

Tecnológico de Costa Rica

Área Académica de Ingeniería en Mecatrónica



Evaluación y análisis técnico de tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica para la transformación de vehículos de combustión a vehículos eléctricos.

Informe de Proyecto de Graduación para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura

Erick Pérez Buendía
2013096334

Cartago
16 de noviembre de 2017

Declaro que el presente Proyecto de Graduación ha sido realizado enteramente por mi persona, utilizando y aplicando literatura referente al tema e introduciendo conocimientos propios.

En los casos en que he utilizado bibliografía he procedido a indicar las fuentes mediante las respectivas citas bibliográficas. En consecuencia, asumo la responsabilidad total por el trabajo de graduación realizado y por el contenido del correspondiente informe final.

Erick Pérez Buendía

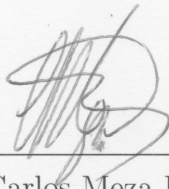
Cartago, 16 de noviembre de 2017

Céd: 116380500

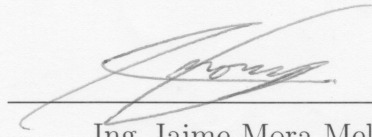
Instituto Tecnológico de Costa Rica
Área Académica de Ingeniería Mecatrónica
Proyecto de Graduación
Tribunal Evaluador

Proyecto de Graduación defendido ante el presente Tribunal Evaluador como requisito para optar por el título de Ingeniero en Mecatrónica con el grado académico de Licenciatura, del Instituto Tecnológico de Costa Rica.

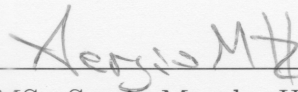
Miembros del Tribunal



Dr. Carlos Meza Benavides
Profesor Lector



Ing. Jaime Mora Meléndez
Profesor Lector



MSc. Sergio Morales Hernández
Profesor Asesor

Los miembros de este Tribunal dan fe de que el presente trabajo de graduación ha sido aprobado y cumple con las normas establecidas por el Área Académica de Ingeniería Mecatrónica

Cartago, 16 de noviembre de 2017

Índice general

Índice de figuras	iii
Índice de tablas	v
Glosario y Abreviaciones	vii
1 Introducción	1
1.1 Objetivos	3
1.1.1 Objetivo General	3
1.1.2 Objetivos Específicos	3
1.2 Supuestos	4
1.3 Contribuciones de la tesis	4
1.4 Estructura	4
2 Baterías, conceptos necesarios para caracterizar su desempeño.	7
2.1 Capacidad	8
2.2 Razón de carga/descarga C (C-rate)	8
2.3 Energía específica	9
2.4 Potencia específica	9
2.5 Estado de carga (SOC)	9
2.6 Profundidad de descarga (DOD)	9
2.7 Estado de la batería (SOH)	9
2.8 Ciclos de carga	10
2.9 Ley de Peukert	10
3 Descripción de las distintas formas de almacenamiento de energía eléctrica utilizable para vehículos eléctricos.	11
3.1 Tecnologías de almacenamiento de electricidad utilizable en un vehículo eléctrico	11
3.1.1 Batería de plomo ácido	11
3.1.2 Baterías basadas en níquel	12
3.1.3 Baterías basadas en ion de Litio (Li-ion)	15
3.1.4 Supercondensadores	18
3.2 Tabla de resumen	20
3.3 Elección de tecnología de almacenamiento	20

4	Análisis de metodos y equipo necesario para la carga de las tecnologías de almacenamiento de energia electrica identificadas	23
4.1	Métodos de carga de las tecnologías de almacenamiento	23
4.1.1	Carga de corriente constante (CC)	23
4.1.2	Carga de tensión constante (CV)	24
4.1.3	Carga de corriente constante-voltaje constante (CC/CV)	25
4.1.4	Carga de múltiples escalones con corriente constante (MSCC)	26
4.1.5	Carga por pulsos (PC)	28
4.2	Infraestructura de carga de vehículos eléctricos	29
5	Análisis de casos de transformaciones de vehiculos de combustion interna a electricos.	33
5.1	Conversión en la universidad de Zagreb , Malasia	33
5.2	Conversión de Suzuki Swift en Alberta, Canada	35
5.3	Conversión Mazda RX8 en Western, Australia	37
5.4	Conversión Holden Barina en Melbourne, Australia	39
5.5	Conversión Toyota Echo en Washington, Estados Unidos	40
5.6	Cálculo de autonomía aproximada de un vehículo eléctrico	43
5.7	Consideraciones respecto a la ubicación del banco de baterías.	46
6	Propuesta de ubicaciones de estaciones de carga	49
6.1	Características a considerar de los tipos de estaciones de carga	49
6.2	Propuesta de las ubicaciones de estaciones de carga	51
6.2.1	Estaciones de carga con nivel 1 de potencia (2 kW)	51
6.2.2	Estaciones de carga con nivel 2 de potencia (8 kW)	51
6.2.3	Estaciones de carga con nivel 2 de potencia (20 kW)	51
6.2.4	Estaciones de carga con nivel 3 de potencia (50 kW)	52
6.3	Modelo de estimación de la densidad de estaciones de carga requerida (ERDEC, Estimating the Required Density of EV Charging stations model)	52
7	Conclusiones y Recomendaciones	57
7.1	Conclusiones	57
7.2	Recomendaciones	58
	Bibliografía	59

Índice de figuras

4.1	Perfil de la tensión y corriente de carga del método CC/CV	25
4.2	Perfil de carga MSCC con 3 pasos, para una batería de níquel.	27
4.3	Perfil de carga MSCC con 4 escalones para baterías de ion de litio.	27
5.1	Vehículo Opel Kadett C 1978 (c), Joost Bakker, CC BY 2.0	33
5.2	Vehículo Suzuki Swift GT 1991 (c), Rudolf Stricker, CC0	35
5.3	Vehículo Mazda RX8 2006 (c), Rudolf Stricker, CC BY-SA 3.0	37
5.4	Vehículo Holden Barina City 2000 (c), OSX, CC0.	39
5.5	Vehículo Toyota Echo 2002 (c), TuRbO_J, CC BY 2.0	41
6.1	Esquema del modelo ERDEC	53

Índice de tablas

3.1	Comparación de las tecnologías de almacenamiento	20
3.2	Comparación con puntaje de las distintas tecnologías de almacenamiento	21
4.1	Características de niveles de potencia de carga.	30
5.1	Valores para el cálculo de la autonomía aproximada de un vehículo eléctrico	45
5.2	Características de desempeño de vehículos convertidos a eléctricos.	46
6.1	Valores escogidos para las variables del cálculo de densidad de estaciones de carga.	54

Glosario y Abreviaciones

Abreviaciones

BMS	Battery Management System
DOD	Depth of Discharge
EV	Electric Vehicle
LFP	Batería de Fosfato de hierro y litio
LTO	Batería Titanato de litio
NiCd	Batería Níquel-cadmio
NiMH	Batería Níquel-metal hidruro
NiZn	Batería Níquel-zinc
NMC	Batería Óxido de litio-níquel-manganeso-cobalto
PHEV	Plug-in Hybrid Electric Vehicle
SOC	State of Charge
SOH	State of Health

Capítulo 1

Introducción

En la actualidad existe una necesidad de reducir drásticamente las emisiones de efecto invernadero que las actividades de ser humano producen día tras días. Uno de estas actividades que más impacta el ambiente con estos gases, es la utilización de vehículos de combustión interna, los cuales requieren quemar combustibles fósiles para obtener energía. Una alternativa para esta situación es la utilización de vehículos eléctricos, los cuales utilizan la energía almacenada en un banco de baterías para alimentar un motor eléctrico. Este tipo de vehículos reducen significativamente el impacto ambiental en comparación con los autos de combustión, y esta diferencia aumenta si la energía eléctrica que utiliza proviene de fuentes renovables, como es el caso más común en nuestro país.

Debido a estas ventajas que proporciona el vehículo eléctrico, la comercialización de este ha aumentado significativamente en los últimos años, donde aún más compañías y países han mejorado la capacidad adquisitiva de dichos vehículos, disminuyendo su costo y aumentando las prestaciones técnicas. Pero aún con la disminución de los precios, todavía no es accesible para todas las personas, y esto se acentúa más en un país como Costa Rica, por lo que la idea de convertir autos de combustión a eléctricos toma fuerza. Esto no simplemente por la disminución en el costo que podría significar, sino también en el aspecto ambiental. Ya que el hecho de poder reutilizar gran parte de las piezas de un auto de combustión, el cual dependiendo del año podría estar cercano a cumplir su vida útil, permite reducir el impacto ambiental futuro que significará que la totalidad de la flota vehicular sea eléctrica, ya que por más pequeño que sea el porcentaje de vehículos convertidos, siempre será una ganancia en el punto de vista ambiental. Además, la conversión de vehículos eléctricos es una forma de ayudar al cambio de mentalidad de la sociedad, ante esta nueva alternativa de movilizarse, la cual puede adoptarse sin necesidad de sustituir por completo el vehículo de combustión que las personas poseen, sino que es posible transformarlo a una versión eléctrica con ventajas ambientales y económicas .

Para lograr esta conversión eléctrica es necesario conocer todos los componentes necesarios que aseguren la viabilidad de una transformación como esta, por lo que el presente

proyecto abordará el estudio de los aspectos eléctricos de una conversión, específicamente el área de almacenamiento de energía. Para esto es necesario identificar cuáles son las tecnologías de almacenamiento comerciales disponibles para utilizar en una aplicación como ésta y elegir la más adecuada en bases a criterios técnicos, económicos y de accesibilidad. Aunque la batería por si sola no es capaz de realizar su misión, por lo que requiere interactuar con otros componentes para su óptimo funcionamiento y además debe ser recargada continuamente, por lo que un estudio de la infraestructura y métodos de carga es necesaria para asegurar un uso adecuado de la tecnología de almacenamiento que posea el vehículo.

La infraestructura de carga no solamente involucra los componentes internos del vehículo, sino que también abarca el equipo externo encargado de suministrarle energía, tales como las estaciones de carga, las cuales son vitales para asegurar una autonomía prolongada que le permite a los usuarios alcanzar su destino sin ningún problema. Es por esto que es imposible hablar de una masificación de los vehículos eléctricos sin asegurar el acceso a estaciones de carga, por lo que se plantean ubicaciones en el valle central basadas en el nivel de potencia capaz de suministrar la estación y con una densidad de estas en un área dada.

La necesidad de evaluar de forma práctica las distintas especificaciones técnicas de las tecnologías de almacenamiento en estudio, conduce al análisis y evaluación de casos de transformaciones reales que utilizan distintos tipos de baterías. Debido a que a partir de la información del desempeño de estos vehículos, se puede dimensionar los límites que puede tener un auto convertido a eléctrico dependiendo del tipo de batería que utiliza. Lo cual viene acompañado por un cálculo teórico que puede ser corroborado con los distintos casos de transformación analizados. .

1.1 Objetivos

1.1.1 Objetivo General

- Analizar las distintas tecnologías de almacenamiento de electricidad disponibles en el mercado, para la transformación de un vehículo de combustión de tipo sedán a uno eléctrico.

1.1.2 Objetivos Específicos

1. Describir las distintas formas de almacenamiento de energía eléctrica utilizable para vehículos eléctricos.
2. Analizar los métodos y equipo necesario para la carga de las tecnologías de almacenamiento de energía eléctrica identificadas, así como la comparación de los mismos.
3. Analizar el desempeño, alcance y velocidad de vehículos transformados a eléctricos, así como un caso teórico, que hayan utilizado las tecnologías de almacenamiento identificadas.
4. Analizar la ubicación de estaciones de recarga que el automóvil pueda utilizar en condiciones de uso normal en el valle central.

1.2 Supuestos

Para cumplir con el objetivo 3, el cual involucra un cálculo de la autonomía aproximada de un vehículo eléctrico, se toman los siguiente supuestos.

1. Se considera que el vehículo permanece a una velocidad constante durante todo el recorrido, no se toma en cuenta variaciones de aceleración ni tampoco diferencias de altitud que modifiquen la potencia suministrada por el motor.
2. El cálculo se realiza basándose en un vehículo de combustión interna el cual puede ser transformado, pero no se consideran variaciones de la masa total del vehículo ante una posible conversión, por lo que se utiliza su masa original. La masa total se considera con un solo tripulante (80 kg) y sin ningún equipaje extra.
3. Se considera que se trabaja con un motor eléctrico con una eficiencia del 90 %.
4. La energía de las baterías se utilizan únicamente para que el motor pueda vencer las fuerzas involucradas en el estudio, no considera otros consumos de energía que podrían presentarse tales como la utilización de aire acondicionado, luces, radio y el controlador del motor.

1.3 Contribuciones de la tesis

El presente informe logra identificar y analizar distintas opciones de tecnologías de almacenamiento, demostrando la viabilidad de estas mediante el estudio de casos reales de conversiones eléctricas, lo que ayuda a demostrar, para las mejores opciones encontradas, su aplicación en la transformación de vehículos. También es posible identificar elementos relacionados al proceso de carga los cuales deben ser tomados en cuenta en una posible conversión. Además, las estaciones de carga y sus distintos tipos basados en niveles de potencia, son necesarios para la propuesta de ubicación de estaciones de carga, la cual es necesaria en el futuro próximo ante la masificación de los vehículos eléctricos.

1.4 Estructura

En el capítulo 2 se presentan conceptos necesarios para comprender distintas especificaciones propias que caracterizan el desempeño de las baterías. En el capítulo 3 se identifican y analizan las distintas tecnologías de almacenamiento, junto con una comparación que permite escoger las mejores opciones para la aplicación en una conversión eléctrica. El capítulo 4 describe los distintos métodos de carga posibles para las tecnologías, además de identificar y analizar la infraestructura que forma parte del proceso de carga de un vehículo eléctrico. En el capítulo 5 se analiza el desempeño de conversiones realizadas

con las tecnologías de almacenamiento en estudio. Para el caso del capítulo 6, se plantea una propuesta para las ubicaciones de estaciones de carga, basados en el nos niveles de potencia de estas. Además se aplica un modelo de estimación de la densidad óptima para distribuir el número de estaciones en un área dada. Se concluye el informe con las conclusiones en el capítulo 7 .

Capítulo 2

Baterías, conceptos necesarios para caracterizar su desempeño.

Es posible describir a una batería como sistema de intercambio de energía electroquímico que convierte materiales activos en energía eléctrica. La batería puede estar compuesta por una o más celdas, en las cuales es posible identificar 3 componentes principales; un electrodo positivo, uno negativo y el electrolito . Este último es el medio por el que los iones se mueven entre los electrodos, pero este transporte solo puede suceder cuando hay un circuito externo. Esta característica , que es posible gracias a la utilización del un filtro selectivo (electrolito), permite almacenar energía y utilizarla en un momento deseado.

Las celdas es posible diferenciarlas en 2 tipos, la celda de tipo primaria y la de tipo secundaria. La primaria es aquella que solo puede utilizarse una vez, es decir, cuando se agote su energía es imposible recargarla. Una celda secundaria es aquella que sí puede ser recargada, ya que es capaz de revertir la reacción química interna y regenerar los reactivos que proporcionan la energía en el proceso de generación. Es este tipo de celda el que se usa en aplicaciones industriales y de utilidades, como el caso de vehículos eléctricos, ya que es imposible concebir el caso en donde se requiera cambiar el banco de baterías por uno nuevo para prolongar su autonomía cada vez que se necesite.

Así mismo es posible dividir las celdas secundarias en otros 2 tipos, en estándar o en celdas de flujo. Las celdas secundarias estándar son autosuficientes y no contienen partes mecánicas. La carga y la descarga se lleva a cabo a través de los terminales de la celda y todos los elementos reactivos requeridos están contenidos dentro de la estructura que contiene a la celda o conjunto de estas que componen la batería. Las celdas secundarias pueden ser de descarga parcial o superficial , las cuales no pueden ser descargadas completamente (ácido de plomo), y las de descarga completa o ciclo completo , las cuales pueden ser completamente descargadas sin producir ningún daño a la batería (ion de litio). Las baterías secundarias de flujo presentan la característica que los reactivos que reaccionan para generar electricidad no se encuentran siempre dentro de la celda misma. Estos se

almacenan en reservas externas y se suministran a la celda cuando se requieran.

Para el caso de estudio se abarcan distintas tecnologías de almacenamiento que son posibles categorizarlas como celdas secundarias estándar, y su diferenciación principal entre sí se da por la variación del material del cátodo, ánodo o del electrolito utilizado.

Para caracterizar una batería, así como el desempeño de la misma, es necesario conocer distintos conceptos, los cuales se definen a continuación.

2.1 Capacidad

La capacidad de una batería, la cual se representa en amperio hora (Ah), es la carga eléctrica total que puede ser descargada por una batería completamente cargada bajo condiciones específicas. Cuando se habla de la capacidad nominal en una batería, esta se refiere a la mínima capacidad cuando una celda nueva es evaluada bajo condiciones estándares, las cuales son establecidas por el fabricante. Algunas de estas condiciones pueden ser la temperatura a la que fue evaluada y la razón de descarga.

También es posible especificar la capacidad de la batería en términos de energía, mediante la unidad respectiva que es el vatio-hora. El valor de la energía nominal en una batería se puede obtener mediante el producto de la capacidad de la batería por el voltaje nominal de la misma.

2.2 Razón de carga/descarga C (C-rate)

Es un término utilizado para representar una razón de carga o descarga igual a la capacidad de la batería en una hora. Funciona como un método para normalizar tiempos de carga, ya que al especificar una descarga a 1 C, el tiempo teórico en completar dicha descarga sería de una hora. También es útil para expresar una corriente de descarga o carga, ya que estos datos en su representación en amperios, pueden variar significativamente entre baterías diferentes de una misma tecnología, debido a la diversidad de capacidades, pero no así la razón de carga/descarga C. El valor C para una determinada batería se puede expresar de la siguiente forma,

$$1C[A] = \frac{\text{Capacidad}[Ah]}{1[h]} \quad (2.1)$$

2.3 Energía específica

Se utiliza para definir que tanta energía una batería es capaz de almacenar por unidad de masa. Se expresa con las unidades de vatio-hora por kilogramo (Wh/kg). Este valor es de suma importancia para determinar el peso total de la batería para un rango de autonomía establecido de un vehículo eléctrico.

2.4 Potencia específica

Este concepto se define como la potencia máxima por unidad de masa, y su unidad es vatio por kilogramo (W/kg).

2.5 Estado de carga (SOC)

El estado de carga de una batería se define como la capacidad restante en esta, expresada en porcentaje. Se ve afectada por condiciones de operación, como lo es la corriente requerida por la carga y la temperatura de trabajo. Este valor se puede calcular de la siguiente forma,

$$SOC[\%] = 100 \cdot \frac{Capacidad\ restante}{Capacidad\ nominal} \quad (2.2)$$

2.6 Profundidad de descarga (DOD)

Se utiliza para indicar el porcentaje que ha sido descargado del valor total de la capacidad de la batería, por lo que es posible relacionarlo como el término inverso del estado de carga (SOC). El valor máximo de la profundidad de descarga establecida para una batería, significa que tanto por ciento de su capacidad nominal puede llegar a descargarse por cada ciclo. Por lo general muchas de las baterías son capaces de alcanzar el 100% como el valor máximo de profundidad de descarga, pero esto afecta directamente en la cantidad de ciclos de carga que puede poseer la batería.

2.7 Estado de la batería (SOH)

El estado de una batería se puede definir como la razón entre la máxima capacidad de una batería completamente cargada, la cual ya ha completado una cierta cantidad de ciclos de carga, entre la capacidad máxima cuando la batería se encontraba nueva. Este valor permite dimensionar el grado de degradación que ha sufrido la batería y puede ser utilizado para estimar la vida útil restante de la misma.

2.8 Ciclos de carga

Es el número de veces que la batería puede ser recargada para recobrar su capacidad completa después de su uso, tomando en cuenta el 80% de la capacidad original de la batería como el valor mínimo. Es una indicación de la duración de vida de la batería, la cual también se ve afectada por razones de carga y descarga, así como que tanto de su capacidad se descarga en cada ciclo (DOD) y la temperatura.

2.9 Ley de Peukert

Esta ley ayuda a determinar cuanta energía realmente es capaz de suministrar una batería a una carga dada. Esto debido a que se ha observado que 2 baterías idénticas, en las mismas circunstancias, se comportan como si tuvieran una capacidad distinta ante una carga, dependiendo de la corriente requerida por esta. Esta diferencia la describe Peukert con la siguiente fórmula,

$$C_p = I^k t \quad (2.3)$$

Donde,

$C_p[Ah]$: Capacidad de la batería.

$I[A]$: Corriente de descarga.

k : Coeficiente de Peukert.

$t[h]$: Tiempo real de descarga de la batería.

El coeficiente de Peukert (k) idealmente es 1, en la práctica las baterías de plomo ácido poseen un coeficiente entre 1.2 y 1.3, y para el caso de las baterías de ion de litio este valor se reduce significativamente, alcanzando el 1.02. De esta forma es posible demostrar que a medida que la tasa de descarga aumenta, la capacidad real disponible de la batería disminuye. Este fenómeno se presenta porque al descargar una batería a corrientes considerablemente altas, la resistencia interna de la celda incrementa y la tasa de recuperación de esta disminuye. La ecuación de Peukert solo es posible aplicarla en casos donde la corriente de descarga y la temperatura de la celda es constante.

Capítulo 3

Descripción de las distintas formas de almacenamiento de energía eléctrica utilizable para vehículos eléctricos.

3.1 Tecnologías de almacenamiento de electricidad utilizable en un vehículo eléctrico

En esta sección se estudian las distintas tecnologías de almacenamiento disponibles en el mercado que pueden ser utilizadas para impulsar un vehículo eléctrico. El hecho de que se limite el estudio a baterías comerciales deja de lado aquellas que se encuentren en etapa de investigación y pruebas, así como aquellas utilizadas en ciertos vehículos comerciales que solo están disponibles para las compañías que fabriquen dichos autos.

3.1.1 Batería de plomo ácido

Este tipo de batería utiliza plomo metálico para el electrodo negativo y óxido de plomo para el caso del electrodo positivo, aunque durante la descarga ambos electrodos son convertidos en sulfato de plomo [12]. El electrolito empleado en este caso es una solución de agua destilada y ácido sulfúrico, el cual interviene de forma activa en el proceso electroquímico ya que varía la proporción del ácido en la solución respecto al estado de carga de la batería. En lo que respecta a su desempeño, este tipo de batería representa una de las mejores opciones en cuanto a costo y sencillez de uso, pero en lo que respecta a energía específica (Wh/kg) se encuentra por detrás de otras tecnologías.

Esta tecnología de almacenamiento tiene más de 100 años de haber sido implementada,

y ha recibido mejoras en la parte de seguridad, como lo es la utilización de una válvula liberadora de presión (VRLA), que permita mantener los gases a una presión interna en la batería que no sobrepase los límites de seguridad. [6]

Un detalle respecto a su uso, es que la sobre descarga y las altas temperaturas en la batería pueden afectar de manera considerable su vida útil, ya que se ven reducidos los ciclos de carga disponibles. Además es necesario estar pendiente ante cualquier fuga, la cual sería de ácido sulfúrico. Esta sustancia provoca quemaduras y daños oculares permanentes. [24]

Características

- Ciclos de carga: 200 (DOD 100%), 1500(DOD 25%) .
- DOD máximo: 80% .
- Costo: \$100-150 (\$/ kWh).
- Energía específica : 35-50 Wh/kg .
- Potencia específica : 80-300 W/kg . [12]
- Corriente de descarga recomendada: 4 A (C/10). [18]
- Corriente de descarga máxima : 120 A, durante 7 minutos A (3C). [18]
- Tiempo recomendado de carga: 12-16 hrs (C/10).
- Tiempo mínimo de carga: 3 hrs (C/3).

Vehículos comerciales

- EV1 (1999), General Motors .

3.1.2 Baterías basadas en níquel

Batería de níquel-metal hidruro (NiMH)

Han sido las baterías de níquel-metal hidruro las que se han afianzado en el mercado de vehículos eléctricos, en compañías como General Motors, Ford y Toyota . Esto debido a contar con buenas características como una alta energía específica y cantidad de ciclos de carga, así como estar compuesta por materiales no tóxicos y reutilizables. Si bien no supera en estas especificaciones a otras tecnologías de almacenamiento, es capaz de aportar una buena relación entre energía y potencia específica . [16]

Este tipo de baterías poseen en su electrodo positivo óxido de níquel , en su electrodo negativo un hidruro metálico y de electrolito una solución de hidróxido de potasio . En lo que respecta a su uso, en caso de utilizar la carga rápida en este tipo de batería, es necesario monitorear la temperatura que alcanza durante este proceso la batería. Esto debido a que puede llegar a dañarla de forma permanente o reducir sus ciclos de cargas disponibles. [6]

Características

- Ciclos de carga: 500-1000 .
- DOD máximo: 100% .
- Costo: \$300 (\$/ kWh).
- Energía específica : 50-110 Wh/kg .
- Potencia específica : 200-2000 W/kg .
- Corriente de descarga recomendada: 10 A (C/2). [8]
- Corriente de descarga máxima : 60 A (3C). [8]
- Tiempo recomendado de carga: 10 hrs (C/10).
- Tiempo mínimo de carga: 1.5 hrs (C).

Vehículos comerciales

- Toyota Prius.
- Lexus híbrido, Toyota.
- Altima (2010) híbrido, Nissan.
- Civic híbrido (2011), Honda.

Batería de níquel-zinc (Ni- Zn)

Este es otro tipo de batería que posee un electrodo de Níquel, y el otro esta compuesto de Zinc, junto con una solución alcalina como el electrolito. Este tipo de tecnología posee potencial en la energía específica y costo en relación a otras tecnologías basadas en níquel, mas que todo por su capacidad de carga. Pero ha encontrado problemas en su evolución por aspectos como la cantidad de ciclos de carga posibles, incidentes por corto circuitos y recombinación de gas en celdas selladas. [29]

Características

- Ciclos de carga: 100-500 .
- DOD máximo: 80% .
- Costo: \$100-300 (\$/ kWh).
- Energía específica : 70-110 Wh/kg . [29]
- Potencia específica : 1000-2000 W/kg . [40]
- Corriente de descarga recomendada: 8 A (1C). [40]
- Corriente de descarga máxima : 80 A (10C). [40]
- Tiempo recomendado de carga: 1.5 hrs (1C).
- Tiempo mínimo de carga: 0.75 hrs (2 C).

Vehículos comerciales

- No se ha utilizado esta tecnología en vehículos eléctricos comerciales .

Batería de níquel-cadmio (Ni–Cd)

La batería Ni-Cd, al igual que las otras baterías basadas en níquel, presenta en su electrodo positivo hidróxido de níquel y cadmio en el electrodo negativo. Como electrolito poseen una solución de hidróxido de potasio. [6] Este tipo de baterías cuenta con ventajas como una resistencia interna baja, un rango de temperaturas de operación alto, además de poder tener una tasa de descarga alta sin impactar de forma negativa la capacidad de la batería.

Por otra parte, ha perdido terreno en la industria por poseer desventaja en comparación a otras tecnologías (NiMh e ión de litio) en aspectos como energía específica, cantidad de ciclos de carga, además de contar con “efecto memoria” el cual se puede describir como la pérdida de capacidad de la batería al no ser descargadas en cada ciclo en su totalidad [12]. Este efecto se agudiza si se mantiene cargando la batería por varios días o si se recarga continuamente sin una descarga completa periódica [24] .Otro aspecto negativo es el impacto ambiental, ya que cuenta con un elemento sumamente tóxico como lo es el cadmio.

Características

- Ciclos de carga: 500 .
- DOD máximo: 100% .
- Costo: \$200-300 (\$/ kWh).

- Energía específica : 50-80 Wh/kg .
- Potencia específica : 200-500 W/kg .
- Corriente de descarga recomendada: 3.5 A (C/2). [11]
- Corriente de descarga máxima : 5 A (C/1.4). [11]
- Tiempo recomendado de carga: 12-14 hrs (0.1C). [19]
- Tiempo mínimo de carga: 1.2 hrs, require un monitoreo de carga (1 C). [19]

Vehículos comerciales

- Peugeot 106 Electrique (1996) .

3.1.3 Baterías basadas en ion de Litio (Li-ion)

El funcionamiento de las baterías de ion de litio consiste en usar una sal de litio como electrolito, la cual permite que el flujo de energía se genere por la transferencia de estos iones de litio que se encuentran en el cátodo hacia el ánodo, en el caso del proceso de carga. Para la descarga los iones de litio son transferidos del ánodo hacia el cátodo. Esta tecnología tiene distintas variaciones, las cuales se generan por el material del cátodo. Estos pueden ser de óxido de litio cobalto, litio-ferrofosfato , óxido de litio-manganeso, óxido de cobalto manganeso níquel litio. En lo que respecta al ánodo, este generalmente esta compuesto de grafito o algún tipo de carbono. [36]

En lo que respecta a beneficios generales de las batería de ion de litio se encuentra una mayor capacidad de voltaje en cada celda, en comparación con baterías de níquel y plomo, lo que permite utilizar menos celdas en serie para alcanzar un voltaje deseado. Además estas baterías cuentan con una mejor densidad de energía y una tasa de auto-descarga mucho menor a las tecnologías de almacenamiento ya mencionadas. Esta tasa se entiende como la perdida natural de capacidad por parte de la batería a través del tiempo sin haber sido utilizada, que en el caso de las basadas en ion de litio oscila entre el 1-5% mensual. [36]

En el campo de ciclos de carga, también supera a las tecnologías de níquel y plomo, ya que logra alcanzar por lo general en sus distintas variaciones los 1000 ciclos con una profundidad de descarga (DOD) del 100%. Aunque es posible aumentar este valor de ciclos disminuyendo dicha profundidad de descarga.

Se estudiaran las tecnologías de ion de litio que por su alta capacidad de de potencia, densidad de energía y ciclos de carga son más adecuadas para aplicaciones automotrices.

Batería de fosfato de hierro y litio (LFP)

Esta batería de ion de litio presenta en su ánodo grafito y en el cátodo fosfato de hierro y litio. Sus características de alta capacidad de potencia le permiten la posibilidad de ser cargada por medio del sistema de freno regenerativo, común entre vehículos eléctricos, y la posibilidad de proporcionar una tasa de descarga elevada. Otro aspecto a favor es que cuenta con un precio relativo menor las demás tecnologías de ion de litio, debido a que sus componentes se pueden considerar como comunes.

Además se considera a esta tecnología como más segura, ya que tiende a soportar condiciones como la de sobrecargar la batería y altas temperaturas. Aunque como aspecto negativo, cuenta con una baja energía específica [36]. Pero es necesario especificar que la temperatura interna máxima no debe sobrepasar los 270 °C, ya que puede llevar a un daño irreversible de la batería.

Características

- Ciclos de carga: 1000-2000 .
- DOD máximo: 100% .
- Costo: \$400-700 (\$/ kWh).
- Energía específica : 80-130 Wh/kg. [36]
- Potencia específica : 1400-2400 W/kg. [36]
- Corriente de descarga recomendada: 30 A (1 C). [9]
- Corriente de descarga máxima : 120 A, por 30s (4C). [9]
- Tiempo recomendado de carga: 3 hrs (C/2). [9]
- Tiempo mínimo de carga: 1.2 hrs (1 C). [9]

Vehículos comerciales

- BYD E6, BYD Auto.
- Chevrolet Spark.

Batería de óxido de litio-níquel-manganeso-cobalto (NMC)

Este es otra batería de ion de litio que posee en su ánodo grafito, y en el caso del cátodo, óxido de níquel-manganeso-cobalto y litio. Esta tecnología presenta una alta energía específica, así como un voltaje alto por celda de 3.6-3.8 V. [36]

Si bien cuenta con una cantidad ciclos de carga elevada, su precio también lo es en comparación con otras baterías de ion de litio .La temperatura máxima que es capaz de soportar la batería es de 210 °C, la cual se puede alcanzar por una tasa de carga elevada.

Características

- Ciclos de carga: 1000-4000 .
- DOD máximo: 100% .
- Costo: \$500-900 (\$/ kWh).
- Energía específica : 140-180 Wh/kg. [36]
- Potencia específica : 500-3000 W/kg. [36]
- Corriente de descarga recomendada: 8 A (C/5). [10]
- Corriente de descarga máxima : 120 A (3 C). [10]
- Tiempo recomendado de carga: 5 hrs (C/5). [10]
- Tiempo mínimo de carga: 1.5 hrs (1 C). [10]

Vehículos comerciales

- Chevrolet Volt.
- BMW i3.
- Volkswagen e-Golf.
- Ford Focus Electric.
- Nissan LEAF.

Batería de titanato de litio (LTO)

Esta batería varía el grafito que normalmente se usa en el ánodo de las baterías de ion de litio y lo sustituye por titanato de litio. El cátodo generalmente se constituye por óxido de manganeso de litio o NMC. La batería de titanato de litio posee un voltaje nominal por celda de 2.2V a 2.3 V, lo que representa a un valor menor que otras tecnologías de ion de litio. Esto provoca que se necesiten más celdas para conseguir el voltaje deseado. [36]

Las ventajas de estas baterías radica en su capacidad de ser recargadas a altas tasas, además de poseer una alta cantidad de ciclos de carga. También cuentan con una buena

potencia específica pero en el aspecto de energía específica y costo presenta desventajas, ya que en sí es la tecnología que tiene el costo más elevado.

Otra ventaja es que tiene un buen comportamiento a bajas temperaturas, a diferencia de las otras tecnologías, alcanzado una capacidad del 80 % de su valor nominal a $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. [36]

Características

- Ciclos de carga: 4000 .
- DOD máximo: 100% .
- Costo: \$600-2000 (\$/ kWh). [36]
- Energía específica : 70-80 Wh/kg. [36]
- Potencia específica : 750 W/kg. [36]
- Corriente de descarga recomendada: 10 A (1 C). [27]
- Corriente de descarga máxima : 150 A (15C). [27]
- Tiempo recomendado de carga: 1.5 hrs (C). [27]
- Tiempo mínimo de carga: 0.25 (5 C). [27]

Vehículos comerciales

- Mitsubishi MiEV

3.1.4 Supercondensadores

Este tipo de condensadores, también llamados condensadores electroquímicos de doble capa, almacenan carga en una doble capa electroquímica en la interfaz que componen el electrolito y el electrodo. Debido al área de la superficie de los electrodos, así como lo pequeño del espesor de la doble capa, su capacitancia es mucho mayor que los condensadores comunes (de hasta 20 veces), lo que permiten almacenar más energía.

Los supercondensadores poseen su principal ventaja en el tiempo de carga, así como también poseer una potencia específica mayor a cualquier otra tecnología de almacenamiento estudiada. Además se podría considerar que tiene la vida útil más larga, ya que los ciclos de carga que puede alcanzar pueden llegar a ser de cientos de miles [12]. En lo que respecta a su principal desventaja, esta recae en la energía específica que es de 10 a 50 veces

menor a la que posee una batería basada en ion de litio.

En lo que se refiere a su proceso de carga, este tipo de tecnología no posee ningún problema con la sobrecarga, y tampoco requiere de ningún mecanismo de detección de carga completa, ya que la corriente simplemente deja de circular cuando se presenta esta situación.

Debido a sus características se utilizan en aplicaciones de alta demanda de potencia, así como en otras en donde sea posible la recarga de forma constante, ya que posee poca energía específica, pero una alta velocidad de carga.

Características

- Ciclos de carga: 1 000 000 .
- DOD máximo: 100% .
- Costo: \$10 000 (\$/ kWh).
- Energía específica : 5 Wh/kg. [7]
- Potencia específica : 1000-2000 W/kg. [7]
- Corriente de descarga recomendada: 10 A (9 C) . [23]
- Corriente de descarga máxima : 1900 A (1727 C) . [23]
- Tiempo recomendado de carga: 1.5 h (2 C). [7]
- Tiempo mínimo de carga: 0.008 h (120 C). [7]

Vehículos comerciales

- No se utiliza esta tecnología de almacenamiento como la principal fuente de energía , sino como un suministro auxiliar para determinadas funciones en vehículos eléctricos.

3.2 Tabla de resumen

La tabla 4.1 sintetiza la información recolectada de la distintas tecnologías de almacenamiento, como forma de comparación entre estas.

Tabla 3.1: Comparación de las tecnologías de almacenamiento

	Plomo ácido	Níquel-metal hidruro	Níquel Zinc	Níquel Cadmio	Fosfato de hierro y litio	Óxido de litio níquel manganeso cobalto	Titanato de litio	Supercondensadores
Abreviatura	-	NiMH	NiZn	NiCd	LFP	NMC	LTO	-
Ciclos de carga	200	500-1000	100-500	500	1000-2000	1000-4000	4000	1 000 000
DoD máximo	80%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Costo (\$/kWh)	100-150	300	100-300	200-300	400-700	500-900	600-2000	10 000
Energía específica (Wh/kg)	35-50	50-110	70-110	50-80	80-130	140-180	70-80	5
Potencia específica (W/kg)	80-300	200-2000	2000	200-500	1400-2400	500-3000	750	1000-2000
Corriente de descarga recomendada (A)	C/10	C/2	1C	C/2	1C	C/5	1C	9C
Corriente de descarga máxima (A)	3C	3C	10C	C/1.4	4C	3C	15C	1727C
Tiempo recomendado de carga	12-16 h (@C/10)	10 h (@C/10)	1.5 h (@1C)	16-20 h (@0.1C)	3 h (@C/2)	5 h (@C/5)	1.5 h (@1C)	1.5h (@1C)
Tiempo mínimo de carga	3 h (@C/3)	1.5 h (@1C)	0.75 h (@2C)	1.5 h (@1C)	1.5 h (@1C)	1.5 h (@1C)	0.25 h (@5C)	0.008 h (@120C)

3.3 Elección de tecnología de almacenamiento

Es posible realizar la escogencia de la tecnología de almacenamiento que cuente con las mejores características teóricas técnicas, económicas y de accesibilidad comercial para una conversión de un vehículo de combustión interna a uno eléctrica, basado en una comparación que escala las características de las opciones estudiadas. Esta herramienta comparativa consiste en establecer una puntuación para cada tecnología estudiada, para las características de potencia específica, energía específica, ciclos de carga, precio y disponibilidad comercial. Cada una de estas con el mismo peso sobre el puntaje total. La suma del puntaje en cada característica dimensionará su capacidad de ser la adecuada

para utilizarse en la conversión, en comparación con las demás opciones.

El sistema de puntaje utilizado es de 1 a 4, siendo 1 el valor que representa una característica deficiente, y siendo 4 el valor óptimo. Por ejemplo, para el caso del costo de la tecnología, 4 sería el valor para la tecnología con el costo menor, y 1 para aquella con el costo más elevado. En el caso de potencia específica, energía específica y ciclos de carga, se decide trabajar el puntaje basado en rangos de desempeño para cada característica. La tabla 3.2 muestra la distribución de la puntuación en cada una de las características tomadas en cuenta, para cada una de las tecnologías estudiadas.

Tabla 3.2: Comparación con puntaje de las distintas tecnologías de almacenamiento

	Plomo ácido	NiMH	NiZn	NiCd	LFP	NMC	LTO	Super-condensadores
Ciclos de carga	1	2	1	2	3	3	4	4
Costo	4	3	4	3	2	2	1	1
Energía específica	1	3	3	2	4	4	2	1
Potencia específica	1	2	3	1	3	4	2	4
Facilidad de adquirir	4	3	1	2	4	3	1	2
Total	11	13	12	10	16	16	10	12

La tabla 3.2 demuestra que ninguna tecnología es capaz de alcanzar el puntaje máximo, esto porque no existe la tecnología ideal técnicamente ni que sea la más accesible en términos económicos. Cada una posee puntos fuertes y débiles, pero son aquellas opciones cuyos aspectos más deficientes no presenten una diferencia considerable con el caso óptimo las que poseen la mejor puntuación. De esta forma las tecnologías NMC Y LFP, se presentan como la mejor opción tomando en cuenta las características comparadas. Para el caso de la tecnología NMC, posee las mejores valores teóricos en potencia específica y energía específica, además de un número aceptable de ciclos de carga. La tecnología LFP es una opción fuerte, ya que si bien no posee las mejores características previamente citadas, tiene los segundos mejores, con la ventaja respecto a la tecnología NMC de tener un costo menor. Este factor económico puede condicionar la decisión final para la elección de la tecnología para la conversión, debido a que dependiendo de las especificaciones de desempeño que se deseen alcanzar, junto con la capacidad económica, condicionan dicha elección.

También se demuestra por qué las tecnologías de ion de litio dominan el mercado de vehículos eléctricos, ya que aún contando con el precio más elevado entre las tecnologías en estudio, son las únicas capaces de proporcionar opciones de desempeño comparables con lo que ofrecen los vehículos de combustión. Además, como en próximos capítulos se expondrá, la tecnología de ion de litio LFP es la más usada en caso de conversiones

eléctricas por personas particulares, debido a su accesibilidad comercial y económica.

Capítulo 4

Analisis de metodos y equipo necesario para la carga de las tecnologías de almacenamiento de energia electrica identificadas

4.1 Métodos de carga de las tecnologías de almacenamiento

4.1.1 Carga de corriente constante (CC)

Es un método muy simple que consiste en aplicar una corriente constante regulada durante todo el proceso de carga. Este proceso termina en el momento en que la tensión empieza a disminuir. Una vez que termina este proceso normal de carga, se procede a utilizar una carga de mantenimiento (TC, tickle charging). Esta carga consiste en suministrar una corriente de entre 0.1 C a 0.01 C, con el fin de mantener cargada la batería en su capacidad máxima para contrarrestar las pérdidas producidas por la auto descarga. [6]

Lo que se refiere al tiempo de carga con este tipo de algoritmo, este dependerá de la corriente suministrada. Pero es necesario saber que si bien una corriente alta de carga disminuye el tiempo del proceso, lo hará con una eficiencia menor. En el caso de utilizar una corriente baja de carga, la eficiencia será mayor, a costa de un mayor tiempo.

Para aplicar este método es necesario contar con un sensor de temperatura que monitoree continuamente a la batería, con el fin de que si se supera un valor límite, el proceso de carga se detenga o se disminuya la tasa de carga. Además es necesario contar con un

sensor de tensión, que permita identificar la caída de la misma para finalizar el proceso de carga.[6]

Tecnologías de almacenamiento en las que se puede aplicar

- Níquel cadmio (NiCd) .
- Níquel zinc (NiZn).
- Níquel metal hidruro (NiMH).

4.1.2 Carga de tensión constante (CV)

Este método de carga es otra opción simple y altamente utilizado en las baterías de plomo ácido, que consiste en aplicar un voltaje regulado y constante. En este caso la corriente máxima depende de la corriente a la que se encuentra limitada el cargador. Posteriormente, la corriente de carga disminuye de forma gradual, debido a la disminución de la aceptación de carga que origina la carga progresiva [6]. La finalización de la carga ocurre cuando dicha corriente se encuentra invariante por un lapso de 3 horas.

La elección de la tensión de carga varia el tiempo de carga, ya que una mayor tensión provoca que la batería se alimente a la corriente máxima del cargador por mas tiempo, lo que lleva a que en las primeras horas de carga se haga a mayor potencia.[6]

Además es necesario contar con un sensor de temperatura para la batería, con el fin de evitar cualquier daño permanente a esta, por la superación del límite proporcionado por el fabricante. Además un sensor de corriente es indispensable para finalizar el proceso de carga.

Tecnologías de almacenamiento en las que se puede aplicar

- Plomo ácido.
- Basadas en ion de litio (LFP, NMC, LTO)

4.1.3 Carga de corriente constante-voltaje constante (CC/CV)

Este método de carga es una combinación de los métodos de corriente constante y tensión constante, que busca reunir las ventajas de estos. Consiste en empezar el proceso con una razón de carga alta en las sección de CC, y termina con un voltaje regulado en la sección CV que limita la sobrecarga de la batería.

La primera corriente de carga regulada se aplica hasta que la tensión de la batería alcance un voltaje preestablecido, lo que normalmente es su voltaje nominal definido por el fabricante. A partir de este punto el voltaje de carga se establece a esta voltaje preestablecido, lo que provoca que la corriente disminuya de manera exponencial. Este proceso de carga culmina cuando la corriente alcance un valor establecido, que depende de la tecnología de almacenamiento, ya que en el caso de ser una batería de plomo ácido, se recomienda terminar el proceso con una corriente de 0.001 C, y para las basadas en ion de litio en 0.01 C [6]. Este proceso se puede observar gráficamente en la figura 4.1, el cual corresponde a un ejemplo aplicado a una batería de plomo ácido.

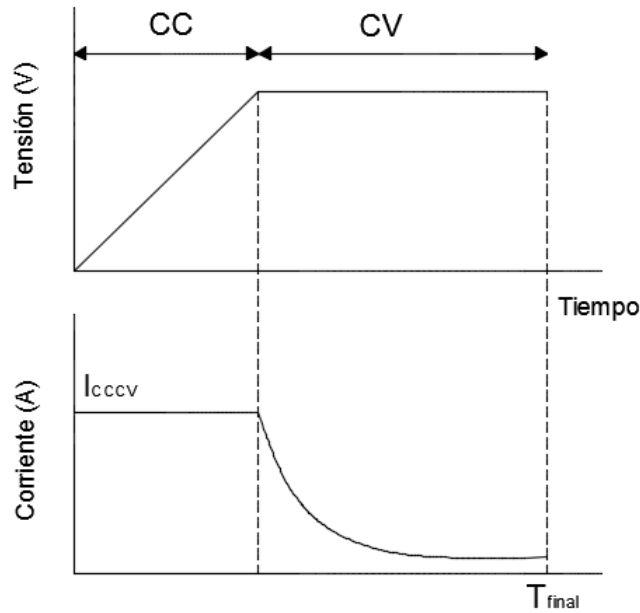


Figura 4.1: Perfil de la tensión y corriente de carga del método CC/CV
Basado en: [6]

En lo que respecta a los instrumentos de medición necesarios para garantizar el funcionamiento y seguridad de éste proceso de carga , se requiere un sensor de temperatura, corriente y tensión. Si bien tiene ventajas en lo que respecta a la simplicidad del método, que facilita la implementación de un control, tiene la desventaja de que el periodo de voltaje constante representa un aumento del tiempo de carga.[6]

Tecnologías de almacenamiento en las que se puede aplicar

- Plomo ácido.
- Basadas en ion de litio (LFP, NMC, LTO)

4.1.4 Carga de múltiples escalones con corriente constante (MSCC)

El objetivo de éste método de carga es reducir la amplitud de la corriente de carga en múltiples pasos o escalones, con el fin de aumentar la eficiencia de carga y disminuir la posibilidad de sobrecargas. Esta idea de la reducción de la corriente constante en escalones se presenta por la reducción gradual de la capacidad de aceptar carga por parte de la batería a medida de que se recarga. [6]

Para el caso de tecnologías de almacenamiento basadas en níquel, se han investigado utilizando 3 escalones de corriente continua . Estos escalones poseen corrientes de 1 C, 0.5 C y 0.14 C. En el caso de los primeros 2, los de mayor amplitud, su culminación se encuentran determinada por la tensión preestablecida como nominal. El ultimo escalón de corriente termina cuando ocurre un cambio de temperatura predefinido, culminando con el proceso de carga [6] . Esto es posible observarlo gráficamente en la figura 4.2, la cual muestra que una vez acabado el proceso de carga, se opta por aplicar una carga de mantenimiento.

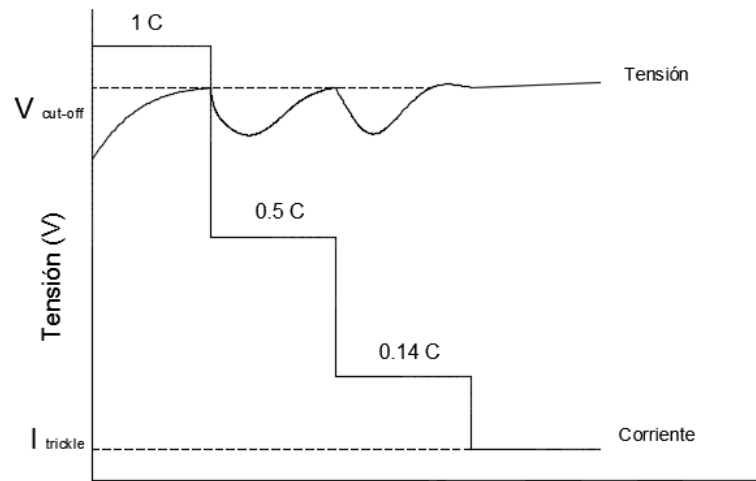


Figura 4.2: Perfil de carga MSCC con 3 pasos, para una batería de níquel.
Basado en : [6]

En el caso de las tecnologías de ion de litio, se pueden utilizar 4 escalones de corriente continua, cuyas amplitudes dependen del método utilizado para establecer los valores óptimos para la carga de la batería. Además es necesario conocer en tiempo real estado de carga (SOC) de la batería, ya que este es el indicador de la variación de la corriente constante y al alcanzar el 25 %, 50 %, 75% y el 100% del estado de carga, ocurrirá dicha variación [6]. Este proceso se muestra en la figura 4.3.

Al comprar este método de carga con un método como el CC/CV, es posible obtener una mejor eficiencia de carga y una mayor velocidad de carga .

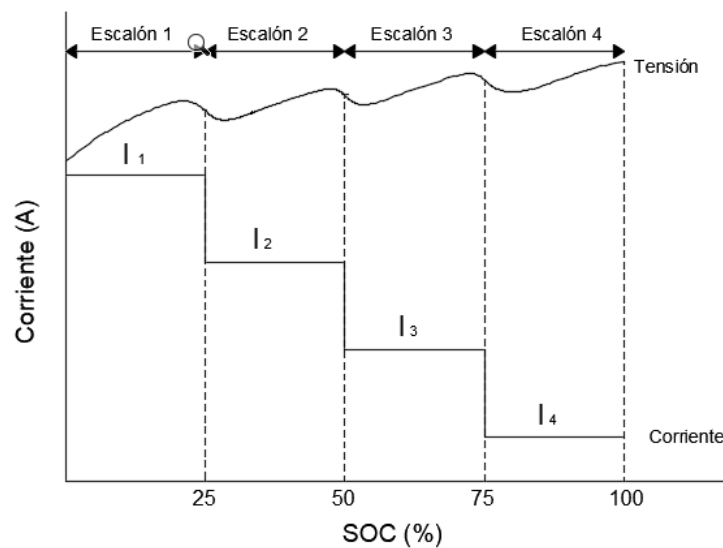


Figura 4.3: Perfil de carga MSCC con 4 escalones para baterías de ion de litio.
Basado en: [6]

Tecnologías de almacenamiento en las que se puede aplicar

- Plomo ácido.
- Basadas en Níquel (Ni-MH, Ni-Cd, Ni-Zn).
- Basadas en ion de litio (LFP, NMC, LTO).

4.1.5 Carga por pulsos (PC)

Este método de carga se ha tomado en cuenta como una opción para las cargas rápidas y se clasifican en 2 tipos, de pulsos con voltaje constante (CV-PC) y con corriente constante (CC-PC). El método CV-PC consiste en mantener en una amplitud constante, el pulso de tensión de carga, y ajustar ya sea la frecuencia o el ciclo de trabajo de dicho pulso para obtener un valor de corriente de carga deseado. Este valor de corriente será el máximo posible de alcanzar con la menor impedancia posible. Los resultados obtenidos con este método han demostrado que es posible alcanzar una carga en un menor tiempo, con una mejor eficiencia de carga y sin impactar tanto en los ciclos de carga de la batería como el método de CC/CV. [6]

En el caso del método CC-PC, se basa en mantener la amplitud del pulso de la corriente constante, mientras se monitorea la tensión de la batería para asegurarse que no supere el voltaje máximo establecido. La potencia utilizada en el método se modifica variando el tiempo en alto y en bajo del pulso, logrando minimizar el tiempo de carga cuando se logra tener el menor tiempo en bajo del pulso. Pero disminuir este tiempo tiene su riesgo, ya que este tiempo en bajo, también llamado tiempo de descanso, le permite a las acciones químicas internas de la batería estabilizarse, equilibrando la reacción a lo largo de todo el electrodo antes de iniciar otro estado en alto de la corriente de carga [6]. Por lo que un desconocimiento del límite de tiempo de descanso a una corriente de carga dada, puede llegar a dañar la batería. También se debe recordar que las altas tasas de carga (C-rate) afectan de forma negativa los ciclos de carga restantes.

La característica positiva de este método es la capacidad de utilizar corrientes elevadas para disminuir el tiempo de recarga con una eficiencia de carga alta, ya que la utilización de este tipo de corrientes sin el tiempo de descanso que ofrece la características de los pulsos, no permite la estabilización gradual de los elementos activos de la batería, lo que lleva a dañarla. [6]

Tecnologías de almacenamiento en las que se puede aplicar

- LFP.
- NMC.
- LTO.

4.2 Infraestructura de carga de vehículos eléctricos

El equipo necesario para cargar un vehículo eléctrico se compone de las estaciones de carga disponibles ya sea en los hogares o lugares de acceso público, así como también por el sistema de carga del vehículo , también llamado cargador. Este ultimo sistema puede ser dividido en 2 tipos principales, uno de ellos se caracteriza por ubicarse dentro del vehículo (on-board) y el otro por ubicarse en la estación de carga (off-board). [32]

El hecho que el sistema de carga se encuentre dentro del vehículo, limita las propiedades de potencia que es capaz de sobrellevar, esto porque necesitan ser equipos no tan robustos que deben cumplir con características de peso y tamaño para adaptarse al diseño del vehículo. Aunque también tiene la ventaja de tener un costo menor, y mas accesibilidad a puntos de recarga, ya que solo es necesario contar con una fuente de alimentación monofásica o trifásica y una estación de carga simple, como lo son las enfocadas en usos domiciliarios y cuyo costo puede acercarse a los \$ 2 000. [15]

El cargador ubicado en las estaciones de carga suministra una salida en corriente continua, aplicable directamente a la batería del vehículo. Al ubicarse fuera del auto, permite tener mas flexibilidad en lo que respecta a peso y tamaño, con lo que se asocia a una mayor potencia, y por lo tanto es capaz de alcanzar tiempos de carga muy bajos [32]. Pero hay que tener en cuenta que el precio es muy elevado y puede alcanzar los \$ 64 000 [15] , lo que limita la distribución de este tipo de estaciones.

La potencia que es capaz de suministrar las estaciones de carga comerciales se encuentran estandarizada por la norma SAE J1772 en 3 niveles, siendo el nivel 1 el de menor potencia y por lo tanto el que requiere más tiempo para una carga completa del vehículo [38] . Además estos niveles llevan a una diferenciación en el tipo de sistema de carga del vehículo, siendo el nivel 3 el único en donde el cargador se encuentra en la estación de carga. La tabla 4.1 expone las especificaciones de estos niveles, en la cual es posible observar que los niveles también tienen asociadas ciertas ubicaciones recomendadas, que dependen de la capacidad eléctrica de dichos lugares.

Tabla 4.1: Características de niveles de potencia de carga.

Tipos de nivel de potencia	Ubicación del cargador	Nivel de potencia esperado (kW)	Tiempo de carga (h)	Tecnología del vehículo)
Nivel 1 120 VAC (US) 230 VAC (EU)	On-board 1-fase	1.4 (12 A) 1.9 (20 A)	4 - 11 11 - 36	PHEV's (5-15 kWh) EV's (16-50 kWh)
Nivel 2 240 VAC (US) 400 VAC (EU)	On-board 1- o 3- fases	4 (17 A) 8 (32 A) 19.2 (80 A)	1 - 4 2 - 6 2 - 3	PHEV's (5-15 kWh) EV's (16-30 kWh) EV's (30-50 kWh)
Nivel 3 (208-600 VAC/VDC)	Off-board 3-fases	50 100	0.4 - 1 0.2 - 0.5	EV's (20-50 kWh)

Fuente: [38]

Es necesario especificar que no todos los vehículos eléctricos comerciales son compatibles con el nivel 3 de carga, actualmente pueden ser cargados con esta potencia el BMW i3, Chevrolet Spark EV, Mitsubishi i-Miev, Nissan LEAF y el Tesla modelo S. [38]

En lo que respecta a la estructura y subsistemas que componen el sistema de carga del vehículo, estos se encuentran diferenciados entre los niveles de potencia, y por lo tanto, por la ubicación donde sucede la rectificación a corriente directa, ya sea en la estación de carga o en el vehículo. También se puede deducir que el equipo necesario para los niveles 1 y 2 siempre será necesario en todo vehículo eléctrico, ya que aunque exista la posibilidad de utilizar un sistema de carga que proporcione corriente directa como salida, esto no supondrá que esté siempre accesible, y se necesite de los primeros niveles de potencia para realizar el proceso de recarga.

El sistema de carga dentro del vehículo, recibe la corriente alterna de la estación y se encarga de realizar la rectificación en el mismo vehículo. Esta compuesta por el sistema de gestión de la batería (BMS, por sus siglas en inglés), el cual su complejidad es acorde con las funciones que tiene que realizar, ya que es la encargada de monitorear aspectos de seguridad como lo es la temperatura, corriente y tensión en la batería [6]. Además debe estimar el estado de carga de la batería y realizar un balance de carga entre las celdas, ya que al ser un banco de estas, algunas de ellas pueden sufrir un desgaste mayor que se maximiza por cada ciclo de carga, lo que requiere ser compensado cuando se recarga la batería. [20]

El BMS también posee una función de comunicación, ya que una vez pasada la etapa de rectificación, la unidad de control de potencia del cargador recibe información del BMS para conocer el método de carga que se utilizará, el cual tiene características de corriente y tensión específicas. Otra etapa de comunicación se presenta entre la estación de carga y el sistema de gestión, ya que deben darse autorizaciones para que se pueda dar el intercambio de energía. Esto quiere decir que sin esta unidad de gestión, sería imposible utilizar las estaciones de carga públicas, ya que es necesaria esta comunicación para que se de la transferencia de energía. Además, si en el proceso de carga ocurre alguna anomalía detectada por el sistema de gestión de la batería, este deberá activar el protocolo de protección.

Para el caso de utilizar el nivel de mayor potencia (nivel 3), la salida de la estación de carga ya es en corriente directa, lo que exenta de algunas funciones al cargador interno que posee el vehículo. Si bien la estación de carga se encarga de la fase de rectificación y control de potencia, no se puede ignorar las características y necesidades de la batería del vehículo. Es aquí donde se necesita de la comunicación entre el sistema de gestión de la batería del vehículo y la estación de carga, con el fin de definir las características de la alimentación que suministra la estación, basadas en el estado de la batería y el método de carga definido de esta.

Capítulo 5

Analisis de casos de transformaciones de vehiculos de combustion interna a electricos.

5.1 Conversión en la universidad de Zagreb , Malasia

Características del vehículo

- Vehículo: Opel Kadett C (1978).
- Peso: 780 kg.



Figura 5.1: Vehículo Opel Kadett C 1978 (c), Joost Bakker, CC BY 2.0 .

Fuente: [3]

La elección del vehículo en esta conversión se basó en la búsqueda de un carro liviano (casi la mitad del peso establecido como máximo para la conversión en estudio), lo que es una característica que influye directamente en la velocidad que pueda alcanzar el vehículo

con un motor determinado y que llega a afectar el alcance que puede lograr el vehículo con una carga completa de sus baterías.

Otro aspecto positivo de la elección de dicho vehículo es que posee tracción trasera, por lo que permite un mayor espacio en la zona del motor. Esto es importante porque en esta conversión deciden colocar parte del banco de baterías en dicho compartimiento, junto con el inversor de potencia y el convertidor DC/DC. [35]

La tecnología de almacenamiento con la que cuenta el vehículo es de ion de litio, específicamente la de fosfato de hierro y litio (LFP) la cual posee una de las mejores relaciones de precio/rendimiento entre las tecnologías de almacenamiento estudiadas. En el caso específico de esta conversión, las celdas que constituyen el banco poseen una tensión de 3.2 V. El banco completo, el cual está compuesto por 32 de estas celdas, posee una tensión nominal de 102.4 V, así como una capacidad de 100 Ah. Tomando en cuenta el peso del banco, que es de 108 Kg, es posible calcular una energía específica de 95 Wh/kg, y tomando en cuenta que es capaz de suministrar una corriente máxima de 2000 A durante 5 s, se obtiene una potencia específica de 1896 W/kg. Estas cifras se encuentran entre los rangos para dicha tecnología obtenidos en informes pasados. [35]

Es necesario especificar que las baterías cuentan un sistema de monitoreo (BMS), el cual se encontraba integrado con el banco de baterías al momento de ser adquirido, y su función en el aspecto de seguridad y mantenimiento de estas es importante. Además posee un cargador dentro del vehículo (on-board), el cual se encarga de ejecutar el método de carga adecuado para la batería que se utilizó.

En el recorrido en el que fue evaluado el vehículo, éste tuvo un alcance de 82 Km y con una velocidad promedio de 33,8 Km/h. Este recorrido tenía la característica de un cambio de altitud de alrededor de 859 m, teniendo una sección en ascenso y otra en descenso, por lo que esto afecta el desempeño de la batería de forma directa. Pero el hecho de que el inversor utilizado pueda operar en los cuatro cuadrantes, le permitía suministrar energía a la batería por medio del sistema de freno regenerativo, útil en la sección de descenso. Esta característica le permitió cargar la batería 14 Ah durante unos 15 Km de descenso. [35]

Comparando el vehículo de esta conversión con un vehículo comercial como el Nissan Leaf, el cual posee una batería de 30 kWh y autonomía de 172 km, el vehículo convertido posee una batería con una capacidad 3 veces menor, pero es capaz de alcanzar la mitad de autonomía que ofrece el auto comercial. Aunque es necesario tener en cuenta que puede tener limitaciones respecto a los tiempos de carga, así como a la velocidad máxima a la que puede desplazarse.

Características del desempeño del vehículo

- Velocidad promedio: 33.8 km/h .
- Autonomía: 82 Km .
- Energía de la batería: 10 kWh .
- Tecnología de almacenamiento : Fosfato de hierro y litio (LFP).
- Energía necesaria por kilómetro: 121 Wh/km .

5.2 Conversión de Suzuki Swift en Alberta, Canada

Características del vehículo

- Vehículo: Suzuki Swift GT 1991
- Peso: 810 kg.



Figura 5.2: Vehículo Suzuki Swift GT 1991 (c), Rudolf Stricker, CC0 .

Fuente: [31]

El vehículo utilizado en esta conversión puede ser considerado liviano, ya que es una característica de los vehículos “hatchback”. Estos tipos de autos cuentan con una carrocería que tiene unida la cajuela con la cabina de pasajeros. Debido a esto es entendible que la cantidad total de pasajeros después de la conversión se vea reducido a 2, debido a la colocación de las baterías en el espacio dedicado a los pasajeros traseros.

Las baterías utilizadas son de plomo ácido, y dicho banco está conformado por 6 baterías de distintos fabricantes pero todas de 12 V, para un total de 72 V [34]. En total el banco posee una energía de 5 kWh, y tomando en cuenta el peso total de este que es de 160 kg, es posible calcular la energía específica que es de 31 Wh/kg. Este dato está un poco por

debajo de los promedios esperados para esta tecnología, el cual es como mínimo de 35 Wh/kg, por lo que siendo la tecnología con la peor relación de energía empeora aún más las condiciones de peso por cada kilovatio de energía que se desea alcanzar en esta conversión.

El cargador utilizado es específico para el tipo de batería de plomo ácido, y está especificado para la tensión total del banco, con 5 A como su corriente máxima. Este no posee ningún conector estandarizado, como por ejemplo el J1772, sino que consiste en conectar las terminales del cargador en las baterías y conectarlo mediante un enchufe americano a la red doméstica (120 VAC). Debido a estos valores de tensión, es posible catalogar el cargador de tipo 1.

Otro aspecto a tomar en consideración es que no se utiliza ningún tipo de sistema de monitoreo de batería (BMS), por lo que es difícil tener un control del estado de carga (SOC) de las baterías en tiempo real durante un viaje, además de no tener ninguna alerta de seguridad ante algún problema o sobre descarga de la batería. En lo que respecta al desempeño de la conversión, se ve limitado a un máximo de 35 km, lo que condiciona el uso normal del carro a rutas cortas. Además cuenta con una velocidad máxima 88 km/h.

En resumen, el vehículo cuenta con limitaciones de autonomía, que en primera instancia puede considerarse contrarrestar con un aumento de la energía disponible con más baterías, pero llevaría a un aumento del peso total. El cual, después de la conversión, alcanzó 50 kg de más con respecto al peso original del auto, por lo que sobrecargar el chasis aun con más baterías podría representar un riesgo estructural. Además de que el peso afecta directamente la capacidad de aceleración del vehículo [21]. De esta forma es posible comprobar que la utilización de baterías de plomo ácido no resulta una opción tan viable aún con las ventajas en términos de precio.

Características del desempeño del vehículo

- Velocidad máxima: 88 km/h .
- Autonomía: 35 Km .
- Tecnología de almacenamiento : Plomo ácido
- Energía de la batería: 5 kWh .
- Energía necesaria por kilómetro: 142 Wh/km .
- Costo estimado de la conversión: \$ 8000 .

5.3 Conversión Mazda RX8 en Western, Australia

Características del vehículo

- Vehículo Mazda RX8 2006
- Peso: 1373 kg.



Figura 5.3: Vehículo Mazda RX8 2006 (c), Rudolf Stricker, CC BY-SA 3.0 .

Fuente: [30]

El vehículo tiene la característica de ser un auto deportivo con 4 puertas, el cual es posible catalogarlo como un sedan, debido a que tiene la sección de pasajeros diferenciada con la del cargamento trasero. En lo que respecta a su peso es posible referirlo como uno pesado, debido a la cercanía con el límite de 1600 kg que se establece como el caso de estudio del proyecto. Al igual que en otros casos, el vehículo ve reducido la cantidad de pasajeros a solo 2 personas debido a la necesidad de colocar las baterías en los asientos traseros y en la parte del cargamento trasero. Además es necesario ocupar parte del volumen delantero.

Esta distribución de las baterías se debe a la gran cantidad de celdas requeridas, que en total suman 90 de fosfato de hierro y litio (LFP) de 3.20 V con capacidad de 100 Ah [17]. Lo que da un equivalente de casi 30 kWh ,y con un peso total del banco de 288 kg, es posible obtener una energía específica de 104 Wh/kg, lo que se encuentra entre los rangos estudiados para este tipo de tecnología. Además el banco es capaz de suministrar un máximo de 1000 A, lo que equivale una potencia específica de 1000 W/kg, que esta por debajo de los rangos esperados.

El cargador utilizado proporciona una potencia de 2 kW, por lo que es de nivel 1 y está equipado con el conector J1772, por lo que es posible utilizar estaciones de carga comerciales. Además el banco de baterías posee una sistema de monitoreo (BMS) que se puede adquirir comercialmente, y que interacciona con cada celda por individual, lo que ayuda a equilibrar la carga en cada una de ellas. Esto porque en el proceso de carga y descarga de las celdas que componen un banco de baterías, cada una puede llegar a tener un

comportamiento diferenciado, provocando variaciones en el estado de carga de las celdas y por tanto, afectando la vida útil.

En lo que respecta al rendimiento, posee un alcance con una sola carga completa de 160 km, con una velocidad promedio de 80 km/h. Además puede alcanzar una velocidad máxima de 144 km/h. Estas características representan una semejanza con las presenta el Nissan Leaf , aunque posea limitaciones en tiempos de carga y en el espacio interno disponible.

Si bien la cantidad de baterías logran una autonomía considerable, también representan un aumento de la masa final del vehículo después de la conversión, ya que esta se vio aumentada en 227 kg con respecto al modelo original. Es posible concluir que si bien se tiene la conversión con la mayor cantidad de energía entre las estudiadas, también posee la segunda relación más alta entre la energía requerida para impulsar cada kilómetro de viaje, lo que esta ligado al peso de más que necesita impulsar.

Características del desempeño del vehículo

- Velocidad máxima: 130 km/h .
- Autonomía: 160 Km .
- Tecnología de almacenamiento : Fosfato de hierro y litio (LFP)
- Energía de la batería: 30 kWh .
- Energía necesaria por kilómetro: 187.5 Wh/km .
- Costo estimado de la conversión: \$ 19800 .

5.4 Conversión Holden Barina en Melbourne, Australia

Características del vehículo

- Vehículo: Holden Barina City, Sb. Modelo 2000 .
- Peso: 873 kg.



Figura 5.4: Vehículo Holden Barina City 2000 (c), OSX, CC0.

Fuente: [25]

El Holden Barina es un vehículo de tipo hatchback, que por lo general son livianos, la cual es una característica que se busca para tener una buena autonomía sin un gasto económico excesivo. La parte negativa de estos vehículos es la necesidad de limitar la cantidad de pasajeros a 2, debido a la falta de espacio por la unión entre la cabina de pasajeros y el baúl trasero, cuyo espacio es muy reducido. Esto provoca que el banco de baterías ocupe todo el espacio de la segunda línea de pasajeros, ya que esta fue la ubicación elegida para colocar la unidad de almacenamiento de energía en esta conversión.

La tecnología de almacenamiento es de ion de litio, con el cátodo de fosfato de hierro y litio (LFP) . En total se utilizaron 45 celdas de 100 Ah y 3.2 V cada una, conectadas en serie para un total 144 V y una energía total disponible de 14.4 kWh [13]. El peso final del banco de baterías alcanza los 145 kg, lo que permite obtener un valor aproximado de energía específica de 99.3 Wh/kg, que es un valor normal para este tipo de tecnología. En lo que respecta a la potencia, la corriente de descarga máxima es de 1000 A, lo que posibilita una potencia específica de 993 W/kg.

El cargador utilizado es el TCCH-144-15, el cual se encuentra instalado dentro del auto (on-board) y puede tener una entrada de 120 Vac o 240 Vac, pero solo es capaz de suministrar 2 kW de potencia, por lo que es posible catalogarlo como de nivel 1 [14]. Aunque en lo que se refiere a condicionar el auto para los cargadores comunes de vehículos

eléctricos, esto no se logra, ya que no posee ningún adaptador que adecue la utilización de un conector estandarizado. Este cargador posee la ventaja de tener integrado el protocolo de comunicación CAN bus, lo que le permite comunicarse con el sistema de monitoreo de la batería (BMS). Esto es aprovechado en esta conversión, ya que se implemente un BMS de la compañía ZEVA, el cual permite un monitoreo en tiempo real, permitiendo visualizar información respecto al estado de carga (SoC) del banco de baterías, así como temperatura, corriente y tensión de las celdas, ya sea de forma individual o en la totalidad del banco. [39]

La autonomía del vehículo con una carga completa es de 104 km, y es capaz de alcanzar una velocidad máxima de 109 km/h. Además de contar con una aceleración de 0 a 95 km/h en 12 s. De esta forma es posible tener la segunda mejor autonomía entre las conversiones estudiadas con la mitad de la energía en comparación con el caso de la mejor autonomía. Además el hecho de contar con un BMS dedicado, permite contar con opciones de seguridad ante alguna situación de riesgo en el banco de baterías, así como un aumento de la vida útil de estas.

Características del desempeño del vehículo

- Velocidad máxima: 109 km/h .
- Autonomía: 104 Km .
- Aceleración: De 0 a 95 km/h en 12 s.
- Tecnología de almacenamiento : Fosfato de hierro y litio (LFP)
- Energía de la batería: 14.4 kWh .
- Energía necesaria por kilómetro: 138.5 Wh/km .
- Costo estimado de la conversión: \$ 15 800 .

5.5 Conversión Toyota Echo en Washington, Estados Unidos

Características del vehículo

- Vehículo: Toyota Echo de 4 puertas modelo 2002.
- Peso: 932 kg.



Figura 5.5: Vehículo Toyota Echo 2002 (c), TuRbO-J, CC BY 2.0 .

Fuente: [33]

El vehículo utilizado en esta conversión es de tipo sedán con 4 puertas, puede considerarse liviano ya que no supera la tonelada y posee un mayor espacio en la cajuela del que puede ofrecer un auto de tipo hatchback. Esto posibilita que el vehículo después de la conversión todavía mantenga su capacidad de pasajeros en 5. Las baterías se encuentran en un espacio debajo de los asientos traseros y en el maletero, en un compartimiento condicionado por la persona encargada de la conversión. Esto puede ser positivo en lo que respecta a un mayor espacio dentro del vehículo, pero afecta directamente la distribución del peso diseñado para el mismo.

Esta conversión utiliza 13 baterías de plomo ácido como fuente de energía, cada una con una capacidad de 85 Ah, para una tensión total de 156 V y una energía máxima de 13.3 kWh [4]. Este banco posee un peso total de 325 kg, lo equivale una energía específica de 41 Wh/kg, el cual es un valor esperado para este tipo de tecnología de almacenamiento, pero que es mucho mas baja que lo que ofrecen las baterías de ion de litio.

El cargador utilizado es un Zivan NG3.y posee un interruptor interno para adecuarse a distintas tipos de baterías, lo que varía el método de carga que se utiliza. Este cargador es capaz de suministrar una potencia de 2 kW, por lo que es posible ubicarlo como en el nivel 1 de potencia , además de que se encuentra instalado dentro del vehículo (on-board). Aunque en esta conversión no se encuentra con un conector estandarizado, posee un enchufe de 3 pines utilizable en Australia, justo en el comportamiento donde se suministra la gasolina en su versión de motor de combustión y permite que se pueda conectar a la red doméstica.

Si bien en la conversión no se utiliza ningún tipo de sistema de monitoreo de batería (BMS) completo , si cuenta con un instrumento que le permita medir la tensión, corriente y capacidad de la batería, y desplegar dicha información en un monitor.

El rendimiento que posee el vehículo convertido en términos de autonomía es de 48 km y

es capaz de alcanzar una velocidad máxima de 112 km/h. Esto demuestra que la opción de baterías de plomo ácido en conversiones ve muy limitada su autonomía, tomando en cuenta la cantidad de energía que poseen las baterías, que además necesita de mucho mas peso para igualar las cifras de energía que posee una batería de ion de litio por ejemplo. Esto lo corrobora el aumento de hasta 300 kg en el peso total del vehículo después de la conversión, sin tener una cantidad de energía disponible tan alta como en otros casos. [4]

Características del desempeño del vehículo

- Velocidad máxima: 112 km/h .
- Autonomía: 48 Km .
- Tecnología de almacenamiento : Plomo ácido
- Energía de la batería: 13.3 kWh .
- Energía necesaria por kilómetro: 277 Wh/km .

5.6 Cálculo de autonomía aproximada de un vehículo eléctrico

El cálculo de la autonomía aproximada ayuda a corroborar las características que presentan las conversiones previamente analizadas, y también permite dimensionar lo que es posible esperar de una conversión con ciertos parámetros dados. En este cálculo, se toma en cuenta fuerzas de resistencia a la rodadura y al aire, las cuales involucran variables como el peso, velocidad constante del movimiento, y la estructura frontal del vehículo (coeficiente de arrastre) . Estas fuerzas son las que el motor debe de vencer con una potencia específica.

La ecuación para obtener la fuerza de resistencia a la rodadura, la cual aparece cuando un cuerpo que rueda sobre otro, deformándose uno de ellos o ambos, es la siguiente,

$$F_R = C_{rr}gm \quad (5.1)$$

Donde,

- $F_R[N]$: Fuerza de resistencia a la rodadura .
- C_{rr} : Coeficiente de resistencia a la rodadura.
- $g[m/s^2]$: Gravedad.
- $m[kg]$: Masa total del vehículo.

Para calcular la fuerza de resistencia al aire que se produce cuando un objeto, en este caso el vehículo, se mueve a una velocidad relativa con respecto al fluido (aire) que lo rodea, se utiliza la siguiente ecuación,

$$F_D = 0.5\rho v^2 C_D A \quad (5.2)$$

Donde,

- $F_D[N]$: Fuerza de resistencia al aire .
- $\rho[kg/m^3]$: Densidad del aire.
- $v[m/s]$: Velocidad constante del vehículo.
- C_D : Coeficiente de arrastre.
- $A[m^2]$: Área frontal del vehículo.

Para calcular la potencia mecánica que necesita ser suministrada por el motor se consideran ambas fuerzas y la velocidad del vehículo, mediante la siguiente ecuación,

$$P_{mec} = (F_R + F_D) \cdot v \quad (5.3)$$

Donde,

$$\begin{aligned}
 P_{mec}[W] &: \text{Potencia mecánica.} \\
 F_R[N] &: \text{Fuerza de resistencia a la rodadura .} \\
 F_D[N] &: \text{Fuerza de resistencia al aire .} \\
 v[m/s] &: \text{Velocidad constante del vehículo.}
 \end{aligned}$$

Tomando en cuenta la eficiencia del motor, es necesario conocer la potencia eléctrica que necesita el motor para suministrar dicha potencia mecánica mediante la siguiente ecuación,

$$P_{elec} = \frac{P_{mec}}{n_m} \quad (5.4)$$

Donde,

$$\begin{aligned}
 P_{elec}[W] &: \text{Potencia eléctrica.} \\
 P_{mec}[W] &: \text{Potencia mecánica.} \\
 n_m[N] &: \text{Eficiencia del motor.}
 \end{aligned}$$

Con el fin de obtener la energía necesaria para mover el vehículo a la velocidad establecida por cada kilómetro, se utiliza la siguiente ecuación,

$$E_{Wh/km} = P_{elec} \cdot \frac{1[h]}{80[km]} \quad (5.5)$$

Donde,

$$\begin{aligned}
 E_{Wh/km}[Wh/km] &: \text{Energía necesaria para recorrer 1 km.} \\
 P_{elec} &: \text{Potencia eléctrica.}
 \end{aligned}$$

Para obtener el valor de la autonomía del vehículo se necesita relacionar la energía total de la batería y la energía necesaria para completar cada kilómetro. Considerando que se utiliza el total de la energía disponible en la batería, se utiliza la siguiente ecuación,

$$R_{DoD100\%} = \frac{E_{bat}}{E_{Wh/km}} \quad (5.6)$$

Donde,

$$\begin{aligned}
 R_{DoD100\%}[km] &: \text{Autonomía del vehículo con una profundidad de descarga del 100\%.} \\
 E_{bat}[Wh] &: \text{Energía disponible en la batería.} \\
 E_{Wh/km}[wh/km] &: \text{Energía necesaria para recorrer 1 km.}
 \end{aligned}$$

Tomando como caso de estudio un Toyota Corolla del año 2010, así como una eficiencia del motor del 90%, se utilizan los valores mostrados en la tabla 5.1.

Tabla 5.1: Valores para el cálculo de la autonomía aproximada de un vehículo eléctrico

Variable	Valor
v	22.22 m/s (80 km/h)
C_{rr}	0.02 [5]
m	1270 kg
g	9.81 m/s ²
A	2.081 m ²
C_D	0.29
ρ	1.225 kg/m ³
E_{bat}	10 kWh
n_m	0.9

La sustitución de estos valores en las ecuaciones previamente expuestas, dan como resultado una autonomía del vehículo de 75.05 km; esto utilizando el 100% de la batería. En el que caso que se desee aumentar la vida útil de la batería se podría optar por realizar el estudio utilizando solo un 80% de profundidad de descarga en cada ciclo, lo que da como resultado una autonomía de 60.03 km. Además el caso en estudio posee la mejor relación, entre los casos de conversión estudiados, de energía necesaria por cada kilometro, con un valor de 133.25 Wh/km, exceptuando la conversión del Opell Kadett C, la cual fue evaluada a una velocidad promedio muy baja (33.8 km/h), lo que ayuda considerablemente en su valor de energía por cada kilómetro. Estas ventajas que posee el caso calculado se explican por las suposiciones tomadas en cuenta en el cálculo, las cuales no suelen darse en los casos prácticos estudiados. Aunque sí es necesario mencionar que el resultado obtenido para el caso teórico se encuentra muy cercado al esperado para un vehículo de tamaño medio en condiciones de autopista, que es de 137 Wh/km en promedio, proporcionado por la “Highway fuel economy test (HWFET)” . [16]

Con estos valores es posible tener un primer acercamiento al posible alcance que pueda tener un vehículo convertido con una carga completa, en este caso con banco de baterías que podría considerarse de una dimensión pequeña, ya que los vehículos comerciales de hoy en día cuentan con una energía mínima utilizable de 20 kWh. Además es posible observar que son valores entre el rango de las conversiones estudiadas, las cuales presentan casos prácticos ya corroborados, por lo que la utilización de esta ecuaciones proporcionan información útil antes de realizar una conversión.

En la tabla 5.2 es posible observar las distintas características de desempeño de las conversiones estudiadas, junto con el caso teórico evaluado. De esta forma es posible comparar las limitaciones que posee utilizar la tecnología de ácido de plomo en una transformación eléctrica, ya que posee la menor autonomía y requiere de una mayor cantidad de energía por kilómetro en los casos donde su velocidad máxima es comparable con las tecnologías de ion de litio. Esto debido a que la masa del banco de batería para una transformación

de plomo ácido es mayor para igualar un valor de energía de un banco de ion de litio, lo que afecta negativamente la autonomía del vehículo eléctrico. Además se ven afectadas de mayor manera por la ley de Peukert, lo que agrava su desempeño ante situaciones de alto consumo de potencia.

Tabla 5.2: Características de desempeño de vehículos convertidos a eléctricos.

Vehículo	Tecnología de almacenamiento	Energía Total (kWh)	Velocidad máxima (km/h)	Autonomía (km)	Energía por km (Wh/km)
Opel Kadett C 1978	LFP	10	33.8 (promedio)	82	121
Suzuki Swift 1991	Ácido de plomo	5	88	35	142
Mazda RX8 2006	LFP	30	130	160	187.5
Holden Barina 2000	LFP	14.4	109	104	138.5
Toyota Echo 2002	Ácido de plomo	13.3	112	48	277
Toyota Corolla 2010 (Teórico)	-	10	80 (constante)	75.05	133.25

5.7 Consideraciones respecto a la ubicación del banco de baterías.

En las conversiones estudiadas, la posición del banco de baterías dentro del vehículo termina siendo una decisión de disponibilidad de espacio y facilidad de colocación, más que de seguridad y de tomar en cuenta el diseño de la distribución del peso con el que fue diseñado el vehículo en su etapa de auto de combustión. Y es que el vehículo está concebido para ser utilizado con una distribución de peso que varía entre los muchos fabricantes de estos, pero se basan en la cantidad de masa que tiene que soportar el eje delantero y el trasero, la cual se debe de buscar mantener lo más que se pueda después de convertir el vehículo. También es necesario recordar que este estudio se restringe solamente a vehículos de tipo sedán.

Una relación común sería la de 50/50, pero se recalca que cada vehículo es diseñado bajo una distribución específica, en la cual la mitad del peso total del vehículo se le atribuye al eje delantero y la otra mitad al eje trasero. Al momento de convertir el vehículo a eléctrico, esta relación es probable que cambie, ya que el vehículo suele ser más pesado dependiendo del tamaño del banco de baterías, además de que es probable tener la mayor concentración del peso en el eje trasero, porque se tiende a aprovechar la cajuela. La

implicación de poseer un exceso de peso en dicho eje, producirá la tendencia a sobrevirar en las curvas y lo que provoca una pérdida del control del vehículo, afectando no solo la maniobrabilidad del auto, sino también la seguridad de los pasajeros. En caso contrario, tener un porcentaje elevado de la masa del vehículo sobre el eje delantero provocará que el auto tienda a subvirar en las curvas.

Los vehículos eléctricos comerciales, distribuyen el banco de baterías de forma equitativa en el espacio que existe entre los 2 ejes, y debajo de los pasajeros, con el fin de tener su centro de masa lo más bajo y centrado posible [21], pero en el caso de una conversión eléctrica eso no es tan fácil de conseguir, ya que el vehículo con el que se trabaja no fue diseñado para estas condiciones. Es por esto que es aconsejable dividir la unidad de almacenamiento, es decir, que el banco de baterías se coloque en 2 ubicaciones para poder distribuir mejor el peso. Una ubicación para colocar parte del banco sería debajo de los asientos traseros, en donde normalmente se ubica el tanque de gasolina. No se aconseja colocarlas en la cajuela, ya que aún cuando el vehículo esta previsto para cargar con un peso extra en esta zona, las baterías podrían exceder dicha previsión, afectando el control del vehículo después de ciertas velocidades [21]. La ubicación debajo de los asientos traseros también permite poder contribuir con la búsqueda de tener el centro de maso en la mitad del vehículo, ya que las baterías se colocarían delante del eje trasero.

La otra parte del banco de baterías se colocaría en el compartimento delantero destinado al motor, ya que en el caso de una conversión, se eliminan muchos componentes en esta sección, además de que existe una diferencia entre las dimensiones del motor eléctrico y el de combustión, lo que permite una mayor disponibilidad de espacio. De esta forma es más fácil intentar mantener la relación entre ejes de la distribución de peso con la que el vehículo fue originalmente diseñado.

El hecho de cómo se fije el banco de baterías al vehículo, así como de la estructura que lo encapsule, son aspectos de seguridad importantes a tomar en cuenta en la conversión. Las baterías deberían estar contenidas en una estructura tal como una caja de acero o aluminio, la cual debe estar prevista para el sistema de enfriamiento del banco. Dicha estructura debe soldarse, además de tener otras fijaciones mecánicas, al bastidor del vehículo, con el fin de mantener la integridad estructural del auto [21]. Además, de que se restringe por completo el movimiento del banco de baterías en todo momento, tomando en cuenta el caso crítico de un accidente en donde la energía cinética del banco, el cual puede tener una masa de hasta 150 kg a una velocidad considerable, representa un riesgo real para los pasajeros, debido a que puede ocurrir el caso en donde ingrese a la cabina de pasajeros por el impacto. Y es debido a esta posibilidad que también se encuentra una ventaja en que el banco de baterías se ubique hundido en el suelo del vehículo, ya que si se diera el caso en donde se desprenda el banco de baterías debido a una colisión, no tendría posibilidad de afectar a los pasajeros, caso contrario que se colocara en la cajuela o en los asientos traseros, a la misma altura que los pasajeros.

Capítulo 6

Propuesta de ubicaciones de estaciones de carga

6.1 Características a considerar de los tipos de estaciones de carga

Las estaciones de carga es posible dividir las en 3 niveles de potencias, según lo hace la norma SAE J1772. Estos niveles varían el tiempo con el que se completa una carga de un vehículo eléctrico dependiendo de la capacidad de su batería. Esto es necesario tomarlo en consideración ya que según sea el tiempo que toma realizar una recarga, este debe adecuarse a la actividad del usuario en el lugar (electrolinera), es decir, influye directamente en la ubicación de la estación de carga.

Tomando como ejemplo un vehículo eléctrico con una batería de 30 kWh, y con una eficiencia de carga del 100% , podríamos esperar un tiempo para realizar una carga completa en el nivel 1 de potencia (2 kW) de alrededor de 15 h. Para el caso de un nivel 2 que posee una potencia de 8 kW, este tiempo se ve reducido a 4-5 h .Aunque este mismo nivel posee otro subnivel de potencia mayor, ya que también es capaz de suministrar 20 kW de potencia, lo que llevaría a completar la carga de un vehículo en un par de horas, Por último, para el caso del nivel 3 de potencia, que es capaz de suministrar 50 kW , puede reducir el tiempo para una recarga completa hasta 0.5 h .[38]

Con estos tiempos es posible notar que no es posible comparar las estaciones de carga eléctrica con las gasolineras, las cuales en un periodo de 5 minutos son capaces de asegurar la autonomía máxima de un carro de combustión interna. Dicha autonomía si bien varía dependiendo de la capacidad del tanque de gasolina, el motor, el peso, entre otros factores, puede asegurar en la mayoría de los casos poder recorrer hasta 500 km con una visita rápida. Este detalle motiva a pensar que el hecho de aplicar el modelo de

las gasolineras, en donde el usuario se mantiene dentro del vehículo y visita el lugar con el único objetivo de recargar combustible, no es del todo viable para las electrolineras o estaciones de carga. Esto porque el usuario no vería factible visitar un lugar durante un mínimo de 30 minutos solamente para recargar su vehículo, a no ser en caso de emergencia.

Debido a esta diferenciación de los tiempos de recarga que posee un vehículo eléctrico, se opta por ubicar la mayoría de las electrolineras en sitios de interés, permitiendo el acceso a estaciones de carga públicas o privadas en estos lugares. Estos sitios de interés, que pueden ser de ocio o de índole laboral, tienen la ventaja de que la persona llega al lugar a pasar un tiempo considerable que le permita cargar su vehículo mientras realiza la visita al lugar. Es por esto que los parqueos ya sean de centros comerciales, públicos, en edificios de oficinas, o estacionamientos en la vía pública, se presentan como la opción idónea para ubicar las estaciones de carga [28]. Ya que para el caso de un estacionamiento en un día de actividad laboral, puede asegurarse que el vehículo se encuentre en este sitio por más de 8 horas, por lo que la utilización de estaciones de carga con un nivel de potencia de 2 (8 kW) le asegura una recarga completa si el caso lo amerita. [37]

Como el estudio está limitado al gran área metropolitana, la cual se puede catalogar como un área urbana, ya se tiene el espacio en estacionamientos en los puntos de interés (centro comerciales, supermercados, edificios de oficinas, universidades), así como estacionamientos públicos independientes de estos puntos. Esto con el fin de adecuar estos parqueos como estaciones de recarga, permitiéndole a varios vehículos de forma simultánea acceder a este servicio. En caso de que se desee salir del GAM a zonas en el país más alejadas, lo cual es un caso que se aleja del objetivo de estudio, se dificulta más aplicar este acondicionamiento a los parqueos, debido a la disminución de dichos puntos de interés en zonas rurales, además de que el sentido de la mayoría de estos viajes largos es llegar al destino sin ninguna interrupción no programada superior a una hora. En estos casos lo más factible es la utilización de estaciones de carga rápida (nivel 3 de potencia) a lo largo del recorrido, que permite recargar el vehículo eléctrico en el menor tiempo posible, ante una detección forzada y necesaria.

Un ejemplo de la distribución de las estaciones de carga en distintos sitios de interés es el de España, que en el año 2015 contaba con aproximadamente 2000 estaciones, de las cuales 515 se encontraban en la vía pública (acceso libre), 437 en parqueos y 200 en centros comerciales. Los restantes se reparten entre hoteles, restaurantes, tiendas, talleres, por lo que están limitados a clientes [2]. Esta distribución corrobora la idea de utilizar espacios de estacionamientos de acceso público como estaciones de recarga.

6.2 Propuesta de las ubicaciones de estaciones de carga

Las posibles ubicaciones se dividen en los tipos de estaciones de carga basados por el nivel de potencia que son capaces de suministrar.

6.2.1 Estaciones de carga con nivel 1 de potencia (2 kW)

Debido al tiempo que toma cargar completamente un vehículo eléctrico con este tipo de nivel de potencia, es lógico pensar que abarcar espacio público para colocar estos cargadores no resulta tan eficiente como realizar una inversión mayor en estaciones con una potencia superior. Debido a esto, su uso se ve limitado a domicilios, también por la característica de su facilidad de transporte y uso, ya que se conecta a cualquier toma corriente estándar de 120 VAC.

6.2.2 Estaciones de carga con nivel 2 de potencia (8 kW)

Para este tipo de estaciones es recomendable usarlos en edificios de oficina, instituciones, empresas y universidades, en donde el parqueo destinado a los empleados, funcionarios o estudiantes sea utilizado como una estación de carga. Esto porque la estancia puede alcanzar las 8 horas, por lo que con este nivel de potencia podría alcanzar la carga completa del vehículo en una jornada ordinaria. Es necesario definir que dichas estaciones de carga serían exclusivas para empleados o funcionarios de la empresa o institución, por lo que su accesibilidad se ve limitada para el público en general. También este tipo de estación puede utilizarse en hogares, y así completar un periodo de carga en el promedio de horas de sueño de una persona (8 h), pero es de esperar que su costo sea mayor a la opción de un cargador de nivel 1.

6.2.3 Estaciones de carga con nivel 2 de potencia (20 kW)

Es recomendable colocar este tipo de estaciones en estacionamientos de sitios donde la visita del usuario sea alrededor de una o varias horas. Estos sitios de interés pueden ser supermercados, centros comerciales, restaurantes, y comercios; esto basados en la idea de adecuar la infraestructura actual con la que cuentan estos locales, es decir, aprovechar sus espacios de estacionamiento y convertirlo parte o la totalidad de estos en estaciones de carga. Esto en muchos de los casos estaría restringido a los clientes de los locales, por lo que la creación de infraestructura pública impulsada por el estado sería necesaria para garantizar el acceso libre al servicio de recarga, tales como nuevas estaciones de carga en

parqueos exclusivos para estos vehículos o el aprovechamiento de los espacios para estacionar en vías públicas, todo estos con la característica de la cercanía con puntos de interés.

6.2.4 Estaciones de carga con nivel 3 de potencia (50 kW)

Este tipo de estaciones de carga requiere de un alto consumo de potencia de la red, por lo que el equipo y costo de operación es muy elevado (alrededor de \$ 64 000, por una estación de carga con un cargador) [15]. Debido a esto su ubicación debe tener el fin de abastecer casos especiales, como lo podría ser un servicio de transporte público, como taxis eléctricos. Para el caso de estos vehículos, los cuales recorren distancias considerables de forma constate, es necesario el acceso a este tipo de estaciones ya que la naturaleza del uso del vehículo lo amerita. Debido a esto es necesario instalar estaciones de carga rápido en las zonas de las vías públicas exclusivas para este tipo de transporte. [22]

Las estaciones de nivel 3 también pueden ocupar espacios en gasolineras, ya que asumiendo un crecimiento en la cantidad de vehículos eléctricos y la disminución considerable de vehículos de combustión, estos centros de servicios contarán con más espacios disponibles. Si bien se mencionó lo poco eficiente que sería para un usuario de un vehículo eléctrico detenerse en su recorrido durante 30 minutos únicamente para recargar por completo su vehículo, esto puede llegar a ser una situación real en el caso de ser realmente necesario. Esto justificaría la utilización de parte de una gasolinera como estación de carga. Además, no es necesario completar la recarga de la batería a su nivel máximo para garantizar la autonomía al destino del usuario, ya que un periodo de 15 minutos (30%-40% SOC) puede garantizar una autonomía de alrededor de 80 km. [22] También es posible utilizar algunos cargadores rápidos en las ubicaciones propuestas de estaciones nivel 2 de potencia de 20 kW, como otra opción viable para la ubicación de estos, prefiriendo siempre que sean minoría con respecto a los de nivel 2 de potencia, con el fin de no sobrecargar la red y disminuir costos.

6.3 Modelo de estimación de la densidad de estaciones de carga requerida (ERDEC, Estimating the Required Density of EV Charging stations model)

La necesidad de conocer el número de estaciones de carga idóneo con una cantidad de cargadores específica para una número de vehículos eléctricos en una región, es un problema que tendrá que tratarse en un futuro cercano. Esto es lo que intenta conocer este modelo que estima la densidad de estaciones de carga para una zona. Si bien no se puede

tomar con una fiabilidad total ya que considera supuestos que no se suceden en el caso real del gran área metropolitana y además no se utilizan datos del todo exactos, sí puede considerarse como una aproximación para elegir un número adecuado de estaciones de carga con el fin de colocarlas en las ubicaciones previamente analizadas, en una región con dimensiones específicas.

Para utilizar este modelo y simplificar su aplicación se toma una región de estudio cuadrada de $L \times L$. Las estaciones de carga (CS), las cuales se expresan como puntos negros en la figura 6.1, se asumen que se encuentran distribuidos equitativamente con una distancia entre ellos denominada d . Por lo que la densidad de estaciones de carga (CS's) puede ser expresada por las variables de L y d . [1]

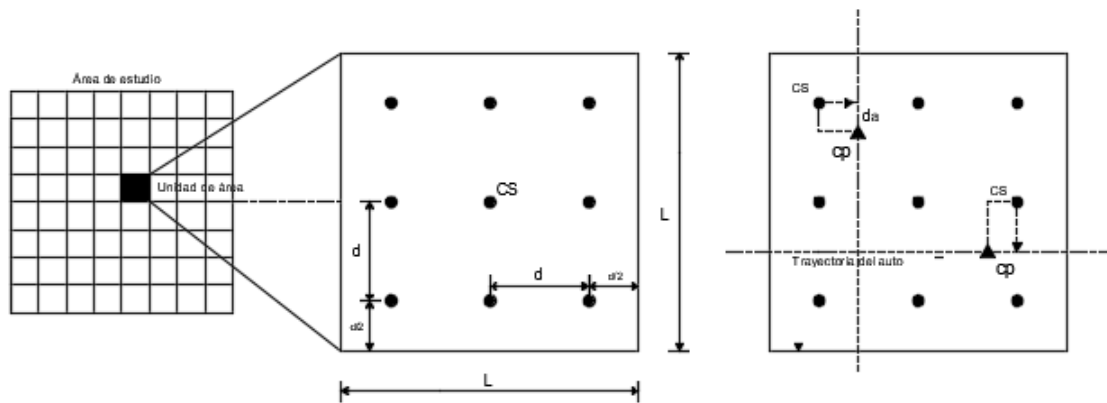


Figura 6.1: Esquema del modelo ERDEC .

Basado en: [1]

Algunas de las suposiciones que toma este modelo es que los vehículos solo son capaces de movilizarse en direcciones verticales y horizontales y que cada estación de carga posee el mismo número de cargadores. También, que cuando un estado de búsqueda de estación de carga suceda (CP), el cuál se define como el momento en que el estado de carga (SOC) del vehículo alcance un 15 % de la autonomía nominal, el usuario procederá inmediatamente a buscar la estación de carga más cercana.[1]

En lo que respecta al cálculo del número de estaciones de carga (N_{CS}), es posible obtenerlo por la siguiente fórmula,

$$N_{CS} = \delta L^2, \quad (6.1)$$

Donde,

δ : Densidad de estaciones de carga (CS)

L : Valor del lado de la región cuadrada en estudio .

En lo que respecta a la distancia entre cualquiera CP y la estación de carga, denominada d_A , la cual es posible observar de forma gráfica en la figura 6.1, esta debe ser menor al 15% de la distancia capaz de recorrer el vehículo después de una carga completa (L_{EVdis}). Esto con el fin de asegurar que el vehículo pueda alcanzar la estación de carga con el restante de energía. [1]

La fórmula que propone el modelo para el cálculo de la densidad recomendada de estaciones de carga es la siguiente ,

$$\delta = \frac{N_{veh}T_{fch}}{0.85l_{EVdis}Lk} \quad (6.2)$$

Donde,

$N_{veh}[1/h]$: Número de vehículos por hora que entran en la región cuadrada de estudio.

$T_{fch}[h]$: Tiempo que toma realizar una carga completa del vehículo.

$l_{EVdis}[km]$: Distancia que es capaz de recorrer el vehículo con una carga completa.

$L[km]$: Dimensión del lado de la región cuadrada en estudio.

k : Cantidad de cargadores por estación de carga.

El hecho de utilizar solo el 85% de la distancia que es capaz de recorrer el vehículo con una carga completa (l_{EVdis}), se debe a que el modelo considera que que al 15 % de estado de carga (SOC) ocurre el evento de búsqueda de la estación de carga más cercana.

Para la aproximación de la estaciones de carga requeridas a partir de la densidad , se asumirá que el total de vehículos eléctricos de Costa Rica, los cuales son aproximadamente 300 [26], entrarán en el lapso de una hora en una zona de $4 km^2$, la cual podría ser el centro de San José, u otra región del valle central con un considerable transito vehicular. También se supondrá que las estaciones de carga serán de nivel 2 de potencia, por lo que el tiempo estimado para lograr una carga completa será de 2 h. Además cada estación contará con 2 cargadores. Se asumirá que la autonomía de todos los vehículos es de 150 km con una carga completa. La Tabla 6.1 resume los valores escogidos para el cálculo.

Tabla 6.1: Valores escogidos para las variables del cálculo de densidad de estaciones de carga.

Variable	Valor
N_{veh}	300
T_{fch}	2 h
l_{EVdis}	150 km
L	2 km
k	2

La sustitución de estos valores en la ecuación 6.2 da como resultado una densidad de 1.17 [$1/km^2$]. Esto sustituyéndolo en la ecuación 6.1 resulta en un número de estaciones de carga de 4.68, lo que se puede interpretar como 5 estaciones con 2 cargadores cada una, en un área de 4 [km^2], para un total de 300 vehículos circulando en lapso de una hora. Algunas de las características que pueden disminuir este valor es aumentar la cantidad de cargadores por estaciones de carga. Así como la colocación de estaciones de carga de nivel 3, que reduciría el tiempo de carga a una cuarta parte del valor introducido en el cálculo realizado. Pero es necesario considerar que no todos los vehículos eléctricos son compatibles con este nivel de potencia, además de que su costo puede ser muy elevado para considerar que todas las estaciones de carga sean de este tipo. Además es necesario especificar que el valor de la autonomía nominal introducido en el cálculo esta por debajo de lo que ofrecen los vehículos eléctricos que actualmente se encuentran en el mercado, y cuyas distancias por cada carga completa aumentarán con el pasar de los años. Otra característica capaz de modificar el resultado, es el número de vehículos eléctricos que circularán por la zona de estudio, ya que es natural pensar que la cantidad de autos eléctricos aumentará considerablemente, provocando también el aumento de dicha densidad requerida de estaciones de carga.

En lo que respecta a la aplicación del modelo, este encuentra mayor exactitud en regiones de menor tamaño, ya que para abarcar una región mucho más grande se opta por aplicar el modelo dividiendo la región en subregiones más pequeñas, utilizando dicho modelo en cada una de estas. Esto beneficia la validez del estudio, ya que si se cuenta con datos reales de vehículos que circulan por cada una de las regiones más pequeñas, es posible obtener un número de estaciones de carga óptimo más cercano a la realidad, en el aspecto de que se adecue de forma real a la intensidad del tráfico de cada zona, sin tener que sobredimensionar el número de estaciones de carga.

Esta densidad de estaciones de carga permite crear una visualización aproximada de la necesidad de este tipo de servicio a medida de que la cantidad de vehículos eléctricos aumente, principalmente en zonas urbanas. Además se reitera que basado en el número de estaciones de carga se puede empezar a buscar los sitios interés previamente recomendados en la zona que se estudia, para la colocación del tipo de estación que se defina.

Capítulo 7

Conclusiones y Recomendaciones

7.1 Conclusiones

- La comparación en base a un puntaje entre las tecnologías de almacenamiento estudiadas, justifica como las opciones adecuadas para la transformación eléctrica a las tecnologías LFP y NMC, en base a los criterios de energía y potencia específica, ciclos de carga, precio y accesibilidad comercial.
- Los distintos casos de conversiones eléctricas analizados poseen un cargador dentro del vehículo, que puede llegar a trabajar con niveles de potencia de hasta 19 kW, lo que demuestra la necesidad de utilizar una unidad de gestión del banco de baterías (BMS) en la conversión.
- El análisis de las tecnologías de almacenamiento en casos de conversiones eléctricas demuestra las limitaciones de las baterías de ácido de plomo en términos de autonomía, en donde llega a tener un valor que representa la mitad en comparación a un caso con una energía total similar que utiliza tecnología de ion de litio, y peso del auto, ya que el banco de baterías alcanza 180 kg más que otro caso similar de estudio.
- La aplicación del modelo que aproxima teóricamente la autonomía de un vehículo eléctrico es viable, ya que para el caso en estudio logra proveer un dato de energía necesaria por kilómetro que se diferencia en un 3 % al valor promedio esperado, para un vehículo mediano en condiciones de autopista.
- La selección de la ubicación para las estaciones de carga públicas, se debe realizar en base a los distintos niveles de potencia que ofrecen dichas estaciones, ya que el tiempo que pueda tomar realizar una recarga debe ser acorde con el que este dispuesto a emplear el usuario en el sitio donde se encuentre la estación, esto en casos no críticos.

7.2 Recomendaciones

- En el capítulo de análisis de conversiones eléctricas, incluir una transformación que utilice baterías basadas en níquel. Esto ya que si bien existen vehículos eléctricos con esta tecnología, las conversiones utilizando esta tecnología no son tan comunes.
- En el caso de la aplicación de un modelo para aproximar la autonomía de una conversión, sería recomendable estudiar el escenario en donde el vehículo circule en un ambiente urbano, considerando el aspecto energético que involucra la desaceleración y aceleración constante para este caso.
- La utilización de un modelo que aproxime la densidad adecuada de estaciones de carga, será de mayor utilidad si se utilizan datos de fluencia vehicular reales de las regiones en estudio.
- La actualización de nuevas opciones comerciales de tecnologías de almacenamiento, las cuales pueden estar en fases de experimentación o restringidas a fabricantes de vehículos en la actualidad, es necesaria a través de los años para fortalecer el estudio, debido a la rápida evolución que existe en este sector.

Bibliografía

- [1] Yongjun Ahn and Hwasoo Yeo. An analytical planning model to estimate the optimal density of charging stations for electric vehicles. 2015.
- [2] Sergio Amadoz. La odisea del coche eléctrico. Disponible en <https://motor.elpais.com/electricos/puntos-de-recarga-coches-electricos/>. Accedido el 10-10-2017.
- [3] Joost Bakker. Opel Kadette C 1973-1979. Disponible en [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Opel_Kadett_C_\(1\)](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Opel_Kadett_C_(1)). Reproducida bajo la licencia CC BY 2.0.
- [4] Randy Brooks. 2002 Toyota Echo Conversion. Disponible en <http://www.evalbum.com/2422>. Accedido el 13-09-2017.
- [5] Hansong Chao, Qidong Wang, Linfeng Zhao, Maofei Zhu, and Wuwei Chen. *Integrated Vehicle Dynamics and Control*. John Wiley & Sons, 2016.
- [6] K. T. Chau. *Energy Systems for Electric and Hybrid Vehicles*. Institution of Engineering and Technology, 2016. Disponible en <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpESEHV002/energy-systems-electric/energy-systems-electric>.
- [7] Jonathan Y. Chen. *Activated Carbon Fiber and Textiles*. Elsevier, 2017. Disponible en <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpACFT0001/activated-carbon-fiber/activated-carbon-fiber>.
- [8] AA Portable Power Corp. Custom nimh battery pack: 48v 20ah (960wh, 80xd) battery. Disponible en <http://www.batteryspace.com/NiMH-Battery-Pack-48V-10Ah-480Wh-Battery-with-Discharging-/-Charger-1.aspx>. Accedido el 03-08-2017.
- [9] AA Portable Power Corp. Lifepo4 40152se battery: 76.8v 30ah (2.3 kwh, 100a rate) with pcm (216). Disponible en <http://www.batteryspace.com/LiFePO4-40152SE-Battery-76.8V-30Ah-2.3-KWh-100A-rate-with-PCM.aspx>. Accedido el 09-08-2017.
- [10] AA Portable Power Corp. Linimnco 26650 battery: 50.4v 30ah (1512wh, 40a rate) rechargeable battery pack. Disponible en <http://www.batteryspace.com/linimnco-26650-battery-50-4v-30ah-1512wh-40a-rate-rechargeable-battery-pack.aspx>. Accedido el 09-08-2017.

- [11] AA Portable Power Corp. Nicd battery pack: 24v 7ah (20xf) battery pack with open end wire. Disponible en <http://www.batteryspace.com/nicd-battery-pack-24v-7ah-20xf-battery-pack-with-open-end-wire.aspx>. Accesado el 05-08-2017.
- [12] Halil S.; Javani Nader Dinger, Ibrahim; Hamut. *Thermal Management of Electric Vehicle Battery Systems*. John Wiley Sons, 2017. Disponible en <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpTMEVBS0E/thermal-management-electric/thermal-management-electric>.
- [13] Bryan Drummond. 2000 Holden Barina Conversion. Disponible en <http://www.evalbum.com/5308>. Accesado el 11-09-2017.
- [14] ElCon. PFC 2500 Battery Charge. Disponible en <http://www.elconchargers.com/catalog/item/7344653/7638094.htm>. Accesado el 19-09-2017.
- [15] Schneider Electric. Pricing list for evlink charging stations. Disponible en <http://static.schneider-electric.us/docs/Electrical%20Distribution/Electric%20Vehicle%20Charging/2800PL1101.pdf>. Accesado el 23-08-2017.
- [16] Rodrigo Garcia-Valle and João A Peças Lopes. *Electric vehicle integration into modern power networks*. Springer Science & Business Media, 2012.
- [17] David Iredale. 2006 Mazda RX8 Conversion. Disponible en <http://www.evalbum.com/5289>. Accesado el 08-09-2017.
- [18] Battery Junction. Power-sonic agm general purpose ps-12400 40ah 12v rechargeable sealed lead acid (sla) battery - nb terminal. Disponible en <http://www.batteryjunction.com/powersonic-ps-12400-nb.html>. Accesado el 03-08-2017.
- [19] Nihal Kularatna. *Energy Storage Devices for Electronic Systems - Rechargeable Batteries and Supercapacitors*. Elsevier, 2015. Disponible en <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpESDESRB5/energy-storage-devices/energy-storage-devices>.
- [20] Barrie Lawson. Electric vehicle charging infrastructure. Disponible en <http://www.mpoweruk.com/infrastructure.htm>. Accesado el 21-08-2017.
- [21] Seth Leitman and Bob Brant. *Build your own electric vehicle*. McGraw-Hill Education, 3 edition, 2013.
- [22] Chris Lilly. Nissan LEAF Charging Guide. Disponible en <https://www.zap-map.com/charge-points/nissan-leaf-charging-guide/>. Accesado el 10-10-2017.

- [23] Maxwell. Datasheet, 125v heavy transportation module. Disponible en <http://www.maxwell.com/products/ultracapacitors/125v-tran-modules/documents>. Accesado el 12-08-2017.
- [24] Axel M.; Sgobba Tomasso Musgrave, Gary Eugene; Larsen. *Safety Design for Space Systems*. Elsevier, 2009. Disponible en <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpSDSS0005/safety-design-space-systems/safety-design-space-systems>.
- [25] OSX. Holden Barina City 2000. Disponible en [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1997-2000_Holden_Barina_\(SB\)_City_3-door_hatchback_\(2008-10-09\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:1997-2000_Holden_Barina_(SB)_City_3-door_hatchback_(2008-10-09).jpg). Reproducida bajo licencia libre (CC0).
- [26] Jacqueline Otey. ¿vale la pena conducir un carro eléctrico en costa rica? Disponible en <https://www.crhoy.com/reportaje-especial/vale-la-pena-conducir-un-carro-electrico-en-costa-rica/>. Accesado el 11-10-2017.
- [27] GWL Power. Gwl/power lithium titanate oxid battery cell - lto 2.4v 10ah. Disponible en <https://www.ev-power.eu/LTO-technology/Lithium-Titanate-Oxid-Battery-Cell-LTO-2-4V-10AH.html>. Accesado el 09-08-2017.
- [28] Bruno Scrosati, Jürgen Garche, and Werner Tillmetz. *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*. Elsevier, 2015.
- [29] Jürgen; Tillmetz Werner Scrosati, Bruno; Garche. *Advances in Battery Technologies for Electric Vehicles*. Elsevier, 2015. Disponible en <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpABTEV007/advances-in-battery-technologies/advances-in-battery-technologies>.
- [30] Rudolf Stricker. Mazda RX8 2006. Disponible en https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mazda_RX8_front_20080226.jpg. Reproducida bajo la licencia CC BY-SA 3.0.
- [31] Rudolf Stricker. Suzuki Swift 1991. Disponible en https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Suzuki_Swift_front_20081216.jpg. Reproducida bajo licencia libre (CC0).
- [32] Ivan Subotic, Nando Bodo, E. Levi, Boris Dumnic, Dragan Milicevic, and Vladimir Katic. Overview of fast on-board integrated battery chargers for electric vehicles based on multiphase machines and power electronics. *IET Electric Power Applications*, 10, 2016.
- [33] TuRbO.J. Toyota Echo 2002. Disponible en [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Toyota_Echo_\(14292571029\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Toyota_Echo_(14292571029).jpg). Reproducida bajo licencia CC BY 2.0.
- [34] Christopher Voss. 1991 Suzuki Swift GT Conversion. Disponible en <http://www.evalbum.com/5177>. Accesado el 07-09-2017.

- [35] Mario Vrazic, Damir Vuljaj, Arsen Pavasovic, and Hrvoje Paukovic. Study of a vehicle conversion from internal combustion engine to electric drive. *Energy Conference*, 2014.
- [36] John Warner. *Handbook of Lithium-Ion Battery Pack Design - Chemistry, Components, Types and Terminology*. Elsevier, 2015. Disponible en <http://app.knovel.com/hotlink/toc/id:kpHLIBPDC3/handbook-lithium-ion/handbook-lithium-ion>.
- [37] Xiaomin Xi, Ramteen Sioshansi, and Vincenzo Marano. Simulation–optimization model for location of a public electric vehicle charging infrastructure. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 22, 2013.
- [38] Murat Yilmaz and Philip Krein. Review of battery charger topologies, charging power levels, and infrastructure for plug-in electric and hybrid vehicles. *Power Electronics*, 28, 2013.
- [39] ZEVA. Electric Vehicle Management System v2.0. Disponible en http://www.zeva.com.au/Products/datasheets/EVMS2_Mannual.pdf. *Accesado el* 20 – 09 – 2017.
- [40] ZincFive. 8ah prismatic cells. Disponible en <http://www.sheffieldsolarfarm.group.shef.ac.uk/solar-panel-data>.