

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la

Producción

Diseño de un sistema de baterías y celdas de combustible para energizar un
motor eléctrico de un kart

TRABAJO FINAL DE GRADUACIÓN

Materia Integradora

Previo la obtención del Título de:

INGENIERO MECÁNICO

Presentado por:

Galo Angel Vera Guevara

GUAYAQUIL – ECUADOR

Año: 2016

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mi Padre Celestial, quien me ha guiado todo el tiempo, a mis padres por su confianza y paciencia y a mi esposa por su amor y apoyo en esta etapa tan importante.

DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido desarrollado en la presente propuesta de la materia integradora corresponde exclusivamente al equipo conformado por:

Galo Angel Vera Guevara

Msc. Gonzalo Alfonso Almeida Pazmiño

Phd. Freddy Xavier Jervis Calle

y el patrimonio intelectual del mismo a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción (FIMCP) de la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”.



Galo Vera Guevara



Msc. Gonzalo Almeida Pazmiño



Phd. Freddy Jervis Calle

RESUMEN

La contaminación, producto del desarrollo industrial y tecnológico, ha hecho necesaria la investigación en el campo de energías limpias. El sector automovilístico ha respondido a la urgencia de invertir en la búsqueda de un desarrollo sustentable, dando como resultado el regreso al uso de tecnologías ambientalmente amigables, como la electricidad en el energizamiento de vehículos. Es por ello que en este proyecto se propone el diseño del sistema de energizamiento para un vehículo pequeño tipo kart, usando baterías y celdas de combustible. Se plantea además simular y confirmar los resultados obtenidos mediante un programa informático adecuado bajo condiciones que atraviesa un vehículo promedio.

Para el desarrollo del proyecto se recurrió a información bibliográfica disponible sobre el funcionamiento y operación de sistemas de celdas de combustibles, y sistemas de baterías. Se utilizaron métodos comparativos para hallar los componentes más adecuados. Las simulaciones del vehículo se realizaron utilizando la librería Advisor, de Simulink, desarrollada por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos.

Los cálculos dieron como resultado una celda de combustible tipo PEM de 5kW y cuatro baterías agrupadas en serie de 60 Ah y 12 V cada una. Las simulaciones confirmaron el acierto de la celda y baterías escogidas al ser probadas bajo las características de velocidad del nuevo ciclo de manejo europeo.

El interés, cada vez más grande, por cuidar el planeta y obtener un desarrollo sustentable hace necesaria la búsqueda de alternativas que permitan mejorar los estándares de vida, a la vez que impliquen soluciones ecológicas o de bajo impacto ambiental. Es por ello que otros proyectos, similares al presentado en este documento, merecen el apoyo y ejecución por parte de instituciones, públicas y privadas, que brinden a personas interesadas la oportunidad de desarrollar ideas que arrojen resultados positivos para la nación y el mundo.

Palabras Clave: celda de combustible, batería, Advisor, PEMFC, sistema de energizamiento

ABSTRACT

Pollution, as a result of technological and industrial development, has turned clean energy research into a necessity. Automotive industry has responded to the urgency of investing in sustainable development, by returning to environmentally friendly technologies, such as electricity to power vehicles. Therefore, it is proposed to design a power train for a go-kart, by using batteries and fuel cells. It is also proposed to make software simulations on average car conditions, in order to test the adequacy of results previously obtained.

Available books regarding work and operation of fuel cell systems and battery systems were carefully analyzed and reckoned on in order to develop the project. Comparisons were used to find the most adequate components. National Renewable Energy Laboratory's Advisor library, of Simulink was used to develop vehicle simulations

As a result of calculations a 5 kW PEM Fuel Cell and a 60 Ah, 48 V Battery Pack were selected. Simulations confirmed fuel cell and battery pack's right choice after being tested under the New European Driving Cycle.

The ever increasing interest on taking care of the planet as well as achieving sustainable development creates an urgent necessity for alternatives to improve living standards and provide ecological or low environmental impact solutions. These are the reasons why similar projects deserve being implemented and supported by public and private institutions, giving people the opportunity to come up with ideas that provide positive outcomes for this country ant the world.

Keywords: fuel cell, battery, Advisor, PEMFC, power system

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN.....	I
ABSTRACT	II
ÍNDICE GENERAL	III
ABREVIATURAS.....	V
SIMBOLOGÍA.....	VI
CAPÍTULO 1.....	1
1. INTRODUCCIÓN	1
1.1. Descripción del problema	1
1.2. Objetivos.....	6
1.2.1. Objetivo general.....	6
1.2.2. Objetivos específicos.....	6
1.3. Marco teórico	7
1.3.1. Vehículos eléctricos.....	7
1.3.2. Vehículos de celdas de combustible.....	8
1.3.3. Funcionamiento de las celdas de combustible	8
1.3.4. Clasificación de las celdas de combustible.....	9
1.3.5. Celdas de combustible tipo PEM.....	11
1.3.6. Sistema de celdas de combustible	12
1.3.1. Batería	12
1.3.1. Batería Ion-Litio	13
1.4. Análisis de alternativas de solución	14
1.4.1. Configuración en serie: Alternativa 1	14
1.4.2. Configuración en paralelo: Alternativa 2	15
1.4.3. Configuración en paralelo: Alternativa 3	16
1.4.4. Criterios de selección	17
1.4.5. Análisis mediante matriz de decisión.....	18
CAPITULO 2.....	20
2. METODOLOGÍA DE DISEÑO.....	20
2.1. Consideraciones de diseño.....	22
2.1.1. Características del motor.....	22

2.1.2. Ciclo de manejo	24
2.2. Diseño del sistema de baterías.....	25
2.2.1. Baterías	26
2.2.2. Cargador.....	32
2.2.3. Convertidor DC/DC.....	33
2.3. Diseño del sistema de celdas de combustible	34
2.3.1. Cálculo de potencia del Sistema de Celdas de combustible	35
2.3.2. Selección del stack de celdas de combustible.....	35
2.3.3. Compresor de aire	36
2.3.4. Dispositivos adicionales subsistema de aire.....	40
2.4. Dimensionamiento del tanque de hidrógeno.....	40
2.5. Simulación del sistema de energizamiento.....	43
2.5.1. Simulación en Simulink - Advisor.....	43
CAPÍTULO 3.....	50
3. RESULTADOS.....	50
3.1. Ciclo de manejo	50
3.2. Sistemas de energizamiento.....	50
3.2.1. Selección de baterías	50
3.2.2. Selección del Stack	51
3.3. Resultados de la Simulación.....	52
3.3.1. Simulación sólo baterías.....	52
3.3.2. Simulación del vehículo completo.....	52
CAPÍTULO 4.....	55
4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES	55
4.1. Conclusiones	55
4.2. Recomendaciones	56
BIBLIOGRAFÍA.....	57
APÉNDICES.....	58

ABREVIATURAS

ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
FIMCP	Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción
FCV	Vehículo con Celdas de Combustible
MCI	Motor de Combustión Interna
OLADE	Organización Latinoamericana de Energía
EPA	Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos
FLACSO	Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales
MAE	Ministerio de Ambiente del Ecuador
PNUMA	Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente
OLADE	Organización Latinoamericana de Energía
MCI	Motor de combustión interna
NASA	Administración Aeronáutica y Espacial de los Estados Unidos
RAE	Real Academia Española
PEMFC	Celda de combustible de membrana de intercambio protónico
DMFC	Celda de combustible de metanol directo por sus siglas en inglés
SOFC	Celda de combustible de óxido sólido
AFC	Celda de combustible alcalina
PAFC	Celda de combustible de ácido fosfórico
MCFC	Celda de combustible de carbonatos fundidos
SAE	Sociedad de Ingenieros Automotrices de Estados Unidos
EUA	Estados Unidos de América
NEDC	Nuevo Ciclo de Manejo Europeo
ADVISOR	Simulador de Vehículos Avanzado
PPS	Sistema de Potencia Pico

SIMBOLOGÍA

H ₂	Hidrógeno
CO ₂	Dióxido de Carbono
CO	Monóxido de Carbono
PM _{2.5}	Material particulado cuyo diámetro es menor a 2.5 mm
COHB	Carboxihemoglobina
HC	Hidrocarburo
DC	Corriente directa
HP	Caballo de fuerza
SO _x	Óxido de Azufre
NO _x	Óxido de nitrógeno
COHB	Carboxihemoglobina
Nm	Newton por metro
RPM	Revoluciones por minuto
kW	Kilovatio
USD	Dólar de Estados Unidos de América
km	Kilómetros
kg	Kilogramos
h	Hora
km/h	Kilómetros por hora
°C	Grados centígrados
A	Amperios
Ah	Amperios hora
T _a	Tiempo de aceleración
T _{cr}	Tiempo en velocidad de crucero
T _{co}	Tiempo sin acople entre el motor y la caja de cambios
T _b	Tiempo de frenado
T _i	Tiempo encendido sin moverse
P _m	Potencia del motor
W _{car}	Energía de carretera

W	Energía de las baterías
SOC	Estado de carga
C	Carga eléctrica
kWh	Kilovatios hora
VAC	Voltaje de Corriente Alterna
VDC	Voltaje de Corriente Directa
%	Porcentaje
W	Vatios
P_{SCC}	Potencia del sistema de celdas de combustible
P_{pmotor}	Potencia pico del motor
P_{SB}	Potencia del sistema de baterías
n_{pmotor}	Eficiencia pico del motor
W_{O_2}	Flujo de oxígeno
n_{cc}	Número de celdas de combustible
M_{O_2}	Masa molar de oxígeno
F	Número de Faraday
I_{st}	Corriente del stack de baterías
$W_{a,ca,in}$	Flujo de aire que ingresa al cátodo
$W_{a,cp,out}$	Flujo de aire que sale del compresor
$W_{v,ca,in}$	Flujo de vapor de agua que ingresa al cátodo
$W_{v,cp,out}$	Flujo de vapor de agua que sale del compresor
M_a	Masa molar de aire seco
M_v	Masa molar de vapor
ϕ_{amb}	Humedad relativa del aire ambiente
λ_{O_2}	Porcentaje de exceso de aire
y_{O_2}	Fracción molar de oxígeno
$p_{sat,amb}$	Presión de saturación de vapor a temperatura ambiente
$p_{a,amb}$	Presión de aire atmosférico seco
τ_{cp}	Torque del compresor
T_{amb}	Temperatura ambiente

n_{cp}	Velocidad angular del compresor
P_{cm}	Potencia del compresor
V_{cm}	Voltaje del compresor
I_{cm}	Corriente del compresor
U_f	Utilización de combustible
m_{H_2}	Masa de hidrógeno
L/min	Litros sobre minuto
min	Minuto
m ³	Metros cúbicos
ΔE	Diferencial de Energía
$E_{m\acute{a}x}$	Energía máxima
$E_{m\acute{i}n}$	Energía mínima
Wh/mi	Vatios hora por milla
t	Tiempo

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Emisiones gases efecto invernadero en EUA	2
Figura 1.2 Diagrama de Ishikawa de causas de la contaminación de un MCI	4
Figura 1.3 Esquema de una celda de combustible.....	9
Figura 1.4 Celda de combustible PEMFC	11
Figura 1.5 Sistema básico de celdas de combustible.....	12
Figura 1.6 Esquema de una batería	13
Figura 1.7 Configuración en serie.....	14
Figura 1.8 Configuración en paralelo, con convertidor DC/DC.....	15
Figura 1.9 Configuración en paralelo, con dos convertidor DC/DC	16
Figura 2.1 Sistemas de energización de un kart híbrido.....	20
Figura 2.2 Metodología de Diseño.....	21
Figura 2.3 Pruebas del motor bajo condiciones nominales	23
Figura 2.4 Pruebas del motor bajo condiciones pico	24
Figura 2.5 Nuevo Ciclo de Manejo Europeo	25
Figura 2.6 Flujo Vs. Potencia de la celda H5000.....	41
Figura 2.7 Pantalla de inicio de Advisor	43
Figura 2.8 Ingreso de datos en Advisor	44
Figura 2.9 Selección del ciclo de manejo	46
Figura 2.10 Resultados simulación sólo baterías	48
Figura 2.11 Resultados de simulación vehículo completo.....	49

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Ejemplos de oportunidades de reducción del sector de transporte	5
Tabla 1.2 Matriz de decisión configuración.....	19
Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de una batería de Ion-Litio	27
Tabla 2.2 Valores energéticos de vehículos eléctricos	30
Tabla 2.3 Características karts eléctricos en el mercado	30
Tabla 2.4 Características baterías en el mercado	31
Tabla 2.5 Matriz de decisión para selección de baterías.....	32
Tabla 2.6 Características de cargadores en el mercado	33
Tabla 2.7 Características nominales del Convertidor DC/DC	34
Tabla 2.8 Características del Stack de celdas de combustible H-5000	36
Tabla 2.9 Características del tanque de hidrógeno	42

CAPÍTULO 1

1. INTRODUCCIÓN

En esta sección se describen el problema y las causas que lo originan. Se presentan datos de niveles de contaminación en el Ecuador, así como el impacto que tiene este factor dentro de la economía y la salud. Se presenta también el objetivo general, así como los objetivos específicos que persigue el proyecto. Además se da un marco teórico sobre vehículos eléctricos, celdas de combustible, vehículos de celdas de combustible, tipos de celda y aplicaciones con el fin de conocer el aporte histórico de las tecnologías a utilizar, así como su valor actual. En la sección análisis de alternativas se exponen tres configuraciones posibles para el diseño del sistema energizante del kart, los criterios de selección con la correspondiente ponderación y finalmente mediante la matriz de decisión se escoge el diseño más apropiado.

1.1. Descripción del problema

Las emisiones de los automóviles no se consideraron un problema sino hasta la segunda mitad del siglo XX, debido a la poca cantidad de vehículos existentes. Al crecer el número de automóviles, así como las plantas de energía, hornos y la población en general, la contaminación del aire se ha convertido en un problema cada vez mayor. En los años 1940 el problema se hizo notorio por primera vez en la ciudad de Los Ángeles, Estados Unidos de América, debido a la densidad poblacional y de automóviles, así como las condiciones climáticas únicas. A partir de la década de 1970 la contaminación del medio ambiente se ha reconocido como un problema serio en la mayoría de ciudades de Estados Unidos, así como en otros lugares con gran población urbana alrededor del mundo.(Pulkrabek, 1997)

De acuerdo a la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA por sus siglas en inglés), el sector del transporte es responsable del 26% del total de los gases que causan efecto invernadero en ese país. Sus datos se presentan

en la figura 1.1. En este sector incluye aviones, barcos, trenes, carros y otros vehículos.

La mayoría de estas emisiones, derivadas del sector de la transportación son emisiones de CO₂ que resultan de la combustión de productos basados en petróleo, como gasolina y diésel. Dentro del sector de transporte, los mayores contaminadores incluyen carros de pasajeros y camiones de carga liviana, vehículos deportivos, camionetas y minivans. Estas fuentes son responsables de más de la mitad de las emisiones totales del sector. En el año 2014, las emisiones de CO₂ equivalente fueron en total 6,870 millones de toneladas métricas en EUA. (EPA, 2014)

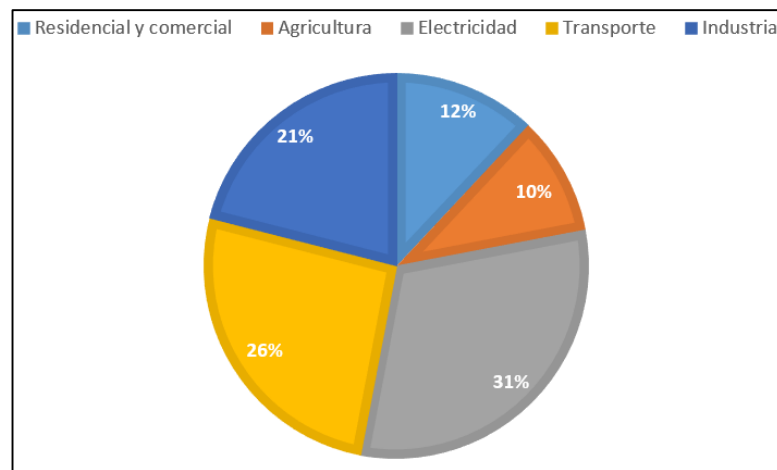


Figura 1.1 Emisiones gases efecto invernadero en EUA

Fuente: EPA, 2014.

En Ecuador la contaminación atmosférica urbana es generada principalmente por la flota vehicular, mayor responsable de las emisiones de los principales contaminantes del aire y por lo tanto de enfermedades respiratorias en la población, lo que evidencia la necesidad de mejorar la calidad del combustible. (FLACSO [Facultad Latinoamericana de Ciencias Sociales], MAE [Ministerio de Ambiente], PNUMA [Programa de las Naciones Unidas para el Medio Ambiente], 2008)

Según la OLADE (Organización Latinoamericana de Energía) en el Ecuador las emisiones anuales de dióxido de carbono (CO₂) ascienden a 26393.34 toneladas, las de óxidos de azufre (SO_x) a 86.79 toneladas, las de monóxido de carbono (CO) a 633.78 toneladas, las de óxidos de nitrógeno (NO_x) a 215.84 toneladas y las de hidrocarburos (HC) no consumidos a 16.45 toneladas (OLADE, 2006). La contaminación ha ido en aumento considerable en los últimos 31 años. Las emisiones de CO₂, NO_x y SO_x se quintuplicaron, las emisiones de CO se triplicaron y las emisiones de HC se incrementaron 57 veces. A la cabeza de las emisiones de CO₂ se encuentra el sector del transporte, seguido por los sectores residencial, industrial y finalmente los sectores de generación eléctrica y de producción y consumo propio de energía. Por otra parte se calcula que las emisiones totales per cápita de CO₂ en el año 2005 fueron de 2.28 toneladas por cada 1000 habitantes (FLACSO, MAE, PNUMA, 2008)

En el año 2000 se llevó a cabo un estudio para ayudar a determinar la relación que existe entre el incremento de enfermedades respiratorias en niños de la ciudad de Quito y la contaminación vehicular a la que estuvieron expuestos. Los resultados mostraron que los niños en edad escolar del casco urbano, sector de alta circulación vehicular, presentaban un porcentaje de carboxihemoglobina mayor que el promedio (COHB 5%), demostrando que su riesgo de adquirir infecciones respiratorias agudas altas es cuatro veces mayor que el de aquellos niños en un sector urbano de la periferia (COHB 2,5%) y rural (COHB 0,7%), con menor exposición a contaminación automotor. (FLACSO, MAE, PNUMA, 2008). Según la Fundación Natura (2003) el costo de la contaminación atmosférica relativo a la salud para el período entre el año 1991 y el 2000, en la ciudad de Quito, fue de más de 34 millones de USD.

Es concluyente que una manera clave de mejorar la calidad de vida alrededor del planeta es disminuir la contaminación, particularmente aquella procedente de los automotores. La figura 1.2 muestra algunas de las causas de contaminación de los motores de combustión interna (MCI), entre las cuales resaltan los bajos

niveles de eficiencia de las máquinas de calor, el uso de combustibles fósiles que contaminan desde su transformación inicial, transporte, hasta su uso final, así como vehículos con tecnología antigua que siguen siendo utilizados en la actualidad.

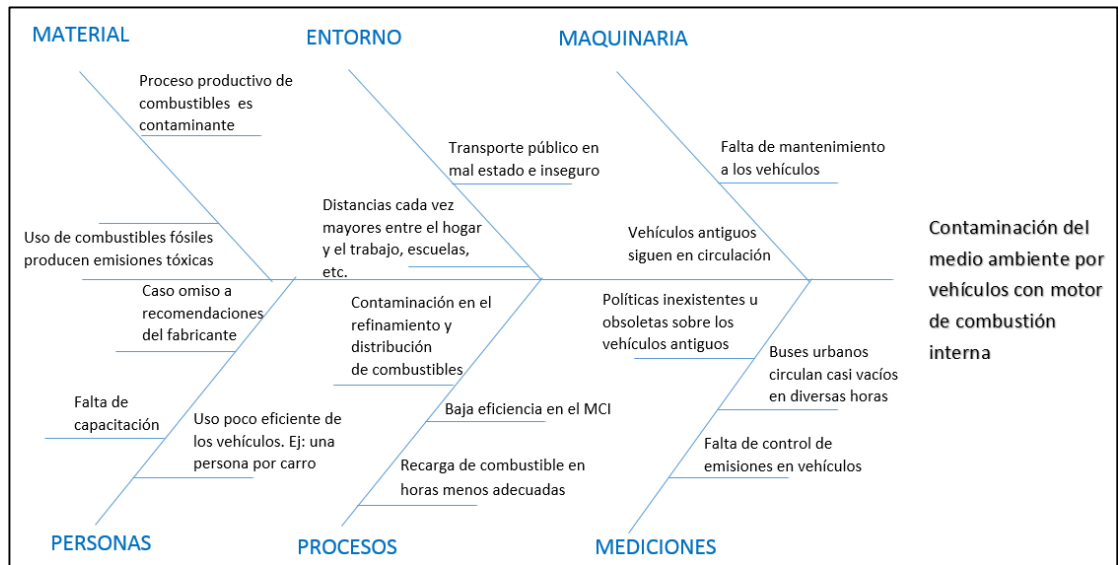


Figura 1.2 Diagrama de Ishikawa de causas de la contaminación de un MCI

Fuente: Vera, 2016.

Elaboración propia

Ya que existen causas claras que llevan a la contaminación, como paso siguiente es importante determinar las formas de disminuir las emisiones de los MCI y seleccionar aquella o aquellas que sean viables. En la tabla 1.1 se describe de manera acertada varias propuestas que, de ser implementadas, ayudarán a la disminución de las emisiones procedentes del MCI.

Mientras que los dos ejemplos mostrados en la parte inferior de la tabla 1.1 son válidos, su eficacia recae principalmente en el gobierno como planificador y el conductor como ejecutor de los programas propuestos, razón por la cual no se tomarán en cuenta estas sugerencias. Luego de esto es clave notar que las dos primeras propuestas presentan tanto un reto como una oportunidad real de llevar

a cabo actividades de nivel ingenieril que minimice de manera sustentable el cambio de energía contaminante por energía limpia.

Tabla 1.1 Ejemplos de oportunidades de reducción del sector de transporte

Tipo	Cómo reducir las emisiones
Cambio de combustible	Usar combustibles que emitan menos CO ₂ que combustibles actuales. Fuentes alternativas pueden incluir biocombustibles; hidrógeno; electricidad de fuentes renovables, como viento y solar; o combustibles fósiles que emiten menos CO ₂ que los reemplazados.
Mejorar la eficiencia de combustible con diseños, materiales y tecnologías avanzados.	Usar tecnologías, diseños y materiales avanzados para desarrollar más vehículos combustible-eficientes.
Mejorar prácticas de operación	Adoptar prácticas que minimicen el uso de combustibles. Mejorar prácticas de manejo y mantenimiento del vehículo. Aprender sobre cómo la industria de la transportación de materiales puede reducir emisiones a través del Programa Smartway de EPA
Reducir demandas de viaje	Emplear planificación urbanística para reducir las distancias que la gente viaja cada día. Reducir la necesidad de manejar a través de medidas como programas de caminar, andar en bicicleta

Fuente: EPA 2014

A fin de realizar este cambio energético se propone cambiar el sistema MCI de un kart por un motor eléctrico con sistema de baterías y celdas de combustible, que permita disminuir considerablemente la contaminación procedente del automotor. Se debe recalcar que una de las razones para la selección de esta propuesta es que el campo de los combustibles alternativos para potenciar vehículos, como por ejemplo la tecnología de los sistemas de celdas de combustible, está en crecimiento y por lo tanto los precios relacionados a esta tecnología disminuyen cada año, mientras que las capacidades de almacenamiento de energía de las baterías, así como la eficiencia de las celdas va en aumento.

Los recursos bibliográficos, así como el número de tesis y estudios relacionados a las celdas de combustible hacen deseable ahondar en un tema que cada año se vuelve más relevante y presenta mayor interés de parte de grandes marcas

como Toyota, quien actualmente comercializa su modelo Mirai, basado en celdas de hidrógeno. Al esfuerzo de continuar con este tipo de tecnología en los vehículos se han sumado grandes marcas como Mercedes Benz y Nissan, entre otras, con anuncios de modelos nuevos disponibles a partir de 2017 y 2020 respectivamente.

Por lo anteriormente expuesto es necesario concluir que el horizonte de los vehículos limpios parece dirigirse hacia un cambio de energía, que incluye motores eléctricos potenciados por celdas de combustible, así como sistemas de baterías. Por lo tanto será del interés de este proyecto llevar a cabo un cambio en el sistema energético de un vehículo unipersonal, basado en un motor eléctrico con un sistema de energización basado en baterías y celdas de combustible.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo general

Diseñar un sistema de baterías y celdas de combustible para energizar un motor eléctrico de un kart.

1.2.2. Objetivos específicos

- Diseñar un sistema de energizamiento para una autonomía de 1 hora a una velocidad promedio de 50 km/h
- Calcular y seleccionar las baterías apropiadas para energizar el motor eléctrico.
- Seleccionar dispositivos auxiliares apropiados para el sistema de baterías
- Seleccionar una celda de combustible adecuada para dar energía de apoyo al sistema de baterías
- Seleccionar los dispositivos del sistema de celdas de combustible en base a la celda escogida

- Desarrollar una simulación del sistema de energización del vehículo en el software Simulink
- Analizar los resultados obtenidos

1.3. Marco teórico

1.3.1. Vehículos eléctricos

Los vehículos eléctricos forman parte de la tendencia creciente de la industria manufacturera de automóviles en buscar motores más eficientes y ambientalmente amigables. Sin embargo, este tipo de automóvil no es algo nuevo. En el año 1881 el primer vehículo eléctrico fue construido por el francés Gustave Trouvé, el cual consistía de un triciclo energizado por un motor de 0.1 Caballos de Fuerza (HP por sus siglas en inglés) a corriente directa (DC) alimentado por baterías de plomo y ácido. A este invento le siguió uno similar realizado en 1883 por dos profesores británicos. Sin embargo, no sería hasta 1864, luego de que un automóvil eléctrico tuviera un desempeño exitoso en la carrera Paris-Rouen que el público en general comenzaría a interesarse en los vehículos sin caballos. Los siguientes 20 años consistirían en una era de competencia entre los vehículos a gasolina y eléctricos. En Europa la ventaja la llevó rápidamente el automóvil a gasolina debido al creciente número de calles pavimentadas. El primer vehículo eléctrico comercial fue el Electrobat de Morris y Salom, que operaba en la ciudad de Nueva York como un taxi, el cual podía ser usado en tres turnos de 4 horas, con pausas de 90 minutos entre ellos para recargar. Poseía dos motores de 1.5 HP que permitían una velocidad de 32 km/h y una distancia de circulación de 40 km. (Ehsani et al. 2005)

Llegarían avances significativos que ayudarían al vehículo eléctrico, como el freno regenerativo (1897) y el transistor (1945). Sin embargo la flexibilidad, el fácil manejo y la potencia de los automóviles a gasolina causaría que los vehículos eléctricos quedaran relegados a carros de golf y vehículos de

despacho. Durante las décadas de 1960 y 1970 la preocupación sobre el impacto ambiental impulsó la investigación en el campo de los vehículos eléctricos nuevamente, dando como resultado modelos como el EV1 y PSA, impulsado por General Motors a finales de la década de 1980 y comienzos de la década 1990. A partir de esa fecha se observa un cambio en la investigación de vehículos eléctricos orientado mayormente hacia los vehículos híbridos, así como las celdas de combustible. (Ehsani et al. 2005)

1.3.2. Vehículos de celdas de combustible

Sir William Grove, conocido también como el padre de las celdas de combustible, en el año de 1839 descubrió la capacidad de generar electricidad al reversar el proceso de electrólisis del agua. Más tarde Charles Langer y Ludwig Mond crearían la primera celda de combustible práctica usando aire y gas de carbón, en 1889. En comienzos de los 1900 se hicieron esfuerzos posteriores por convertir carbón en electricidad, los cuales se verían detenidos en gran medida por la llegada del MCI. Luego de varios adelantos esporádicos en cuanto a las celdas de combustible, Harry Karl Ihrig desarrollaría un tractor energizado por una celda de combustible de 20 HP. La Administración Aeronáutica y Espacial de los Estados Unidos (NASA, por sus siglas en inglés) también construiría generadores eléctricos compactos para uso en misiones espaciales al final de la década de 1950, y continuaría con su uso en varias misiones espaciales. En los últimos años varias marcas mundiales de vehículos han apostado por modelos a bases de celdas de combustible y el gobierno de Estados Unidos ha apoyado iniciativas en el sector automotriz, así como en otras aplicaciones. (Emanuelsson, Person, 2007)

1.3.3. Funcionamiento de las celdas de combustible

Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte la energía química de un combustible directamente en electricidad y calor, sin pasar por el proceso de la combustión (Constantino, 2012). La celda consiste

básicamente en un ánodo y un cátodo, con una capa de electrolito entre ellos, mostrados en la figura 1.3. De manera general los electrodos tienen forma plana y presentan porosidades que permiten obtener buen contacto entre el electrolito y los gases. La capa de electrolito se hace delgada para permitir el paso de los iones sin pérdidas de corriente considerables. (Emanuelsson, Person, 2007)

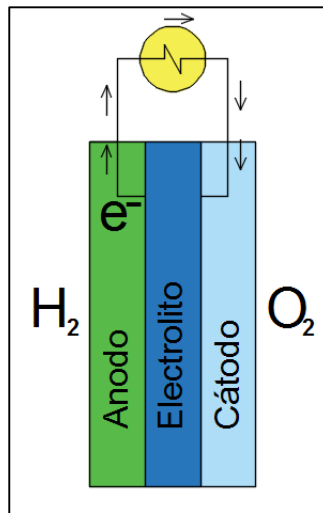


Figura 1.3 Esquema de una celda de combustible

Fuente: Vera, 2016.

Elaboración propia

Existe diversidad en los modelos y tecnologías de las celdas de combustible, de acuerdo al tipo de aplicación, costos, etc. Sin embargo lo común entre todas ellas son las altas eficiencias, operación silenciosa y baja contaminación, entre otros. Se las puede clasificar de acuerdo al electrolito que usan. Esta clasificación determina el tipo de reacción electroquímica que se lleva a cabo en la celda, los catalizadores requeridos, el rango de temperatura en el cual la celda opera, el combustible a usar y otros factores. Del conjunto de estas características depende la aplicación más adecuada. (Ehsani et al. 2005)

1.3.4. Clasificación de las celdas de combustible

Los tipos de celda, según sus siglas en inglés, se pueden clasificar en:

- PEMFC (membrana de intercambio protónico, por sus siglas en inglés): Actúa a temperaturas cercanas a los 80°C y entre sus ventajas se encuentra mayor densidad de potencia y vida útil. Es la más utilizada en aplicaciones de vehículos.
- DMFC (metanol directo, por sus siglas en inglés): Usa una pequeña celda tipo PEMFC, que funciona con metanol sin reformar, la cual es la fuente del hidrógeno. Se utiliza en aplicaciones portables y de microelectrónica (cortadoras de césped, computadoras portátiles, teléfonos celulares).
- SOFC (óxido sólido, por sus siglas en inglés): Opera a temperaturas por encima de los 650°C y por debajo de los 1000°C. Además de la electricidad produce vapor y CO₂. No requiere metales preciosos para el catalizador, ni para el proceso de reformación, en el cual se obtiene Hidrógeno a partir de hidrocarburos ligeros. Es posible utilizar este tipo de celda a gran y pequeña escala en sistemas de alta potencia. Sus aplicaciones más comunes son la generación de energía eléctrica para edificios o conjuntos habitacionales.
- AFC (alcalina, por sus siglas en inglés): Este tipo de celdas tiene un costo alto y requiere hidrógeno y oxígeno puros comprimidos. Trabaja a temperaturas entre 150°C y 200°C. Tiene alrededor de 70% de eficiencia. Fue uno de los diseños más usados por la NASA desde 1960 en programas espaciales. Es poco comercial.
- PAFC (ácido fosfórico, por sus siglas en inglés): Requiere de un reformador externo y soporta hasta 1.5% de concentración de CO en el cátodo. Este tipo de celdas trabaja a temperaturas entre 150°C y 250°C. Se puede aplicar en pequeños sistemas de potencia o estacionarios, sin embargo no se recomienda su uso en automóviles.
- MCFC (carbonatos fundidos, por sus siglas en inglés): Usa níquel como catalizador e hidrocarburos como combustibles. Actúa a temperaturas cercanas a los 650 °C. Se recomienda su uso para grandes sistemas de potencia. Su construcción y operación son más económicas, ya que las celdas más comunes son las de electrolito ácido. (Constantino, 2012)

1.3.5. Celdas de combustible tipo PEM

Su alta densidad de energía, así como su bajo peso y volumen, comparados con los demás tipos de celdas, hacen a la PEMFC la elección ideal para nuestro proyecto. La PEMFC usa un polímero sólido como electrolito y electrodos de carbón porosos que contienen un catalizador de platino o de aleación de platino. En la figura 1.4 podemos observar que sólo se necesita hidrógeno, oxígeno del aire y agua para funcionar. El hidrógeno por lo general se suministra desde un tanque o reformador. (Zhao, 2009)

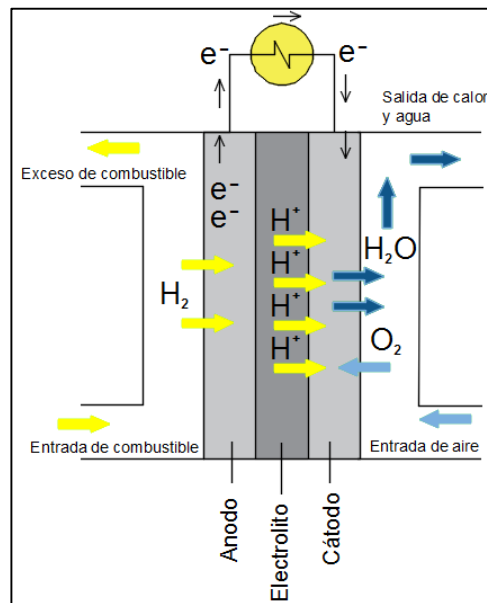


Figura 1.4 Celda de combustible PEMFC

Fuente: Vera, 2016.

Elaboración propia

Sus bajas temperaturas de operación les permiten a las PEMFC encender rápidamente, debido a que tienen que calentarse por menos tiempo, resultando en menos desgaste de los componentes del sistema y por lo tanto mayor vida útil. Una de las debilidades de este tipo de celdas es que se requiere un metal noble como catalizador, que por lo general es platino, añadiendo de esta manera costos al sistema. Además debido a que el platino es muy sensible a la contaminación por CO, se necesita emplear un reactor adicional para reducir

esta emisión en el combustible, siempre y cuando el hidrógeno se derive de un hidrocarburo. Esto añade otro costo al sistema. (Constantino, 2012)

1.3.6. Sistema de celdas de combustible

Los sistemas de celdas de combustible necesitan componentes auxiliares para funcionar, los cuales generalmente incluyen: bomba para circulación de aire, bomba para circulación de refrigerante, ventilador, bomba de suministro de combustible y dispositivos de control eléctrico, tal como se muestra en la figura 1.5.

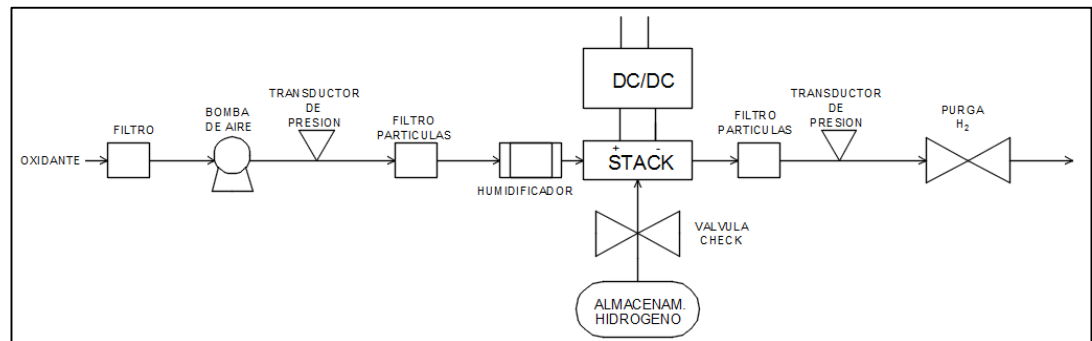


Figura 1.5 Sistema básico de celdas de combustible

Fuente: Modern Electric, Hybrid Electric & Fuel Cell Vehicles – Ehsani, et al

La bomba de aire es el dispositivo que más energía consume, con un porcentaje promedio de 10% del consumo total de energía suministrada por el stack, el cual es un conjunto de celdas que trabaja en serie para suministrar energía. (Kim et al, 2006)

1.3.1. Batería

En su concepto más simple una batería es un acumulador de electricidad (RAE, 2016). Consiste de una o más de una celda electroquímica que convierte la energía química almacenada en electricidad. La celda se compone de un electrodo positivo y uno negativo, llamados cátodo y ánodo respectivamente, además de electrolitos, los cuales permiten que los iones se

muevan entre los electrodos, produciéndose de esta manera electricidad. En la figura 1.6 se observa la configuración básica de una batería.

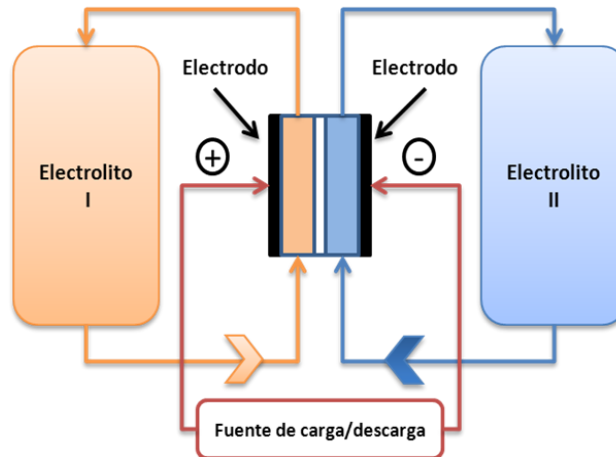


Figura 1.6 Esquema de una batería

Recuperado de: <http://www.madrimasd.org/blogs/energiasalternativas/2011/04/04/131159>

Se pueden dividir en baterías primarias y secundarias. Las baterías primarias, también conocidas como desechables, son aquellas que se utilizan una vez y se desechan luego de que los materiales del electrodo sufren un cambio irreversible durante la descarga. Las baterías secundarias son aquellas que se pueden recargar varias veces. Para recargarlas se reversa la corriente, permitiendo que la composición original de los electrodos se restaure. (Linden et al. 2002)

1.3.1. Batería Ion-Litio

La batería Ion-Litio pertenece al grupo de las baterías secundarias o recargables. En este dispositivo los iones de Litio se mueven del electrodo negativo al positivo durante la descarga y de regreso durante la carga. Su uso es muy común en una amplia gama de aparatos electrónicos debido a la alta densidad de energía, bajos efectos de memoria y baja autodescarga. Su rango de aplicación va desde celulares y computadoras portátiles hasta vehículos

eléctricos y aplicaciones aeroespaciales. Debido a estas características y bajo peso se recomienda su uso para vehículos eléctricos. (Linden et al. 2002)

1.4. Análisis de alternativas de solución

Se proponen tres opciones de diseño para el sistema de energización del vehículo, los cuales serán descritos en detalle.

1.4.1. Configuración en serie: Alternativa 1

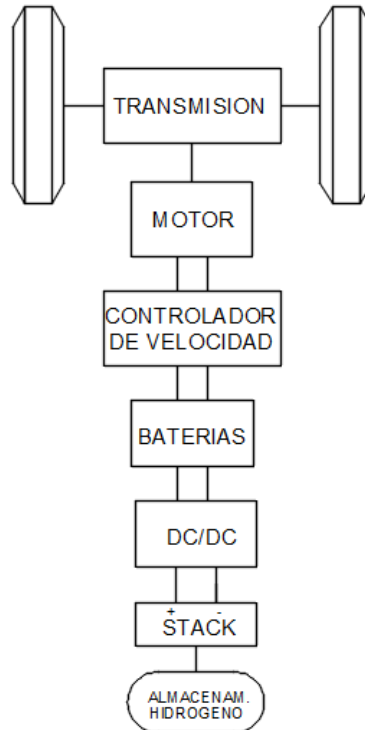


Figura 1.7 Configuración en serie

Fuente: Vera, 2016.

Elaboración propia

Como primera alternativa se describe una configuración del sistema de energización donde la batería y el stack se encuentran en serie. En la figura 1.7 se observa que el sistema está compuesto por un tanque donde se

almacena el hidrógeno, el cual se usa como combustible en el stack. Inmediatamente después del stack tenemos al Convertidor Boost DC/DC o también llamado, elevador, el cual entrega a su salida una tensión mayor que a su entrada. La electricidad convertida carga la batería, la cual se dirige al controlador de velocidad y luego al motor, quien a su vez mueve la transmisión.

La desventaja de este tipo de configuración es que las pérdidas aumentan debido a que la energía del stack no se dirige directamente al motor. Los modos de operación para una configuración en serie son:

- Sólo batería: El vehículo es energizado sólo por la batería
- Modo combinado: el stack alimenta la batería y de manera simultánea la batería alimenta el motor

1.4.2. Configuración en paralelo: Alternativa 2

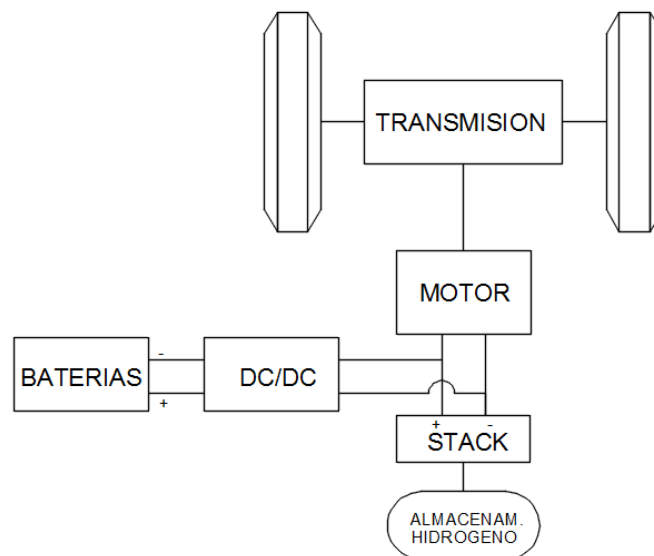


Figura 1.8 Configuración en paralelo, con convertidor DC/DC

Fuente: Vera, 2016.

Elaboración propia

En la figura 1.8 se observa una configuración donde el stack y las baterías están conectados en paralelo al motor eléctrico. Tres modos de operación son posibles:

- Sólo baterías: el motor es energizado por las baterías.
- Sólo stack: el motor recibe la energía proporcionada por el stack, quien a su vez utiliza hidrógeno como combustible.
- Combinado: las baterías y el stack comparten energía al motor

Entre las ventajas de un vehículo en paralelo se puede nombrar el hecho de que hay menos pérdidas debido a que la corriente fluye directamente al motor de cada fuente de energía. Además cuando una de las fuentes se está agotando es posible utilizar la otra de manera independiente. También es posible cargar la batería a partir del stack.

1.4.3. Configuración en paralelo: Alternativa 3

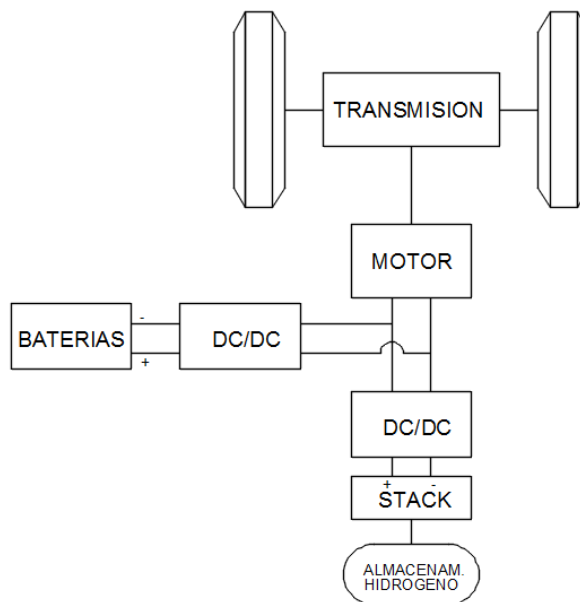


Figura 1.9 Configuración en paralelo, con dos convertidor DC/DC

Fuente: Vera, 2016.

Elaboración propia

En la figura 1.9 se observa otra configuración en paralelo. La diferencia con respecto a la anterior es únicamente la existencia de un convertidor DC/DC adicional que presenta una ventaja al controlar las variaciones de voltaje en el stack, además de las ocurridas en las baterías.

Entre las desventajas de esta configuración está el aspecto económico debido a que suma costos. Por otro lado la eficiencia del stack se ve disminuida porque la energía producida debe pasar por el convertidor DC/DC, causando pérdidas adicionales.

1.4.4. Criterios de selección

Se conoce como criterios de selección a los requisitos y restricciones que se deberán tomar en cuenta y que generalmente son impuestos por la aplicación del sistema, así como otras consideraciones generales. No es igual un diseño de un sistema de celdas de combustible para una aplicación de tipo estacionaria que para una de tipo móvil. De igual manera las restricciones y requisitos no serán los mismos para dos usos virtualmente similares, ya que algunas restricciones pueden estar ligadas a factores externos como leyes del país, disponibilidad de tecnología, factores monetarios, etc., mientras que algunos objetivos dependerán del propósito principal del proyecto, deseos de los inversionistas, objeto de estudio y otros. Vale la pena mencionar que en el ámbito del sector transporte existen algunos criterios que son vitales, otros que son deseables, y ciertos criterios que limitan el diseño. Dentro de todos ellos se encuentran los siguientes:

- **Eficiencia:** La eficiencia se relaciona con otros criterios como el costo y tamaño, que ejercen tanto una restricción como una oportunidad de crecimiento al encontrar el balance entre ambos. Se lo considera el criterio de mayor importancia en el diseño de un vehículo, ya que afecta al resto de criterios. Se ha asignado un valor de 35%
- **Costo:** Definitivamente este es un criterio que debe considerarse seriamente a la hora de emprender cualquier proyecto, sea este con fines

de lucro, educativos o con fines de esparcimiento. Debido a que este proyecto no incluye implementación, pero es importante determinar que su factibilidad sea aceptable, se ha decidido darle un valor de 30%.

- Velocidad de respuesta: No se considera crítico para aplicaciones estacionarias, sin embargo para aplicaciones móviles es vital obtener un encendido rápido así como una respuesta oportuna a cambios de cargas. El tener una batería o capacitor se considera útil a fin de obtener una respuesta rápida. Para esta aplicación, sin embargo, se considerará menos importante en relación a los otros. Se ha decidido que su valor sea de 10%.
- Autonomía: Es el parámetro que mide la distancia que puede recorrer un vehículo sin detenerse a recargar. Debido a que es un valor importante en cualquier vehículo se le ha dado una ponderación de 25%

1.4.5. Análisis mediante matriz de decisión

Con las alternativas enunciadas y los criterios definidos y ponderados es posible definir la alternativa que satisface la mayoría de los criterios mediante el método de la matriz de decisión, en la cual se analiza detalladamente cada configuración propuesta en base a los criterios como la eficiencia, costos y otros.

En la tabla 1.2 se observa el desarrollo de la matriz de decisión y es importante notar que la alternativa 2 es la que tiene mayor cantidad de puntos sobre las otras dos opciones. El puntaje de eficiencia es ligeramente mayor para la alternativa 2 comparado con la alternativa 3 y mucho mayor comparado con la alternativa 1. Esto responde al hecho de que la configuración 2 dispone de menos equipos, los cuales incurren en menos pérdidas de energía hasta llegar al motor.

Tabla 1.2 Matriz de decisión configuración

DESCRIPCION	VALOR	ALTERNATIVAS		
		1	2	3
EFICIENCIA	35	20	33	30
COSTO	30	25	25	20
AUTONOMIA	25	15	20	20
VELOCIDAD DE RESP	10	5	6	6
TOTALES		65	84	76

Fuente: Vera, 2016.

Elaboración propia.

Adicionalmente se encuentra el tema de costos, en el cual las alternativas 1 y 2 se equiparan por tener la misma cantidad de componentes. Ambas alternativas son mayores que la número 3, debido a que esta última tiene mayor cantidad de componentes. No se han tomado hasta este punto en consideración costos a largo plazo, sino solamente costos de implementación.

El puntaje por autonomía se asigna de acuerdo a los modos de operación posibles en cada alternativa. Las alternativas 2 y 3 comparten el mismo puntaje porque poseen la misma cantidad de modos de operación, permitiendo que las distancias recorridas entre cada recarga sean mayores. A su vez ambas configuraciones poseen más autonomía que la configuración en serie, la cual sólo posee dos tipos de configuración de energización, causando que el tiempo total estimado entre cada recarga del vehículo sea menor.

CAPITULO 2

2. METODOLOGÍA DE DISEÑO

En este capítulo se desarrollará en detalle el diseño del sistema energizante del kart en base a la alternativa escogida en el capítulo anterior. El diseño de la geometría del vehículo quedará excluido, así como los sistemas de control inherentes a cada subsistema.

Los componentes representados en la figura 2.1 responden a los más usados en sistemas similares de vehículos con celdas de combustibles y baterías. Es importante definir que los datos de entrada de este proyecto son las características del motor y la autonomía del vehículo, los que serán detallados más adelante en la sección 2.1.

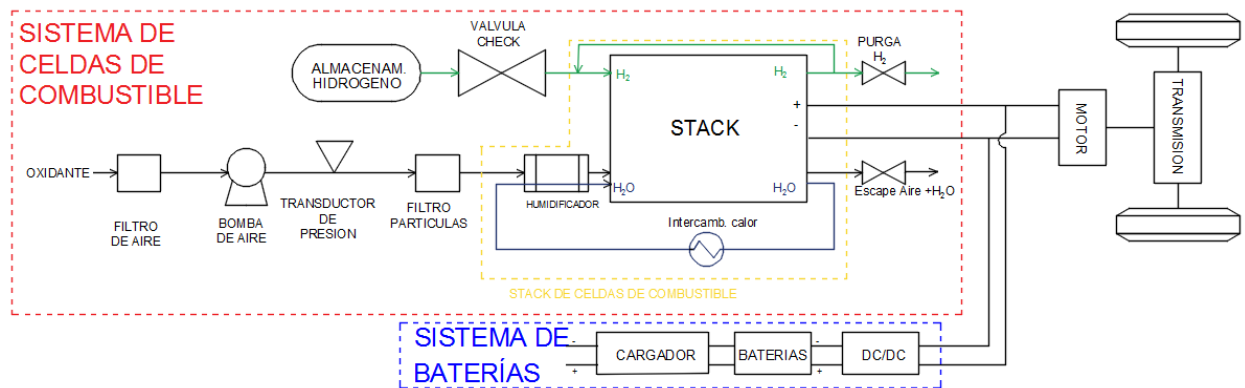


Figura 2.1 Sistemas de energización de un kart híbrido.

Fuente: Vera, 2016

Elaboración propia

Con esto en mente es posible definir la metodología más apropiada de acuerdo a lo estudiado para el modelo de vehículo escogido. Esta metodología, mostrada en la figura 2.2, consiste en definir primero el sistema de baterías, que incluye a las baterías, cargador y convertidor DC/DC. Estos dispositivos serán seleccionados en base a la potencia nominal a la que trabajará el motor y a la velocidad y autonomía deseada para el transporte del proyecto. Se harán comparaciones entre las características de modelos

de vehículos eléctricos similares a fin de seleccionar el sistema de baterías más adecuado.

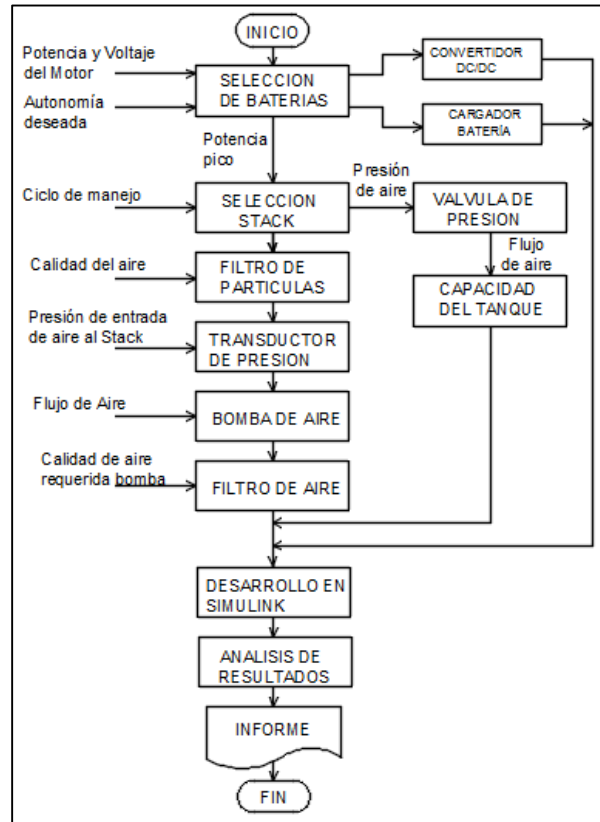


Figura 2.2 Metodología de Diseño

Fuente: Vera, 2016

Elaboración propia

Luego de definido el sistema de baterías se procederá al diseño del sistema de celdas de combustible, el cual funciona como sistema de energía pico, es decir, un sistema de energizamiento auxiliar que es accionado en momentos en que la potencia requerida por el motor supera la potencia de diseño de las baterías o en momentos en que la batería se encuentra descargada.

El elemento principal del Sistema de Celdas de Combustible es el Stack de Celdas de Combustible, que consiste en un conjunto de celdas tipo PEM agrupadas en serie. Para seleccionarlo se utilizará la diferencia entre la potencia suministrada por las baterías y la potencia pico característica del motor. Inmediatamente después de escogido el stack

los dispositivos siguientes a escoger serán los filtros de aire, válvulas de presión, compresores o bombas de aire y tanque de hidrógeno

2.1. Consideraciones de diseño

Las consideraciones de entrada para el diseño del sistema de energizamiento del vehículo son:

- Marca y Modelo del Motor: LEM 200 - 127
- Ciclo de manejo a utilizar: Nuevo ciclo de manejo europeo, actualizado el 14 de junio 2006
- El sistema de energizamiento principal será el de las baterías
- El sistema de energizamiento de apoyo será el de celdas de combustible
- La autonomía deseada para el vehículo es 1 hora
- La velocidad promedio será de 50 km/h
- Se configurará el sistema de energizamiento para que el estado de carga de las baterías no sea menor que el recomendado por el fabricante.
- Número de dientes del piñón de la rueda: 24
- Número de dientes del embrague: 12
- Diámetro de las llantas: 330 mm

2.1.1. Características del motor

Se detallan a continuación las características del motor de acuerdo a la ficha técnica proporcionada por el fabricante, Lynch Motor Company:

- Marca y Modelo: LEM 200 - 127 DC MOTOR
- Voltaje: 48 V
- Corriente nominal: 215 A
- Corriente sin carga: 5 A
- Torque nominal: 31.5 Nm
- Potencia continua: 8.55 kW = 11.47 HP
- Potencia pico: 16.08 kW = 21.56 HP

- Eficiencia pico: 89%
- Peso motor: 11 kg
- Constante de velocidad: 54 rpm/V
- Velocidad nominal: 2592 rpm
- Constante de torque: 0.15 Nm/A

Como datos de entrada adicionales se cuenta con información resultante de pruebas realizadas por el Centro de Investigación y Desarrollo de la Universidad del Azuay (2015) mostradas en las figuras 2.3 y 2.4. En ellas se exhibe el comportamiento del motor en condiciones nominales y condiciones pico respectivamente.

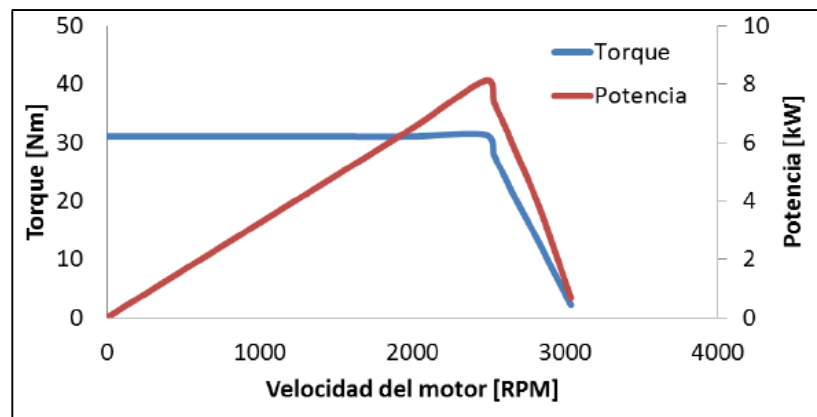


Figura 2.3 Pruebas del motor bajo condiciones nominales

Fuente: Universidad del Azuay, 2015.

La simulación bajo condiciones nominales de funcionamiento expone datos de velocidad máxima, torque máximo y potencia máxima del orden de los 3098 revoluciones por minuto (RPM), 31 Newtons – metro (Nm) y 8.11 kilovatios (kW) respectivamente. Vale la pena observar que la potencia nominal en la prueba es ligeramente menor a la nominal del fabricante.

La simulación del motor en condiciones pico se simuló para una potencia del orden de los 11.91 kW, la cual es notablemente menor que los 16.08 kW mostrados en los datos del fabricante. La simulación bajo condiciones

nominales de funcionamiento expone datos de velocidad máxima, torque máximo y potencia máxima del orden de los 3098 revoluciones por minuto (RPM), 65 Newtons – metro (Nm) y 11.91 kilovatios (kW) respectivamente.

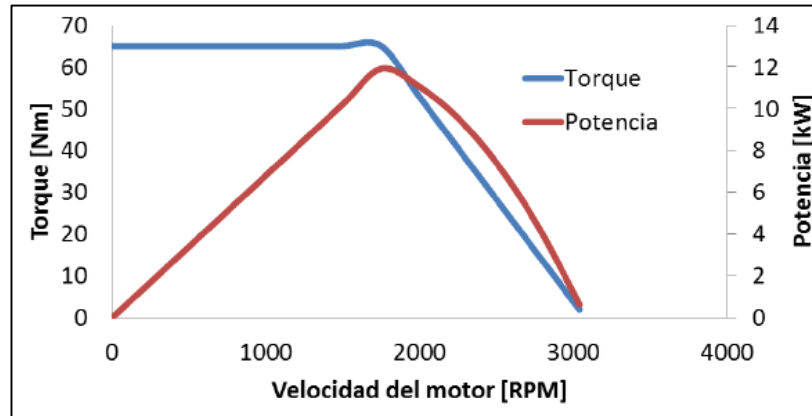


Figura 2.4 Pruebas del motor bajo condiciones pico

Fuente: Universidad del Azuay, 2015.

2.1.2. Ciclo de manejo

Durante la mayor cantidad del tiempo de operación un automotor opera con carga parcial y con una amplia variación de velocidades y aceleraciones, las cuales dependen a su vez de condiciones geográficas, así como características del individuo, condiciones ambientales, fechas, rutas, etc. (Ehsani, 2005)

A pesar de las extensas variaciones de parámetros previamente expuestos, se han diseñado ciclos de manejo representativos que emulan ambientes de manejo típicos. Estos ciclos se presentan por lo general en un plano Velocidad vs Tiempo de operación, considerando que el automotor se maneja en un terreno plano.

2.1.2.1. Ciclo de manejo Europeo

El ciclo de manejo a utilizar es el Nuevo Ciclo de Manejo Europeo (NEDC, por sus siglas en inglés), usado para la aprobación de modelos de vehículos

livianos en la Unión Europea (Barlow et al., 2009). A este ciclo, mostrado en la figura 2.5, se lo describe como un ciclo altamente estilizado con periodos que comprenden aceleración, desaceleración y velocidad constante.

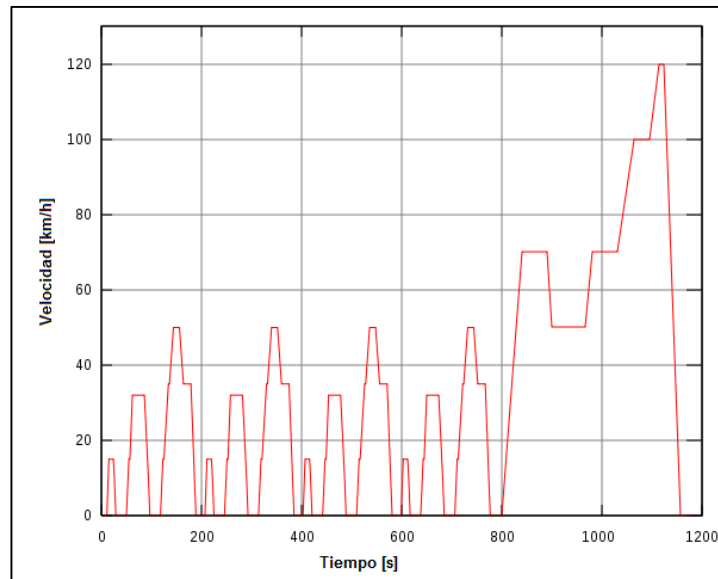


Figura 2.5 Nuevo Ciclo de Manejo Europeo

Fuente: Orzetto, 2006

Consta de un tiempo total de aproximadamente 1200 segundos. El período inicial tiene una duración 800 segundos, considerado como la prueba de manejo urbana del ciclo. El segmento final, a partir de los 800 segundos se considera la parte del ciclo que emula el comportamiento de un vehículo en una carretera. Se utilizará este ciclo para las pruebas de funcionamiento del sistema de celdas de combustible.

2.2. Diseño del sistema de baterías

En un vehículo eléctrico puro los sistemas principales incluyen la batería, el motor, reductor, embrague, entre otros. Con el objetivo de incrementar la eficiencia de transmisión se puede omitir el embrague del automóvil en el sistema de transmisión de potencia. (Zhou et al. 2005).

En base a lo mencionado previamente, es posible definir que el diseño del sistema de baterías se centrará en el conjunto de baterías, cargador y convertidor DC/DC. Debido a que las baterías serán las encargadas de alimentar principalmente las demandas del vehículo es necesario que se encuentre primero las características que se necesitan para cubrir la potencia del motor, así como el desplazamiento en el rango requerido.

2.2.1. Baterías

Linden y Reddy (2001) enuncian que existen varios factores que deben considerarse al momento de seleccionar una batería para un determinado sistema. Entre ellas se enumeran las siguientes:

- Sistema electroquímico: Se consideran las ventajas y desventajas de los sistemas típicos usados para aplicaciones similares
- Voltaje: Voltaje nominal o de operación, variaciones de voltaje, regulación de voltaje, perfil o curva de descarga, tiempo de inicio, retraso de voltaje.
- Corriente de carga: corriente constante, resistencia constante, potencia constante u otros.
- Ciclo de servicio: continuo o intermitente, programa de ciclos si es intermitente.
- Ciclo de vida: Vida útil que requiere la operación
- Requerimientos físicos: tamaño, forma, peso, terminales
- Ciclo de carga o descarga: Ciclo de servicio; requerimientos de ciclo o vida; disponibilidad y características de la fuente de carga; eficiencia de carga.
- Condiciones ambientales: vibración, giro, aceleración, sacudidas etc.
- Seguridad y confiabilidad: Variabilidad permisiva, tasas de falla; libertad de fugas o goteo; uso de componentes tóxicos o peligrosos; ambientalmente amigables; condiciones peligrosas.

- Mantenimiento y suministro: facilidad de adquisición, distribución; facilidad de reemplazo; disponibilidad de facilidades de carga; transporte especial, recuperación, procedimientos de desecho requeridos.
- Costo: costo inicial, costo ciclo de operación;

Aquellas características que aplican a este estudio y que se relacionan estrechamente con el diseño de un sistema de energizamiento se detallan en los puntos a continuación.

2.2.1.1. Composición química

El uso de baterías varía de acuerdo a la aplicación, exigencias, desarrollo tecnológico, eficiencia y un sinnúmero de consideraciones adicionales que no deben desestimarse en el momento de diseñar un sistema de baterías. La composición química de baterías incluye una amplia gama de opciones y que varían en eficacia debido al tipo de uso que se necesite.

Tabla 2.1 Ventajas y desventajas de una batería de Ion-Litio

Ventajas	Desventajas
Celdas selladas	Costo inicial
Ciclo de vida extendido	Se degrada a altas temperaturas
Larga duración en almacenamiento	Necesita circuitería para protegerse
Amplio rango de temperatura de operación	Pérdida de capacidad cuando se sobrecarga
Baja autodescarga	Fugas térmicas bajo presión
Capacidad de carga rápida	
Alta capacidad de descarga de potencia	
Alta energía específica y densidad de energía	
No tiene efecto de memoria	

Fuente: Linden, 2002

Entre las tendencias actuales de uso de baterías en vehículos eléctricos es importante notar que las baterías de Ion-Litio son las preferidas para los vehículos eléctricos. La tabla 2.1 muestra ventajas y desventajas en el uso de este tipo de baterías de acuerdo a lo expuesto por Linden et al. (2002).

2.2.1.2. Voltaje

El motor trabaja a un voltaje nominal de 48 V. De acuerdo a Yuste (2009) la batería escogida para ser el suministro de potencia del motor debe tener la misma capacidad de voltaje o uno muy cercano al del motor. Esto con el fin de evitar las sobrecargas de voltaje que afectarían negativamente al motor y componentes asociados. Por lo tanto el voltaje de la batería o conjunto de baterías será 48 V.

2.2.1.3. Energía

Zhou et al. (2005) especifica las consideraciones necesarias para hallar la energía de las baterías de acuerdo a la ecuación 2.1.

$$W_{car} = P_m \times t \quad \text{Ec (2.1)}$$

Donde,

W_{car} : Energía necesaria para el desplazamiento

P_m : Potencia de entrada del controlador del motor

t : tiempo

Para hallar la energía real de las baterías se utiliza la ecuación 2.2.

$$W = W_{car} SOC \quad \text{Ec (2.2)}$$

Donde,

W : La energía de las baterías

W_{car} : La energía necesaria para el desplazamiento

SOC: es el estado de carga de la batería.

2.2.1.4. Carga eléctrica

Debido a que las baterías se caracterizan por su carga eléctrica, mas no energía, es necesario encontrar el valor de carga que necesitará la batería, mediante la ecuación 2.3 (Zhou et al. 2005).

$$C = \frac{E}{V} \quad \text{Ec (2.3)}$$

Donde,

C: Carga eléctrica de las baterías

E: Energía de las baterías

V: Voltaje de las baterías.

De acuerdo a Kubala (2013) las baterías se clasifican por su voltaje y capacidad Amperios-hora (Ah); siendo esta última la medida de la energía eléctrica total que una batería puede entregar en un determinado tiempo. Esta característica es una función del tamaño y cantidad de placas que posee la batería. Para una comprensión más clara, una batería de 100 Ah se descargará en 100 horas a razón de 1 amperio por hora, o en 50 horas a razón de 2 Amperios por hora.

2.2.1.5. Comparación con otros modelos de vehículos

El Departamento de Energía de Estados Unidos, en su portal web menciona varios modelos y marcas de vehículos eléctricos, compartiendo datos de potencia del motor y de energía suministrada por la batería. En la tabla 2.2 se muestran los diferentes modelos de vehículos con sus respectivas

potencias, que van desde los 49 hasta los 80 kW, con baterías entre 16 y 24 Kilovatios hora (kWh).

Tabla 2.2 Valores energéticos de vehículos eléctricos

Modelo	Motor [kW]	Batería [kWh]
Nissan Leaf (2016)	80	24
Smart fortwo (2016)	55	17.6
Mitsubishi i-MiEV (2016)	49	16
Kia Soul (2015)	50	16.4

Fuente: Vera, 2016.

Elaboración propia.

Además de estos vehículos existen también modelos de karts similares a aquel que es objeto de este estudio, como por ejemplo el modelo Sidewinder double de la marca J.J. Amusement, que posee como potencia nominal del motor un valor de 13.9 kW y un valor de energía de 55 Ah. Una comparación de ambos automotores se presenta en la tabla 2.3, donde se muestran la potencia del motor, voltaje, capacidad y composición química de ambas baterías.

Tabla 2.3 Características karts eléctricos en el mercado

Modelo	Motor [kW]	Batería [V]	Batería [Ah]	Composición química
ACTEV	0.5	43.2	2	Litio-Ion
Sidewinder double	13.9	48	55	Plomo-Estaño

Fuente: Vera, 2016.

Elaboración propia.

2.2.1.6. Comparación de baterías

De acuerdo a las características anteriormente expuestas y debido a que el vehículo, objeto de este estudio, es similar al modelo Sidewinder Double se tomará como referencia para la selección de las baterías del kart híbrido las características de batería de ese modelo. En la tabla 2.4 se presentan tres

tipos distintos de baterías, incluida la Opción 2 que corresponde a la batería usada en el modelo Sidewinder Double.

Tabla 2.4 Características baterías en el mercado

CARACTERISTICAS	UNIDADES	OPCIÓN 1	OPCIÓN 2	OPCIÓN 3
Marca	N/A	GBS	OPTIMA	Av/Sport
Modelo	N/A	GBS 12V 4 Celdas	YELLOW TOP D34/78	ND
Celdas	N/A	4	4	4
Corriente	A	ND	750	
Voltaje Nominal	V	12.8	12	12.8
Capacidad Nominal	Ah	60	55	60
Composición química	N/A	LiFeMnPO4	Plomo-estaño	LiFeMnPO4
Rango Voltaje Operación	V	11.2 a 14.4	13.65 a 15	10 a 15.2
Peso	Kg	9.2	19.77	10.6
Dimensiones	Mm	125x280x180	176x256x200	284x125x220
Corriente máx carga	C	3	ND	ND
Corriente máx descarga (continua)	C	3	ND	ND
Corriente máx descarga (intermitente)	C	10	ND	ND
Ciclo de vida	N/A	>1500	ND	>1000
Prof. De descarga	%	80	ND	80
Temperatura de operación	C	-20 a 65	ND	ND
Densidad Energía	Wh/kg	ND	ND	72.45
Tasa carga recomendada	A	ND	ND	20 a 60
Tasa máx descarga(limitada por PCM)	A	ND	ND	100
Tasa de autodescarga mensual	%	3	ND	ND
Precio	USD	365	267.99	584

N/A: No aplica; ND: Información no disponible

Fuente: Vera, 2016.

Elaboración propia.

2.2.1.7. Selección de baterías

La tabla 2.5 enumera cinco criterios de selección considerados los más representativos del proceso de diseño del sistema de energizamiento del

vehículo híbrido. El primero de los criterios se refiere a composición química, criterio al cual se hace referencia en la primera parte de esta sección y se menciona que las baterías de Ion-Litio son las más adecuadas para este tipo de proyecto. A las opciones que cumplan se les da un valor de 20 que equivale al 100% de la calificación. La relación Precio/Capacidad es otra característica importante porque ella influirá en la autonomía del carro, así como en la posibilidad de comprar componentes adicionales. El peso y las dimensiones son fundamentales en aplicaciones de transporte, por ello la puntuación mayor va hacia las baterías cuyos pesos y volúmenes sean inferiores. El ciclo de vida es el último pero no menos importante criterio, ya que de éste dependerá la capacidad de utilización a largo plazo del vehículo.

Tabla 2.5 Matriz de decisión para selección de baterías

DESCRIPCION	VALOR	OPCIONES		
		1	2	3
Composición química	20	20	10	20
Precio/Capacidad	30	25	30	5
Peso	20	20	5	15
Dimensiones	15	15	10	12
Ciclo de vida	15	15	10	10
TOTALES		95	65	62

Fuente: Vera, 2016.

Elaboración propia.

Por lo tanto, el modelo de batería escogido es el GBS 12V, 4 Celdas, 60 Ah.

2.2.2. Cargador

La selección de un cargador de baterías depende específicamente del tipo de batería escogido. Otros factores como tiempo deseado de carga, presupuesto disponible, etc. influirán en el modelo de cargador a seleccionar. En la tabla 2.6 se exponen tres modelos de cargadores adecuados para las baterías seleccionadas en el punto anterior.

Tabla 2.6 Características de cargadores en el mercado

OPCIÓN	1	2	3
CARACTERÍSTICA			
Marca y Modelo	GBS 48V 6A	GBS 48V 15A	Elcon PFC1500
Dimensiones (mm)	203x157x76	241x152x70	352x175x139
Peso [kg]	2.55	5.6	6.33
Entrada [VAC]	110	96 a 260	110
Salida voltaje [VDC]	58.2	57.4	48
Salida Corriente [A]	6	15	18
Tipo de enfriamiento	ventilador	ventilador	ventilador
Adecuado para baterías con [# celdas]	16	16	ND
Temperatura operación [°C]	ND	ND	-40 a 55
Factor de potencia [%]	ND	99	98
Factor de eficiencia [%]	ND	92	93
Precio [USD]	91	255	575

Fuente: Vera 2016.

Elaboración propia.

2.2.2.1. Selección del cargador

Debido a que todos los cargadores cumplen las especificaciones se seleccionará el que tiene el menor precio y menor tamaño, es decir, la opción 1, el cargador GBS 48V 6A

2.2.3. Convertidor DC/DC

El convertidor DC/DC, también conocido como elevador o convertidor Boost (por su nombre en inglés) es un dispositivo de orden electrónico que emite a su salida una tensión continua mayor que la que recibe a su entrada. En la tabla 2.7 se encuentran las características del convertidor DC/DC marca Lucent, modelo 20W, el cual recomienda el vendedor para las baterías escogidas. El uso de un convertidor de este tipo es importante debido a los cambios de voltaje que ocurren en el sistema de baterías.

Tabla 2.7 Características nominales del Convertidor DC/DC

CARACTERISTICAS	DETALLE
Marca y Modelo	LUCENT 20W
Dimensiones (mm)	9.91x0.38
Peso [kg]	
Entrada [VDC]	36 a 75
Entrada [A]	1.1
Salida voltaje [VDC]	12
Salida Corriente [A]	1.67
Protección sobrecarga	SI
Aislamiento entrada a salida [VDC]	1500
Temperatura operación [C]	-40 a 110
Encendido remoto	SI
Potencia [W]	20
Eficiencia [%]	85

Fuente: Vera 2016.

Elaboración propia.

2.3. Diseño del sistema de celdas de combustible

El sistema de celdas de combustible será considerado el sistema de potencia pico (PPS, por sus siglas en inglés), es decir, cuando la potencia requerida por el motor exceda la potencia o condiciones de funcionamiento del sistema de baterías, se usará el sistema de celdas de combustible. Existirán ocasiones en que la potencia requerida por el motor, por ejemplo, debido a una aceleración excederá el suministro de las baterías necesitando energía adicional, entonces será el momento en que el PPS entrará en acción junto con el sistema de baterías para suministrar la potencia requerida a la transmisión del motor. (Ehsani et al., 2005)

El sistema de Celdas de combustible incluye el stack de celdas de combustible, que consiste en múltiples celdas de combustible instaladas en serie, y otros componentes auxiliares del sistema, entre ellos compresor, dispositivos de

enfriamiento y sistema de control del agua. Lo primero es hallar la potencia que se requerirá suministrar por parte del PPS y en base a ese parámetro dimensionar el resto de elementos, comenzando por el stack de celdas de combustible, luego el compresor y después el resto de elementos.

2.3.1. Cálculo de potencia del Sistema de Celdas de combustible

Para calcular este parámetro Ehsani et al (2005) aconseja utilizar la ecuación 2.4, la cual considera la potencia máxima o pico que puede alcanzar el motor.

$$P_{SCC} = \frac{P_{pmotor}}{n_{pmotor}} - P_{SB} \quad \text{Ec (2.4)}$$

Donde:

P_{SCC} : Potencia del sistema de celdas de combustible

P_{pmotor} : Potencia pico del motor; 16.08 [kW]

P_{SB} : Potencia del sistema de baterías; 13.9 [kW]

n_{pmotor} : Eficiencia pico del motor; 0.89

Reemplazando valores obtenemos que P_{SCC} es 4.17 kW

2.3.2. Selección del stack de celdas de combustible

El stack de celdas de combustible consiste en múltiples celdas de hidrógeno agrupadas en serie; es el núcleo del PPS y el único dispositivo que entrega energía dentro del sistema. Por ello se debe seleccionar un stack que cumpla con los parámetros de potencia hallados en P_{sc} .

Considerando las pérdidas por eficiencia el stack debe tener 5 kW. Se tomará como referencia la celda de combustible de hidrógeno tipo PEM H-5000, marca Horizon. Sus características se muestran en la tabla 2.8 y las curvas características para este stack se muestran en el Anexo A.

Tabla 2.8 Características del Stack de celdas de combustible H-5000

CARACTERISTICA	DETALLE
Tipo de Celda	PEM
Número de celdas	120
Potencia nominal [W]	5000
Desempeño	72 V a 70 A
Voltaje válvula H2 [V]	12
Voltaje válvula de purga [V]	12
Voltaje del ventilador [V]	24
Reactivos	Hidrógeno y aire
Temperatura externa [C]	5 a 30
Máxima temperatura stack [C]	65
Presión H2 [bar]	0.45 a 0.55
Pureza H2	>99.994
Humidificación	autohumidificado
Enfriamiento	aire - integrado
Peso [kg]	30.2
Controlador [kg]	2.6
Dimensiones [cm]	65x35x21.2
Flujo a máxima descarga [L/min]	65
Tiempo encendido [s]	< 29
Eficiencia stack	40% a 72V
Suministro de potencia externa	24V, 8 - 12 A

Fuente: Manual del Usuario Stack H-5000, 2013.

Este Stack tiene integrado el subsistema de suministro de aire, por lo que no necesitará de un compresor o filtros de partículas. Sin embargo a continuación se describe el proceso junto con las fórmulas para hallar un compresor de aire adecuado para un stack de celdas de combustible cualquiera.

2.3.3. Compresor de aire

Entre los componentes auxiliares del PPS el compresor es el mayor consumidor de energía. De acuerdo a Kim et al (2006), el compresor puede consumir hasta un 30% de la energía total suministrada por las celdas. Además Boettner et al. (2002) afirma que al agrupar los consumos de todos

los componentes auxiliares del sistema de celdas de combustible, el compresor puede ser responsable hasta del 93% del total consumido.

Para el diseño de un compresor de aire pueden existir varias variables, sin embargo Kim et al (2006) utiliza el diámetro del compresor como variable de diseño. De acuerdo a este enfoque, la corriente del stack de celdas se considerará como dato de entrada y se asumirá que tendrá un valor fijo, a fin de simplificar los cálculos. Se asume además que la temperatura se mantiene entre las condiciones de operación y se ignoran los efectos de la diferencia de presión entre el cátodo y el ánodo. Ya que la corriente del stack determina la cantidad de oxígeno que reacciona y sin este dato no es posible hallar el diámetro del compresor, será el primer paso hallar el flujo de aire que pasa por el compresor.

2.3.3.1. Flujo de aire

A fin de seleccionar el compresor apropiado se debe hallar el flujo de aire que ingresa a él; para ello es necesario conocer el flujo de oxígeno que ingresa por el cátodo, el cual es función de la corriente del stack de baterías. Se debe asumir un compresor y seleccionar, de la curva suministrada por el fabricante, un valor de corriente. Se asume una fracción constante de masa de oxígeno dentro del cátodo del compresor. De acuerdo a Kim et al. (2006) para el cálculo de oxígeno se puede utilizar la ecuación 2.5.

$$W_{O_2} = \frac{n_{cc} M_{O_2} I_{st}}{4F} \quad \text{Ec (2.5)}$$

Donde:

W_{O_2} : es flujo de oxígeno

n_{cc} : número de celdas de combustible

M_{O_2} : Masa molar de oxígeno

F : Número de Faraday

I_{st} : corriente del stack

Con el flujo de oxígeno se puede hallar el flujo de aire, mediante la ecuación 2.6

$$W_{a,ca,in} = \frac{\lambda_{O_2} W_{O_2}}{y_{O_2}} \quad \text{Ec (2.6)}$$

Donde:

$W_{a,ca,in}$: flujo de aire que ingresa al cátodo

λ_{O_2} : porcentaje de exceso de aire

y_{O_2} : fracción molar de oxígeno

Kim et al. (2006) considera para efectos de cálculo operación en estado estable, afirmando que se puede asumir que el flujo de aire en la entrada del cátodo, $W_{a,ca,in}$, es igual al flujo de aire a la salida del compresor, $W_{a,cp,out}$. Asimismo se puede considerar que el flujo másico de vapor de agua que entra al cátodo, $W_{v,ca,in}$, es igual al flujo másico de vapor que sale del compresor, $W_{v,cp,out}$. Con estos puntos claros, Kim et al. (2006) declara que la ecuación 2.7, que sirve para calcular el flujo másico total a la salida del compresor

$$W_{cp,out} = \left(1 + \frac{M_v \phi_{amb} p_{sat,amb}}{M_a p_{a,amb}}\right) W_{a,ca,in} \quad \text{Ec (2.7)}$$

Donde,

$W_{cp,out}$: flujo másico total a la salida del compresor

M_a : masa molar de aire seco

M_v : masa molar de vapor

ϕ_{amb} : humedad relativa del aire ambiente

$p_{sat,amb}$: presión de saturación de vapor a temperatura ambiente

$p_{a,amb}$: presión de aire atmosférico seco

Luego de esto se halla el torque del compresor, con ayuda de la ecuación 2.8 y al asumir un compresor estático para seleccionar la velocidad del compresor ω_{cp} y la tasa de presión $\frac{p_{sm}}{p_{amb}}$.

$$\tau_{cp} = \frac{C_p T_{amb}}{\omega_{cp} n_{cp}} \left[\left(\frac{p_{sm}}{p_{amb}} \right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} - 1 \right] W_{cp} \quad \text{Ec (2.8)}$$

τ_{cp} : Torque del compresor

C_p : Capacidad del compresor

T_{amb} : Temperatura ambiente

ω_{cp} : Velocidad del compresor

n_{cp} : Eficiencia del compresor

W_{cp} : Flujo másico compresor

γ : Tasa de calor específico del aire

Paso seguido se puede encontrar finalmente la potencia del compresor de acuerdo a la fórmula siguiente:

$$P_{cm} = V_{cm} I_{cm} = V_{cm} \frac{\tau_{cp}}{n_{cm} k_t} \quad \text{Ec (2.9)}$$

Donde,

P_{cm} : Potencia del compresor

V_{cm} : Voltaje del compresor

I_{cm} : Corriente del compresor

n_{cm} : Eficiencia del motor del compresor.

k_t : es la constante del motor del compresor

2.3.4. Dispositivos adicionales subsistema de aire

Entre los dispositivos adicionales del subsistema de suministro de aire de un Sistema de Celdas de Combustible se requieren los siguientes:

- Bomba de aire: Con el flujo de aire calculado se pueden hallar las características de la bomba más adecuada.
- Filtro de partículas: si no viene incluido dentro del stack, es importante considerar uno para preservar la vida de las celdas. Esta selección se basa en la calidad de aire que el stack necesita
- Transductor de presión: el stack indica la presión de ingreso del aire. Por ello es necesario un transductor de presión que se acople al sistema.
- Filtro de aire: precede a la bomba y permite filtrar el aire antes de que llegue a la bomba. Dependerá de las características de la bomba de aire y del stack.

2.4. Dimensionamiento del tanque de hidrógeno

La cantidad de hidrógeno consumido en el stack viene dada por la ecuación:

$$m_{H_2} = \frac{I}{U_f} \left[\frac{0.08291 \text{ lbH}_2}{1 \text{ KA}} \right] \text{ lbH}_2/h \quad \text{Ec (2.10)}$$

Donde:

m_{H_2} = Masa del hidrógeno

U_f = Utilización de combustible

V = Voltaje

I = Corriente

Sin embargo, debido a que el manual del usuario del stack de celdas de combustible H-5000 proporciona la tasa de suministro de hidrógeno con respecto a la Potencia, la cual se muestra en la gráfica 2.6, es mejor calcular las dimensiones del tanque con el dato del fabricante, el cual es más exacto. Para

ello se asumirá que la potencia promedio será 4.2 kW de acuerdo a lo hallado en la sección 2.3.1 y que el tiempo de uso de la celda es media hora, del total de dos horas que se mantiene encendido el vehículo. Con estas consideraciones se obtiene la gráfica 2.10, la cual muestra que el flujo de hidrógeno será de 45 L/min.

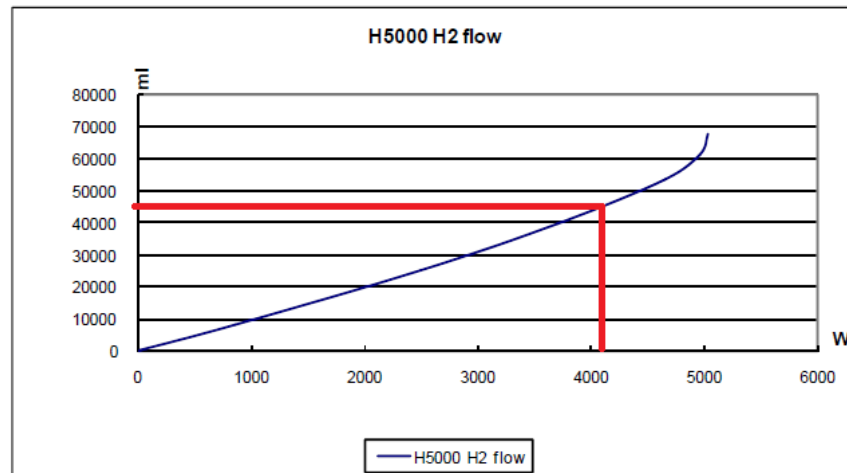


Figura 2.6 Flujo Vs. Potencia de la celda H5000

Fuente: Manual del Usuario Stack H-5000, 2013.

Con los valores encontrados de flujo volumétrico y tiempo es posible hallar el volumen de hidrógeno requerido para operar el vehículo de acuerdo a la ecuación

$$V = Q \times t \quad \text{Ec (2.11)}$$

Donde,

Q: flujo volumétrico; 45 L/min

t: tiempo; 30 min

V: Volumen

Reemplazando los valores encontramos que el volumen de H₂ que necesita almacenarse es de 1.35 m³

2.4.1.1. Consideraciones adicionales sobre el Hidrógeno

El hidrógeno no es un elemento corrosivo y por lo tanto puede ser almacenado en tanques de metal, siempre y cuando no sean identificados como metales comunes no reactivos, a baja presión y a temperatura ambiente (Indura, 2015). Una de las mayores empresas distribuidoras de gases en el Ecuador recomienda considerar lo siguiente en caso de trabajar o diseñar un tanque para almacenamiento de hidrógeno a altas temperaturas y altas presiones:

- Escoger aceros con elevada resistencia al impacto
- Trabajar con tensiones a un 80% del límite elástico
- Evitar diseños que impliquen zonas de concentración de tensiones.
- Desechar contenedores que muestren grietas o indentaciones en la superficie interior.
- Utilizar aluminio o aleaciones de este metal, ya que funcionan bien con el H₂. También el cobre y sus aleaciones son apropiados a temperaturas menores de 400°C.

2.4.1.2. Selección del tanque

Existen tres dimensiones de tanques para almacenamiento de Hidrógeno distribuidos comercialmente en Ecuador.

Tabla 2.9 Características del tanque de hidrógeno

DESCRIPCION	UNIDADES	DETALLE
Cilindro	N/A	3AA 1800
Diámetro	cm	44
Longitud	cm	124
Volumen H ₂	m ³	5
Temperatura	°C	15
Presión	atm	1
Peso	kg	0.43
Presión/llenado	bar	122.5

Fuente: Indura, 2015

Sus capacidades corresponden a 5, 5.5 y 7 m³. Debido a que todos suplen la demanda requerida el modelo a elegir será el de menor capacidad a fin de aligerar pesos en el vehículo, es decir el tanque de 5 m³ cuyas características se muestran en la tabla 2.9

2.5. Simulación del sistema de energizamiento

La efectividad de la información obtenida a base de cálculos para el sistema de potencia del kart es comprobada en esta sección mediante simulaciones realizadas en el Software Simulink de Matlab. Para ello se usó la librería Advisor (Simulador de Vehículos Avanzado), la cual fue desarrollada por el Laboratorio Nacional de Energías Renovables de Estados Unidos en la década de 1990 y es de uso libre. Advisor es ampliamente usada por los productores e investigadores de vehículos alrededor del mundo. La librería recibe contribuciones continuamente de componentes y datos por muchos de sus usuarios (Zhou, 2007).

2.5.1. Simulación en Simulink - Advisor

El software Advisor es una herramienta basada en Matlab & Simulink. Cuenta con una interfaz amigable que soporta sistemas lineales y no lineales, modelados en tiempo continuo y discreto.



Figura 2.7 Pantalla de inicio de Advisor

Fuente: Advisor, 2016

En la figura 2.7 se observa la pantalla de inicio del programa, donde se elige el tipo de unidades a utilizar, las cuales pueden ser en sistema internacional o sistema imperial. Al dar clic en el botón **Start** de color azul, ubicado en la parte superior derecha se ingresará al programa permitiendo acceder a la ventana de ingreso de datos.

En la pantalla de ingreso de datos, mostrada en la figura 2.8, se solicitan las características del vehículo. En las ventanas desplegables (1) y (2) se escoge la opción **fuel_cell** para cada uno, la cual indica que el vehículo utiliza celdas de combustible.

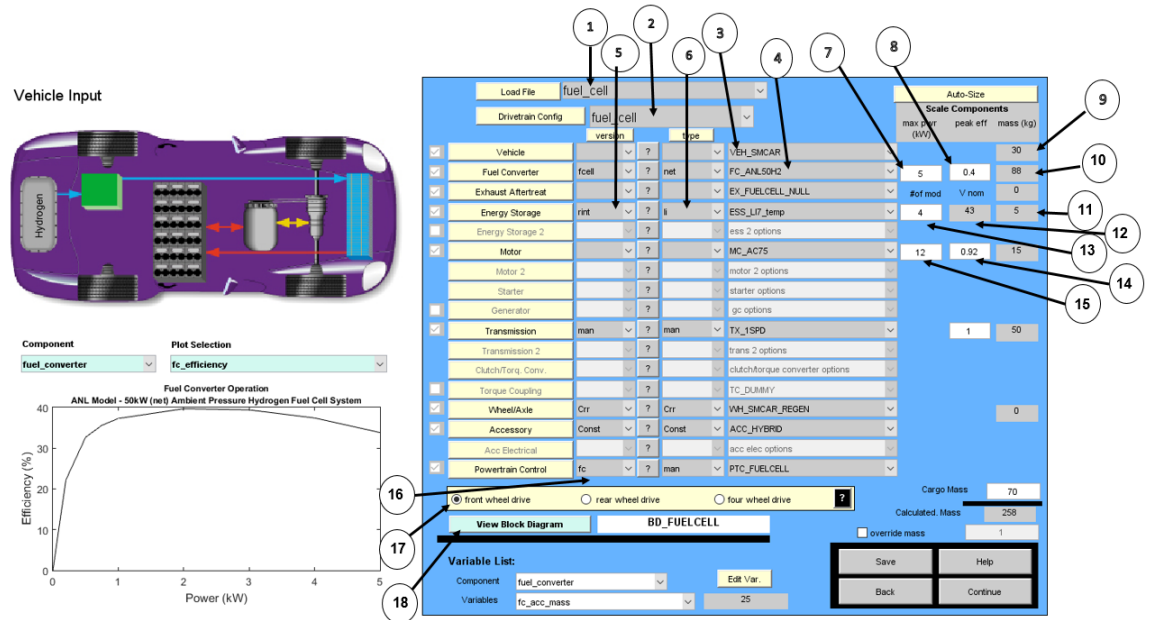


Figura 2.8 Ingreso de datos en Advisor

Fuente: Advisor, 2016

En la sección (3) se debe escoger la opción **VEH_SMCAR**, la cual permite llenar los datos correspondientes al vehículo, tales como el área frontal, separación entre llantas, centro de gravedad, coeficiente de arrastre, gravedad, densidad del aire.

La sección siguiente (4) corresponde al tipo de convertidor de energía a usar, allí se escoge la opción **FC_ANL50H2**, que significa que el tipo de combustible a utilizar es Hidrógeno.

La sección a continuación (5) tiene que ver con el tipo de almacenamiento auxiliar a utilizar en el diseño del vehículo. De la lista desplegable se escoge la opción **rint**, la cual ofrece un modelo basado en la resistencia interna de la batería. En la ventana desplegable (6) se selecciona la opción “li” que significa que la batería usada tiene una composición química de Litio.

El recuadro denominado (7) tiene que ver con la característica de potencia de la celda de combustible, mientras que el recuadro (8) se refiere a la eficiencia pico de la misma. Los recuadros (9), (10), (11) y (12) se refieren al peso del vehículo solo, peso del vehículo con la celda de combustible, peso de la batería y voltaje de la batería, respectivamente.

La opción (13) permite modificar el número de módulos que contiene la batería a utilizar, los cuales para esta aplicación corresponden a 4. Los espacios (14) y (15) son la eficiencia pico y potencia del motor, respectivamente.

El espacio (16) es donde se configura el estado inicial de la celda de combustible y el momento en que se debe encender la misma, lo que corresponde a la estrategia de control, la cual está excluida del proyecto.

El siguiente punto a modificar es el (17), donde se selecciona el eje en el que irá el motor del vehículo. Se selecciona con un clic la opción “front wheel drive”, debido a que la tracción del kart va en el eje delantero. El resto de las opciones se mantuvieron como el programa las muestra por defecto.

El botón (18) permite acceder a la vista del diagrama de bloques, mostrada en el Apéndice B. En este se observa el diagrama de bloques del sistema kart

completo. En la parte izquierda se encuentran los bloques de Ciclo de Manejo y todos los bloques que se relacionan con la geometría del vehículo como ruedas, ejes y caja de cambios. Desde el centro hacia la derecha se encuentran los bloques del motor y los dispositivos de energizamiento del vehículo.

Dentro del diagrama de bloques debe confirmarse que el ciclo de manejo escogido sea el correcto. Para ello hay que dar clic en el botón Ciclo de Manejo, lo que llevará a la ventana mostrada en la figura 2.9.

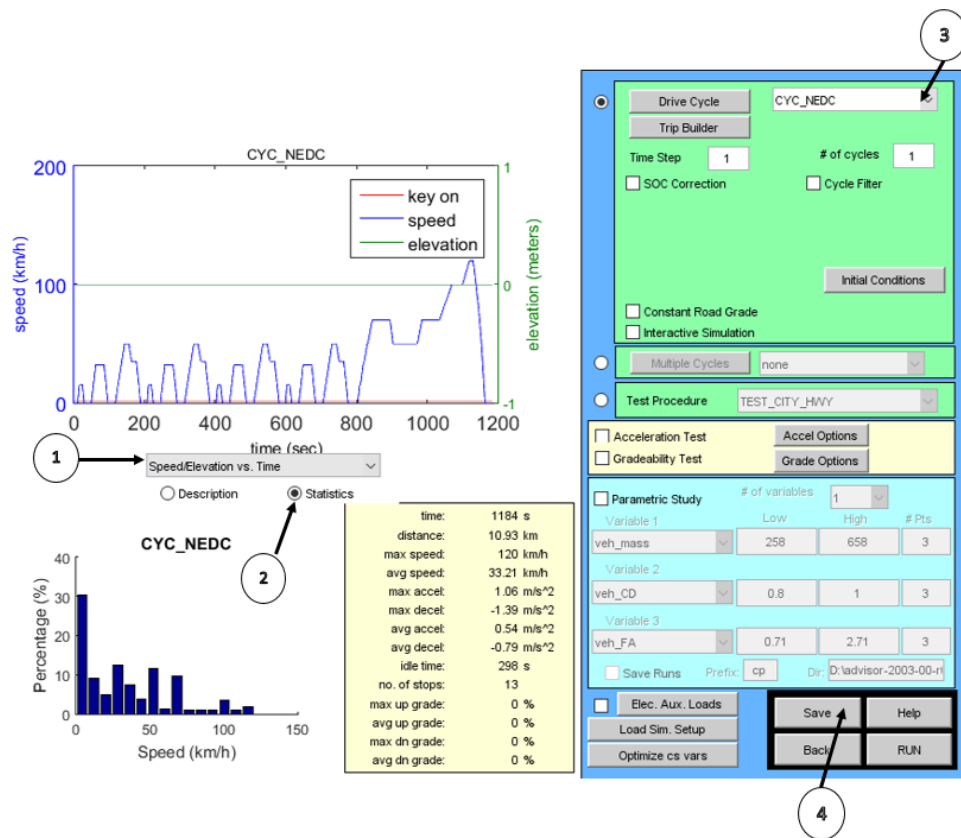


Figura 2.9 Selección del ciclo de manejo

Fuente: Advisor, 2016

En la ventana desplegable (1) debe seleccionarse la entrada **Speed/Elevation vs. Time**. Esto permite observar los resultados obtenidos en la simulación en un plano Velocidad Vs. Tiempo. La elevación o pendiente por defecto es cero

grados, la cual debe mantenerse así porque la simulación está propuesta en un terreno plano sin elevación. Al dar clic en (2) se predetermina la presentación de los datos estadísticos relacionados al ciclo de manejo utilizado.

El botón desplegable (3) presenta los ciclos de manejo disponibles. Aquí se escoge la opción **CYC_NEDC**, que corresponde al Nuevo Ciclo de Manejo Europeo, ciclo seleccionado para la simulación del vehículo en el proyecto. El resto de opciones se deja sin modificar. Para finalizar se da clic en el botón **SAVE**, marcado como (4), que guarda los cambios realizados.

2.5.1.1. Simulación usando sólo baterías

En esta parte del proyecto se simuló el funcionamiento del vehículo solamente propulsado por las baterías en el ciclo de manejo NEDC, a fin de obtener la gráfica Energía Vs Tiempo, mostrada en la figura 2.10. La gráfica consta de dos curvas, la ubicada en la parte superior corresponde al NEDC y la segunda a la curva de Energía consumida por la batería versus el tiempo. Debido a que dentro de las consideraciones de diseño del vehículo se planteó una velocidad promedio de 50 km/h se ha colocado una línea roja para indicar que la velocidad máxima alcanzada por el vehículo es de 100 km/h. Con ese dato señalado se obtiene el diferencial de energía, ΔE correspondiente al período de tiempo entre 0 y 1100 segundos.

De la gráfica se obtiene un ΔE de aproximadamente 2800 Wh. Debido a que las baterías se caracterizan por su carga eléctrica, y no por su energía, se utiliza la ecuación 2.3 para hallar el valor de carga, reemplazando la energía hallada de 2800 Wh y los 48 V de la batería.

Se obtiene un valor de carga eléctrica de 58.33 Ah, muy cercano a los 60 Ah escogidos en la sección de diseño para las baterías.

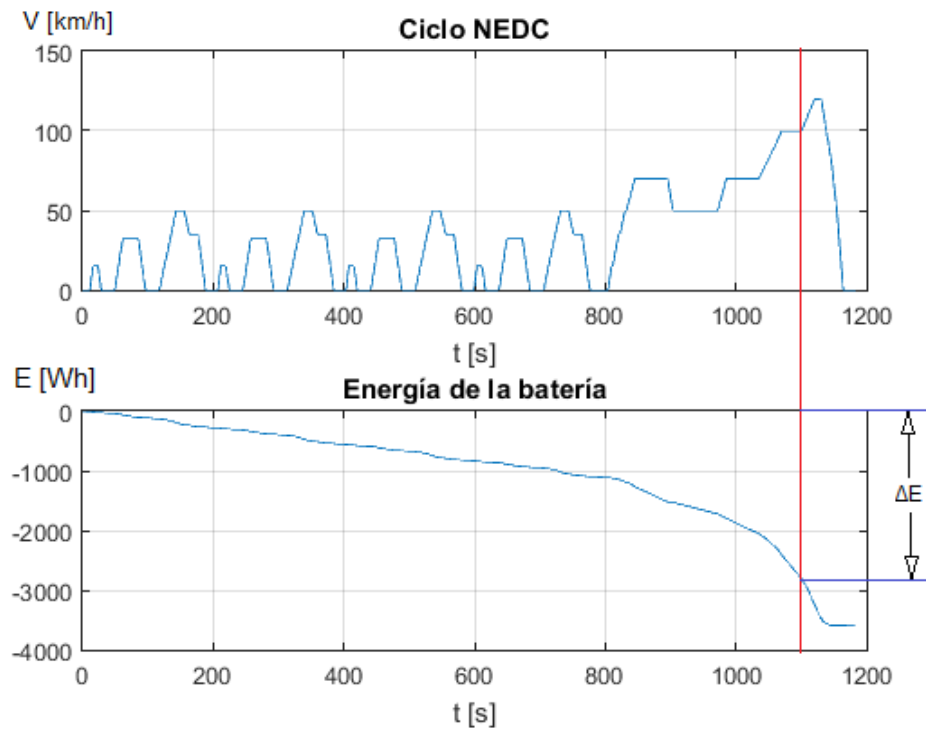


Figura 2.10 Resultados simulación sólo baterías

Fuente: Vera, 2016.

Elaboración propia

2.5.1.2. Simulación del Sistema completo

El paso siguiente consistió en simular el sistema de energizamiento completo del vehículo en funcionamiento bajo los parámetros del NEDC. En la figura 2.11 se muestran tres gráficas, que en orden descendente corresponden a las curvas Velocidad Vs Tiempo, Potencia de las Baterías Vs. Tiempo y Potencia de la Celda de Combustible Vs. Tiempo, respectivamente.

En la gráfica Velocidad Vs Tiempo el color azul pertenece a la velocidad requerida y el color rojo es la velocidad real alcanzada por el vehículo. No se observa el color azul debido a que la velocidad real alcanzó valores extremadamente cercanos a los requeridos, por lo que sólo se observa el color rojo, es decir la velocidad real alcanzada.

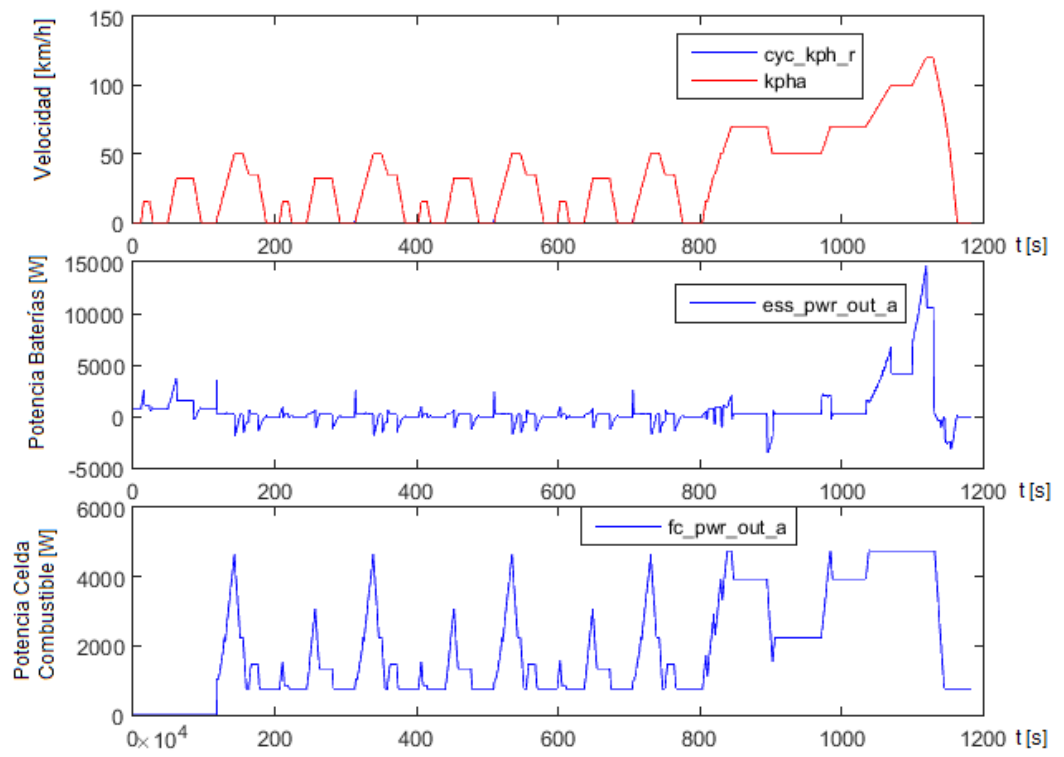


Figura 2.11 Resultados de simulación del vehículo

Fuente: Vera, 2016

Elaboración propia

CAPÍTULO 3

3. RESULTADOS

A continuación se analizan los resultados obtenidos en el diseño del sistema de energizamiento del kart.

3.1. Ciclo de manejo

El ciclo de manejo escogido para las simulaciones fue el NEDC, debido a que es uno de los ciclos más ampliamente utilizados por diferentes países en Europa y fuera de ella y a que sus intervalos de tiempo, junto con sus cambios de velocidad claramente definidos, son visualmente más fáciles de interpretar que otros ciclos existentes. Los datos obtenidos de potencia y energía almacenada se pudieron interpretar mejor en este tipo de ciclo.

3.2. Sistemas de energizamiento

El kart, objeto de este estudio, está compuesto de dos grandes sistemas de energizamiento, a saber, el sistema de baterías y el sistema de celdas de combustible. El sistema de baterías fue considerado como el principal suministro de energía, debido a la facilidad de recargar las baterías al conectarlas a la red eléctrica y a lo económico de este recurso en el país. El sistema de celdas de combustible se consideró como el sistema auxiliar de energizamiento debido a costos y viabilidad para conseguir hidrógeno en el mercado.

3.2.1. Selección de baterías

El proceso de diseño y selección de baterías dio como resultado el uso de cuatro baterías de Ion-Litio de 60 Ah y 12 V cada una.

La composición química seleccionada se debió a que este tipo de baterías representa el mayor aporte en porcentaje de vehículos eléctricos. Su duración

de carga, rango de temperatura de aplicación, densidad de energía, y ciclo de vida son altas comparadas con baterías similares.

El voltaje de las baterías escogido dependió directamente del motor a energizar. De acuerdo a las recomendaciones dadas por Yuste (2009), éstas debían tener un valor de voltaje muy cercano al voltaje nominal del motor para evitar sobrecarga o un desempeño muy pobre. Se escogieron cuatro baterías, de 12 V cada una, que agrupadas en serie contribuyen un total de 48 V al motor eléctrico.

Debido a que la capacidad de las baterías se relaciona con diferentes parámetros tales como corriente, temperatura de uso, tiempo, eficiencia, punto de operación y un sinnúmero de consideraciones adicionales se siguió el modelo de comparación utilizado por Lin (1999), donde se colocan en una tabla las características de interés de varios vehículos actuales y se escoge una respuesta basada en criterios de selección adecuados para el proyecto en curso.

En este caso se utilizó la relación precio/capacidad como el criterio de mayor valor debido a que el costo inicial de este tipo de baterías es precisamente una de las desventajas mencionadas en el texto. El peso fue otro factor determinante debido al tipo de aplicación móvil para el que es requerido el acumulador de energía, donde cada kilogramo tendrá un impacto en el desempeño final del vehículo. Las dimensiones y el ciclo de vida tuvieron un valor similar en la puntuación. La mejor opción de acuerdo a las características resultó en las baterías marca GBS, de 12 V y 60 Ah.

3.2.2. Selección del Stack

El Stack de Celdas de combustible seleccionado fue el H-5000 de la marca Horizon, con una potencia nominal de 5kW.

La selección de baterías dio como resultado la alimentación del motor a una potencia nominal. La diferencia entre la potencia máxima y potencia nominal del motor debía ser suministrada por el sistema de celdas de combustible. Al restar la máxima potencia del motor con la potencia entregada por las baterías se obtuvo un valor de 4.17 kW. Se eligió un Stack con potencia mayor que el de los cálculos para compensar las pérdidas por eficiencia.

3.3. Resultados de la Simulación

Todas las simulaciones se realizaron en Advisor, de Simulink, por ser este un programa confiable, utilizado ampliamente en la industria automotriz y que cuenta con actualizaciones regulares.

3.3.1. Simulación sólo baterías

Se realizó una simulación del vehículo potenciado únicamente por las baterías a fin de observar el diferencial de energía utilizado y de esta manera comprobar que el modelo de baterías seleccionado es el más adecuado.

Debido a que el NEDC, a partir de los 800 segundos, tiene velocidades de operación muy por encima de la velocidad de diseño, en promedio 50 km/h, se decidió considerar como energía máxima la que alcanza la batería al llegar a los 100 km/h, despreciando los picos de energía restantes. De acuerdo a esta consideración la energía máxima utilizada fue de 2800 Wh. Al hacer los cálculos de conversión de energía a carga eléctrica se obtuvo un valor de 58.33 Ah para la simulación, comprobando de esta manera la idoneidad de la selección de baterías.

3.3.2. Simulación del vehículo completo

Como resultado de la simulación del sistema de energizamiento completo se obtuvieron dos gráficas Potencia Vs Tiempo, una que corresponde a las

baterías y otra al stack de celdas de combustible. Ambas gráficas se muestran en una sola figura en la sección 2.5.1.2 con el título de figura 2.11.

Al inicio del ciclo el vehículo se enciende y se mantiene en ralentí. Se observa que la batería es el primer suministro de energía para el vehículo, ya que en el arranque su potencia es diferente de cero. Esto se debe a que la batería se encuentra alimentando a la totalidad de componentes electrónicos del kart. Transcurridos diez segundos ocurre la primera aceleración del ciclo, lo que ocasiona un aumento brusco de potencia en las baterías, alcanzando un valor de aproximadamente 3000 W de manera instantánea.

Debido a que la velocidad se mantiene a aproximadamente 20km/h, valor alcanzado durante el primer incremento de velocidad, la potencia en las baterías disminuye aunque no regresa al valor inicial de potencia. Inmediatamente después ocurre una desaceleración que regresa el vehículo a velocidad cero. Como es de suponer, la potencia disminuye drásticamente también. Este proceso se repite de manera muy similar para la batería en la siguiente sección de aumento, velocidad constante y frenado, que sucede entre los 50 y 100 segundos del ciclo.

A partir del segundo 120 aproximadamente, se experimenta una aceleración que lleva al automotor de 0 a 50 km/h. En este preciso momento la celda de combustible aumenta su potencia de 0 a 1000 W de manera casi instantánea, para luego experimentar un crecimiento lineal de potencia hasta un valor cercano a 5000W. Esto se debe al elemento de control, que está regulado para que a incrementos bruscos de velocidad el sistema de potencia auxiliar, en este caso el sistema de celdas de combustible, se encienda y evite descargas profundas en las baterías.

Es importante notar además que a lo largo del ciclo la celda contribuye a la carga de la batería, a la vez que energiza al motor. Fue mencionado

anteriormente que el intervalo de 0 a 800 segundos comprende la parte urbana del ciclo, mientras que la sección final corresponde a una conducción de carretera. Vale la pena notar que en la parte urbana la batería y la celda trabajan juntas, mientras que la parte extra-urbana la celda es la mayor proveedora de potencia al motor.

CAPÍTULO 4

4. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. Conclusiones

Se desarrolló un sistema de energizamiento apropiado que suplió los requerimientos del motor, aportando durante su funcionamiento las potencias requeridas para un desarrollo promedio de 50 km/h por un período igual o mayor a 30 minutos.

El método de comparación con vehículos similares del mercado probó ser una forma efectiva al momento de escoger las baterías y algunos dispositivos secundarios del sistema de energizamiento.

Las ecuaciones utilizadas para los cálculos previos a la selección del sistema de celdas de combustible fueron de vital importancia a la hora de escoger el stack de celdas de combustible, así como los componentes asociados.

El mercado de celdas de combustible es reducido en Ecuador debido a que no existe normativas que fomenten este tipo de iniciativas para sectores como el de la industria o la transportación, siendo este último uno de los mayores emisores de gases contaminantes a la atmósfera.

Las baterías escogidas fueron apropiadas para el motor del vehículo. Mediante la simulación del vehículo energizado solamente por medio de las baterías se demostró que el vehículo cumplió las exigencias de la parte urbana del NEDC, llegando incluso a velocidades mayores que las planteadas en el diseño inicial.

4.2. Recomendaciones

Los beneficios de este estudio se verán reflejados en la futura investigación que se realice a partir de los resultados obtenidos. Por ello se recomienda que se lleven a cabo estudios más exhaustivos en cuanto a temas específicos como el uso de una celda de combustible tipo PEM para vehículos de transporte masivo, y las baterías en el transporte eléctrico.

Las celdas de combustible son solamente uno de los muchos recursos disponibles en el estudio de energías limpias, por ello se recomienda avanzar con estudios de factibilidad que incluyan diferentes tecnologías limpias además de las que se realizan actualmente en el país, como es el caso de energía eólica o de presas energéticas

El apoyo gubernamental es vital en la promoción de ideas, por ello se recomienda la creación de leyes y planes de incentivos que fomenten el uso y producción de tecnologías ambientalmente amigables a fin de disminuir la huella ecológica creada por el sector industrial e incluso los hogares en el Ecuador.

La investigación en el campo de energías limpias tiene mucho por delante. La unión entre inversionistas e investigadores es vital para poder desarrollar modelos experimentales, cuya efectividad haya sido verificada y que permita surgir a Ecuador como uno de los países latinoamericanos líderes no sólo en desarrollo sino en sostenibilidad en bien de las generaciones futuras a corto y mediano plazo.

BIBLIOGRAFÍA

- Constantino, S. M. (2012). *Model-based design and operation of fuel cell systems*. Londres.
- David Linden, T. B. (2002). *Handbook Of Batteries 3rd Edition*. New York: McGraw Hill.
- Ehsani, e. a. (2005). *Vehículos Eléctricos Modernos, Eléctricos Híbridos y de Celdas de Combustible*.
- FLACSO-MAE-PNUMA. (2008). *Informe sobre el estado del medio ambiente*. Quito.
- Fundación Natura. (2003). *Estudio: Impacto ambiental económico de la contaminación del aire en Quito*. Quito.
- INDURA. (2015). *Manual de Gases*.
- Kubala. (2013). *Electricity: devices, circuits and materials*. New York: Delmar.
- Meilan Zhou, L. Z. (2005). *Pure Electric Vehicle Power-train Parameters Matching based on Vehicle Performance*. Harbin, China.
- Min-Joong Kim, H. P. (2006). *Power management and design optimization of fuel*. Michigan.
- Pulkrabek. (1997). *Fundamentos de Ingeniería de Motores de Combustión Interna*.
- Real Academia Española. (2014). *Diccionario de la lengua española (23.a ed.)*. Madrid, España.
- Sebastian Emanuelsson J. P. (2007). *Design of a fuel cell system*. Göteborg, Suecia.
- T J Barlow, S. L. (2009). *A reference book of driving cycles for use in the measurement of road vehicle emissions*. Berkshire, Reino Unido: IHS.
- Universidad del Azuay. (2014). *Capacidad de aceleración go-kart*. Cuenca.
- Yuste, I. S. (2009). *Design, construction and testing of a new class of mobile robots*. Miami.

APÉNDICES

APÉNDICE A

Curvas de la Celda de combustible H-5000, marca Horizon

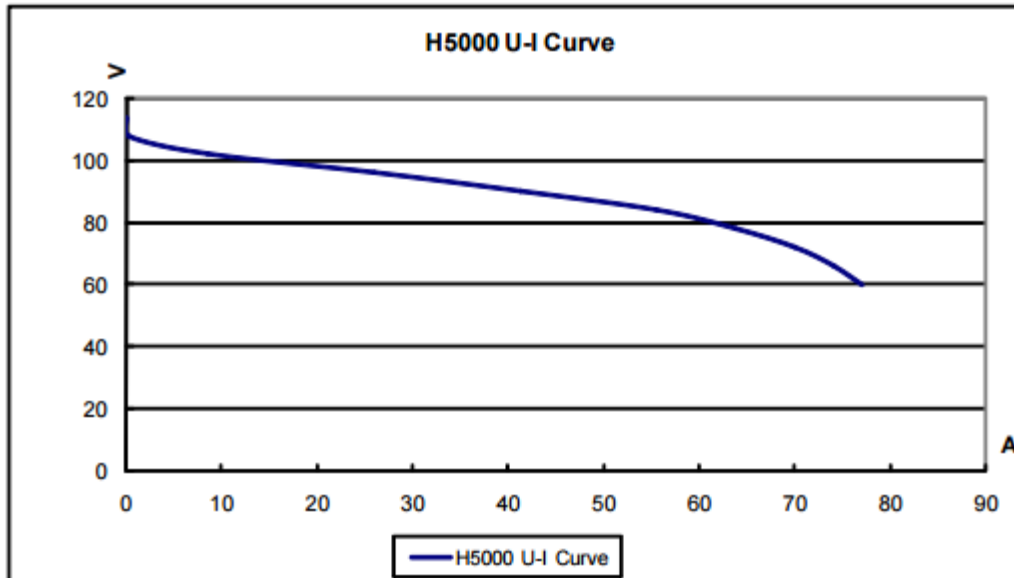


Figura A1. Voltaje Vs. Corriente de la celda H5000

Fuente: Manual del usuario H-5000 Stack

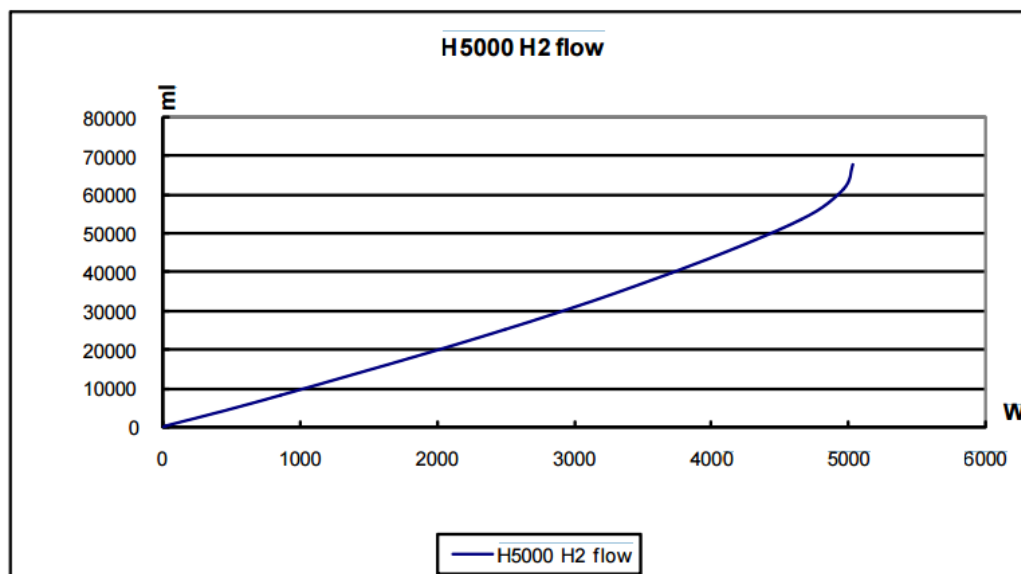


Figura A2. Flujo Vs. Potencia de la celda H5000

Fuente: Manual del usuario H-5000 Stack

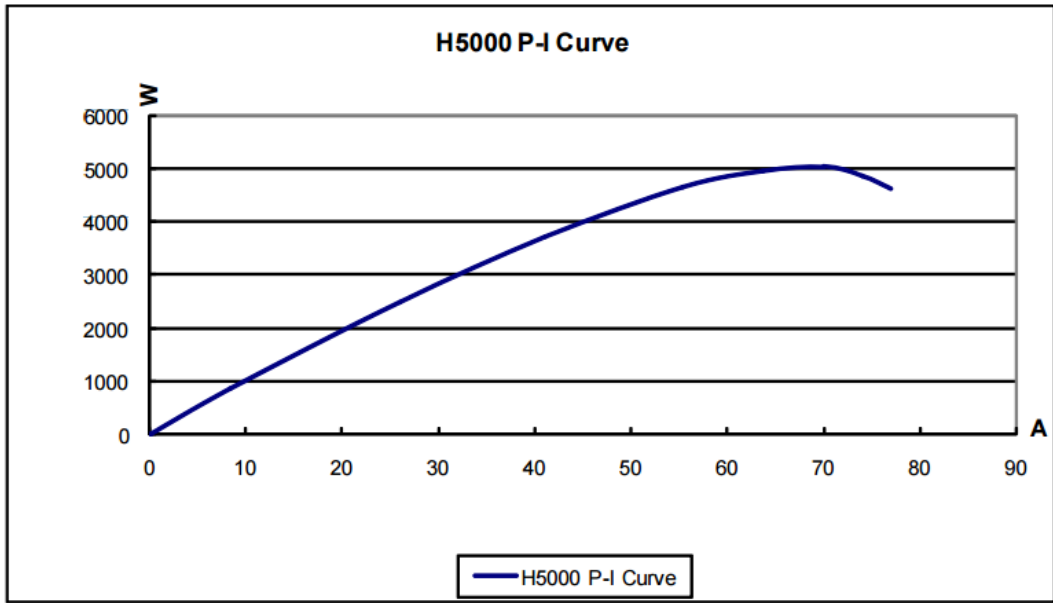


Figura A3. Potencia Vs. Corriente de la celda H5000

Fuente: Manual del usuario H-5000 Stack

APÉNDICE B

Vista de diagrama de bloques del vehículo en Simulink - Advisor

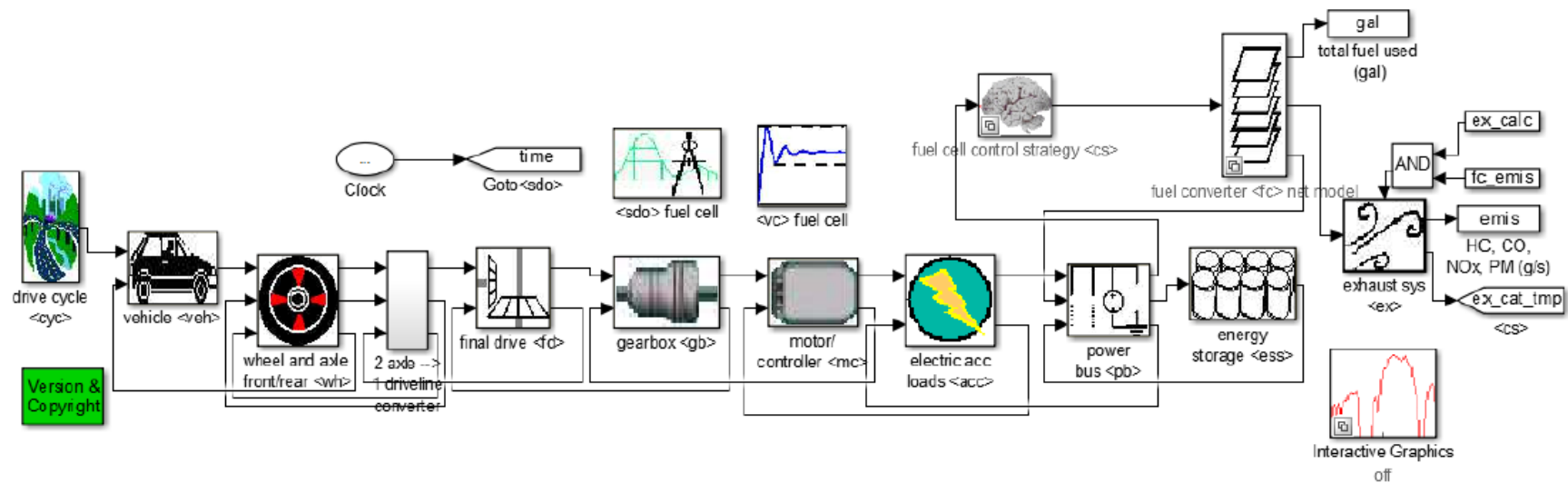


Figura B1. Diagrama de bloques del sistema de energizamiento del kart

Fuente: Advisor, 2016