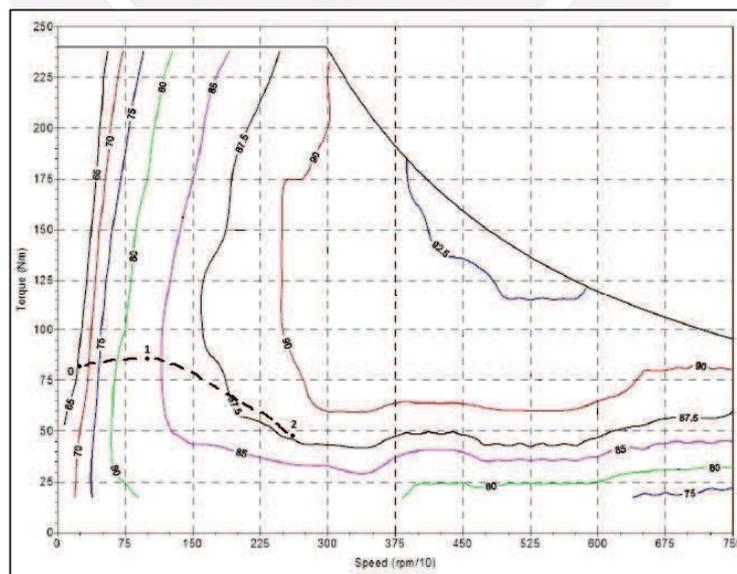


Figura 3.7 Torque [Nm] vs. Velocidad [rpm/10] - segunda opción, figura modificada [12]

El punto 0 en la gráfica indica el torque necesario para dar movimiento al vehículo estacionado, en el punto 1 el vehículo se encuentra en aceleración a velocidad de 15 km/h, hasta alcanzar la velocidad constante de 40 km/h, punto 2. La curva 0-1-2 representa el ciclo de manejo en Lima Metropolitana para las condiciones de tráfico pesado durante las mañanas. La curva es cuadrática, ya que presenta variación de torque y velocidad del motor eléctrico, en este caso no se utiliza transmisión, solo un diferencial. Para las especificaciones del motor eléctrico véase anexo 2.



Figura 3.8 Motor Eléctrico PowerPhase Select 75 [13]

3.3.3. Elección de sistema de transmisión

Para el sistema de transmisión se opta por la segunda opción, en la cual solo se considera al diferencial. Como se mencionó anteriormente, el motor eléctrico cuenta con un inversor y un controlador los cuales varían la velocidad y torque según se requiera; por ende, solo es necesario una relación de transmisión final, la cual se da en el diferencial. Optar por la primera opción, en la cual se incluye una CVT y un diferencial no es una decisión muy conveniente; ya que requiere una mayor inversión al incluir una CVT y además no se aprovecha en su totalidad la función del controlador del ME.

El sistema de transmisión, en este caso diferencial, debe contar con una reducción final de 7.94.

3.4. Inversor DC/AC

El motor eléctrico seleccionado, incluye un controlador y también un inversor DC/AC. Por lo tanto, en este sub capítulo se realiza el cálculo de las pérdidas del inversor, pero no la selección del mismo.

3.4.1. Pérdidas en el inversor DC/AC

Para determinar las pérdidas máximas en el inversor se utilizan las ecuaciones 3.10 y 3.11 [14].

$$P_{ME,m\acute{a}x} = \frac{P_{m,m\acute{a}x}}{n_{ME}} \quad (3.10)$$

$$P_{Inv,m\acute{a}x} = \frac{1 - n_{Inv}}{n_{Inv}} * P_{ME,m\acute{a}x} \quad (3.11)$$

Dónde:

$P_{m,m\acute{a}x}$ [W] : *Potencia máxima de salida del motor eléctrico*

$P_{ME,m\acute{a}x}$ [W] : *Potencia máxima de entrada del motor eléctrico*

n_{ME} [%] : *Eficiencia del motor eléctrico*

n_{Inv} [%] : *Eficiencia del inversor*

$P_{Inv,m\acute{a}x}$ [W] : *Pérdidas máximas del inversor*

De las especificaciones técnicas del motor eléctrico PowerPhase Select 75 de la tabla 3.3, véase 3.2.3, se tiene que la potencia máxima de salida del motor es 75 kW y que la eficiencia es 94%. La eficiencia del inversor se asume igual a 98% [15]. Con los valores mencionados se obtiene las pérdidas máximas del inversor.

$$P_{Inv,m\acute{a}x} = 1645.71 \text{ Watts}$$

3.5. Sistema de almacenamiento – Baterías

Las baterías son las encargadas de suministrar la energía requerida por el motor eléctrico para que este pueda propulsar al vehículo. Además, las baterías deben suministrar la energía necesaria para las cargas auxiliares; es decir, luces, radio y HVAC (aire acondicionado, ventilación y calefacción)

Cargas auxiliares.- Para las cargas auxiliares se considera una potencia promedio de 857 W [16]. Se muestra la distribución de la potencia promedio.

- Luces: 52 W
- Radio: 489 W
- HVAC: 316 W

Potencia standby del inversor: El inversor del motor eléctrico, consume potencia cuando se encuentra en estado “en espera”, lo cual se da en situaciones del vehículo en parada; es decir, cuando no está en movimiento. Dicha potencia es de 17 W [17].

3.5.1. Capacidad de almacenamiento para 1 ciclo de conducción

La capacidad de almacenamiento de energía de las baterías está dada por:

$$E_{bat,1} = (E_{motor,real} + E_{inv} + E_{aux}) * \left(\frac{1}{DoD}\right) \quad (3.12)$$

Dónde:

$E_{bat,1}$	[kW – h] :	Capacidad de las baterías para 1 ciclo de conducción
$E_{motor,real}$	[kW – h] :	Energía consumida por el ME en 1 ciclo de conducción
E_{inv}	[kW – h] :	Energía consumida por el inversor en 1 ciclo de conducción
E_{aux}	[kW – h] :	Energía consumida por los equipos aux. en 1 ciclo de conducción
DoD	[%] :	Depth of discharge (Profundidad de descarga)

Para asegurar un largo ciclo de vida de las baterías, se recomienda que el SoC (state-of-charge o estado de carga) no sea menor de 20%. Lo que significa que el DoD no debe ser mayor de 80%; es decir, solo se recomienda utilizar el 80% de la capacidad de las baterías.

En la tabla 3.8, véase 3.3.2.2, se tiene la potencia necesaria para las condiciones de conducción en Lima Metropolitana, en horas de la mañana y en condiciones de tráfico pesado. Además, la figura 3.5, véase 3.3.1.2, representa el ciclo de conducción en Lima Metropolitana, para las condiciones mencionadas anteriormente. Con la información de potencia necesaria y ciclo de conducción, es posible determinar la energía necesaria que

debe suministrar las baterías. Se muestra el gráfico de potencia para el ciclo de conducción en Lima Metropolitana.

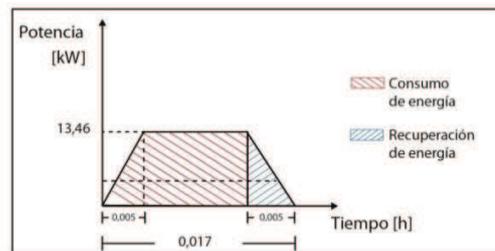


Figura 3.9 Intervalo Potencia vs. Tiempo, ciclo de conducción en L. M [Elaboración propia]

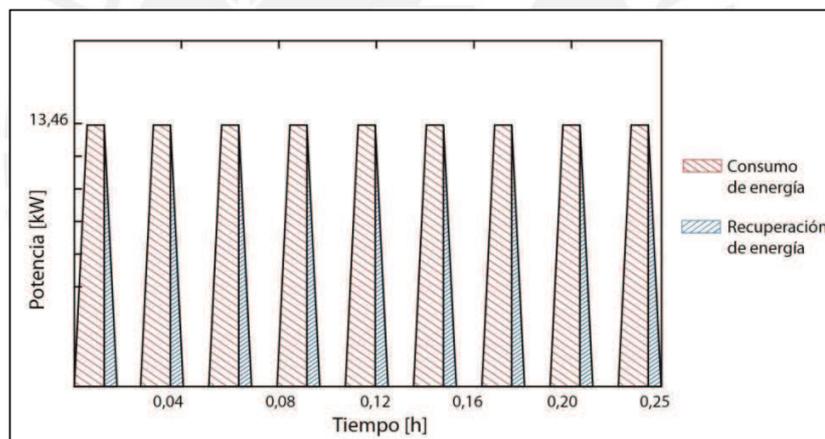


Figura 3.10 Potencia vs. Tiempo, ciclo de conducción en L.M [Elaboración propia]

De la figura 3.10, se puede calcular la energía requerida por el motor eléctrico para un ciclo de conducción de 15 minutos, en horas 0.25. La energía requerida es el área bajo la curva. El motor suministra la potencia desde el arranque y va en aumento hasta obtener la potencia constante para una velocidad de 40 km/h. La entrega de potencia transcurre en un lapso de 43.8 segundos; en los primeros 18 segundos, conversión en horas 0.005, el motor varía la potencia hasta alcanzar la velocidad máxima de 40 km/h; luego del transcurso de 0.005 horas, el motor suministra potencia constante por 25.8 segundos, conversión a horas 0.0071. Por geometría es posible determinar el área bajo la curva.

$$E_{motor} = \left\{ \left[\left(\frac{18 \text{ seg} \times 13.46 \text{ kW}}{2} \right) + (25.8 \text{ seg} \times 13.46 \text{ kW}) \right] * 9 \right\} * \left(\frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ seg}} \right) \quad (3.13)$$

$$E_{motor} = 1.1710 \text{ kW} - h$$

Los vehículos eléctricos que se comercializan actualmente, cuentan con el sistema KERS (*kinetic energy recovery system*), dicho sistema se conoce como frenado regenerativo. Para obtener la energía consumida real por el motor, es necesario determinar la energía recuperada por el frenado regenerativo. Se sabe que un vehículo eléctrico que cuenta con sistema de frenado regenerativo, aumenta su capacidad de recorrido en un 15% [18]. Dicho valor sirve para determinar la energía recuperada por ciclo de conducción.

$$E_{Recuperada} = 1.1710 * \left(\frac{15}{100} \right) \quad (3.14)$$

$$E_{Recuperada} = 0.1756 \text{ kW} - h$$

Entonces, la energía consumida real del motor eléctrico es la diferencia de la energía consumida por el motor y la energía recuperada.

$$E_{motor,real} = E_{motor} - E_{Recuperada} \quad (3.15)$$

$$E_{motor,real} = 0.9954 \text{ kW} - h$$

Para determinar la energía consumida por el inversor, es necesario multiplicar la potencia del inversor en standby por el tiempo de parada del vehículo:

$$E_{inv} = [(17 \text{ W} * 42.8 \text{ seg}) * 8] * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ seg}} * \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}} \quad (3.16)$$

$$E_{inv} = 0.0016 \text{ kW} - h$$

Por último, es necesario determinar el consumo de energía de las cargas adicionales. Para determinar dicho consumo, se considera que todos los equipos están en operación durante el manejo. Se realiza esta asunción, ya que representa el caso crítico durante un ciclo de manejo.

$$E_{aux} = (857 \text{ W} * 900 \text{ seg}) * \frac{1 \text{ h}}{3600 \text{ seg}} * \frac{1 \text{ kW}}{1000 \text{ W}} \quad (3.17)$$

$$E_{aux} = 0.2142 \text{ kW} - h$$

Desarrollando la ecuación 3.12, con los resultados de las ecuaciones 3.15, 3.16 y 3.17, se obtiene la capacidad de almacenamiento de las baterías para los requerimientos de 1 ciclo de manejo en Lima Metropolitana, en las condiciones de tráfico pesado en horas de la mañana.

$$E_{bat,1} = 1.514 \text{ kW} - h$$

3.5.2. Capacidad de almacenamiento total

El vehículo eléctrico debe tener una autonomía de 50 km; es decir, recorrer 50 km antes de cargar las baterías nuevamente. Para el ciclo de conducción de Lima Metropolitana, se recorre 3.74 km en un tiempo total de 15 minutos, considerando el tiempo que el vehículo se encuentra detenido y el tiempo en el que el vehículo se encuentra en movimiento. Para desempeñar la autonomía de 50 km, son necesarios 13.36 ciclos de conducción. No es posible fraccionar el ciclo de conducción, por lo tanto se realizan 14 ciclos de conducción, obteniendo una autonomía de 52.36 km. La capacidad de almacenamiento total se obtiene de:

$$E_{bat,total} = E_{bat,1} * N \quad (3.18)$$

Dónde:

$E_{bat,total}$ [kW - h] : Capacidad de las baterías para 14 ciclos de conducción

$E_{bat,1}$ [kW - h] : Capacidad de las baterías para 1 ciclo de conducción

Desarrollando la ecuación 3.18, para N = 14, se tiene:

$$E_{bat,total} = 21.2 \text{ kW} - h$$

La capacidad total de las baterías permite recorrer 52.36 km en un tiempo total de 3 horas y 30 minutos, bajo las condiciones de tráfico pesado en las mañanas en Lima Metropolitana.

3.5.3. Parámetros de selección de Baterías

De los resultados anteriores, se tiene que la capacidad de almacenamiento necesario de las baterías es 21.2 kW-h, para una autonomía de 52.36 km en condiciones de tráfico pesado durante horas de la mañana en Lima Metropolitana. La energía requerida por el motor eléctrico para recorrer 52.36 km es 13.92 kW-h.

Se muestran dos alternativas de sistema de almacenamiento, ambos sistemas tienen características similares a las requeridas para este caso de estudio.

- Energy Core Pack (23 kW-h): Voltaje nominal 393 Voltios, capacidad de almacenamiento 23 kW-h. Fabricada por la empresa A123SYSTEMS [19].
- Energy system 16 X EM12: Voltaje nominal 346 Voltios, capacidad de almacenamiento 28.4 kW-h. Fabricada por la empresa JOHNSON CONTROLS [20].

Se opta por seleccionar el sistema de almacenamiento de 23 kW-h, ya que este sistema tiene una capacidad similar a la requerida, 21.2 kW-h. Al tener un pack de baterías de 23 kW-h, la autonomía del vehículo va a ser mayor a la calculada. Por lo tanto, se calcula la autonomía real del vehículo, usando la ecuación 3.18, se tiene el número de ciclos de manejo:

$$N = 15.66$$

Se sabe que en cada ciclo de conducción se recorre 3.74 km, en 15 minutos. Por lo tanto la autonomía real del vehículo es 58.56 km. Cabe resaltar que dicha autonomía se da para situaciones de tráfico pesado en horas de la mañana, en un ciclo de conducción de Lima Metropolitana. El tiempo total que puede recorrer el vehículo, bajo las condiciones mencionadas es 3 horas y 55 minutos.

Por último, la autonomía y tiempo de recorrido son calculadas utilizando el 80% de carga del sistema de almacenamiento. Luego de recorrer los 58.56 km, las baterías están cargadas al 20%; es decir, tienen almacenadas 4.6 kW-h. Se realiza el cálculo al 80% de la capacidad total, ya que por recomendación de fabricantes, utilizar el 100% de la capacidad disminuye el tiempo de vida de las baterías.



Figura 3.11 Pack de Baterías, marca A123SYSTEMS [21]

3.5.4. Tiempo de recarga de baterías

El tiempo de carga de las baterías depende de la potencia de la red eléctrica.

Consideraciones para calcular el tiempo de recarga, en base a potencia contratada de 5 kW:

- Potencia contratada: 5 kW
- Uso de otros artefactos: 2 kW

Se tienen las siguientes ecuaciones:

$$P_d = P_c - P_u \quad (3.19)$$

$$t = \frac{E_{bat,total}}{P_d} \quad (3.20)$$

Dónde:

P_c [kW] : Potencia contratada

P_u [kW] : Potencia utilizada

P_d [kW] : Potencia disponible

t [h] : Tiempo de recarga

Resolviendo las ecuaciones 3.19 y 3.20, se tiene que el tiempo de carga para el 100% de la capacidad de baterías es 7.67 horas. Si se sigue la recomendación de fabricantes, solo usar el 80% de la capacidad de las baterías, estas se cargan en 6.13 horas.

Los enchufes, tomas de corriente, conectores, cables, accesorios de carga en general; están normados según la IEC (Comisión Electrotécnica Internacional) bajo el código IEC 62196-1 [22]. Norma que aplica para conexiones que no excedan: 250 amperios de corriente, 650 Voltios en A.C y frecuencia entre 50 – 60 Hz.

3.6. Rectificador

El rectificador es el encargado de rectificar el voltaje y corriente de la red eléctrica a niveles de corriente continua, para luego transmitir dicho voltaje y corriente al convertidor.

3.6.1. Resistencia del rectificador

Para calcular la resistencia de encendido del rectificador, se utilizan las ecuaciones 3.21 a 3.25 [23].

$$P_{red,m\acute{a}x} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} * V_{LL} * I_{red,m\acute{a}x} \quad (3.21)$$

$$I_{RF,m\acute{a}x} = \sqrt{\frac{3}{2}} * I_{red,m\acute{a}x} \quad (3.22)$$

$$V_{RF,m\acute{a}x} = \frac{3\sqrt{2}}{\pi} * V_{LL} \quad (3.23)$$

$$P_{RF,m\acute{a}x} = n_{RF} * P_{red,m\acute{a}x} \quad (3.24)$$

$$R_{RF} = \frac{P_{red,m\acute{a}x} (1 - n_{RF}) - 2 * V_{th,RF} * I_{RF,m\acute{a}x}}{2 * I_{RF,m\acute{a}x}^2} \quad (3.25)$$

Dónde:

$I_{red,m\acute{a}x}$ [A] : Corriente máxima RMS de red eléctrica

V_{LL} [V] : Tensión de red eléctrica

$P_{red,m\acute{a}x}$ [W] : Potencia máxima de red eléctrica

$I_{RF,máx}$	[A] :	<i>Corriente máxima rectificada</i>
$V_{RF,máx}$	[V] :	<i>Tensión máxima rectificada</i>
$P_{RF,máx}$	[W] :	<i>Potencia máxima rectificada</i>
$V_{th,RF}$	[V] :	<i>Tensión de umbral</i>
R_{RF}	[m Ω] :	<i>Resistencia del interruptor y diodo</i>

La corriente máxima RMS de la red eléctrica y el voltaje de red eléctrica se obtiene de la empresa LUZ DEL SUR S.A.A., se tiene: $I_{red,máx} = 16$ Amperios y $V_{LL} = 220$ Voltios. La eficiencia del rectificador se asume en 98% y la tensión de umbral es $V_{th,RF} = 1.5$ Voltios [24]. Al resolver las ecuaciones 3.21 a 3.25, se obtiene la resistencia del interruptor y diodo en mili ohmios.

$$R_{RF} = 75 \text{ m } \Omega$$

3.6.2. Parámetros de selección de rectificador

Del capítulo 3.6.1, el rectificador debe contar con una resistencia de $R_{RF} = 75 \text{ m } \Omega$ y además debe ser capaz de cumplir con los siguientes parámetros:

$$V_{RF,máx} = 297.10 \text{ Voltios}$$

$$I_{RF,máx} = 19.6 \text{ Amperios}$$

$$P_{RF,máx} = 5705.58 \text{ Watts}$$

3.7. Convertidor AC/DC

El convertidor es el encargado de transformar el voltaje y corriente alterna en continua, además debe elevar el voltaje de salida del rectificador para que sea posible cargar las baterías. Este componente es conocido como boost converter.

3.7.1. Potencia y resistencia del convertidor

La potencia máxima del convertidor AC/DC y la resistencia del mismo, se determina con las ecuaciones 3.26 y 3.27 [25].

$$P_{Conv,m\acute{a}x} = n_{Conv} * P_{RF,m\acute{a}x} \quad (3.26)$$

$$R_{Conv} = \frac{P_{RF,m\acute{a}x} (1 - n_{Conv}) - V_{th,Conv} * I_{RF,m\acute{a}x}}{I_{RF,m\acute{a}x}^2} \quad (3.27)$$

Dónde:

n_{Conv}	[%] :	<i>Eficiencia del convertidor</i>
$P_{Conv,m\acute{a}x}$	[W] :	<i>Potencia máxima del convertidor</i>
$V_{th,Conv}$	[V] :	<i>Tensión de umbral del convertidor</i>
R_{Conv}	[Ω] :	<i>Resistencia del convertidor</i>

Para resolver las ecuaciones 3.26 y 3.27, se tiene la $P_{RF,m\acute{a}x}$ y $I_{RF,m\acute{a}x}$ del capítulo 3.6.2. La eficiencia del convertidor se asume en 98% y la tensión de umbral $V_{th,Conv} = 1.5 V$ [26]. Se muestran los resultados obtenidos.

$$P_{Conv,m\acute{a}x} = 5591.46 \text{ Watts}$$

$$R_{Conv} = 220 \text{ m } \Omega$$

3.7.2. Parámetros de selección del convertidor

El convertidor debe contar con las siguientes características:

$$R_{Conv} = 220 \text{ m } \Omega$$

$$P_{Conv,m\acute{a}x} = 5591.46 \text{ Watts}$$

3.8. Características técnicas vehículo eléctrico

Una característica que se considera importante, es la velocidad máxima del vehículo. Dicha velocidad se calcula con la ecuación 3.28 [27].

$$V_{m\acute{a}x} = \frac{\pi * N_{m\acute{a}x} * r_r}{30 * G} \quad (3.28)$$

Dónde:

$V_{m\acute{a}x}$	[m/s]:	<i>Velocidad máxima del vehículo</i>
$N_{m\acute{a}x}$	[RPM]:	<i>Velocidad máxima del motor eléctrico</i>
r_r	[m]:	<i>Radio de la rueda</i>
G	[-]:	<i>Relación de transmisión del diferencial</i>

De las especificaciones técnicas del motor eléctrico PowerPhase Select 75, velocidad máxima 8000 rpm. El radio de rueda es 0.315 m, véase 3.2.2. La relación de transmisión final del diferencial se ha definido anteriormente $G = 7.94$. Resolviendo la ecuación 3.28.

$$V_{m\acute{a}x} = 33.23 \text{ m/s}$$

$$V_{m\acute{a}x} = 120 \text{ km/h}$$

Se muestran las características técnicas del vehículo eléctrico, para los sistemas seleccionados.

Tabla 3.9 Características técnicas de vehículo eléctrico [Elaboración propia]

Prestaciones	
Velocidad máxima [km/h]	120
Emisiones CO ₂ [gr/km]	0
Autonomía, ciclo de conducción L.M [km]	58.56
Autonomía, ciclo de conducción L.M [horas]	3.9
Motor Eléctrico	
Potencia máxima [kW / HP]	75 / 100
RPM para potencia máxima	3000 - 8000
Torque máximo [N.m]	240
RPM para torque máximo	0 - 3000
Voltaje de operación (VDC)	240 - 420
Batería	
Tipo	Iones de Litio
Capacidad [kW-h]	23
Disponible [kW-h]	18.4
Voltaje Nominal [V]	393
Tiempo de carga, 100% capacidad	
Potencia [kW] / Tiempo de carga [horas]	3 / 7.67
Tiempo de carga, 80% capacidad	
Potencia [kW] / Tiempo de carga [horas]	3 / 6.13
Transmisión	
Sistema de tracción	Posterior
Caja de cambios	1 sola velocidad

Cabe resaltar que las características técnicas del vehículo eléctrico han sido consideradas para condiciones de uso en Lima Metropolitana, en las cuales se incluyen condiciones de tráfico pesado durante las mañanas y situaciones críticas en pendientes, véase tabla 3.2. Este vehículo no es el adecuado para realizar viajes o trayectos de gran recorrido, para ello conviene utilizar un vehículo híbrido eléctrico.

3.9. Costos

Se realiza una averiguación de costos de los componentes requeridos, para un vehículo eléctrico con las características técnicas expuestas en el capítulo 3.8, los componentes satisfacen las condiciones de tráfico pesado en horas de la mañana en Lima

Metropolitana. Además se realiza una comparación entre un vehículo eléctrico y un vehículo convencional o propulsado por un motor de combustión interna.

3.9.1. Costos de sistemas principales

Se considera que los sistemas principales en un vehículo eléctrico, son el sistema de propulsión y el sistema de almacenamiento; es decir, el motor eléctrico y el pack de baterías. En el capítulo 3, se tiene que el motor eléctrico seleccionado es de la marca UQM TECHNOLOGIES, modelo PowerPhase Select 75 y el pack de baterías es de la marca A123SYSTEMS, Energy Core Pack 23 kW-h.

Tabla 3.10 Costos sistemas principales [Elaboración propia]

	Marca	Modelo	Costo [Dólares]
Motor eléctrico	UQM	PowerPhase Select 75	25069.00
Pack Baterías	A123SYSTEMS	Energy Core Pack 23 kW-h	6900 - 13800

El costo del motor eléctrico incluye el cargo de envío a Lima, Perú. Se solicitó una cotización a la empresa UQM TECHNOLOGIES [28]. Como se puede observar, el costo del motor eléctrico es muy elevado, esto se debe a que el motor PowerPhase 75 se fabrica en función a los pedidos de los clientes, este motor no es de producción a gran escala. Es posible seleccionar un motor de características similares en otras marcas y fabricados en producción masiva, con lo cual se pueden conseguir costos bajos.

El costo del pack de baterías es un estimado. Para un nivel de producción bajo, pensado entre 2012 – 2015, se estima que el costo por kW-h, se encuentra en el rango de 300 a 600 dólares [29].

3.9.2. Costos de recorridos anuales

Se realiza una comparación en base al rendimiento del vehículo eléctrico [$kW - h/km$] y el rendimiento de un vehículo de combustión interna dedicado a gasolina [$km/galón$], que presenta características similares al vehículo eléctrico requerido. El rendimiento del vehículo de combustión interna, se obtiene en base al recorrido de la ruta tipificada A1.

Consideraciones:

- Recorrido anual: 16 500 km [30]
- Combustible vehículo convencional: 97 oct.
- Precio por galón, gasolina 97 octanos: 18.1 Nuevo Sol [31]
- Precio por kW-h: 45.56 Céntimos de Nuevo Sol [32]

Para determinar el precio del combustible de 97 octanos, se toma el promedio del precio máximo y precio mínimo, para los grifos formales ubicados en el distrito de La Molina.

El precio de kW-h usado, es en base a la tarifa residencial BT5B de baja tensión, costo para viviendas que consumen más de 100 kW-h al mes.

Se muestran los costos de recorrer 16 500 km, en condiciones de tráfico pesado durante horas de la mañana en Lima Metropolitana.

Tabla 3.11 Costo anual de recorrer 16 500 km [Elaboración propia]

Rendimiento	
Vehículo Eléctrico [kW-h / km]	0.314
Vehículo Convencional [Lt./km]	0.126
Recorrido anual	
Vehículo Eléctrico [km]	16 500
Vehículo dedicado a gasolina [km]	
Precios	
Energía activa [céntimos de Sol / kW-h]	45.56
Gasolina 97 octanos [Soles / galón]	18.10
Costo anual por recorrido	
Vehículo Eléctrico [S/.]	2 360
Vehículo Convencional [S/.]	9 955

De la tabla anterior, se entiende que al utilizar un vehículo eléctrico existe un ahorro considerable de 7 595 Nuevos Soles, en el periodo de 1 año.

3.9.3. Tiempo de recuperación de inversión inicial

Se puede determinar el tiempo de recuperación de la inversión inicial que implica la compra de un vehículo eléctrico, para lo cual se toma como referencia el precio del Nissan Leaf, ya que tiene características técnicas similares a las mencionadas en el capítulo 3.8. El vehículo dedicado a gasolina con cual se va a comparar es el Kia Rio Hatchback, el cual es uno de los más vendidos en el 2012 y 2013 en el Perú, véase 2.1.3.

Precio del Nissan Leaf: 29 010 Dólares [33]

Precio del Kia Rio HB: 18 090 Dólares [34]

Utilizando 2.8 Nuevos Soles como tipo de cambio, los precios de los vehículos en Nuevos Soles son:

Precio del Nissan Leaf: 81 228 Nuevos Soles

Precio del Kia Rio HB: 50 652 Nuevos Soles

Tomando las consideraciones del capítulo 2.9.2 se obtiene, que al realizar la compra de un vehículo eléctrico se recupera la inversión inicial luego de 66 000 kilómetros de recorrido, considerando que el recorrido anual es de 16 500 km, un usuario típico recuperaría la inversión luego de 4 años; para un usuario que recorre más de 16 500 km anuales, es posible recuperar la inversión inicial en menos tiempo. Cabe resaltar que luego de 66 000 km de recorrido, se presenta un ahorro anual de 7 595 Nuevos Soles.

Para el análisis de tiempo de recuperación de inversión inicial, no se han considerado los costos de mantenimiento del vehículo eléctrico y vehículo convencional, ya que dichos costos implican un análisis económico más extenso, el cual no forma parte del alcance de la presente tesis.

Como referencia se puede mencionar que el Departamento de Energía de Estados Unidos, tiene a disposición de los usuarios información relevante sobre el uso de vehículos eléctricos, incluyendo información sobre el mantenimiento de los vehículos híbridos eléctricos, híbridos eléctricos enchufables y vehículos eléctricos.

Los vehículos eléctricos requieren menor costo de mantenimiento que los vehículos convencionales dedicados a gasolina debido a [35]:

- La electrónica, pack de baterías y motor eléctrico requieren poco o nulo mantenimiento regular.
- Los vehículos eléctricos tienen menos fluidos que cambiar.
- El desgaste de los frenos se reduce, debido al frenado regenerativo.
- La cantidad de partes móviles es notablemente menor, comparado con un vehículo convencional.



Referencias Bibliográficas del Capítulo 3

- [1] HUSAIN, Iqbal
2011 *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals*. Segunda edición. Boca Ratón: CRC Press, pp. 64.
- [2] SOYLU, Seref (Editor)
2011 *Electric Vehicles – Modeling and simulations*. Rijeka: InTech, pp.2. Consulta: 12 de marzo de 2014.
<<http://www.intechopen.com/books/electric-vehicles-modelling-and-simulations>>
- [3] Ídem, pp. 3
- [4] Ídem, pp. 4
- [5] CARINF.COM
s/a *Nissan Leaf 2010*
Consulta: 14 de mayo de 2014
<<http://www.carinf.com/es/9e60422878.html>>
- [6] MINISTERIO DEL AMBIENTE DEL PERÚ
2009 *Dispersión de la velocidad del viento diurno para la ciudad de Lima*. Lima
- [7] HIBRIDOS Y ELECTRICOS – Ecotecnología del vehículo
s/a *Coches eléctricos*. Consulta: 17 de mayo de 2014
<<http://www.hibridosyelectricos.com/seccion/coches-electricos/>>
- [8] UQM TECHNOLOGIES
2014 *Especificaciones técnicas PowerPhase Select 75*. Consulta: 22 de mayo de 2014.
<<http://uqm.com/products/full-electric/prototype/passenger-vehicles/>>

- [9] SOYLU, Seref (Editor)
2011 *Electric Vehicles – Modeling and simulations.*
Rijeka: InTech, pp.4. Consulta: 12 de marzo de 2014.
<<http://www.intechopen.com/books/electric-vehicles-modelling-and-simulations>>
- [10] Ibídem
- [11] UQM TECHNOLOGIES
2014 *Especificaciones técnicas PowerPhase Select 75.* Consulta: 22 de mayo de 2014.
<<http://uqm.com/products/full-electric/prototype/passenger-vehicles/>>
- [12] Ibídem
- [13] Ibídem
- [14] SOYLU, Seref (Editor)
2011 *Electric Vehicles – Modeling and simulations.*
Rijeka: InTech, pp.16-18. Consulta: 12 de marzo de 2014.
<<http://www.intechopen.com/books/electric-vehicles-modelling-and-simulations>>
- [15] Ídem, pp. 18
- [16] Ídem, pp. 3
- [17] UQM TECHNOLOGIES
2014 *Especificaciones técnicas PowerPhase Select 75.* Consulta: 22 de mayo de 2014.
<<http://uqm.com/products/full-electric/prototype/passenger-vehicles/>>

- [18] CODY, Jarrad; GÖL, Özdemir; NEDIC, Zorica; MOHTAR, Aaron y NAFALASKI, Andrew
2009 *Frenado Regenerativo en un Vehículo Eléctrico. Problema Ejercicio-Maquinaria Eléctrica N° 81*. Universidad de Australia del Sur, pp. 113.
- [19] A123SYSTEMS
s/a *Energy Core Pack (23 kWh)*. Consulta: 06 de junio de 2014.
<<http://www.a123systems.com/products-systems-energy-core-pack.htm>>
- [20] JOHNSON CONTROLS
s/a *Especificaciones de sistemas de lones de Litio*.
Consulta: 06 de junio de 2014.
<http://www.johnsoncontrols.com/content/us/en/products/power_solutions/products/lithium-ion_technology/systems___packs/system---pack-specs.html>
- [21] A123SYSTEMS
s/a *Energy Core Pack (23 kWh)* [Imagen]. Consulta: 06 de junio de 2014.
<<http://www.a123systems.com/products-systems-energy-core-pack.htm>>
- [22] INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION
2011 *Plugs, socket-outlets, vehicle connectors and vehicle inlets - Conductive charging of electric vehicles - Part 1: General requirements*. 13 de octubre.
- [23] SOYLU, Seref (Editor)
2011 *Electric Vehicles – Modeling and simulations*.
Rijeka: InTech, pp.17. Consulta: 12 de marzo de 2014.
<<http://www.intechopen.com/books/electric-vehicles-modelling-and-simulations>>

- [24] Ídem, pp. 18
- [25] Ibídem
- [26] Ibídem
- [27] EHSANI, Mehrdad; GAO, Yimin; GAY, Sebastien y EMADI, Ali
2005 *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles.*
Boca Ratón: CRC Press, pp. 105
- [28] UQM TECHNOLOGIES
2014 *Quote PowerPhase Pro 100.* Correo electrónico del 27 de mayo
a Víctor Zúñiga.
- [29] INTERNATIONAL ENERGY AGENCY
2011 *Technology Roadmap Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles.*
Francia, pp. 32
- [30] JIMENEZ, Fernando
2014 *Documento de Trabajo Interno*
- [31] OSINERGMIN
2014 *Precio de Gasolina y Diesel en Estaciones de Servicio y Grifos
Formales.* Consulta: 10 de junio de 2014.
<<http://www.facilito.gob.pe/facilito/actions/PreciosCombustibleAutomotorAction.do>>
- [32] LUZ DEL SUR S.A.A.
2014 *Precios para la venta de Energía Eléctrica, Mayo 2014.*
Consulta: 10 de junio de 2014.
<<http://www.luzdelsur.com.pe/media/dtarifas/TARIFAS.PDF>>
- [33] CarPrices.com
2014 *Precios del Nissan Leaf 2015.*
Consulta: 15 de setiembre de 2014
<http://www.carprices.com/carresearch/TrimsBuildCP/make_Nissan/model_Leaf/confid_carprices-demo/>

[34] CarPrices.com

2014

Precios del Kia Rio HatchBack 2014.

Consulta: 15 de setiembre de 2014

<[http://www.carprices.com/carresearch/TrimsBuildCP/make_Kia/
model_Rio5/confid_carprices-demo/](http://www.carprices.com/carresearch/TrimsBuildCP/make_Kia/model_Rio5/confid_carprices-demo/)>

[35] DEPARTMENT OF ENERGY OF U.S.

s/a

Maintenance and Safety of Hybrid and Plug-in Electric Vehicles

Estados Unidos. Consulta: 03 de octubre de 2014.

< http://www.afdc.energy.gov/vehicles/electric_maintenance.html>



CONCLUSIONES

El desarrollo de la presente tesis llevó a las siguientes conclusiones:

1. Del levantamiento de datos, se puede afirmar que para las condiciones de tráfico pesado en Lima Metropolitana, durante horas de la mañana, entre 9:00 a.m. y 11:00 a.m., se obtuvo que las velocidades promedio son de $(15.06 \pm 4.8) \text{ km/h}$, para ciclos de conducción de 3.74 km en 15 minutos; además, se registró velocidad máxima de 40 km/h . Este ciclo de conducción se validó por medio de las encuestas realizadas a usuarios de vehículos dedicados a gasolina y diesel.
2. Para el ciclo de conducción de las mañanas en Lima Metropolitana, es necesario un vehículo eléctrico con potencia de 13.8 kW , pero esta potencia no es suficiente para todas las pistas de Lima Metropolitana. De la medición de pendiente de las pistas más pronunciadas, se obtuvo una medición de 10.5 grados para la Av. Raúl Ferrero ubicada en el Cerro Centinela – La Molina. Para esta situación de manejo, considerando una velocidad máxima de 60 km/h y peso bruto del vehículo de 1708 kilogramos , se requiere como mínimo una potencia de 58.36 kW . Por lo tanto, se selecciona un motor de 75 kW de la marca UQM Technologies, el cual cumple con los requerimientos de los usuarios.
3. Se puede concluir que la capacidad de las baterías y por ende, la autonomía del vehículo, depende de diversos factores, tales como: inclinaciones de terreno, cantidad de pasajeros y carga adicional, uso de accesorios y equipos. La selección del pack de baterías permite una autonomía de 58.56 km , para condiciones de tráfico pesado durante las mañanas en Lima Metropolitana, utilizando el 80% de capacidad de las baterías. El tiempo de carga del 80% de las baterías es de 6.1 horas.
4. El vehículo eléctrico no cuenta con un MCI, lo cual significa una mejora de calidad de aire y disminución de gases de efecto invernadero. Así como también, asegura una disminución de gastos en función del recorrido, para un recorrido anual se

presenta un ahorro aproximado de 6880 Nuevos Soles, frente al uso de vehículos dedicados a gasolina.

5. Finalmente, el vehículo eléctrico y características técnicas del mismo, cumplen los requerimientos para ciclos de conducción en Lima Metropolitana, pero no son suficientes para que el vehículo sea utilizado en autopistas, como Panamericana Sur o Norte, para efectuar viajes de largo recorrido. Para recorridos largos, se aconseja el uso de vehículos híbridos eléctricos, los cuales brindan una mayor autonomía, a costa de uso de combustibles fósiles.



RECOMENDACIONES

- Se recomienda el trabajo conjunto del Gobierno del Perú, con la Asociación de Representantes Automotrices del Perú (ARAPER) y empresas fabricantes de vehículos convencionales, líderes en el parque automotor peruano. Estas organizaciones deben evaluar y determinar las características técnicas de los vehículos eléctricos, para su utilización en Lima Metropolitana y posteriormente a nivel Nacional. La presente tesis puede ser útil como punto de partida para el trabajo y evaluación conjunta de las organizaciones mencionadas anteriormente. Además, se debe evaluar la posibilidad y viabilidad de desarrollar infraestructuras de estaciones de carga rápida para los vehículos eléctricos, dichas estaciones permiten cargar el 80% de las baterías en un tiempo aproximado de 30 minutos o menos.
- Es necesario que el Gobierno Peruano incentive y fomente el uso de vehículos eléctricos en sustitución de vehículos dedicados a gasolina o diesel. Una forma de incentivar a los usuarios a optar por un vehículo eléctrico es subvencionar una parte del costo inicial del vehículo eléctrico. Esta forma de fomentar la compra de VE, se puede realizar una vez que las empresas líderes de ventas de vehículos ligeros ingresen vehículos eléctricos al parque automotor peruano.
- Es necesario que la carga del vehículo eléctrico se realice en instalaciones con potencia contratada no menor a 5 kW, ya que al tener una potencia contratada menor, el tiempo de carga del vehículo será muy elevado. Se recomienda a los futuros usuarios de vehículos eléctricos, cuya potencia contratada de la vivienda es menor a 5 kW, aumentar dicha potencia a 5 kW como mínimo.

BIBLIOGRAFÍA

CHAN, C.

2010 *Electric, Hybrid, and Fuel-Cell Vehicles: Architectures and Modeling*
Paper de la IEEE, volumen 59, número 2.

CHAN, C.

2007 *The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles.*
Paper de la IEEE, volumen 5, número 4.

CODY, Jarrad; GÖL, Özdemir; NEDIC, Zorica; MOHTAR, Aaron y NAFALASKI, Andrew

2009 *Frenado Regenerativo en un Vehículo Eléctrico. Problema Ejercicio-Maquinaria Eléctrica N° 81.* Universidad de Australia del Sur.

CÓRDOVA, Manuel

2003 *Estadística Descriptiva e Inferencial.* Quinta Edición.
Lima: Moshera S.R.L.

DEPARTMENT OF ENERGY OF U.S.

s/a *Emissions from Hybrid and Plug-In Electric Vehicle.*
Estados Unidos.

DEPARTMENT OF HEALTH AND HUMAN SERVICES OF U.S.

2008 *Anthropometric Reference Data for Children and Adults.* National Health Statistics Reports. Estados Unidos.

EHSANI, Mehrdad; GAO, Yimin; GAY, Sebastien y EMADI, Ali

2005 *Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles.*
Boca Ratón: CRC Press.

EMADI, Ali

2008 *Power Electronics and Motor Drives in Electric, Hybrid Electric, and Plug-In Hybrid Electric Vehicles.* Paper de la IEEE, volumen 55, número 6.

- HUSAIN, Iqbal**
2011 *Electric and Hybrid Vehicles Design Fundamentals*. Segunda edición. Boca Ratón: CRC Press.
- INTERNATIONAL ENERGY AGENCY**
2011 *Technology Roadmap Electric and Plug-in Hybrid Electric Vehicles*. Francia.
- JUNTA DE CASTILLA Y LEÓN**
2013 *Guía del vehículo eléctrico para Castilla y León*. España.
- LUZ DEL SUR S.A.A.**
2014 *Precios para la venta de Energía Eléctrica, Mayo 2014*.
- MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES DEL PERÚ**
2001 *Manual de diseño geométrico de carreteras*. Lima.
- MINISTERIO DE VIVIENDA, CONSTRUCCIÓN Y SANEAMIENTO DEL PERÚ**
2006 *Reglamento Nacional de Edificaciones. Norma A.010 Condiciones generales de diseño*. Lima.
- MINISTERIO DEL AMBIENTE DEL PERÚ**
2009 *Dispersión de la velocidad del viento diurno para la ciudad de Lima*. Lima
- OSINERGMIN**
2014 *Precio de Gasolina y Diesel en Estaciones de Servicio y Grifos Formales*.
- PULKRABEK, Willard**
2004 *Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine*. Segunda edición. Nueva York: Pearson Prentice-Hall.

SOYLU, Seref (Editor)

- 2011 *Electric Vehicles – Modeling and simulations.*
Rijeka: InTech. Consulta: 12 de marzo de 2014.
<<http://www.intechopen.com/books/electric-vehicles-modelling-and-simulations>>

WACKERLY, Dennis; MENDENHALL III, William y SCHEAFFER, Richard

- 2010 *Estadística matemática con aplicaciones.* Séptima Edición.
México D.F: Cengage Learning Editores S.A.

