



# ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

## Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

### SISTEMA HÍBRIDO DE SUMINISTRO DE ENERGÍA BASADO EN PILAS DE COMBUSTIBLE PARA APLICACIÓN EN PEQUEÑOS VEHÍCULOS ELÉCTRICOS

Dennys Celi <sup>(1)</sup>, Jonathan Cayetano <sup>(2)</sup>, Wilton Agila<sup>(3)</sup>

Facultad de Ingeniería en Electricidad y Computación

Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL)

Campus Gustavo Galindo, Km 30.5 vía Perimetral

Apartado 09-01-5863. Guayaquil-Ecuador

[daceli@espol.edu.ec](mailto:daceli@espol.edu.ec) <sup>(1)</sup>, [jondcaye@espol.edu.ec](mailto:jondcaye@espol.edu.ec) <sup>(2)</sup>, [wagila@fiec.espol.edu.ec](mailto:wagila@fiec.espol.edu.ec) <sup>(3)</sup>

#### Resumen

*El presente trabajo presenta el diseño y análisis de un sistema híbrido de suministro de energía para un pequeño vehículo eléctrico. El sistema propuesto utiliza tres fuentes de energía que conmutan de acuerdo a la potencia requerida por el motor eléctrico del vehículo. La fuente de energía primaria corresponde a una pila de combustible que entra en funcionamiento cuando la demanda de potencia por parte del vehículo es baja y cuando el estado de carga de la batería o supercapacitor empiece a disminuir; la segunda corresponde a la batería, que proporciona la potencia en el arranque y cuando se requiera potencia en un sistema estable; y el tercero es un supercapacitor, este último ayuda cuando la demanda de potencia sea alta en el caso de una aceleración, es decir, potencias pico del vehículo. La simulación se lleva a cabo en el Software Matlab, mediante la programación de Simulink. Por medio de sus librerías se obtuvo los modelos de la pila de combustible, batería y supercapacitor, los cuales han sido analizados en cuatro diferentes escenarios, donde se obtiene la mejor solución híbrida para un vehículo Kart.*

**Palabras Claves:** *pila de combustible, supercapacitor, simulink.*

#### Abstract

*This project presents the design and analysis of a hybrid power supply system for a small electric vehicle. The proposed system uses three energy sources that are switched according to the power required by the electric motor vehicle. The primary energy source corresponds to a fuel cell which comes into operation when the demand for power by the vehicle is low and when the state of charge of the battery or supercapacitor begins to decrease; It corresponds to the second battery, which provides power at startup and when power is required in a stable system; and the third is a supercapacitor, the latter help when power demand is high in the case of acceleration, that is, peak powers the vehicle. The simulation is performed in Matlab software, by programming Simulink. Through its library models the fuel cell, battery and supercapacitor was obtained, which have been analyzed in four different scenarios where the best hybrid solution for a vehicle Kart is obtained.*

**Key Words:** *fuel cell, supercapacitor, simulink.*

## 1. Introducción

El uso de combustibles fósiles en el sector del transporte es el responsable de las emisiones de gases invernadero, consume los recursos petroleros mundiales y también contribuye con la emisión de otros contaminantes como los óxidos de nitrógeno y de azufre. En la actualidad existen en circulación a nivel mundial alrededor de 750 millones de automóviles y para un futuro se espera que esta cifra aumente de manera notable.

Se está tratando de evitar estas emisiones de CO<sub>2</sub> mediante el uso de una variedad de combustibles, los cuales pueden ayudar a nuevos suministros de energía. Entre estos combustibles podemos mencionar diésel y gasolinas reformulados, metanol, etanol, biodiesel, gasolinas sintéticas producidas a partir de gas natural o carbón, gas natural comprimido y por ende hidrógeno que es el gas más abundante en la naturaleza.

## 2. Solución propuesta

Una de las maneras que se puede eliminar los gases de efecto invernadero y el ruido que causan diariamente los vehículos de combustión es aplicando un sistema híbrido con el fin de que se vea implementado como alternativa al desarrollo del transporte, el cual brinda la ventaja de un bajo impacto ambiental. Es por ello que una de las alternativas de suministro de energía es la pila de combustible de hidrógeno que tienen ciertas ventajas sobre la tecnología ya usada como es la combustión, ya que favorece con un aumento de la eficiencia entre un 40–70 %, teniendo en cuenta que la emisión producida debido a la reacción de hidrogeno con oxígeno es vapor de agua.

## 3. Aspectos generales

Se mencionan características y funcionamiento de las distintas fuentes de energías que se utilizan para el diseño del sistema híbrido apropiado.

### 3.1 Pila de combustible

Es un dispositivo en donde la energía química se convierte en energía eléctrica a través de un proceso electroquímico. El combustible y el oxidante se suministran continuamente y de forma separada a los dos electrodos donde tiene lugar una reacción, es necesario el electrolito para conducir los iones de un electrodo a otro. En la figura 1 se muestra una pila de combustible tipo PEM.

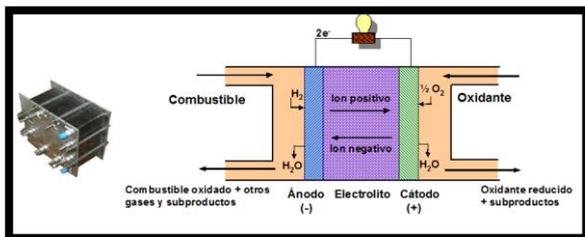


Figura 1. Pila de combustible tipo PEM

### 3.2 Sistema híbrido con pilas de combustible

Las configuraciones híbridas permiten aumentar la eficiencia del sistema disminuyendo el consumo de hidrógeno, como así también mejorar la respuesta transitoria ante cambios bruscos de carga. Un sistema de generación híbrido está compuesto por al menos una fuente de energía y un sistema de almacenamiento de energía. En el caso de sistemas con pilas de combustible, la fuente de energía es la propia pila y el sistema acumulador de energía puede estar compuesto por baterías o por supercondensadores.

### 3.3 Batería

Es un dispositivo que consiste en una o más celdas electroquímicas que pueden convertir la energía química almacenada en electricidad. Cada celda consta de un electrodo positivo, un electrodo

negativo, y electrolitos que permiten que los iones se muevan entre los electrodos.

## 3.4 Supercapacitor

Son celdas de almacenamiento basadas en el condensador, que proporcionan rápidos y masivos estallidos de energía instantánea. Los supercondensadores son una buena opción debido a diversas ventajas tales como su alta densidad de energía, larga vida útil, buena eficiencia y alta velocidad de carga y descarga.

## 4. Parametrización de elementos

Previo a conocer las distintas configuraciones híbridas realizadas, se procede a parametrizar cada una de las fuentes de energía, motor y control de velocidad.

### 4.1 Parametrización de la pila de combustible

Se ha escogido comercialmente una pila de combustible tipo PEM (Membrana de intercambio Protónico) de 1KW a 46V, debido a que tienen una alta densidad de potencia, además, pueden variar rápidamente su potencia de salida para adaptarse a la demanda energética tanto a nivel industrial como casero, figura 2.

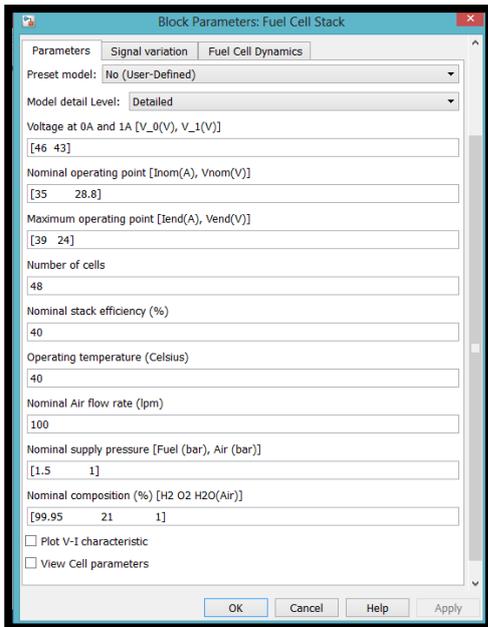


Figura 2. Pila de combustible comercial (Horizon)

Entre sus datos más importantes se tiene:

- Tipo de Pila de Hidrógeno: PEM.
- Numero de celdas: 48.
- Potencia: 1000W.
- Eficiencia: 28.8 V / 35 A.
- Pureza de Hidrogeno: 99.995 %.

La figura 3 ilustra los parámetros de la pila ingresados en el simulador.



**Figura 3.** Parámetros pila de combustible

#### 4.2 Parametrización de la batería

Se ha elegido la batería Lithium – Ion (Iones de Litio), debido a que acumulan mucha mayor carga por unidad de peso y volumen, larga vida en las baterías para vehículos eléctricos, más de 3000 ciclos de carga/descarga. Alto voltaje por célula, ya que cada batería proporciona 3.7v, lo mismo que tres baterías de Ni-MH o Ni-Cd (1,2 V cada una), figura 4.

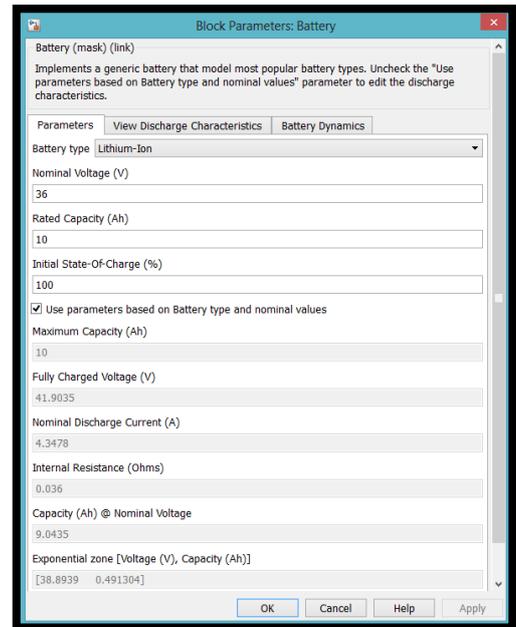


**Figura 4.** Batería comercial (Golden motor)

Entre sus datos más importantes se tiene:

- Peso: 5.5 Kg.
- Capacidad: 36 V / 10AH.
- Corriente máxima de descarga: 35[A].
- Ciclos de carga: mayor a 3000.

La figura 5 ilustra los parámetros de la batería ingresados en el simulador.



**Figura 5.** Parámetros de la batería

#### 4.3 Parametrización del supercapacitor

Se ha elegido Supercapacitor MAXWELL para su aplicación en vehículos eléctricos o híbridos, figura 6.

Actúan como fuerza motriz secundaria y permiten almacenar la energía generada durante el proceso de frenado y reutilizarla en la siguiente operación de aceleración.



**Figura 6.** Supercapacitor comercial (Maxwell)

Entre sus datos más importantes se tiene:

- Capacitancia nominal: 500F.
- Voltaje nominal: 16 V.
- Corriente máxima: 1900 A.
- Numero de celdas: 6.
- Capacitancia de celdas individuales: 3000 F.

La figura 7 ilustra los parámetros del supercapacitor ingresados en el simulador.

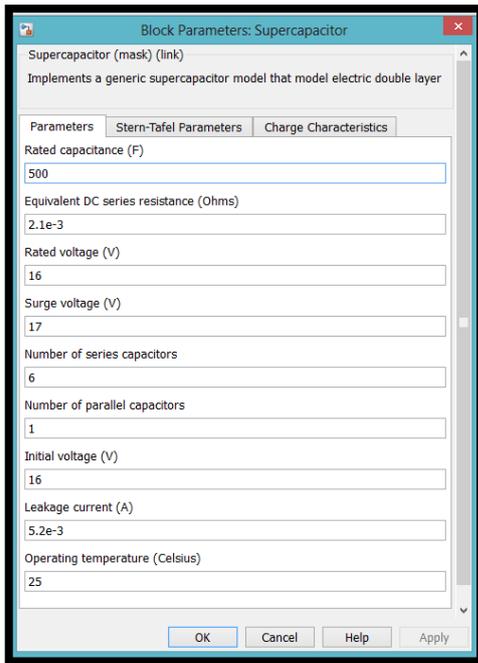


Figura 7. Parámetros de la batería

#### 4.4 Parametrización del motor eléctrico

El motor eléctrico provee el torque necesario para mover el vehículo eléctrico.

Para el sistema híbrido se escoge un motor Brushless a una potencia máxima de 1000W, ya que ofrece ventajas tanto eléctricas como mecánicas para esta aplicación.

De los datos técnicos del fabricante se tiene un motor eléctrico con una potencia de 1000W con una velocidad aproximadamente 480 rpm y un torque máximo de 25 [N.m].

#### 4.5 Control de velocidad

El controlador designado es el BAC-282 de Magic Pie, el cual posee las siguientes características:

- Control de Velocidad de crucero.
- Límite de velocidad Máxima, amperios, aceleración, etc.
- Alarma antirrobo y bloqueo de rueda por detección de vibración.
- Frenado regenerativo.
- Funciona con 24V, 36V o 48V.
- Protección de corriente excesiva, bajo voltaje.

### 5. Configuraciones sistemas híbridos

En base a las diferentes estrategias utilizadas lo que se pretende es determinar la mejor solución híbrida para el suministro de energía a un motor eléctrico de 1KW de un vehículo Kart.

#### 5.1 Sistema híbrido 1

La primera configuración híbrida como se ilustra en la figura 8, es un sistema basado en una batería y una pila de

combustible tipo PEM. Cada fuente de energía alimenta a un convertidor elevador de 48 V DC/DC luego se muestra el bloque controlador y el control de velocidad que dependiendo de las condiciones de potencia alimentan a la carga 1KW.

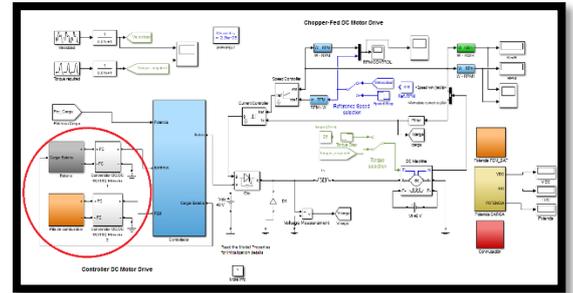


Figura 8. Configuración híbrida 1

#### 5.2 Sistema híbrido 2

La segunda configuración, es un sistema híbrido basado en una batería y una pila de combustible tipo PEM, con las mismas características técnicas que el sistema anterior, a diferencia que solo tiene un convertidor elevador 48 Vdc DC/DC a la salida del conmutador como se ilustra en la figura 9.

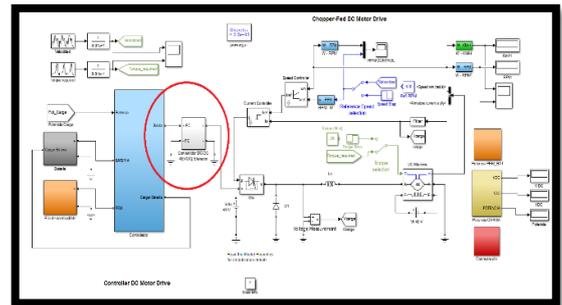


Figura 9. Configuración híbrida 2

#### 5.3 Sistema híbrido 3

En la tercera configuración se ha añadido una fuente de energía, un supercapacitor el cual ayuda a suministrar energía durante los picos de potencia y arranque del motor, este sistema posee 3 convertidores elevadores 48V DC/DC para cada fuente de energía como se visualiza en la figura 10.

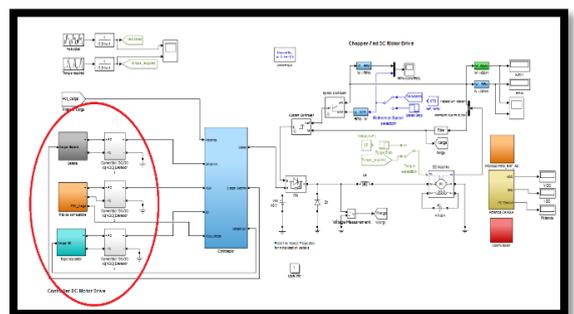


Figura 10. Configuración híbrida 3

### 5.4 Sistema híbrido 4

En la cuarta configuración híbrida se trabaja con las tres fuentes de energía, la diferencia de este sistema consiste en que posee un solo convertidor elevador 48V DC/DC, el cual se encuentra a la salida del conmutador, como se ilustra en la figura 11. Todos los resultados de los osciloscopios se los muestra en el capítulo 7.

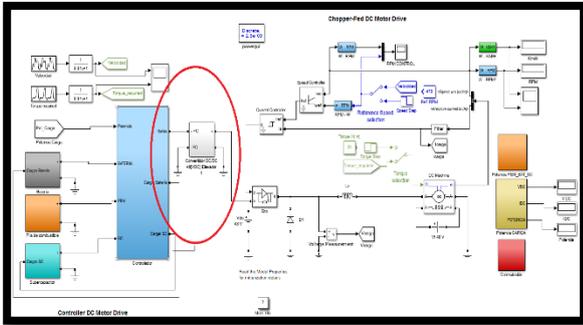


Figura 11. Configuración híbrida 4

## 6. Diseño del controlador

Este capítulo se enfoca en la descripción del bloque controlador del sistema, el funcionamiento del control de velocidad, los parámetros de velocidad y torque que se aplican al motor en diferentes tiempos.

### 6.1 Controlador configuración híbrida 3 – 4

Para el controlador del sistema híbrido 3 – 4 a diferencia del controlador del sistema híbrido 1 – 2 se le añade el supercapacitor, que cubre las demandas de potencias altas para valores mayores 1100W o un tiempo menor a 3 segundos dada por la señal clock, para un rango de potencias entre 400 y 1100 W, el interruptor permite el paso de corriente de la batería, y por ende para potencias menores a 400 W el que conmuta es la pila de combustible. En la figura 12 se ilustra el controlador para la configuración híbrida 3-4 implementado en simulink, donde se muestra las condiciones dado por los parámetros de entrada que permite activar las señales de salida (SC, PEM, Batería).

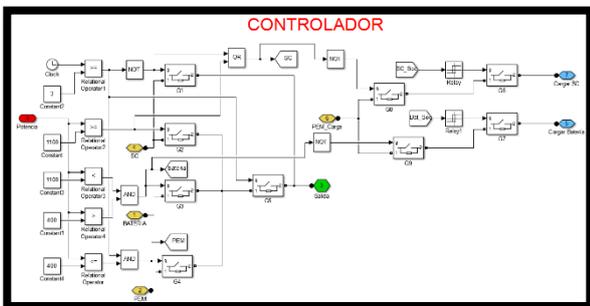


Figura 12. Controlador configuración híbrida 3 – 4

### 6.2 Control de velocidad para un motor DC

En la figura 13 se ilustra un motor DC que se alimenta de una fuente continua (baterías, pila de combustible o supercapacitor) mediante el troceador, consistente de un GTO y un diodo de paso libre D1.

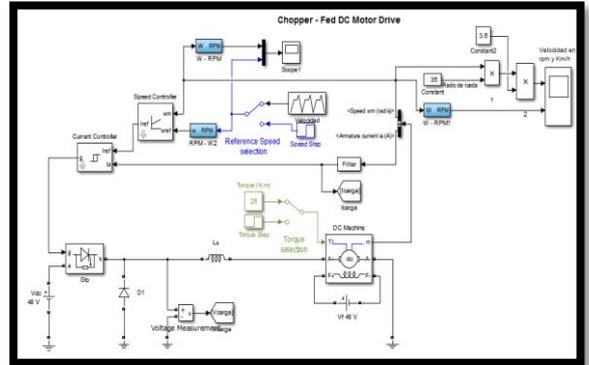


Figura 13. Chopper – Fed DC Motor Drive

### 6.3 Velocidad y torque aplicados al motor DC

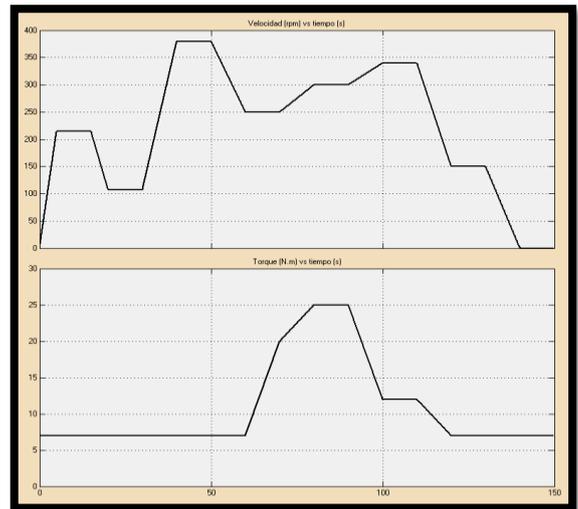
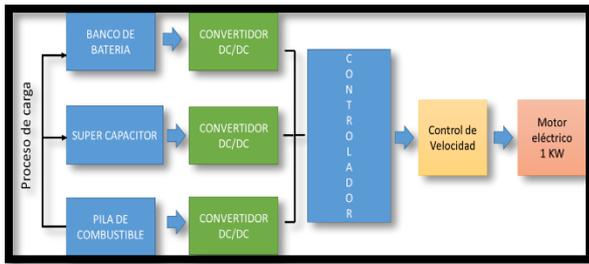


Figura 14. Velocidad (rpm) y torque (N.m)

La figura 14 muestra los datos ingresados de velocidad y torque que corresponden a la aceleración del Kart, su velocidad constante, y des-aceleración en diferente tiempos. El torque constante simula al peso propio del vehículo Kart mientras que su torque variable simula a una pendiente o al ingreso en una curva.

## 7. Resultados del sistema híbrido seleccionado

Se ha seleccionado la configuración híbrida 3, el cual consta de las 3 fuentes de energía y 3 convertidores que se encargan de suministrar energía dependiendo de la demanda de potencia que requiere el motor eléctrico, esta configuración permite mejorar el funcionamiento de todo el conjunto, el diagrama de bloque del sistema se ilustra en la figura 15.



**Figura 15.** Diagrama de bloques configuración híbrida 3

### 7.1 Potencia suministrada por la batería, pila de combustible y supercapacitor

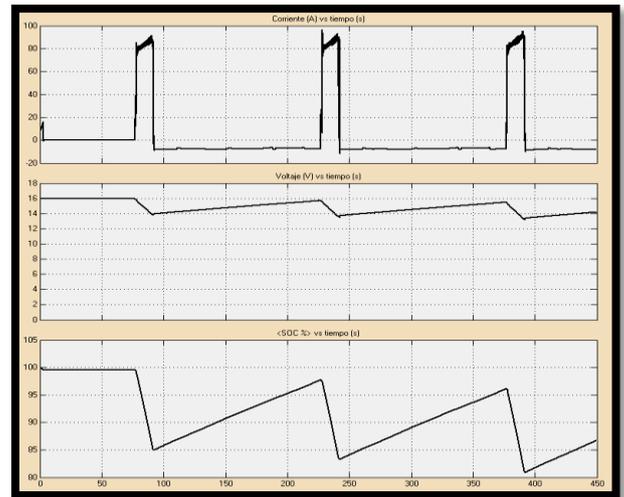
En la figura 16 se visualiza el suministro de potencia de las 3 fuentes de energía, el supercapacitor entrega hasta un máximo de 1200 W aproximadamente, en el osciloscopio se observa que la pila de combustible entrega más de los 400 W, esto es porque está entregándole energía al supercapacitor.



**Figura 16.** Potencia batería + pila de combustible+supercapacitor

### 7.2 Voltaje, corriente y estado de carga del supercapacitor en 3 ciclos

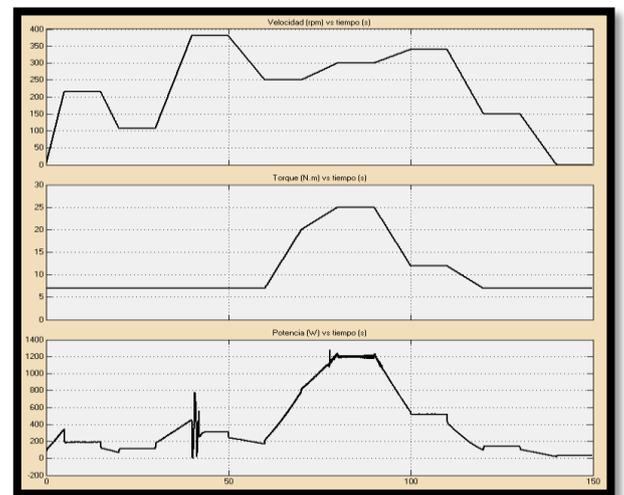
En la figura 17 se visualiza el voltaje y la corriente que entrega el supercapacitor para suministrar energía a la carga, en el intervalo donde la corriente es negativo se debe a que la pila de combustible le está suministrando energía para evitar que se descargue. El estado de carga aumenta cuando el SOC es menor a 90%, pero debido a la demanda de potencia que requiere la carga, se puede observar que el SOC no llega al 100% en un tiempo de 450 s.



**Figura 17.** Estado de carga supercapacitor en 3 ciclos

### 7.3 Velocidad, torque y potencia en la carga

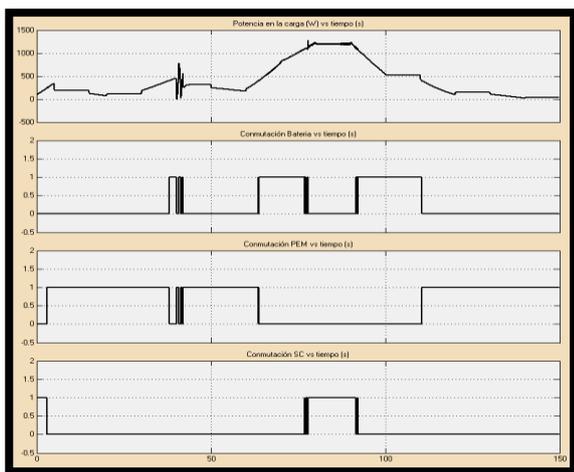
En la figura 18 se observa la velocidad requerida y torque aplicado al motor, donde la demanda de potencia que requiere en el arranque llega hasta un valor máximo de 345 W. En un tiempo de 40 s se observa varias oscilaciones en la potencia de 400W conmutan la batería y pila de combustible. La potencia suministrada por la suma de las 3 fuentes de energía se adapta a la demanda de potencia que requiere el motor eléctrico, dando energía de manera eficiente y estable, mejorando el funcionamiento global del sistema.



**Figura 18.** Velocidad, torque y potencia en la carga

### 7.4 Conmutación de la batería, pila de combustible y supercapacitor

En la figura 19 se visualiza cada una de las conmutaciones de las fuentes de energía que se activan dependiendo de la demanda de potencia del motor eléctrico, para potencias menores a 400 W suministra la pila de combustible, entre 400W - 1100 W la batería, y para demandas de potencias altas y el arranque el supercapacitor.



**Figura 19.** Conmutación batería, pila de combustible y supercapacitor

## 8. Análisis económico

En la tabla 1 se menciona cada uno de los componentes del modelo híbrido 3 con su respectiva marca, precio unitario y precio total de acuerdo al número de elementos a usar. En los primeros ítems de la tabla se encuentran las fuentes de energía, luego el convertidor elevador, controlador, control de velocidad y finalmente el motor eléctrico. Cabe recalcar que en este informe no se toma en cuenta elementos para la construcción del chasis-carrocería del vehículo eléctrico kart ni mano de obra.

**Tabla 1.** Informe económico

ITEM	Precio Uni.	Precio total
Banco de baterías (Golden Motor) 36V/10AH	\$ 481,27	\$ 962,54
Pila de combustible PEM 35A / 28.8V 1 KW	\$ 6485,00	\$ 6485,00
Depósito de Hidrogeno 900 L	\$2000	\$2000
Supercapacitor (Maxwell) 500F / 16V	\$ 560,00	\$ 560,00
Convertidor Elevador 24 – 36 V / 48 V 1 KW	\$ 420,00	\$ 1334,16
Controlador PLC SIEMENS S7-1200	\$ 450,00	\$ 450,00
Control de velocidad 48V/50A BAC-0282P	\$ 84,00	\$ 84,00
Motor DC Brushlees 48 V – 1 KW	\$380,25	\$380,25
<b>TOTAL</b>		<b>\$ 12255,95</b>

## 9. Conclusiones

- Con este trabajo de investigación se ha logrado realizar la simulación de distintos sistemas híbridos de suministro de energía, del cual se ha elegido la configuración tres.
- El vehículo híbrido de la configuración tres, posee un sistema de alimentación basado en un banco de

baterías, pila de combustible PEM, y supercapacitor. Cuando la demanda de potencia es alta, como en una aceleración, el supercapacitor y batería suministran la potencia necesaria. Cuando la demanda es baja como en condición de velocidad crucero, la pila de combustible proporciona la potencia adecuada, en este estado las baterías y supercapacitor se recargan.

- La Potencia máxima de la carga muestra valores de 1250W para casos cuando el motor trabaja a su máxima velocidad de 310 RPM, equivalentes a 40km/H con carga de 25 N-m. Así mismo, se tiene el motor al vacío, el cual nos brinda una velocidad máxima de 470 RPM que equivale a 62Km/H.
- Un sistema compuesto por pilas de combustible, batería y supercapacitores, permite aumentar la eficiencia global del sistema de suministro de energía. El hecho de contar con energía acumulada y que rápidamente sea entregada a la carga (supercapacitores), ayuda a resolver problemas importantes en las pilas de combustible, mejorando su dinámica lenta ante incrementos bruscos de corriente demandada por la carga.
- El ciclo de carga de las baterías para la simulación se encuentra en 100% a 98.5%, estos valores pueden ser ajustados a valores de 100% a 30% como valores óptimos en sistemas reales, así mismo para el supercapacitor, los cuales son cargados mediante la pila de combustible.
- Como se observa en el informe económico no es viable por el momento mantener un vehículo híbrido, por su elevado costo de operación y fabricación, solo en componentes se gasta un valor estimado de \$ 12255,95.

## 10. Recomendaciones

- Para realizar configuraciones híbridas tener en cuenta las curvas características de las fuentes y de la carga a usar, de esta manera se puede tener un rango próximo de exactitud con valores reales.
- Tener en cuenta que los valores voltaje son troceados por el controlador de velocidad, por lo que se es necesario utilizar valores medios DC.
- Para los distintos sistemas híbridos a utilizar se recomienda el uso de un convertidor elevador DC/DC para cada fuente de energía, con ello se estabiliza las señales de voltaje y corriente.
- Con respecto a la batería, se requiere que sea de iones de litio ya que acumulan mucha mayor carga por unidad de peso y volumen en comparación con las de plomo ácido que son de alto peso.
- Los diferentes sistemas simulados puede ser fácilmente escalables en potencia y velocidad ajustándose con ello a diferentes tipos de vehículos híbridos u otras aplicaciones.

## 11. Referencias

- [1] Ministerio de ambiente, <http://www.ambiente.gob.ec/mae-trabaja-en->

programas-de-mitigacion-y-adaptacion-para-reducir-emisiones-de-co2-en-ecuador/, Mayo de 2013.

- [2] M. Laughton, "Fuel Cells", Power Engineering Journal, February 2002.
- [3] W. Yang, B. Bates, N. Fletcher, R. Pow, "Control Challenges and Methodologies in Fuel Cell Vehicles Development", Fuel Cell Tecnology for Vehicles, 1998.
- [4] Sunshine, Blog de Ingeniería y sostenibilidad para el s.21, <http://www.ison21.es/2006/05/19/como-funciona-una-pila-de-combustible/>, 19 de mayo del 2006.
- [5] A. Drolia, P. Jose, N. Mohan, "An Approach to Connect Ultracapacitor to Fuel Cell Powered Electric Vehicle and Emulating Fuel Cell Electrical Characteristics using Switched Mode Converter", 2003 IEEE.
- [6] D. Siguenza, S. Márquez, "Diseño, construcción y pruebas de un vehículo eléctrico (Energía solar-energía humana)", 2002.
- [7] <https://upcommons.upc.edu/pfc/bitstream/2099.1/7538/1/Memoria%20PFC.pdf>, "Memoria PFC", 2009.
- [8] Fuel Cell HandBook, Seventh Edition, EG&G Technical Services, Inc., 2004.