



**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”**

**INFORME DE MATERIA DE GRADUACIÓN**

Previo a la obtención del Título de:

**INGENIERO EN ELECTRICIDAD ESPECIALIZACIÓN ELECTRÓNICA Y  
AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL**

Presentado por:

**JONATHAN DAVID CAYETANO ARREAGA**

**DENNYS ADRIAN CELI ORRALA**

**GUAYAQUIL – ECUADOR**

**Año: 2015**

## **AGRADECIMIENTO**

A nuestras familias que siempre estuvieron apoyándonos en el transcurso de la vida universitaria, al PhD. Wilton Agila por la guía prestada en el desarrollo de este proyecto y a todas aquellas personas que de una u otra manera colaboraron para la realización de este trabajo, nuestro más sincero agradecimiento.

## **DEDICATORIA**

Quiero dedicar este trabajo a mis padres por el apoyo brindado durante mi carrera universitaria, a mis hermanos por la compañía y a Dios por darme la fortaleza de seguir adelante.

**Dennys Adrian Celi Orrala**

A Dios por darme fuerzas, a mis padres, hermanos por el apoyo y comprensión que me han brindado en estos años de carrera estudiantil, a las personas que han estado conmigo en esta etapa importante de mi vida, quienes son considerados como parte de mi familia.

**Jonathan David Cayetano Arreaga**

## **TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN**

---

**Ph.D. Wilton Agila**

PROFESOR DE LA MATERIA DE GRADUACIÓN

---

**M.Sc. Víctor Asanza**

PROFESOR DELEGADO POR LA UNIDAD ACADÉMICA

## DECLARACIÓN EXPRESA

“La responsabilidad del contenido de este Informe, nos corresponde exclusivamente a nosotros; y el patrimonio intelectual de la misma a la ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL”

(Reglamento de Graduación de la ESPOL)

---

Jonathan David Cayetano Arreaga.

---

Dennys Adrian Celi Orrala

## RESUMEN

En este trabajo se 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 de hidrógeno 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 empieza 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.

Las fuentes de energía son comandadas por un controlador, el cual evalúa las condiciones de potencia de un motor eléctrico, dependiendo de la velocidad y torque que sea requerido, para poder suministrar energía de una manera eficiente.

## ÍNDICE GENERAL

AGRADECIMIENTO .....	II
DEDICATORIA .....	III
TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN .....	IV
DECLARACIÓN EXPRESA .....	V
RESUMEN .....	VI
ÍNDICE GENERAL.....	VIII
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XV
ÍNDICE DE TABLAS .....	XIX
ABREVIATURAS .....	XX
INTRODUCCIÓN .....	XXI
CAPÍTULO 1 .....	1
1. Generalidades .....	1
1.1 Descripción del problema.....	1
1.2 Justificación.....	2
1.3 Objetivo .....	3
1.4 Resultados esperados.....	3
CAPÍTULO 2.....	4

2. Marco Teórico.....	4
2.1 Pilas de combustible .....	4
2.1.1 Funcionamiento de la pila de combustible .....	6
2.1.2 Sistemas híbridos con pilas de combustible .....	8
2.1.3 Tipos de pilas de combustible.....	9
2.2 Batería.....	12
2.2.1 Tipos de batería por su naturaleza interna .....	12
2.3 Ultracondensadores .....	14
2.4 Vehículo híbrido .....	15
2.4.1 Tipos de vehículo híbrido.....	15
2.4.2 Funcionamiento de un automóvil híbrido .....	18
2.5 Motor DC Brushless .....	19
2.5.1 Funcionamiento del motor Brushless DC.....	20
CAPÍTULO 3.....	23
3. Descripción de parámetros del sistema.....	23
3.1 Diagrama de Bloques de Suministro Híbrido.....	24
3.2 Batería.....	25
3.2.1 Conceptos de los distintos parámetros configurados en la batería. ....	27

3.2.2 Configuración de parámetros de la batería.....	30
3.3 Pila de combustible .....	31
3.3.1 Conceptos de los distintos parámetros configurados en la pila de combustible. ....	33
3.3.2 Configuración de parámetros de la pila de combustible. ....	36
3.4 Tanque de almacenamiento de Hidrógeno.....	37
3.5 Supercapacitor .....	38
3.5.1 Conceptos de los distintos parámetros configurados en el supercapacitor.....	40
3.5.2 Capacitancia equivalente supercapacitor .....	42
3.5.3 Configuración de parámetros del supercapacitor. ....	43
3.6 Motor Eléctrico. ....	44
3.6.1 Configuración de parámetros motor DC. ....	45
3.7 Sistema de Control.....	47
3.8 Control de Velocidad .....	47
3.9 Configuraciones para el suministro de energía de un pequeño vehículo eléctrico Kart.....	48
3.9.1 Suministro híbrido 1 .....	48
3.9.2 Suministro híbrido 2.....	49

3.9.3 Suministro híbrido 3.....	50
3.9.4 Suministro híbrido 4.....	51
CAPÍTULO 4.....	52
4. Diseño del controlador.....	52
4.1 Controlador configuración híbrida 1 - 2.....	53
4.2 Controlador configuración híbrida 3 - 4.....	55
4.3 Funcionamiento de control de velocidad para un motor DC.....	57
4.4 Referencia de velocidad con una constante.....	60
4.5 Referencia de velocidad con una señal escalón.....	62
4.6 Convertidor de velocidad.....	64
4.6.1 Convertidor de rad/s a km/h.....	64
4.6.2 Convertidor de rad/s a rpm.....	65
4.7 Parámetros de velocidad y torque aplicados al motor DC.....	66
CAPÍTULO 5.....	69
5. Resultados de los distintos sistemas híbridos.....	69
5.1 Pruebas realizadas Suministro híbrido 1.....	70
5.1.1 Estado de carga, corriente y voltaje en la batería.....	70
5.1.2 Voltaje, corriente en la pila de combustible.....	71
5.1.3 Potencia suministrada por la batería y pila de combustible.....	72

5.1.4	Conmutación de la batería y pila de combustible .....	73
5.1.5	Velocidad de referencia y velocidad de control.....	74
5.1.6	Velocidad en km/h y rpm .....	75
5.1.7	Velocidad, torque y potencia en la carga.....	76
5.1.8	Voltaje, corriente y potencia en la carga .....	77
5.2	Pruebas realizadas Suministro híbrido 2.....	78
5.2.1	Estado de carga, corriente y voltaje en la batería.....	78
5.2.2	Voltaje, corriente en la pila de combustible.....	79
5.2.3	Potencia suministrada por la batería y pila de combustible .....	80
5.2.4	Conmutación de la batería y pila de combustible .....	81
5.2.5	Velocidad, torque y potencia en la carga.....	82
5.2.6	Voltaje, corriente y potencia en la carga .....	83
5.3	Pruebas realizadas Suministro híbrido 3.....	84
5.3.1	Estado de carga, corriente y voltaje en la batería.....	84
5.3.2	Voltaje, corriente en la pila de combustible.....	85
5.3.3	Voltaje, corriente y estado de carga en el supercapacitor. ....	86
5.3.4	Potencia suministrada por la batería, pila de combustible y supercapacitor.....	88

5.3.5	Conmutación de la batería, pila de combustible y supercapacitor.....	89
5.3.6	Velocidad de referencia y velocidad de control.....	90
5.3.7	Velocidad en km/h y rpm .....	91
5.3.8	Velocidad, torque y potencia en la carga.....	92
5.3.9	Voltaje, corriente y potencia en la carga .....	93
5.4	Pruebas realizadas Suministro híbrido 4.....	94
5.4.1	Estado de carga, corriente y voltaje en la batería.....	95
5.4.2	Voltaje, corriente en la pila de combustible.....	96
5.4.3	Voltaje, corriente y estado de carga en el supercapacitor. ....	97
5.4.4	Potencia suministrada por la batería, pila de combustible y supercapacitor.....	98
5.4.5	Conmutación de la batería, pila de combustible y supercapacitor.....	99
5.4.6	Velocidad de referencia y velocidad de control.....	100
5.4.7	Velocidad en km/h y rpm .....	101
5.4.8	Voltaje, corriente y potencia en la carga.....	102
5.5	Informe económico de todos los componentes del modelo híbrido seleccionado.....	104
CONCLUSIONES .....		106

RECOMENDACIONES.....	109
ANEXOS.....	111
BIBLIOGRAFÍA.....	127

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Pila de combustible.....	5
Figura 2.2 Principio de operación de una pila de combustible .....	7
Figura 2.3 Configuración serie .....	16
Figura 2.4 Configuración paralelo.....	18
Figura 2.5 Esquema simplificado de un automóvil híbrido.....	19
Figura 2.6 Esquema Motor Brushless.....	20
Figura 2.7 Funcionamiento del motor Brushless DC.....	22
Figura 3.1 Diagrama de bloque de Suministro Híbrido .....	24
Figura 3.2 Batería comercial (Golden Motor).....	26
Figura 3.3 Bloque de la batería.....	27
Figura 3.4 Configuración de parámetros de la batería.....	30
Figura 3.5 Pila de combustible (HORIZON).....	31
Figura 3.6 Bloque de la pila de combustible .....	32
Figura 3.7 Configuración de parámetros de la pila de combustible .....	36
Figura 3.8 Depósito de Hidruros metálicos (Ovonic).....	37
Figura 3.9 Supercapacitor (MAXWELL).....	39
Figura 3.10 Bloque del supercapacitor .....	40
Figura 3.11 Condensadores en serie.....	42
Figura 3.12 Configuración de parámetros del supercapacitor .....	43
Figura 3.13 Cuadro de parámetros motor DC.....	45

Figura 3.14 Configuración híbrida 1 para vehículo eléctrico .....	48
Figura 3.15 Configuración híbrida 2 para vehículo eléctrico .....	49
Figura 3.16 Configuración híbrida 3 para vehículo eléctrico .....	50
Figura 3.17 Configuración híbrida 4 para vehículo eléctrico .....	51
Figura 4.1 Diagrama de Flujo del Controlador configuración híbrida 1 – 2 ...	54
Figura 4.2 Bloque controlador configuración híbrida 1 – 2.....	55
Figura 4.3 Diagrama de Flujo del Controlador configuración híbrida 3 – 4 ...	56
Figura 4.4 Bloque controlador configuración híbrida 3 – 4.....	57
Figura 4.5 Chopper – Fed DC Motor Drive .....	57
Figura 4.6 Cuadro de parámetros controlador lazo de corriente.....	58
Figura 4.7 Cuadro de parámetros controlador de velocidad.....	59
Figura 4.8 Valor de referencia y valor medido (rpm).....	61
Figura 4.9 Voltaje de salida del troceador y corriente de armadura.....	62
Figura 4.10 Parámetros señal escalón .....	63
Figura 4.11 Valor de referencia y valor medido (rpm) para una señal escalón .....	64
Figura 4.12 Convertidor de rad/s a km/h.....	65
Figura 4.13 Convertidor de rad/s a rpm .....	65
Figura 4.14 Parámetros de velocidad .....	66
Figura 4.15 Parámetros de Torque.....	66
Figura 4.16 Velocidad (RPM) y torques (N.m) aplicados al motor DC.....	68
Figura 5.1 Estado de carga, corriente y voltaje en la batería.....	70

Figura 5.2 Voltaje, corriente en la pila de combustible.....	71
Figura 5.3 Potencia Batería + Pila de combustible .....	72
Figura 5.4 Conmutación de la batería y pila de combustible .....	73
Figura 5.5 Velocidad de referencia y velocidad de control.....	74
Figura 5.6 Velocidad en km/h y rpm .....	75
Figura 5.7 Velocidad, Torque y Potencia en la carga .....	76
Figura 5.8 Voltaje, corriente y potencia en la carga .....	77
Figura 5.9 Estado de carga en 3 ciclos.....	78
Figura 5.10 Voltaje, corriente en la pila de combustible.....	79
Figura 5.11 Potencia Batería + Pila de combustible .....	80
Figura 5.12 Conmutación de la batería y pila de combustible .....	81
Figura 5.13 Velocidad, Torque y Potencia en la carga .....	82
Figura 5.14 Voltaje, corriente y potencia en la carga .....	83
Figura 5.15 Estado de carga, corriente y voltaje en la batería.....	84
Figura 5.16 Voltaje, corriente en la pila de combustible.....	85
Figura 5.17 Voltaje, corriente y estado de carga en el supercapacitor. ....	86
Figura 5.18 Estado de carga supercapacitor en 3 ciclos .....	87
Figura 5.19 Potencia Batería + Pila de combustible + Supercapacitor .....	88
Figura 5.20 Conmutación de la batería, pila de combustible y supercapacitor .....	89
Figura 5.21 Velocidad de referencia y velocidad de control.....	90
Figura 5.22 Velocidad en km/h y rpm .....	91

Figura 5.23 Velocidad, Torque y Potencia en la carga .....	92
Figura 5.24 Voltaje, corriente y potencia en la carga .....	93
Figura 5.25 Estado de carga, corriente y voltaje en la batería .....	95
Figura 5.26 Voltaje, corriente en la pila de combustible.....	96
Figura 5.27 Voltaje, corriente y estado de carga en el supercapacitor .....	97
Figura 5.28 Potencia Batería + Pila de combustible + Supercapacitor .....	98
Figura 5.29 Conmutación de la batería, pila de combustible y supercapacitor .....	99
Figura 5.30 Velocidad de referencia y velocidad de control.....	100
Figura 5.31 Velocidad en km/h y rpm .....	101
Figura 5.32 Voltaje, corriente y potencia en la carga .....	102

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Semirreacciones en una pila de combustible tipo PEM .....	6
Tabla 2 Parámetros de configuración de batería .....	27
Tabla 3 Parámetros de configuración de pila de combustible.....	33
Tabla 4 Parámetros de configuración de supercapacitor .....	40
Tabla 5 Parámetros motor DC 1000w 48v .....	46
Tabla 6 Informe económico .....	104

## ABREVIATURAS

A	Amperios
Ah	Amperios hora
DC	Corriente directa
GTO	Gate Turn-Off Thyristor
H	Hidrógeno
KM/H	Kilómetro por hora
LPM	Litros por minuto
O	Oxígeno
PEM	Membrana de intercambio protónico
RPM	Revoluciones por minuto
SOC	Porcentaje de carga
V	Voltaje
W	Wattios

## 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.

Según la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL), Ecuador emite 1,9 toneladas métricas de CO<sub>2</sub> por habitante. Lo que representa un 0,1% de emisiones a nivel mundial. [1]

El presente trabajo propone una configuración para un sistema híbrido a ser utilizados en pequeños vehículos eléctricos, con el fin de reducir el uso de combustibles fósiles los cuales son responsables de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el medio ambiente.

En el capítulo uno se describe el problema causado por el efecto invernadero por parte de los vehículos convencionales, al cual se da una solución mediante uso de energías renovables conformado en un sistema híbrido. En el capítulo dos se da a conocer los conceptos de los principales elementos a utilizar en la simulación. En el tercer capítulo se parametriza los elementos de la simulación con su correspondientes valores técnicos. En el cuarto capítulo se describe el diseño del controlador y el funcionamiento del control de velocidad, así como el ingreso de las señales de velocidad y torque variables en el tiempo. Por último se obtiene las gráficas de cada sistema híbrido simulado, su informe económico y la elección de la configuración más eficiente.

# **CAPÍTULO 1**

## **1. Generalidades**

En el presente capítulo se describe el problema provocado por las emisiones de CO<sub>2</sub> por parte de los vehículos de combustión interna, la justificación apropiada para eliminar este impacto ambiental mediante un sistema híbrido, a partir de fuentes de energía renovable como lo es el hidrógeno.

### **1.1 Descripción del problema**

El aumento de las emisiones de CO<sub>2</sub> en el ambiente, nos lleva a buscar nuevas fuentes de energía renovables, las cuales reemplacen a los combustibles fósiles. El hidrógeno como portador energético

presenta los mejores beneficios ambientales, puesto que su uso en las pilas de combustible no genera emisiones contaminantes, es una forma versátil de transportar energía y este puede ser producido a partir de una variedad de recursos primarios disponibles.

Si el hidrógeno es producido a partir de fuentes renovables de energía y su sistema de distribución es eficiente, las emisiones contaminantes en todo el ciclo productivo serán casi nulas. Debido a los avances tecnológicos en nuestro país, se introduce este sistema híbrido con el fin de que se vea implementado como alternativa al desarrollo del transporte, evitando las emisiones de CO<sub>2</sub>.

## **1.2 Justificación**

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 que actualmente se encuentra en fase de desarrollo, el cual brinda la ventaja de un bajo impacto ambiental, es decir emisiones cero. 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 se obtiene vapor de agua.

De estos dispositivos se obtienen eficiencias mayores a las máquinas térmicas, alto rendimiento, ruido muy reducido y bajo mantenimiento.

### **1.3 Objetivo**

Investigar mediante simulación, diferentes configuraciones y estrategias que permitan determinar la mejor solución híbrida para el suministro de energía de un pequeño vehículo eléctrico.

### **1.4 Resultados esperados**

Encontrar la mejor solución híbrida para alimentar un vehículo eléctrico Kart con un motor de 1000W de manera eficiente.

Elaborar un informe económico y detalles para la adquisición de los dispositivos necesarios del suministro de energía.

## **CAPÍTULO 2**

### **2. Marco Teórico**

Se menciona características y funcionamiento de las distintas fuentes de energías que se utilizan para el diseño del sistema híbrido apropiado, como también del motor eléctrico a suministrar.

#### **2.1 Pilas de combustible**

Se trata de 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 2.1 se muestra una pila de combustible tipo PEM. [4]

Esto las convierte en una alternativa interesante de generación de energía eléctrica en diversas aplicaciones. Estas aplicaciones se pueden dividir en tres grandes grupos: generación de potencia estacionaria, transporte y dispositivos electrónicos portátiles [2]. En particular, en los últimos años ha tomado cada vez más importancia el estudio de las pilas de combustible en vehículos propulsados con motor eléctrico. La principal ventaja de los vehículos con pilas de combustible frente a los de combustión interna radica en que la conversión de la energía es directa. Esto permite lograr una alta eficiencia de conversión y emisión de contaminantes prácticamente nula si se usa hidrógeno. [3]

Otro subsistema importante es el encargado del acondicionamiento de la potencia eléctrica generada. A estos subsistemas puede sumarse otro capaz de acumular energía dando lugar a sistemas híbridos de generación, los cuales permiten mejorar el funcionamiento global del sistema.



Figura 2.1 Pila de combustible

En las pilas de combustible de tipo PEM el electrolito está constituido por una membrana cuyo material constituyente es un polímero. Este tipo de membrana es un buen conductor de protones bajo determinadas condiciones, al mismo tiempo que es aislante de electrones. [8]

### 2.1.1 Funcionamiento de la pila de combustible

En la figura 2.2 se ilustra de forma esquemática el principio de operación de una pila de combustible H<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>. En el ánodo tiene lugar la oxidación electroquímica del hidrógeno a protones y electrones. Los protones migran a través de la membrana de conducción protónica; mientras tanto, los electrones fluyen por un circuito externo a la pila de combustible. Electrones y protones convergen en el cátodo, donde reaccionan con el oxígeno para formar agua y liberar energía en forma de calor.

**Tabla 1** Semirreacciones en una pila de combustible tipo PEM

Reacción anódica	$2\text{H}_2 \rightarrow 4\text{H}^+ + 4\text{e}^-$ (2.1)
Reacción catódica	$\text{O}_2 + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{H}_2\text{O}$ (2.2)
Reacción global	$2\text{H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{H}_2\text{O} + \text{calor} + \text{energía eléctrica}$ (2.3)

La tabla 1 muestra las reacciones anódica, catódica y global. Al conjunto de electrodo anódico, membrana de conducción protónica y electrodo catódico, se le conoce como ensamble membrana-electrocatalizador (EME). Una pila unitaria de combustible básica (monopila) consiste de un EME, localizado entre un par de difusores de gases. El difusor de gases le confiere al EME una resistencia mecánica adicional y como su nombre lo indica es el medio de difusión de los gases reactantes hacia los electrodos. A su vez el EME y los difusores de gases se localizan entre los colectores bipolares por donde fluyen los gases.

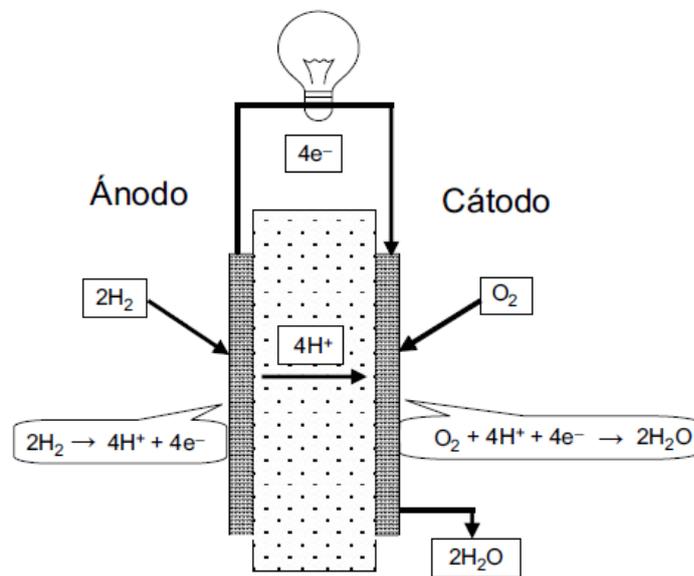


Figura 2.2 Principio de operación de una pila de combustible

### **2.1.2 Sistemas híbridos 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.

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.

[5]

Al tener una gran velocidad de carga y descarga pueden proveer gran cantidad de potencia transitoria, permitiendo así suplir rápidos aumentos de carga, tales como rápidas aceleraciones o pendientes abruptas en una aplicación en vehículos.

### 2.1.3 Tipos de pilas de combustible

La forma más usual de clasificación es por el tipo de electrolito que utilizan. Los tipos principales de pilas se describen a continuación.

- **Pila de combustible de Membrana de intercambio Protónico**

El electrolito es una membrana de polímero sólido que contiene ácidos sulfónicos perfluorados, y debe mantenerse completamente hidratada durante la operación para favorecer la conducción de los protones.

Las PEM operan a temperaturas relativamente bajas, tienen una alta densidad de potencia y, además, pueden variar rápidamente su potencia de salida para adaptarse a la demanda energética. Existen PEMs con potencias que varían entre unos pocos vatios hasta varios kilovatios, por lo que se pueden utilizar en multitud de sistemas.

Eficiencia eléctrica: 40 – 60 %.

Temperatura de operación: 80 - 95°C.

- **Pila de combustible de metanol (DMFC)**

Utilizan como electrolito una membrana de polímero. Sin embargo, en los sistemas DMFC no es necesario que el combustible pase por un reformador, ya que el propio ánodo catalizador extrae el hidrógeno del metanol líquido. Dado que la temperatura mínima de operación de este tipo de pilas es baja, las DMFC se pueden utilizar en aplicaciones de pequeño tamaño, como teléfonos móviles, ordenadores portátiles y cargadores de baterías para otros productos electrónicos.

Eficiencia eléctrica: por encima del 40%.

Temperatura de operación: 50 – 120°C.

- **Pila de combustible alcalinas (AFC)**

El combustible y el comburente que se utilizan en las PAFC tienen que ser hidrógeno y oxígeno puros. En efecto, el CO<sub>2</sub> (o el CO) reacciona con el KOH y se forma carbonato potásico, lo que reduce enormemente la eficiencia de la pila de combustible. Se utilizan principalmente en el sector aeroespacial y ambientes submarinos.

Eficiencia eléctrica: 60 -70%.

Temperatura de operación: 105 - 245<sup>0</sup> C.

- **Pila de combustible de ácido fosfórico (PAFC)**

Las PAFCs pueden utilizar como combustible hidrocarburos o biogás. Las reacciones en el cátodo y en el ánodo son parecidas las que se dan en las PEMs, pero la temperatura de operación es más alta y también, toleran mejor las impurezas que pueda tener el combustible. Las PAFCs se utilizan con frecuencia en cogeneración.

Eficiencia eléctrica: 36 – 42°C.

Temperatura de operación: 180 - 205°C.

- **Pila de combustible de óxido sólido (SOFC)**

Este tipo de pilas de alta temperatura, están diseñadas para reformar hidrocarburos ligeros (como el gas natural) de manera interna, por tanto si se quisieran emplear hidrocarburos más pesados (como gasolina) se requeriría de un reformador externo. Su forma puede ser plana o tubular.

Eficiencia eléctrica: 50 – 60%.

Temperatura de operación: 800 – 1000°C.

## **2.2 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, o ánodo y un electrodo negativo, o cátodo y electrolitos que permiten que los iones se muevan entre los electrodos, facilitando que la corriente fluya fuera de la batería para llevar a cabo su función.

### **2.2.1 Tipos de batería por su naturaleza interna**

Los principales tipos de baterías recargables según sus características electroquímicas se describen a continuación:

- **Baterías de plomo-ácido**

Es un tipo de batería muy común en vehículos convencionales, como batería de arranque, aunque también se utilizan como batería de tracción de vehículos eléctricos. Suele proporcionar una tensión de 6 V, 12 V u otro múltiplo

de 2, ya que la tensión que suministra cada celda es de 2 V. Pueden suministrar unas intensidades de corriente relativamente grandes, lo que las hacen ideales para los motores de arranque.

- **Baterías de Níquel-cadmio (Ni-Cd)**

Es una batería recargable de uso doméstico e industrial. Cada vez se usan menos, debido a su efecto memoria y al cadmio que es muy contaminante. Sin embargo, poseen algunas ventajas sobre el NiMH, como por ejemplo los ciclos (1 ciclo = 1 carga y descarga) de carga, que oscilan entre los 1.000 y 1.500 ciclos. En condiciones estándar, dan un potencial de 1,3 V (tensión de trabajo nominal 1,2V).

- **Baterías de iones de litio**

Es un dispositivo diseñado para almacenamiento de energía eléctrica que emplea como electrolito una sal de litio que procura los iones necesarios para la reacción electroquímica reversible que tiene lugar entre el cátodo y el ánodo. No admiten descargas y sufren mucho

cuando éstas suceden; por lo que suelen llevar acoplada circuitería adicional para conocer el estado de la batería, y evitar así tanto la carga excesiva como la descarga completa.

- **Baterías de Níquel-Hidruro (Ni-MH)**

Es un tipo de batería recargable que utiliza un ánodo de oxihidróxido de níquel ( $\text{NiOOH}$ ), como en la batería de níquel cadmio, pero cuyo cátodo es de una aleación de hidruro metálico. Esto permite eliminar el cadmio, que es muy caro y, además, representa un peligro para el medio ambiente. Asimismo, posee una mayor capacidad de carga (entre dos y tres veces más que la de una pila de NiCd del mismo tamaño y peso) y un menor efecto memoria.

## **2.3 Ultracondensadores**

Los ultracondensadores son celdas de almacenamiento basadas en el condensador, que proporcionan rápidos y masivos estallidos de energía instantánea. A veces se usan en vehículos con celdas o células de combustible para proporcionar un empuje extra al acelerar

después de las constantes disminuciones de velocidad o paros impuestos por un tráfico denso, y al subir por pendientes.

## **2.4 Vehículo híbrido**

Un vehículo híbrido se caracteriza porque para su propulsión utiliza una combinación de dos sistemas que a su vez consume fuentes de energías diferentes. Esto es un motor de combustión y un motor eléctrico, alimentado por baterías. Al conjugar los dos sistemas, se consigue reducir de forma significativa el efecto invernadero de los gases, ya que los vehículos tradicionales originan problemas de contaminación ambiental, exceso de ruido y secuelas en la salud de las personas.

### **2.4.1 Tipos de vehículo híbrido**

Para la construcción de un vehículo híbrido, se lo puede hacer combinando los motores eléctricos y el de combustión de varias formas, entre ellas tenemos:

- **Configuración serie**

En esta configuración, el motor de combustión mueve un generador que recarga la batería, que es la que alimenta al

motor eléctrico encargada de la tracción del vehículo. Los tres componentes; motor de combustión interna, generador – baterías y motor eléctrico, están en serie con lo que se consigue una transformación de energía mecánica (la del motor de combustión) en energía eléctrica en el generador-batería, la cual posteriormente va a ser de nuevo convertida en energía mecánica debido al motor eléctrico, Figura 2.3 A continuación se muestra un esquema de la configuración serie:

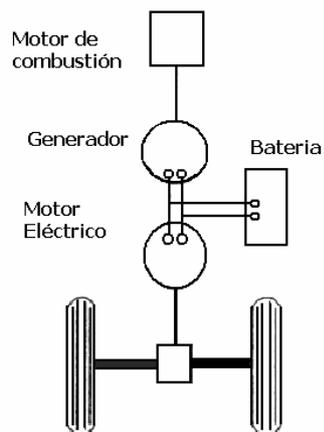


Figura 2.3 Configuración serie

- **Configuración paralelo**

Mediante este método de configuración, ambos motores transmiten la energía mecánica directamente al eje de tracción, pudiéndose además suprimir el generador. Dentro

de la configuración en paralelo tenemos cuatro posibilidades de conexión:

**Caso A:** Es una combinación de pares por medio de una disposición de dos ejes.

**Caso B:** Consiste en unir a un sólo eje ambos motores mediante un sumador de par, en donde cada motor contribuye al par total.

**Caso C:** Es un sumador de velocidades que consiste en generar la energía necesaria para el movimiento a través de la combinación de la velocidad rotacional de ambos motores por medio una caja diferencial donde se conecta los dos motores.

**Caso D:** es en la que no hay conexión mecánica entre ellos y que se considera una conexión tipo paralelo, porque ambos motores pueden contribuir en paralelo a la fuerza de tracción requerida por el vehículo.

La figura 2.4 ilustra los 4 casos de configuración en paralelo.

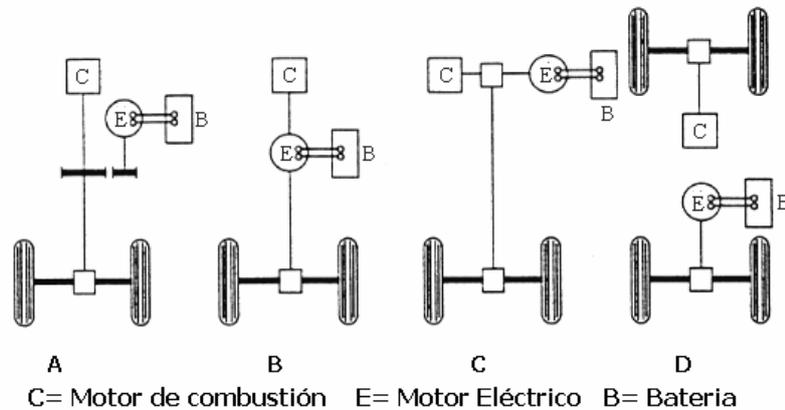


Figura 2.4 Configuración paralelo

### 2.4.2 Funcionamiento de un automóvil híbrido

El vehículo híbrido está formado por dos etapas, la parte que corresponde al motor de combustión interna, la cual tiene como señal de entrada; el acelerador, freno, palanca de velocidades y señal de encendido. Para la etapa eléctrica tenemos la unidad de control que es la que gobierna a la etapa de potencia a través de la batería que alimenta al motor. El motor ya sea de alterna o de continua se conecta a una caja de velocidades y este mueve el eje de la transmisión por medio de un diferencial que hace llegar el movimiento a las ruedas, las órdenes la envía el módulo de aceleración la cual por medio de la unidad de control dosifica la energía para el motor. En la figura 2.5 se muestra un diagrama de bloques simplificado del vehículo híbrido.

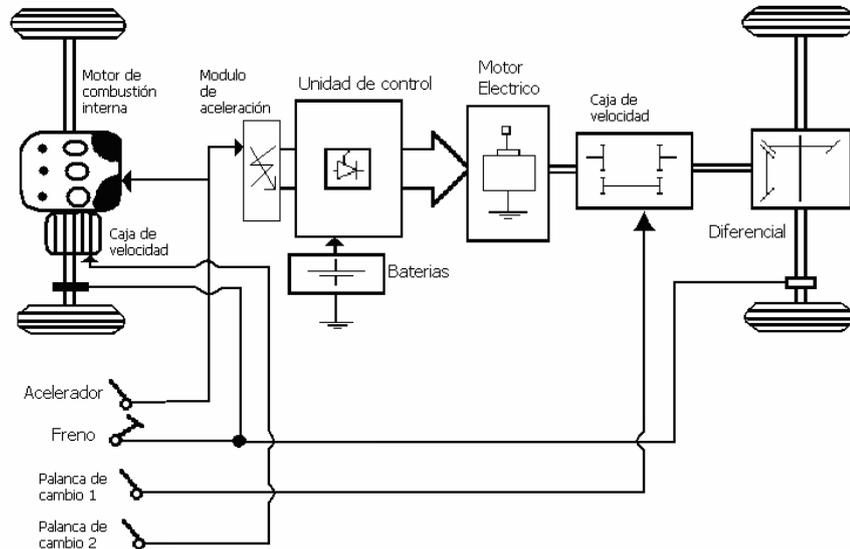


Figura 2.5 Esquema simplificado de un automóvil híbrido

## 2.5 Motor DC Brushless

Para realizar el movimiento en el vehículo eléctrico Kart se selecciona un motor DC Brushless, los cuales en su construcción y diseño son altamente eficiente y realizan la misma función que un motor DC, con la excepción de que los motores Brushless no tienen conmutador ni escobillas, las cuales sufren desgaste generando chispas, y su mantenimiento debe ser constante. En cambio el motor Brushless posee switches de estado sólido para su inmutación de la corriente en las bobinas del estator realizándolo de manera electrónica, figura 2.6.

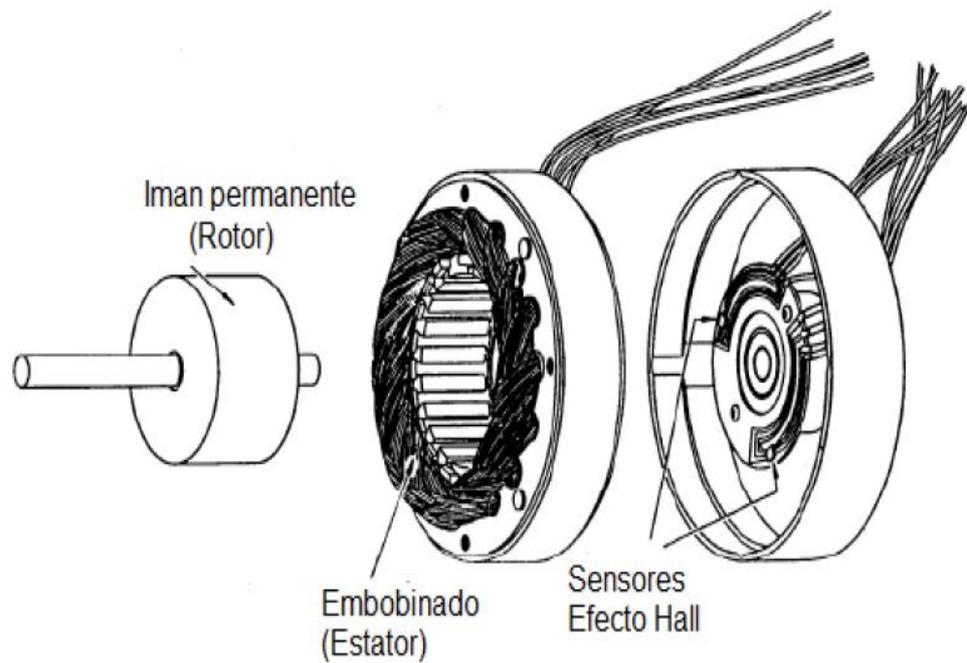


Figura 2.6 Esquema Motor Brushless

### 2.5.1 Funcionamiento del motor Brushless DC

El motor Brushless usado para dar movimiento al vehículo híbrido es parecido a un motor AC- Trifásico, la diferencia en el funcionamiento de este motor es la forma de detectar la posición del rotor relativo al estator, y de esa forma alimentar las bobinas con el voltaje de la fuente, en este caso con el voltaje de las baterías de Lithium Ion, para generar la corriente en las bobinas que producen un campo magnético con la

polaridad correcta, y con ello producir la fuerza que genera el torque de rotación en el motor.

Para detectar la posición de los polos magnéticos en el rotor se usa sensores de efecto Hall, en los cuales al fluir una corriente a través de ellos dentro de un campo magnético, (producidos por polos magnéticos del rotor), se genera un voltaje debido al efecto Hall, este voltaje de salida es proporcional al producto de la intensidad del campo magnético y de la corriente que circula por el sensor, de esta forma se detecta la posición de los polos magnéticos en el rotor y realiza la conmutación electrónica de los embobinados en el rotor, que es la parte central de la rueda motriz, figura 2.7.

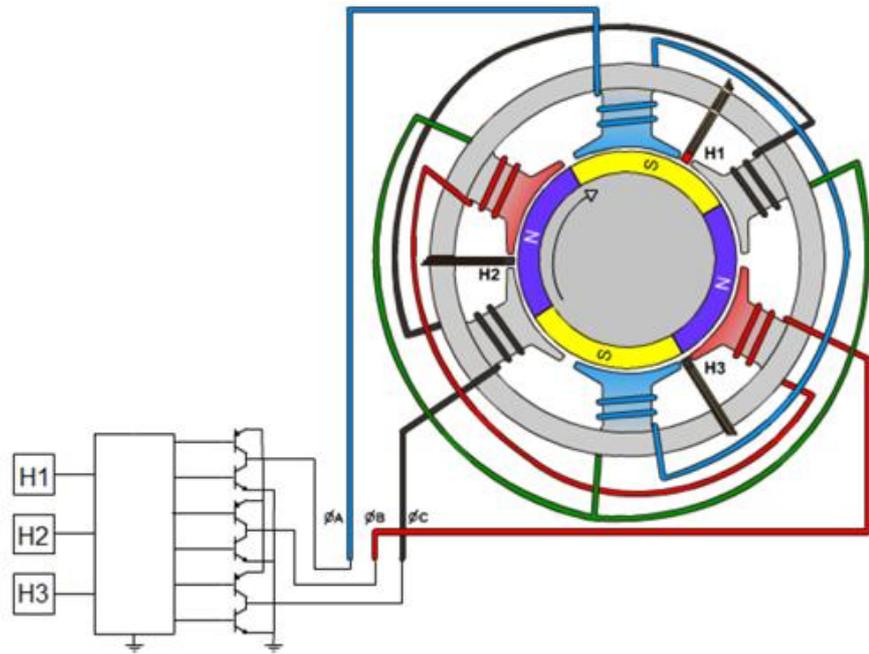


Figura 2.7 Funcionamiento del motor Brushless DC

## **CAPÍTULO 3**

### **3. Descripción de parámetros del sistema**

En el presente capítulo se procede a detallar las distintas configuraciones híbridas realizadas, para suministrar energía a un motor eléctrico de un vehículo Kart de 1 KW, entre los cuales constan: banco de baterías, pila de combustible y supercapacitor.

Para ello se hizo uso de los elementos de energía que se encuentran en la librería de Simscapes, así como bloques de Simulink para realizar cálculos matemáticos y operaciones relacionales de lógica matemática, etc.

Previo a conocer las configuraciones híbridas, se describe los parámetros de cada elemento, de acuerdo a las especificaciones técnicas comerciales de las fuentes de energía para la aplicación de un pequeño vehículo eléctrico (kart).

### 3.1 Diagrama de Bloques de Suministro Híbrido

Considerando la demanda de potencia del sistema tiene la siguiente estructura como se ilustra en la figura 3.1.

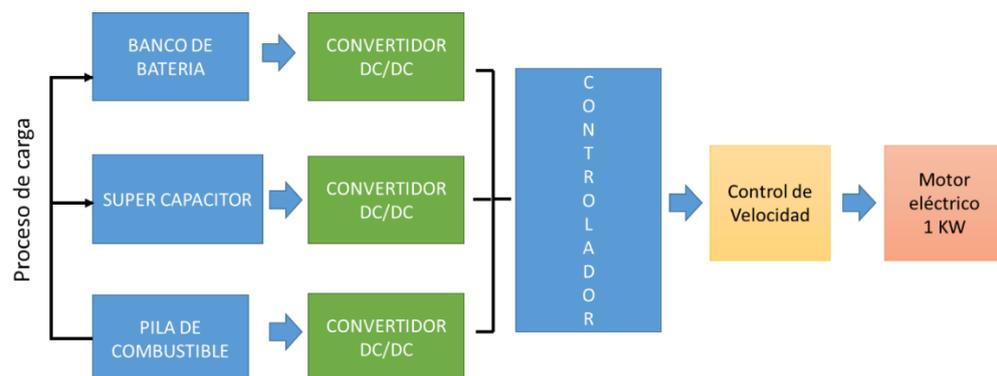


Figura 3.1 Diagrama de bloque de Suministro Híbrido

Cada fuente de energía alimenta a un convertidor DC/DC, el cual se encarga de estabilizar el voltaje a la entrada del controlador, este es quien decide la conmutación de acuerdo a las condiciones de potencia a suministrar al control de velocidad y respectivamente energiza el motor eléctrico.

A su vez dicho sistema permite un proceso de carga a través de la pila de combustible al banco de baterías o al supercapacitor, según su estado de carga.

A partir de esta idea se presentan cuatro configuraciones híbridas de las cuales se va estudiar su comportamiento en las señales de voltaje y corriente entregado a la potencia de la carga, de igual manera analizar cual sistema es más eficiente y estable.

Se detalla a continuación la configuración de los parámetros ingresados al simulador a partir de las especificaciones técnicas. Al final del documento se detalla el modelo y los datos de los componentes a utilizar, los cuales se encuentran en anexos.

### **3.2 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, 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).

La pila comercial se muestra en la figura 3.2.

Entre sus datos más importantes se tiene:

- Peso: 5.5 Kg.
- Capacidad: 36 V / 10AH.
- Corriente máxima de descarga: 35[A].
- Dimensiones: 24cm x 24cm x 39cm.
- Ciclos de carga: mayor a 1000.

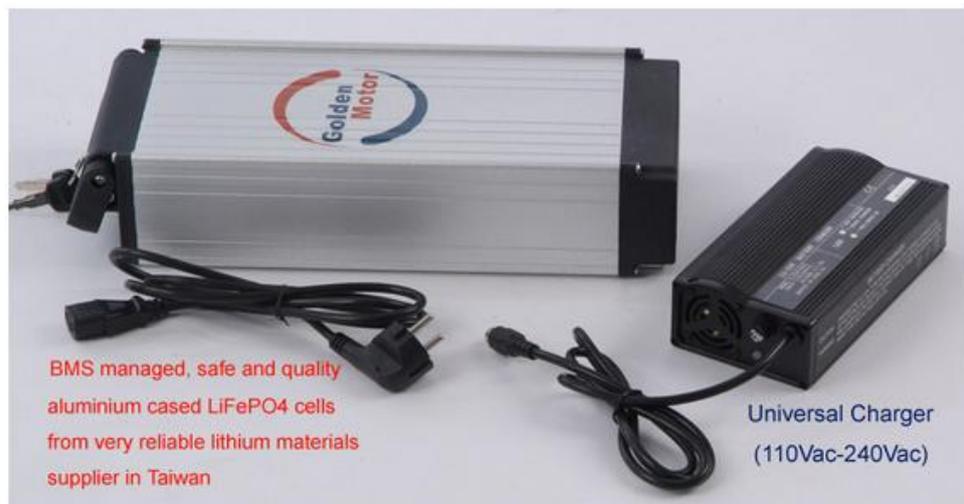


Figura 3.2 Batería comercial (Golden Motor)

En el simulador la batería a configurar con las especificaciones técnicas se encuentra en la librería Electrical Sources, Electric Drives/Extra Sources, como se ilustra en la figura 3.3.

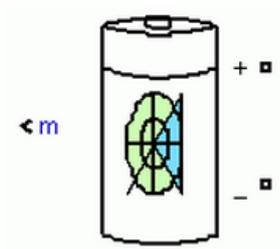


Figura 3.3 Bloque de la batería

### 3.2.1 Conceptos de los distintos parámetros configurados en la batería.

**Tabla 2** Parámetros de configuración de batería

<b>Tipo de Batería</b>	Proporciona un conjunto de comportamientos, carga predeterminada para cuatro tipos de batería: Plomo-ácido, Litio-Ion, Níquel-Cadmio, Níquel- hidruro metálico.
<b>Tensión nominal (V)</b>	La tensión nominal ( $V_{nom}$ ) de la batería (voltios) representa el final de la zona lineal de las características de descarga.
<b>Capacidad nominal (Ah)</b>	La capacidad nominal ( $Q_{rated}$ ) de la batería en amperios-hora es la capacidad mínima efectiva de la batería.

<b>Estado de carga inicial (%)</b>	El estado inicial de carga (SOC) de la batería 100% indica una batería completamente cargada y 0% indica una batería vacía.
<b>Máxima capacidad (Ah)</b>	La capacidad teórica máxima (Q), cuando se produce una discontinuidad en el voltaje de la batería. Este valor es generalmente igual al 105% de la capacidad nominal.
<b>Tensión totalmente cargada (V)</b>	La tensión de carga completa, para una corriente de descarga dada. Tenga en cuenta que la tensión totalmente cargada no es la tensión en vacío.
<b>Descarga Corriente Nominal (A)</b>	La corriente nominal de descarga, para los que se ha medido la curva de descarga.
<b>Resistencia interna</b>	La resistencia interna de la batería (ohmios).

<b>Capacidad (Ah)</b>	La capacidad ( $Q_{nom}$ ) extrae de la batería hasta que la tensión cae por debajo de la tensión nominal. Este valor debe estar entre $Q_{exp}$ y $Q_{max}$ .
<b>Voltaje nominal</b>	

### 3.2.2 Configuración de parámetros de la batería

**Block Parameters: Battery**

Battery (mask) (link)

Implements a generic battery that model most popular battery types. Uncheck the "Use parameters based on Battery type and nominal values" parameter to edit the discharge characteristics.

Parameters | View Discharge Characteristics | Battery Dynamics

Battery type: Lithium-Ion

Nominal Voltage (V): 36

Rated Capacity (Ah): 10

Initial State-Of-Charge (%): 100

Use parameters based on Battery type and nominal values

Maximum Capacity (Ah): 10

Fully Charged Voltage (V): 41.9035

Nominal Discharge Current (A): 4.3478

Internal Resistance (Ohms): 0.036

Capacity (Ah) @ Nominal Voltage: 9.0435

Exponential zone [Voltage (V), Capacity (Ah)]: [38.8939 0.491304]

OK Cancel Help Apply

Figura 3.4 Configuración de parámetros de la batería

Se observa en la figura 3.4 la configuración al tipo de batería seleccionada de iones de litio, entre sus características técnicas se configuró un voltaje nominal de 36V, capacidad nominal de

10 Ah (Amperio-hora) y un estado inicial del 100%. Los siguientes parámetros son cargados por defecto.

### 3.3 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. Su limitada temperatura de operación por debajo de 100°C es fundamental para obtener una buena eficiencia, como se observa en la figura 3.5



Figura 3.5 Pila de combustible (HORIZON)

Entre sus datos más importantes se tiene:

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

En el simulador la pila de combustible a configurar con las especificaciones técnicas se encuentra en la librería Electrical Sources, Electric Drives/Extra Sources, como se ilustra en la figura 3.6

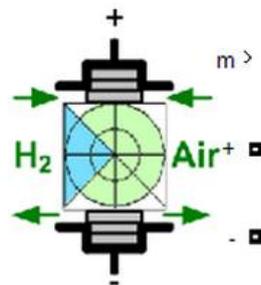


Figura 3.6 Bloque de la pila de combustible

### 3.3.1 Conceptos de los distintos parámetros configurados en la pila de combustible

**Tabla 3** Parámetros de configuración de pila de combustible

<p><b>Modelo preestablecido</b></p>	<p>Proporciona un conjunto de curvas y parámetros para pilas particulares de células de combustible que se encuentran en el mercado de polarización predeterminados:</p> <p>No (definido por el usuario)          PEMFC - 1,26 kW - 24 Vdc          PEMFC - 6 kW - 45 Vdc          PEMFC - 50 kW - 625 Vdc          AFC - 2,4 kW - 48 Vdc</p>
<p><b>Tensión a 0 A y 1 A</b></p>	<p>La tensión en 0 A y 1 A de la pila (Voltios). Suponiendo utilizaciones de gases nominales y constantes.</p>
<p><b>Punto de funcionamiento nominal</b></p>	<p>La corriente nominal (amperios) y la tensión nominal (voltios) de la pila. Suponiendo utilizaciones de gases nominales y constantes.</p>

<p><b>Punto de funcionamiento máxima</b></p>	<p>La corriente (amperios) y la tensión (voltios) de la pila a la máxima potencia. Suponiendo utilizaciones de gases nominales y constantes.</p>
<p><b>Número de celdas</b></p>	<p>El número de celdas en serie de la pila.</p>
<p><b>Eficiencia nominal de la pila</b></p>	<p>La eficiencia nominal de la pila en relación con el valor de calentamiento bajo (LHV) de agua.</p>
<p><b>Temperatura de funcionamiento</b></p>	<p>La temperatura nominal de funcionamiento en grados Celsius.</p>
<p><b>Caudal de aire nominal</b></p>	<p>La tasa nominal de flujo de aire (l / min).</p>
<p><b>Presión de suministro nominal</b></p>	<p>Presión nominal de alimentación (absoluta) de combustible y aire en Bar.</p>

<b>Composición nominal</b>	El porcentaje nominal de hidrógeno (x) en el combustible, el oxígeno (y) y agua (w) en el oxidante.
<b>Gráfica V-I característico</b>	Contiene dos gráficos. El primer gráfico representa la tensión de pila (Voltios) vs corriente (A) y el segundo gráfico representa la potencia de la pila (kW) vs actual (A).

### 3.3.2 Configuración de parámetros de la pila de combustible

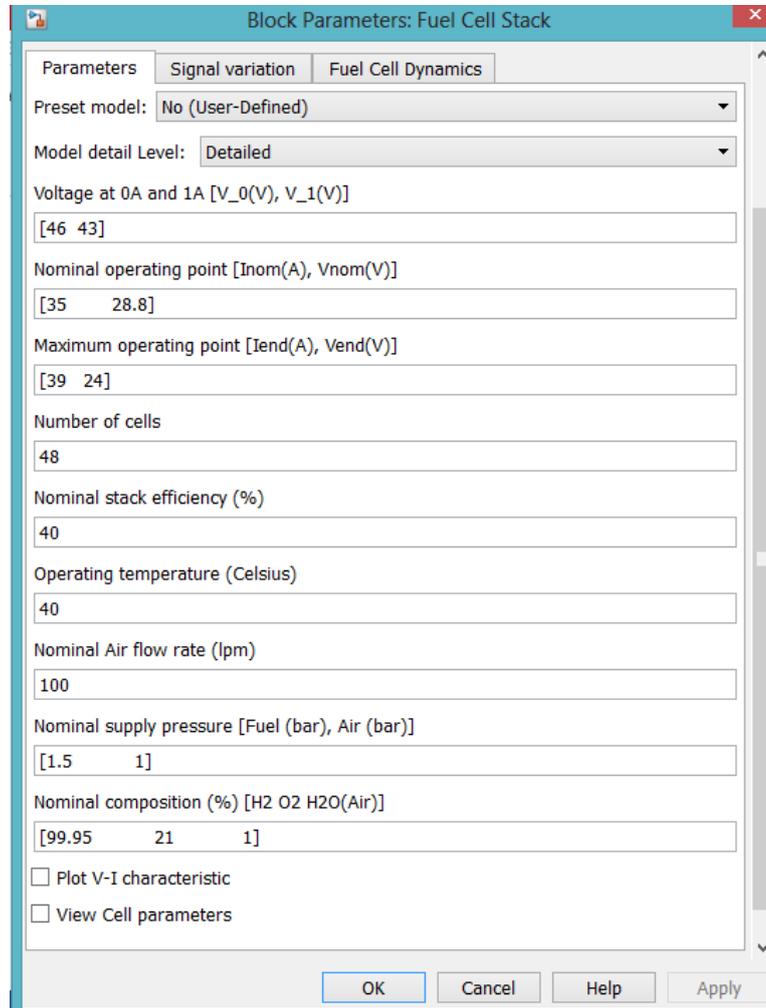


Figura 3.7 Configuración de parámetros de la pila de combustible

En la figura 3.7 se observa cómo se parametriza al bloque de la pila de combustible a usar en las simulaciones, en base a las especificaciones técnicas y observando la curva de polarización que nos ofrece el fabricante, se dan los valores nominales de

voltaje de 28.8V y de corriente en 35 A, completando de esta manera con los siguientes parámetros técnicos.

### 3.4 Tanque de almacenamiento de Hidrógeno

El depósito de hidrógeno escogido es de hidruro metálico para evitar volúmenes excesivos, este es necesario para almacenar el excedente de energía transformada en hidrógeno.

Utilizan aleaciones metálicas cuya estructura es muy porosa y permiten almacenar en sus poros hidrógeno, por lo que permiten almacenar cantidades asombrosas de hidrógeno, es decir si el volumen de la aleación metálica es un litro, se pueden almacenar mil litros de hidrógeno, figura 3.8



Figura 3.8 Depósito de Hidruros metálicos (Ovonic)

El depósito de hidrogeno será necesario para la pila de combustible, la función de la misma es convertir el hidrógeno en energía eléctrica y así suministrar energía al motor eléctrico.

La utilización del hidrógeno es constante para el valor nominal ( $Uf_{H2} = 83,55\%$ ) usando un regulador de caudal de combustible. Como no se selecciona la casilla de verificación velocidad de flujo de aire bajo panel de variación de la señal, la pila funciona a la utilización fija, nominal de oxígeno (59,3%).

### **3.5 Supercapacitor**

Los supercapacitores son dispositivos de gran interés para su aplicación en vehículos eléctricos o híbridos. Actúan como fuerza motriz secundaria y permiten almacenar la energía generada durante el proceso de frenado y reutilizarla en la siguiente operación de aceleración. En la figura 3.9 se muestra el supercapacitor comercial.



Figura 3.9 Supercapacitor (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.

En el simulador el supercapacitor a configurar con las especificaciones técnicas se encuentra en la librería Electrical Sources, Electric Drives/Extra Sources. En la figura 3.10 se muestra el bloque del supercapacitor.

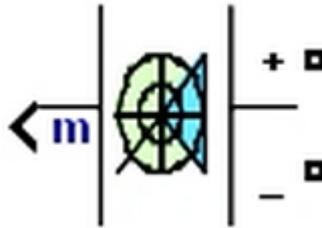


Figura 3.10 Bloque del supercapacitor

### 3.5.1 Conceptos de los distintos parámetros configurados en el supercapacitor

**Tabla 4** Parámetros de configuración de supercapacitor

<p><b>Capacitancia nominal (F)</b></p>	<p>Especifica la capacidad nominal del supercapacitor, en faradios.</p>
<p><b>Resistencia equivalente serie DC (ohms)</b></p>	<p>Especifica la resistencia interna del supercapacitor, en ohmios.</p>
<p><b>Tensión nominal (V)</b></p>	<p>Especifica la tensión nominal del supercondensador, en voltios. Tensión nominal típica es igual a 2,7 V.</p>

<b>Tensión inicial (V)</b>	Especifica la tensión inicial del supercondensador, en voltios.
<b>Picos de tensión (V)</b>	Especifica la sobretensión o tensión máxima del supercondensador. Picos de tensión corresponde a la tensión supercapacitor cuando el electrolito interno se convierte en gas.
<b>Número de condensadores en serie</b>	Especifica el número de condensadores en serie para ser representado.
<b>Número de condensadores en paralelo</b>	Especifica el número de condensadores en paralelo a ser representado.
<b>Temperatura de funcionamiento (celsius)</b>	Especifica la temperatura de funcionamiento del supercondensador. La temperatura nominal es de 25 ° C.

### 3.5.2 Capacitancia equivalente supercapacitor

En la figura 3.11 se ilustra los condensadores configuración serie.

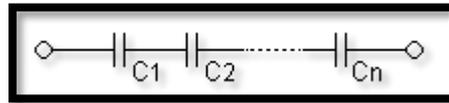


Figura 3.11 Condensadores en serie

Se obtiene la capacitancia equivalente para  $n$  capacitores mediante la siguiente fórmula:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{C_1} + \frac{1}{C_2} + \dots + \frac{1}{C_n} = \sum_{k=1}^n \frac{1}{C_k} \quad (3.1)$$

El supercapacitor consta de 6 capacitores de 3000F cada uno y reemplazamos este valor en la ecuación 3.1:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{1}{3000} + \frac{1}{3000} + \frac{1}{3000} + \frac{1}{3000} + \frac{1}{3000} + \frac{1}{3000} \quad (3.2)$$

Donde se obtiene:

$$\frac{1}{C_{eq}} = \frac{6}{3000} \quad (3.3)$$

Se despeja  $C_{eq}$  de la ecuación 3.3 y se obtiene:

$$C_{eq} = \frac{3000}{6} = 500F \quad (3.4)$$

### 3.5.3 Configuración de parámetros del supercapacitor

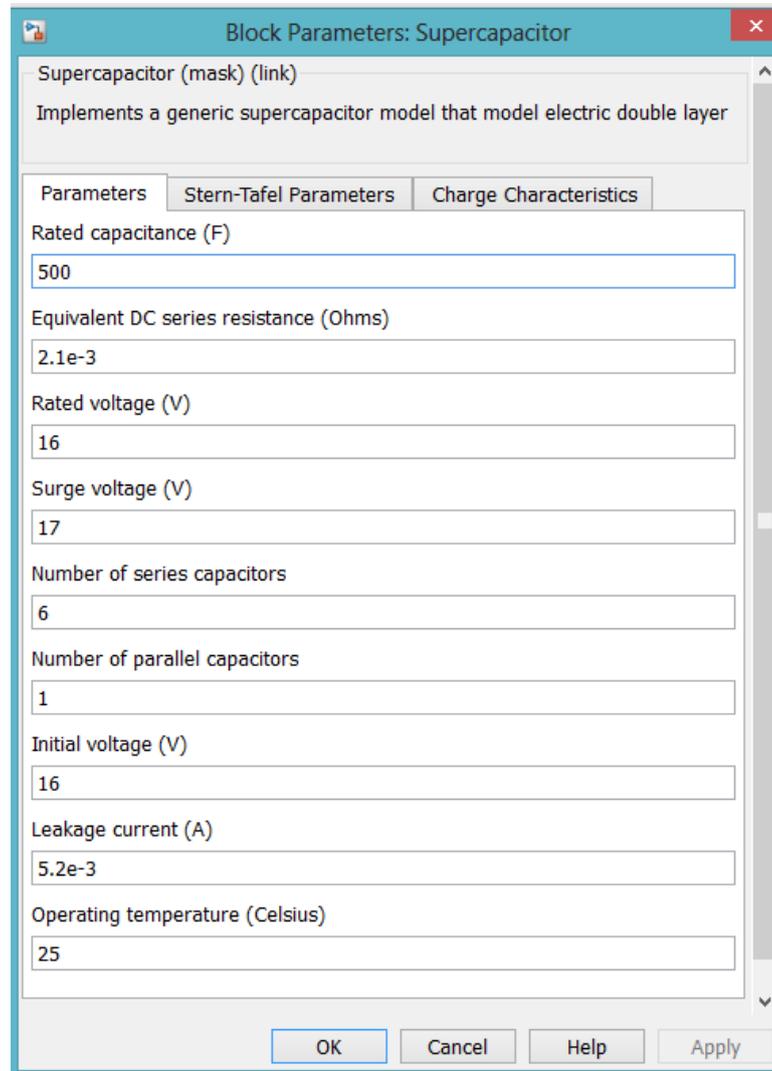


Figura 3.12 Configuración de parámetros del supercapacitor

De acuerdo a las especificaciones técnicas del fabricante se escoge el modelo de supercapacitor con una capacitancia nominal de 500 F con un número de capacitores en serie de 6, es decir la capacitancia de cada capacitor es de 3000F,

operando a una temperatura de 25°C, como se ilustra en la figura 3.12.

### **3.6 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.

También se tomó en cuenta las fuentes de energía del mismo, que permitirán suministrar voltaje para el funcionamiento del sistema eléctrico del vehículo, donde el voltaje de operación nominal del motor DC Brushless es de 48V.

De acuerdo a 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].

### 3.6.1 Configuración de parámetros motor DC

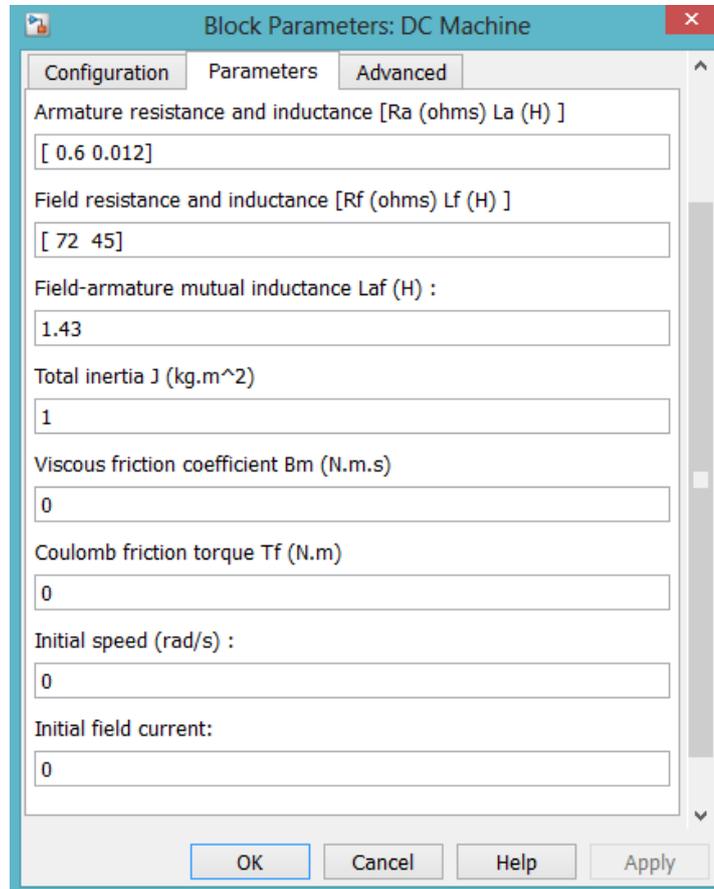


Figura 3.13 Cuadro de parámetros motor DC

Se ajusta los parámetros del motor DC de excitación separada mediante varias pruebas, obteniendo valores muy próximos a las especificaciones técnicas del motor eléctrico comercial, como se observa en la figura 3.13. En la tabla 3.4 se muestra diferentes pruebas que se realizó sin el uso del controlador y las fuentes de energía, con una fuente fija de 48V para observar el

funcionamiento del motor DC con el control de velocidad fijo a su valor máximo de 470 RPM. Se observa a medida que al aumentar el valor de torque requerido, su potencia aumenta y su velocidad disminuye a la velocidad de referencia.

**Tabla 5** Parámetros motor DC 1000w 48v

<b>T</b>	<b>V</b>	<b>I</b>	<b>P</b>	<b>RPM</b>	<b>Km/h</b>
0,1	48	0,1049	5,0352	470,2	62,12
1	48	1,049	50,352	464,5	61,29
2	48	2,098	100,704	458,2	60,45
3	48	3,14	150,72	451,8	59,62
4	48	4,2	201,6	445,3	58,77
5	48	5,25	252	439,1	57,94
6	48	6,3	302,4	432,8	57,11
7	48	7,34	352,32	426,5	56,28
8	48	8,39	402,72	420,2	55,45
9	48	9,44	453,12	414	54,63
10	48	10,49	503,52	407,7	53,79
11	48	11,54	553,92	401,3	52,96
12	48	12,64	606,72	394,3	52,06
13	48	13,64	654,72	388,3	51,28
14	48	14,7	705,6	382,2	50,44
15	48	15,74	755,52	376,1	49,63
16	48	16,78	805,44	369,8	48,8
17	48	17,83	855,84	363,5	47,97
18	48	18,88	906,24	357,1	47,13
19	48	19,93	956,64	350,8	46,29
20	48	21	1008	344,3	45,45
21	48	22,03	1057,44	338,3	44,64
22	48	23,08	1107,84	332	43,8
23	48	24,13	1158,24	325,7	42,97
24	48	25,18	1208,64	319,4	42,14
25	48	26,22	1258,56	312,9	41,31

### **3.7 Sistema de Control**

La configuración del sistema eléctrico de potencia del vehículo eléctrico Kart consta de los siguientes elementos: Pila de combustible (Pem) como fuente primaria de energía eléctrica, como segunda fuente se tiene un banco de baterías, como tercer suministro un supercapacitor el cual cubre picos elevados de corriente y el motor eléctrico como demanda de potencia. Los componentes del vehículo Kart se encuentran dirigidos por un controlador el cual designa el correcto funcionamiento de suministro de energía hacia el control de velocidad del motor.

### **3.8 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

### 3.9 Configuraciones para el suministro de energía de un pequeño vehículo eléctrico Kart

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. A continuación se muestran los distintos sistemas realizados.

#### 3.9.1 Suministro híbrido 1

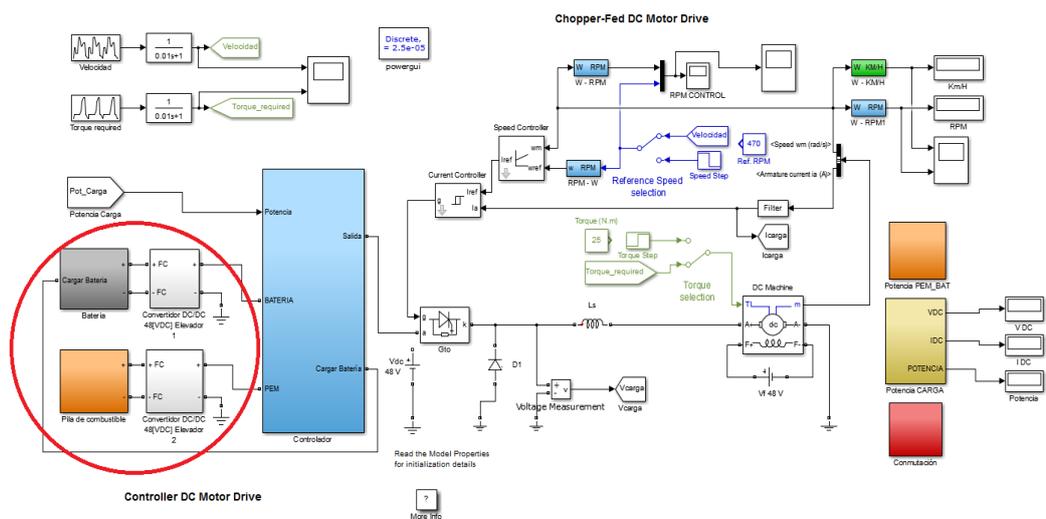


Figura 3.14 Configuración híbrida 1 para vehículo eléctrico

En la primera configuración híbrida como se ilustra en la figura 3.14, 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.

### 3.9.2 Suministro híbrido 2

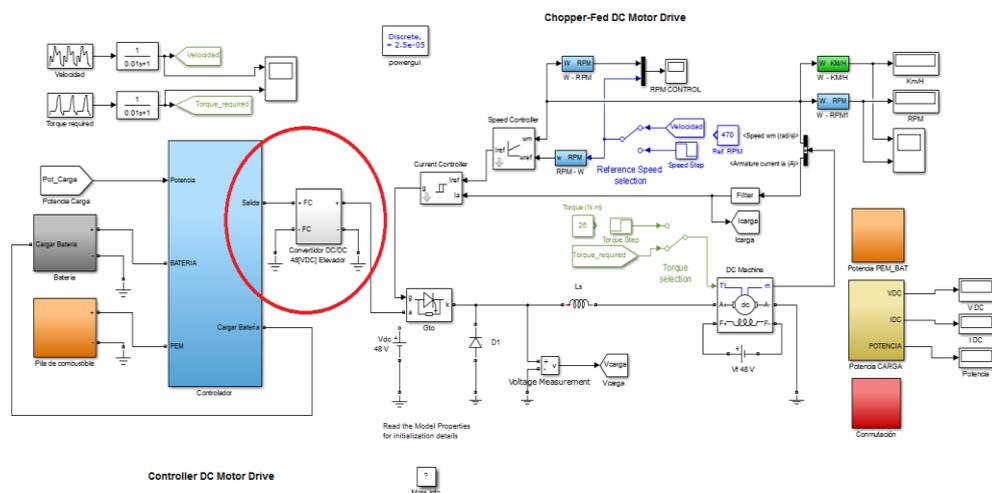


Figura 3.15 Configuración híbrida 2 para vehículo eléctrico

En 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 3.15.

### 3.9.3 Suministro híbrido 3

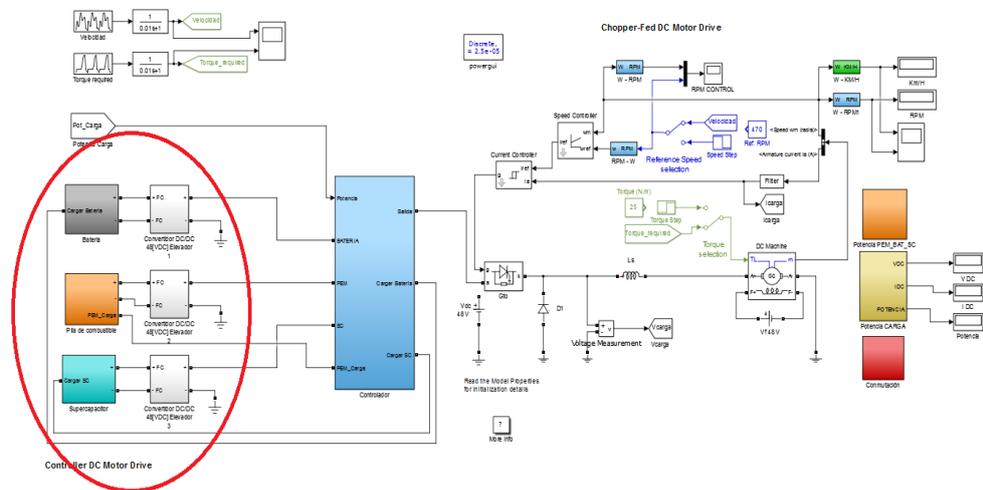


Figura 3.16 Configuración híbrida 3 para vehículo eléctrico

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 3.16.

### 3.9.4 Suministro híbrido 4

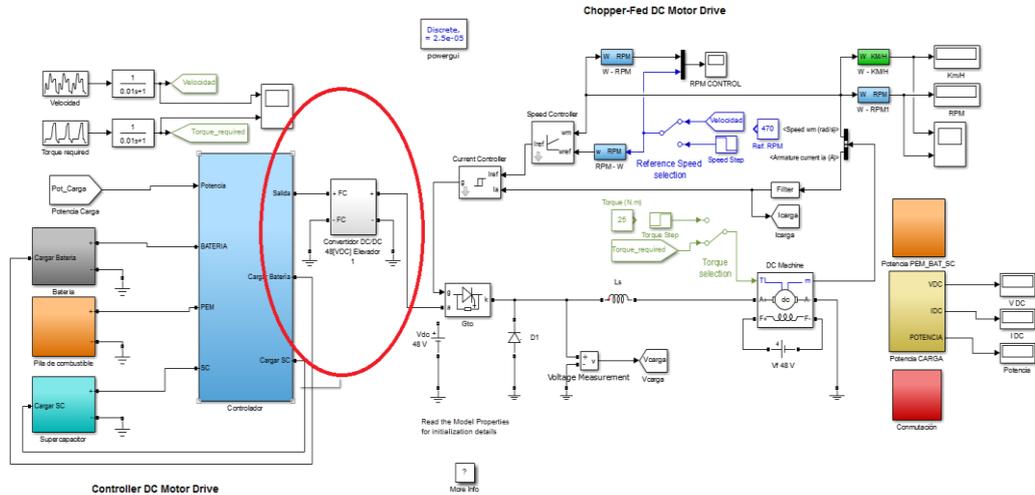


Figura 3.17 Configuración híbrida 4 para vehículo eléctrico

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 3.17 Todos los resultados de los osciloscopios se los muestra en el capítulo 5.

## **CAPÍTULO 4**

### **4. Diseño del controlador**

Después de describir los sistemas híbridos configurados. Este capítulo se enfoca en la descripción del bloque controlador del sistema y el funcionamiento del control de velocidad, los parámetros de velocidad y torque que se aplican al motor en diferentes tiempos. Se ha tomado un ciclo de referencia de 150 segundos para cada configuración.

Se realizaron pruebas con la velocidad requerida y el torque aplicado al motor para obtener el consumo de potencia y quien lo suministra.

#### **4.1 Controlador configuración híbrida 1 - 2**

Su funcionamiento es en base a la demanda de potencia que requiere el motor eléctrico. Para el arranque con potencias mayores a 500 W o un tiempo menor a 3 segundos dada por la señal clock, se utiliza la batería por lo que el interruptor permite el paso de corriente al control de velocidad para su correcto funcionamiento mientras que para potencias menores o iguales a 500 W conmuta la pila de combustible. Se hace uso de un relay para cargar la batería cuando no esté en uso mediante la pila de combustible que suministra energía cuando el estado de carga de la batería comienza a descargarse. Para la configuración 1, los valores de voltaje que entrega la pila de combustible y batería antes de ser conectados al controlador son alimentados a un convertidor para regular el voltaje a 48V mientras que para la configuración 2, el voltaje lo entregan directamente al controlador, debido a que solo se coloca un convertidor a la salida del conmutador. En la figura 4.1 se presenta el diagrama de flujo del controlador para la configuración híbrida 1-2 que permite activar las señales de salida (PEM, Batería).

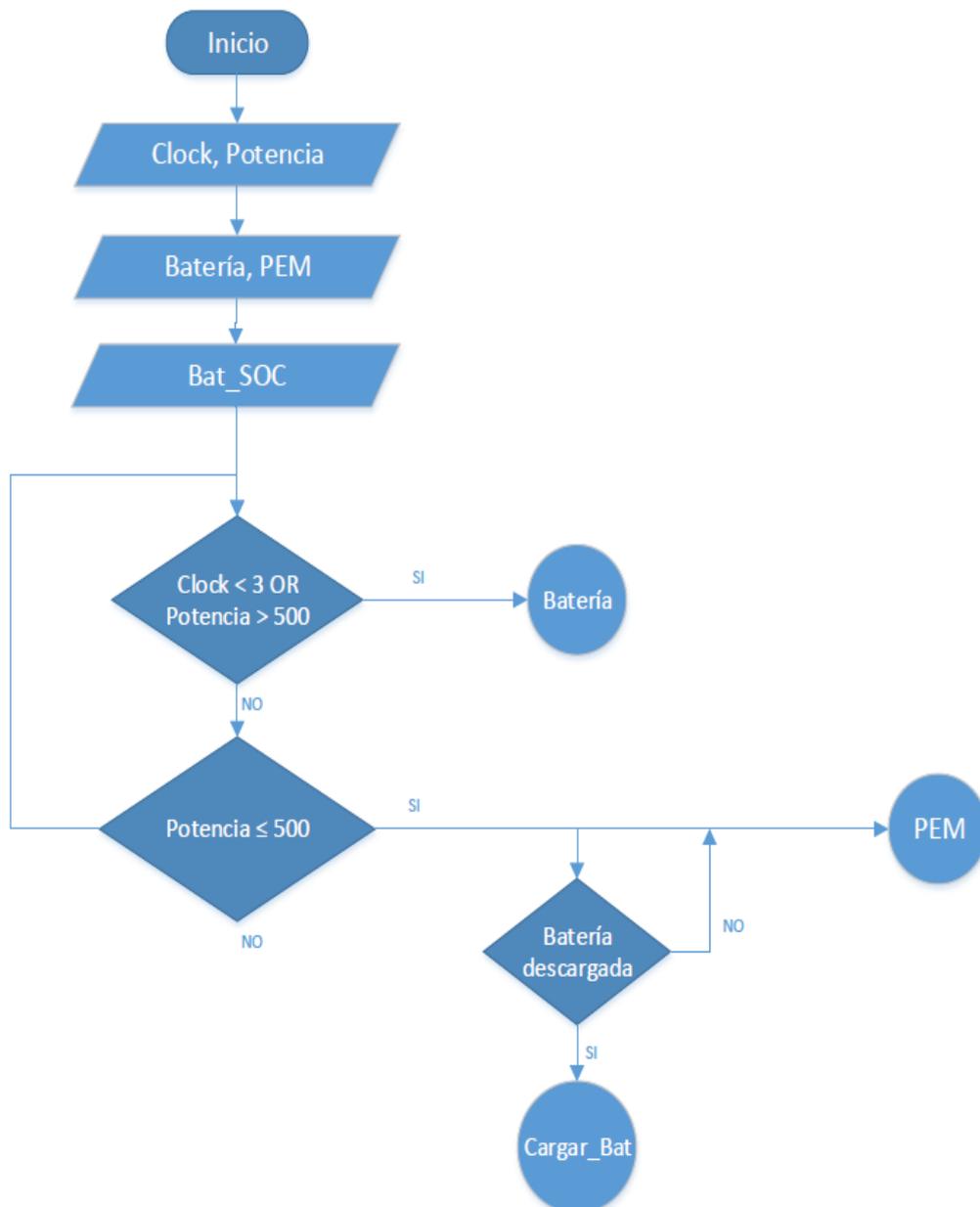


Figura 4.1 Diagrama de Flujo del Controlador configuración híbrida 1 – 2

La figura 4.2 muestra el controlador del sistema híbrido 1-2 implementado en Simulink.

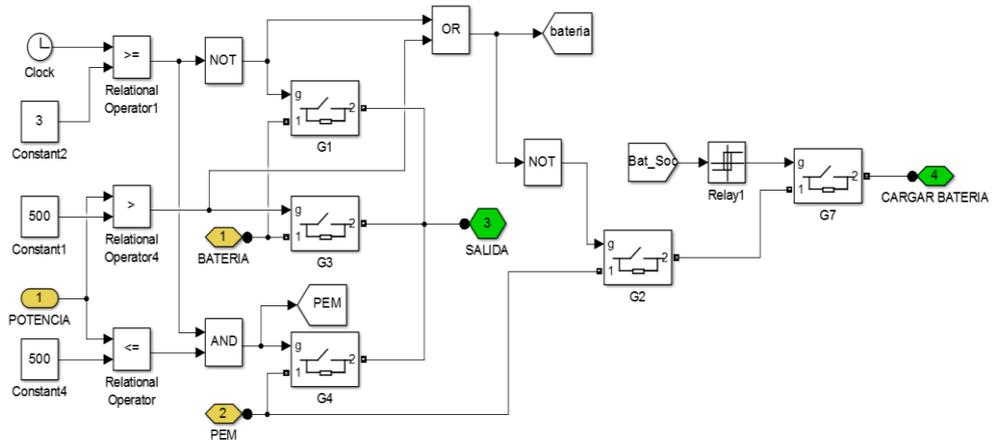


Figura 4.2 Bloque controlador configuración híbrida 1 – 2

#### 4.2 Controlador configuración híbrida 3 - 4

Para el controlador del sistema híbrido 3 – 4 se le ha hecho un pequeño cambio al controlador anterior debido a que en la simulación se hizo uso de una nueva fuente de energía (supercapacitor) el cual vuelve a cargarse cuando no está en uso mediante la pila de combustible. Para ello el supercapacitor cubre las demandas de potencias altas para valores mayores 1100W o un tiempo menor a 3 segundos, 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 4.3 se muestra el diagrama de flujo del controlador para la configuración híbrida 3-4, donde se muestra las condiciones dado por

los parámetros de entrada que permite activar las señales de salida (SC, PEM, Batería).

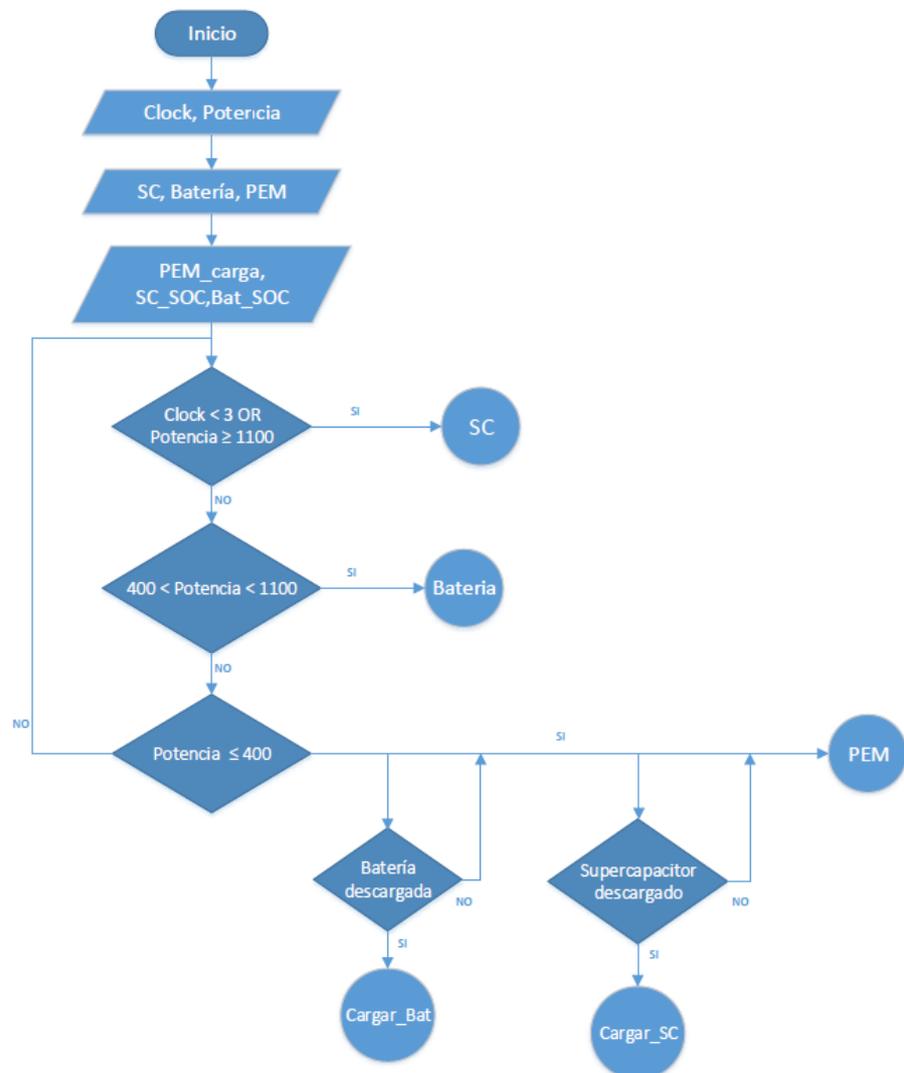


Figura 4.3 Diagrama de Flujo del Controlador configuración híbrida 3 – 4

La implementación en simulink del controlador del sistema híbrido 3-4 queda representada en la figura 4.4.

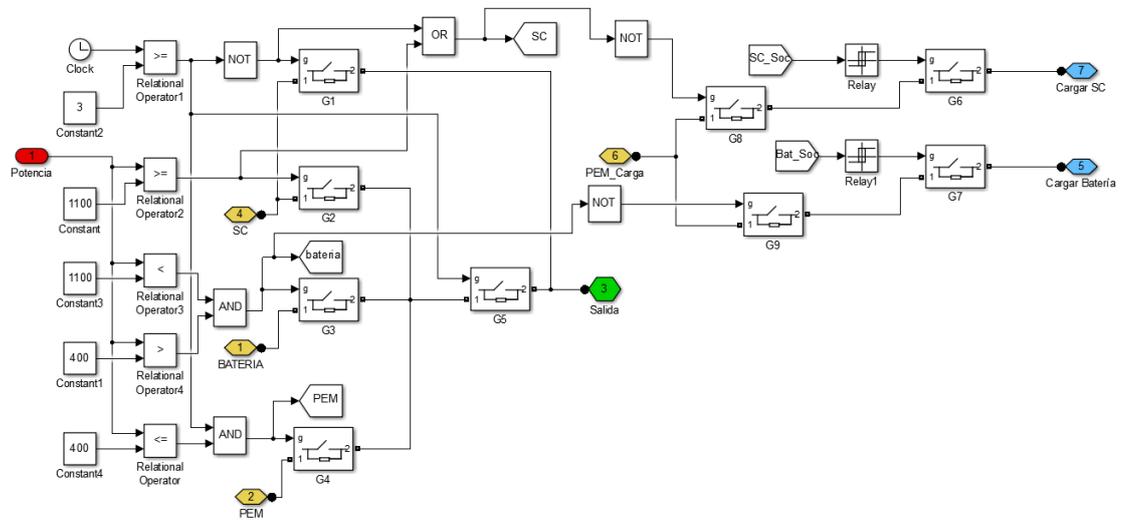


Figura 4.4 Bloque controlador configuración híbrida 3 – 4

### 4.3 Funcionamiento de control de velocidad para un motor DC

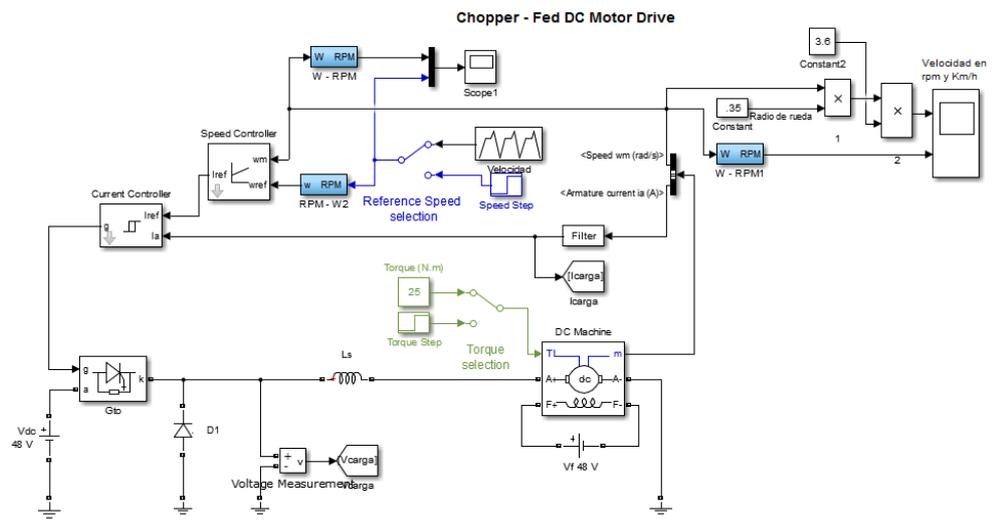


Figura 4.5 Chopper – Fed DC Motor Drive

En la figura 4.5 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. El motor esta acoplado a una carga mecánica caracterizada por una inercia  $J$ , el coeficiente de fricción  $B$  y el torque de carga  $TL$ .

El controlador del lazo de corriente es de histéresis y simplemente compara la corriente medida con la referencia y genera la señal de disparo para el tiristor (GTO) y obliga a que la corriente en el motor siga a la referencia, figura 4.6.

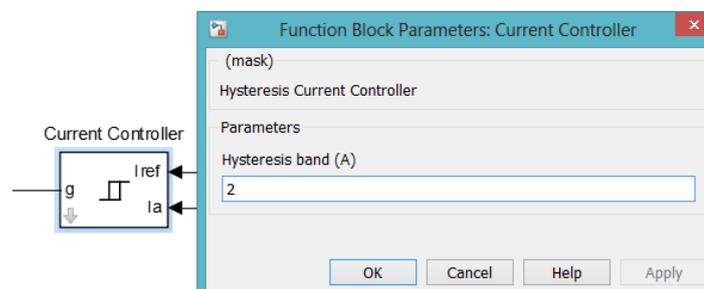


Figura 4.6 Cuadro de parámetros controlador lazo de corriente

El lazo de control de velocidad utiliza un controlador Proporcional-Integral que genera la referencia para el lazo de corriente, figura 4.7.

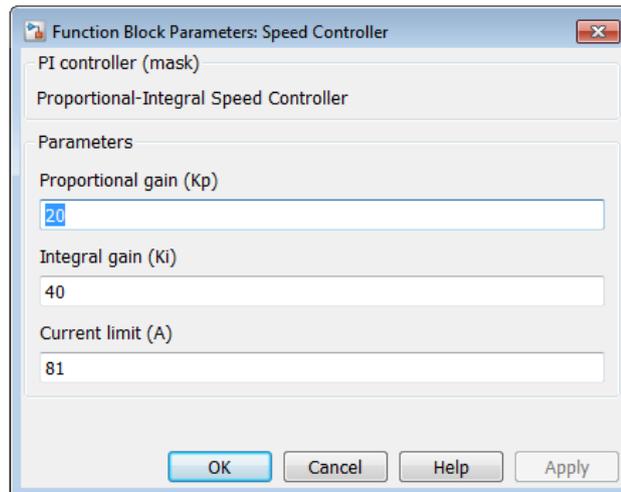


Figura 4.7 Cuadro de parámetros controlador de velocidad

Los parámetros del controlador que se ajustan al sistema son:  $K_p = 20$ ,  $K_i = 50$ , y corriente límite = 81 [A].

El tipo de respuesta de la variable controlada ( $\omega_m$ ), esto es la velocidad angular del motor (normalmente expresada en RPM) presenta una respuesta subamortiguada, que exhibe una pequeña sobre oscilación inicial. Este tipo de respuesta es enteramente dependiente de las ganancias proporcional e integral del controlador de velocidad. Al colocar un valor de  $K_p$  muy bajo la respuesta del sistema exhibe a la variable de interés con oscilaciones indeseables alrededor del valor de estado estable, mientras con el valor  $k_p = 20$  el sistema se estabilizará más rápido.

Nótese que a la salida del troceador se ha agregado inductancia en serie con la armadura del motor con el propósito de que la corriente en el motor sea continua para todo el rango de operación del sistema. En otras palabras la función de transferencia del troceador exhiba un voltaje de salida que sea proporcional a  $\omega$  ( $(\omega/T)*V$ ).

Adicionalmente obsérvese también la necesidad de implementar un bloque de filtrado para la corriente de armadura del motor, puesto que esta contiene un alto rizado.

#### **4.4 Referencia de velocidad con una constante**

Nótese en la figura 4.8 que a los 0.3 segundos la velocidad del motor se va incrementando hasta alcanzar el valor solicitado de 100 rpm (constante).

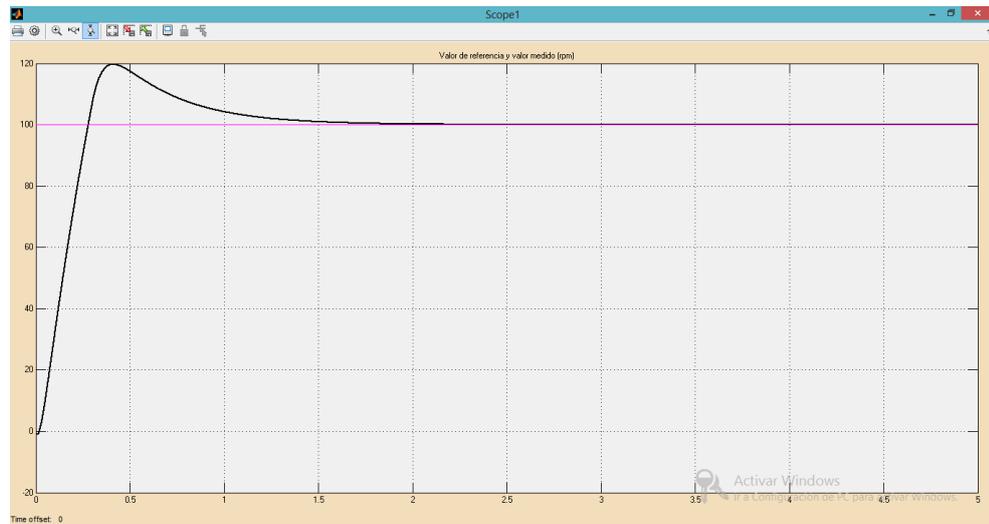


Figura 4.8 Valor de referencia y valor medido (rpm)

Obsérvese también que la señal de referencia para la velocidad del motor es seguida por el sistema.

El controlador con histéresis trata de que la corriente en la armadura del motor siga la referencia impuesta por el controlador de velocidad. Una vez que se alcanza la velocidad requerida (100rpm) la corriente del motor se reduce drásticamente, puesto que de lo contrario la velocidad seguiría incrementándose. El torque desarrollado por el motor (corriente) es justo el necesario para mantener el motor operando a la velocidad requerida.

En estado estable el voltaje de salida del troceador presenta un ancho fijo de los pulsos (ton=constante) y la corriente presenta oscilaciones de estado estable entre valores de  $I_{min}$  e  $I_{max}$  (corriente continua) como se muestra en la figura 4.9

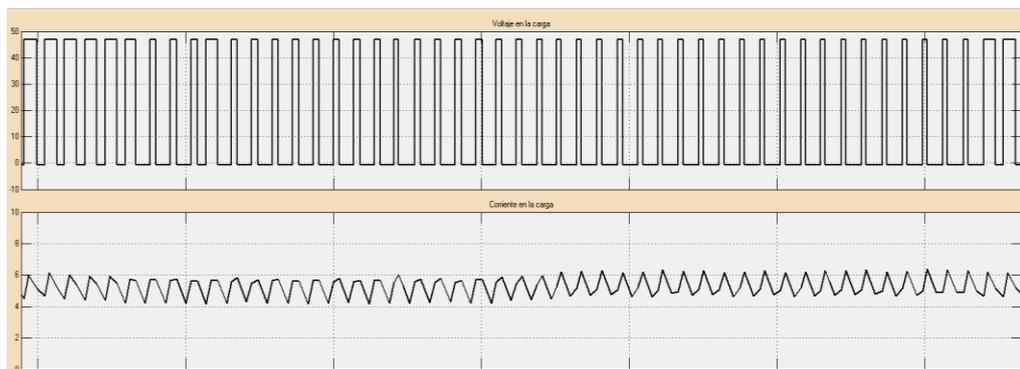


Figura 4.9 Voltaje de salida del troceador y corriente de armadura

#### 4.5 Referencia de velocidad con una señal escalón

Se coloca un valor inicial de 100 RPM y para un tiempo de 10 segundos el valor debe ser de 300 RPM como se muestra en la figura 4.10.

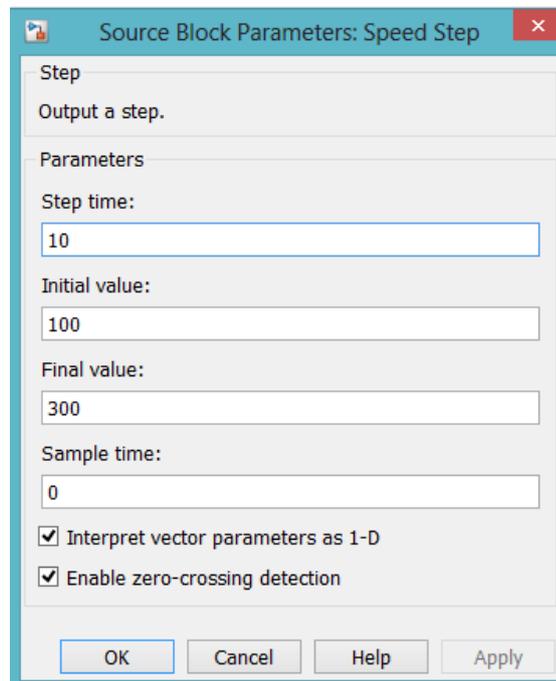


Figura 4.10 Parámetros señal escalón

Nótese que a los 0.4 segundos la velocidad del motor se va incrementando hasta alcanzar el valor solicitado de 100 rpm y se estabiliza en un tiempo de 2 segundos aproximadamente. Para un tiempo mayor a 10 segundos el valor medido se estabiliza en 13 segundos al valor de 300 rpm como se muestra en la figura 4.11

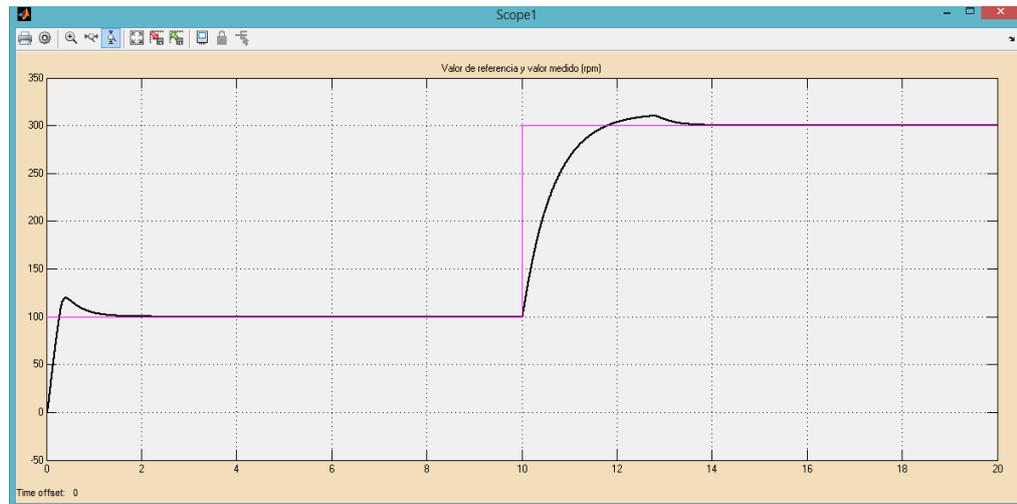


Figura 4.11 Valor de referencia y valor medido (rpm) para una señal escalón

## 4.6 Convertidor de velocidad

### 4.6.1 Convertidor de rad/s a km/h

Los bloques que se muestran a continuación convierten la velocidad medida en rad/s a km/h de acuerdo al valor del radio de las ruedas del vehículo eléctrico Kart, como se ilustra en la figura 4.12.

$$\text{Valor medido} \left( \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right) * \text{radio rueda (m)} * \frac{1 \text{ km}}{1000 \text{ m}} * \frac{3600 \text{ s}}{1 \text{ hora}} = \\
 \text{km/hora} \quad (4.1)$$

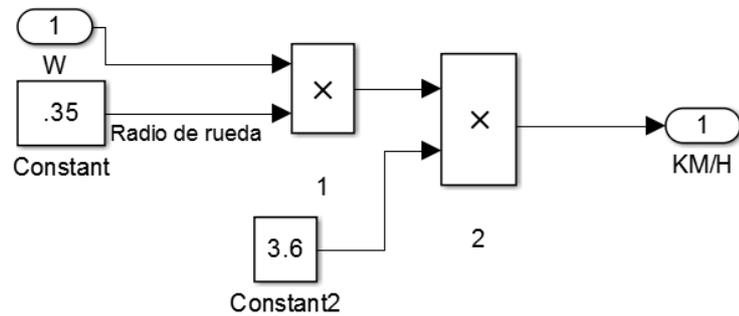


Figura 4.12 Convertidor de rad/s a km/h

#### 4.6.2 Convertidor de rad/s a rpm

Los bloques que se muestran a continuación convierten la velocidad medida en rad/s a rpm, como se ilustra en la figura 4.13.

$$\text{Valor medido} \left( \frac{\text{rad}}{\text{s}} \right) * \frac{60\text{s}}{1\text{min}} * \frac{1\text{rev}}{2\pi\text{rad}} = \text{rpm} \quad (4.2)$$

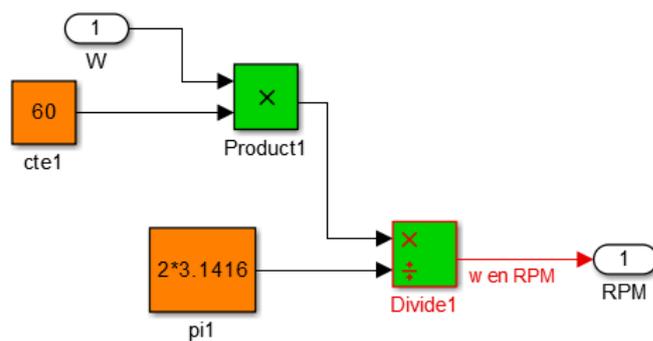


Figura 4.13 Convertidor de rad/s a rpm

#### 4.7 Parámetros de velocidad y torque aplicados al motor DC

Los parámetros de velocidad (figura 4.14) y de torque (figura 4.15) ingresados al sistema son los siguientes:

Parameters
Time values:
<input type="text" value="[0 5 15 20 30 40 50 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150]"/>
Output values:
<input type="text" value="[0 215 215 107.5 107.5 380 380 250 250 300 300 340 340 150 150 0 0]"/>

Figura 4.14 Parámetros de velocidad

Parameters
Time values:
<input type="text" value="[0 5 60 70 80 90 100 110 120 130 140 150]"/>
Output values:
<input type="text" value="[7 7 7 20 25 25 12 12 7 7 7 7]"/>

Figura 4.15 Parámetros de Torque

Cabe recalcar que los datos ingresados anteriormente en diferentes tiempos se los utiliza en los 4 sistemas híbridos implementados para observar su comportamiento, los cuales corresponden a la aceleración del Kart, su velocidad constante, y des-aceleración en diferente tiempos. Al principio se aplica un torque constante de 7 N-m en los primeros 60 s, luego de este tiempo su velocidad continúa variando y su torque aumentará hasta 25 N-m y disminuirá al valor inicial de 7 N-m hasta llegar a 120 s, finalmente se mantiene constante este valor hasta cumplir 150 s.

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. En la figura 4.16 se visualiza los parámetros ingresados anteriormente, lo cual variará los valores de voltaje y corriente en la carga, estos resultados se muestran en el capítulo 5 para los 4 sistemas híbridos.

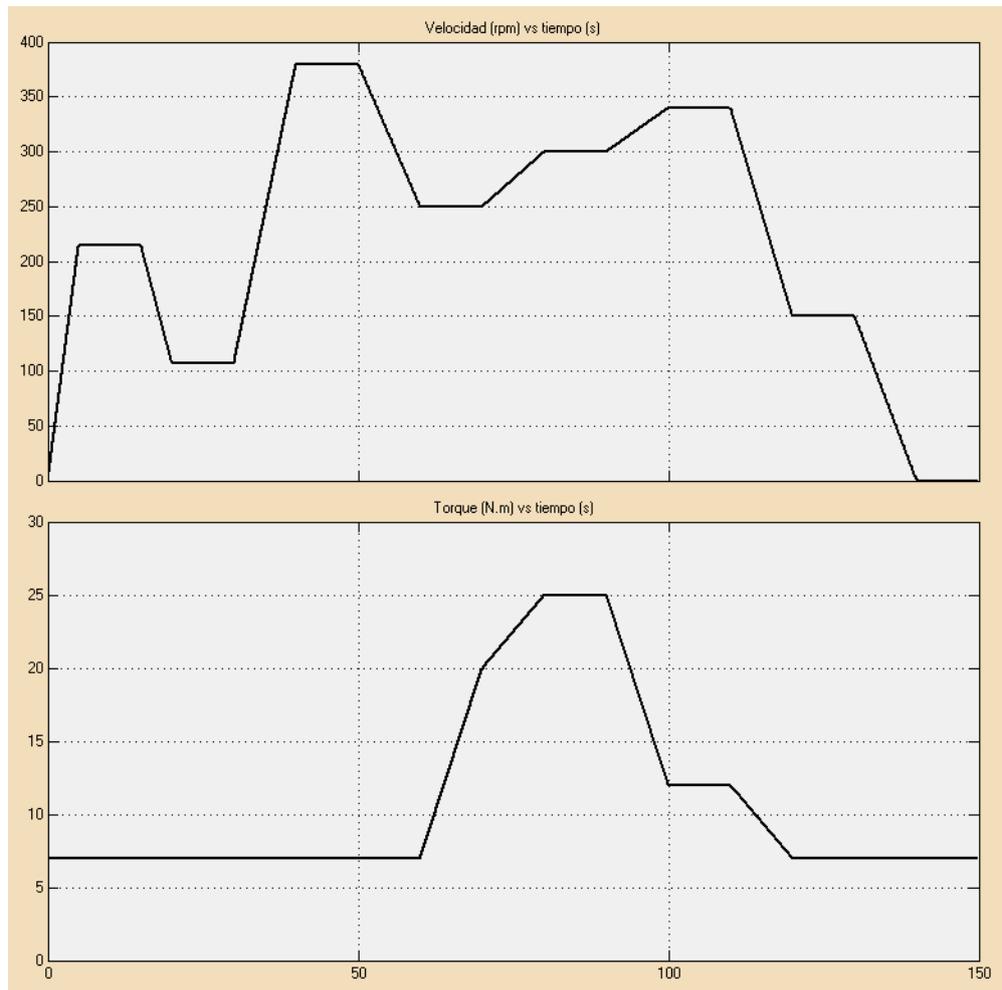


Figura 4.16 Velocidad (RPM) y torques (N.m) aplicados al motor DC.

## **CAPÍTULO 5**

### **5. Resultados de los distintos sistemas híbridos**

Después de describir el controlador y control de velocidad, este capítulo se enfoca en las pruebas realizadas a los 4 sistemas, se mostrarán los resultados obtenidos mediante los osciloscopios donde se observa el comportamiento de cada sistema y la descripción del mismo. Finalmente se detalla un informe económico de la mejor solución híbrida.

Todas las gráficas se encuentran en función del tiempo en segundos.

- Corriente: Amperios. (I)
- Voltaje: Voltios. (V)
- Potencia: Vatios.(W)

## 5.1 Pruebas realizadas Suministro híbrido 1

### 5.1.1 Estado de carga, corriente y voltaje en la batería

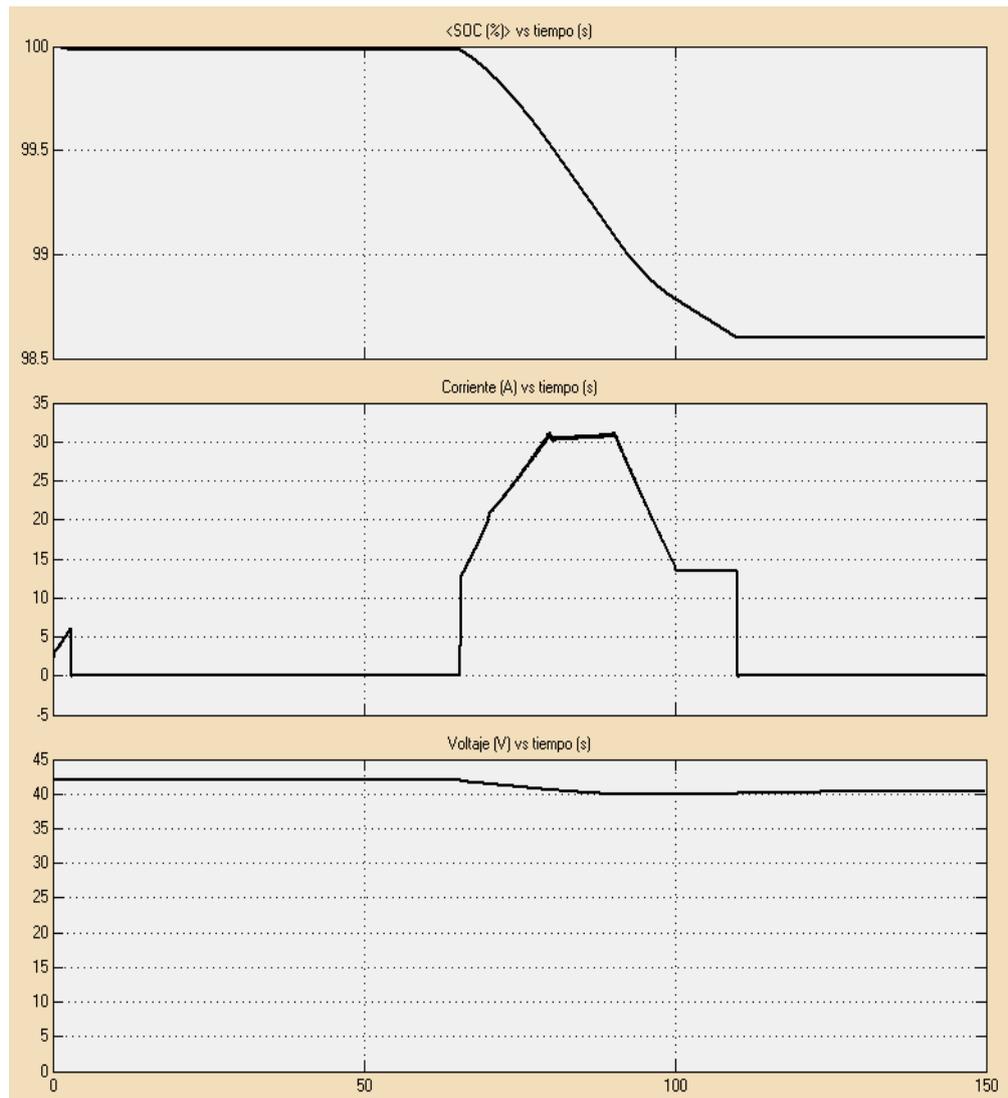


Figura 5.1 Estado de carga, corriente y voltaje en la batería.

Como se visualiza en la figura 5.1 el estado de carga de la batería empieza a disminuir en el momento que la batería comienza a funcionar y cargará por medio de la pila de combustible cuando el SOC sea menor a 98.5%, se observa también el voltaje y potencia que entrega la batería. En los intervalos donde la corriente es cero, la pila de combustible es la que suministra energía.

### 5.1.2 Voltaje, corriente en la pila de combustible

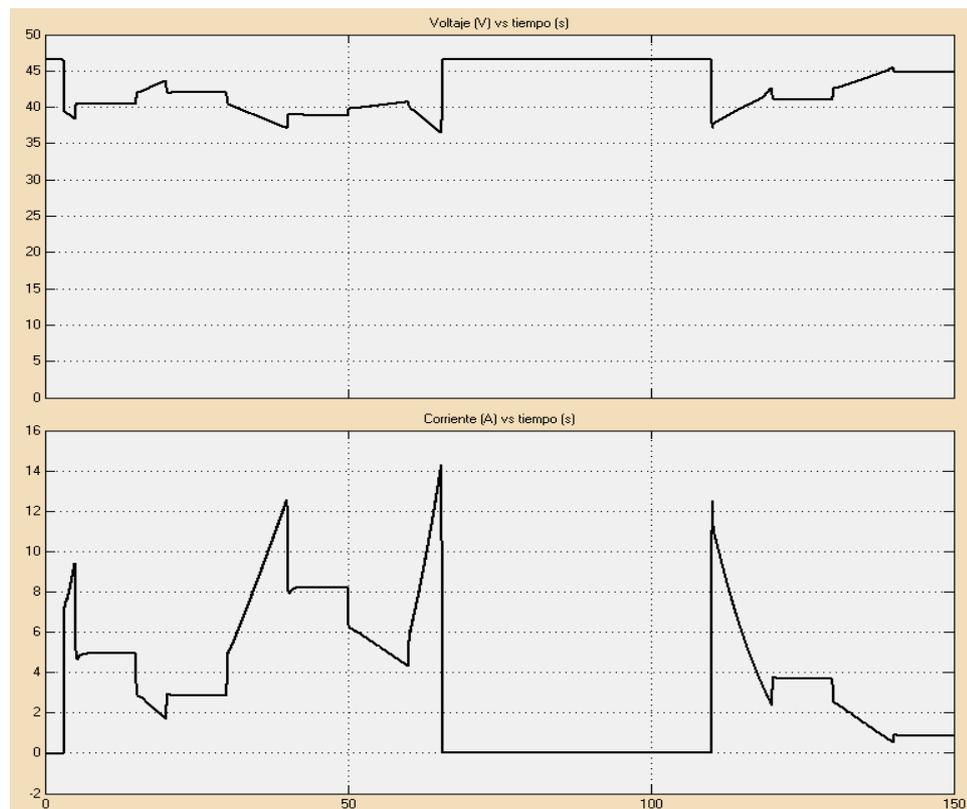


Figura 5.2 Voltaje, corriente en la pila de combustible.

En la figura 5.2 se visualiza el voltaje y la corriente que entrega la pila de combustible para suministrar a la carga, en el intervalo de 65 – 110 s la corriente en la pila es cero, debido a que el suministro en ese tiempo lo realiza la batería.

### 5.1.3 Potencia suministrada por la batería y pila de combustible

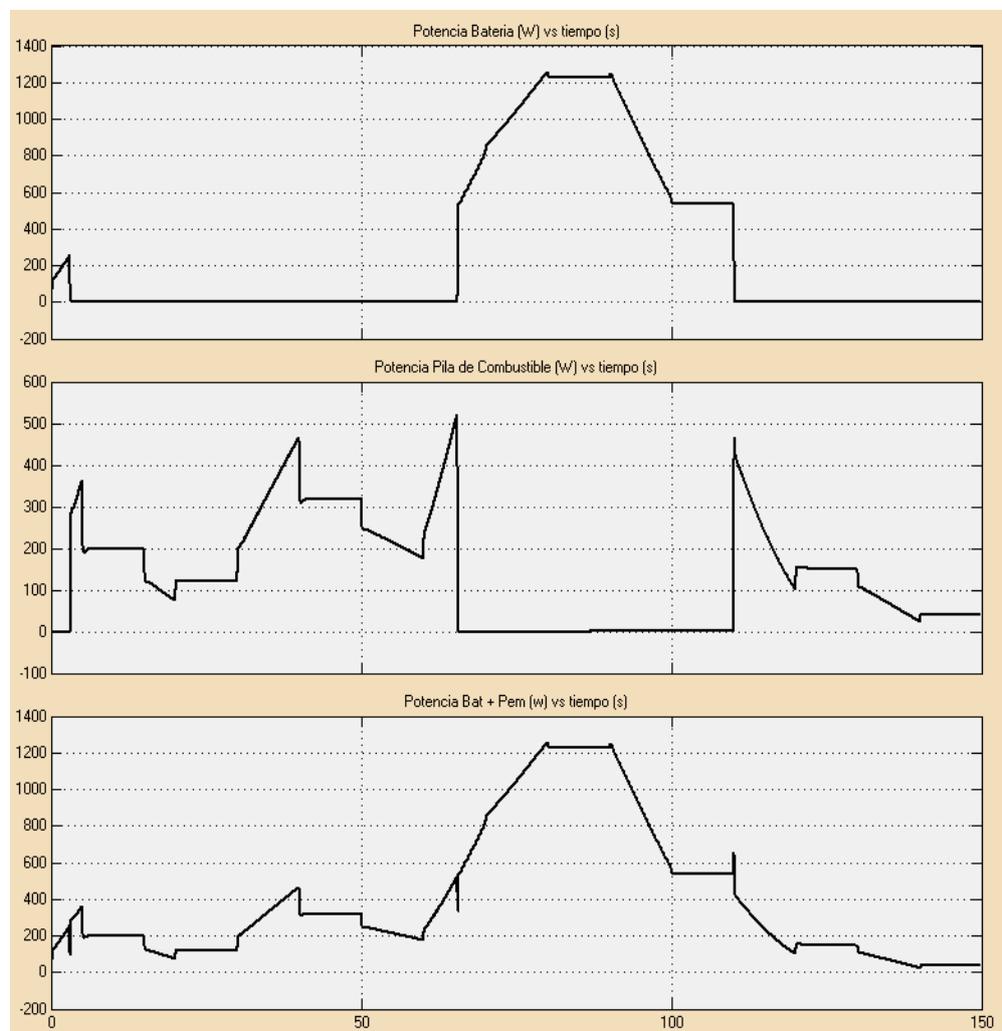


Figura 5.3 Potencia Batería + Pila de combustible

En la figura 5.3 se ilustra la potencia suministrada por la batería y la pila de combustible a la carga del motor. En un tiempo mayor a 110 s, se observa potencia negativa en la batería, esto se debe a que la pila le entrega energía para evitar que se descargue cuando no se la esté usando.

#### 5.1.4 Conmutación de la batería y pila de combustible

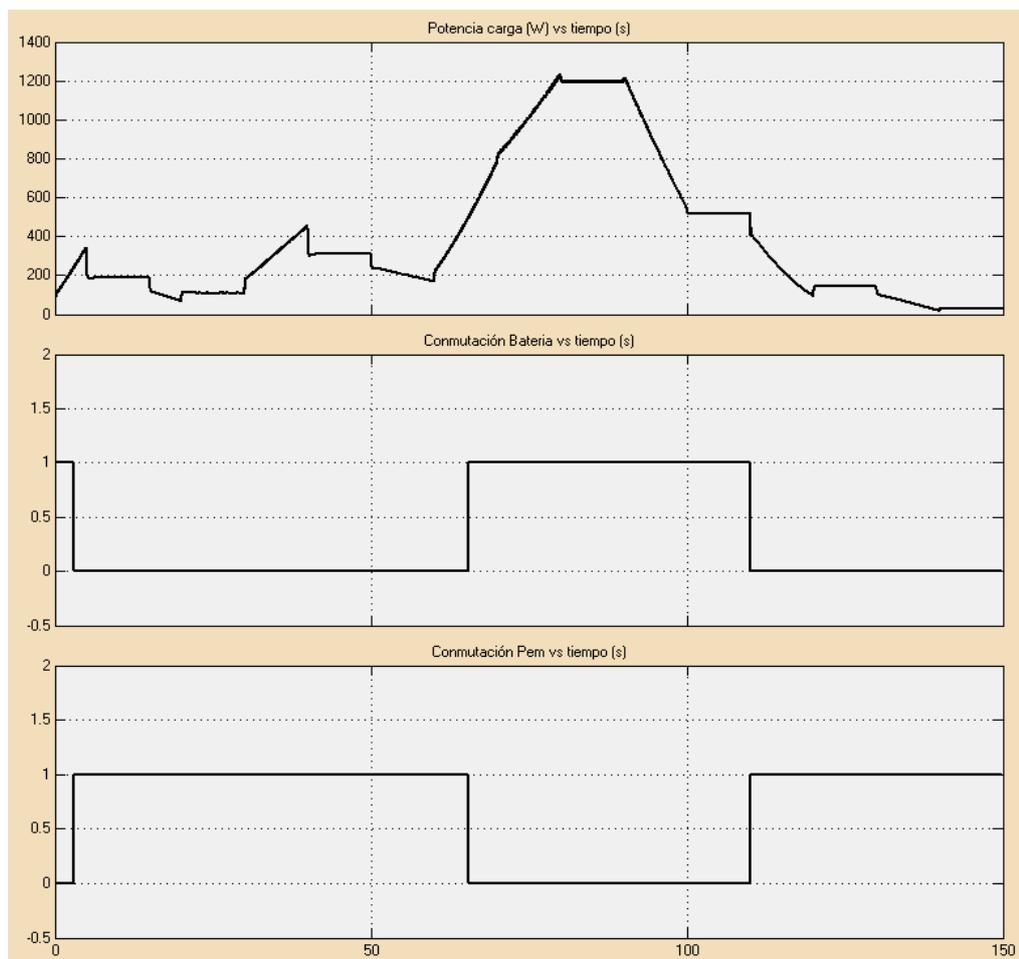


Figura 5.4 Conmutación de la batería y pila de combustible

En la gráfica 5.4 se observa la conmutación de la batería y la pila de combustible, para valores menores a 500 W suministra energía a la carga la pila de combustible mientras que en el arranque y potencias mayores a 500 W lo hace la batería.

### 5.1.5 Velocidad de referencia y velocidad de control

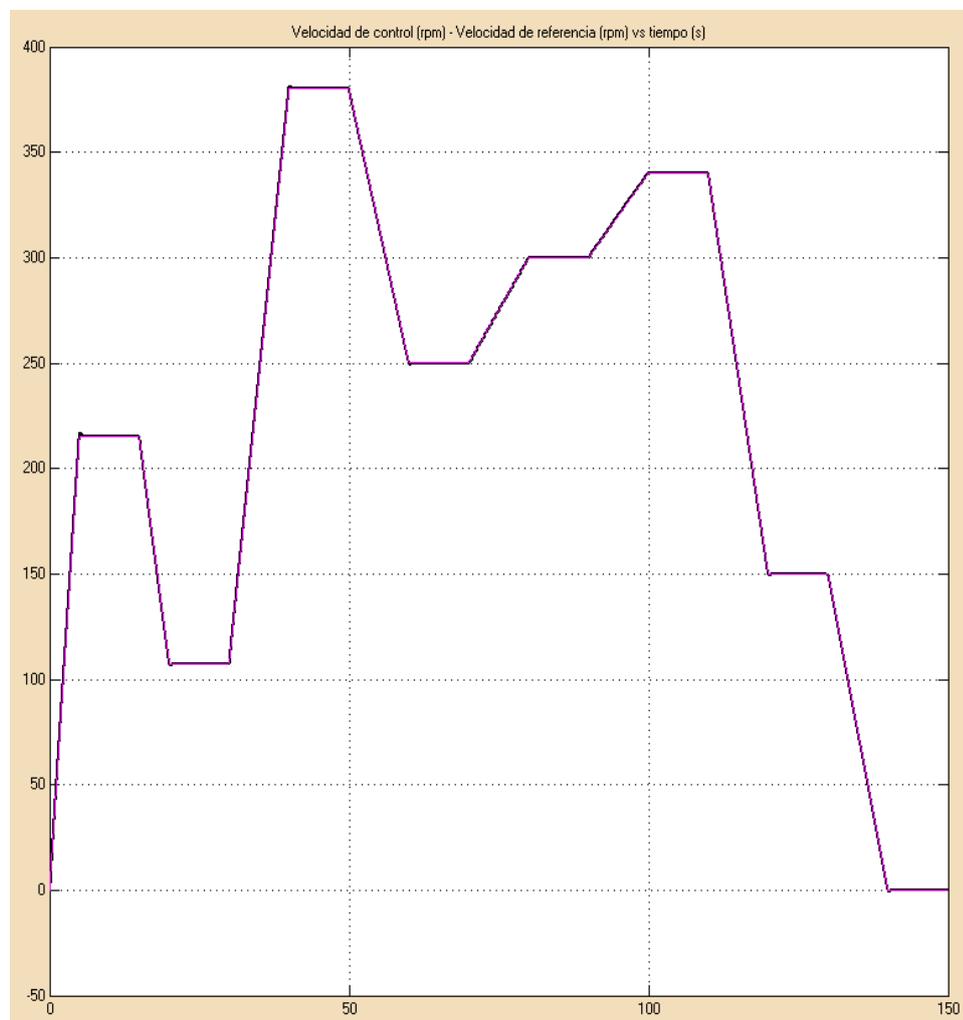


Figura 5.5 Velocidad de referencia y velocidad de control

En la figura 5.5 se visualiza como la velocidad de control sigue fielmente a la velocidad de referencia, es decir el control de velocidad se lleva a cabo correctamente.

### 5.1.6 Velocidad en km/h y rpm

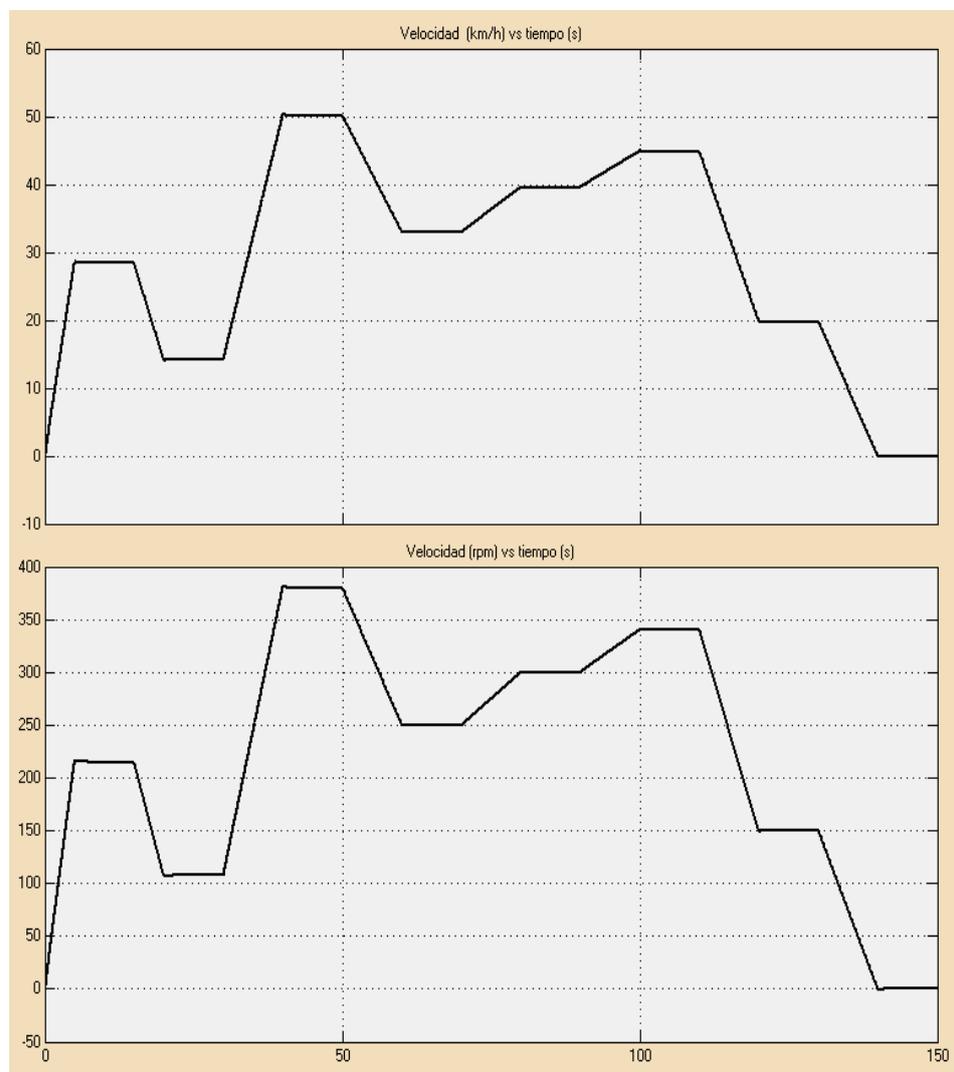


Figura 5.6 Velocidad en km/h y rpm

En la figura 5.6 se observa las velocidades transformada a km/h y rpm. Para una velocidad de 380 rpm su velocidad es de 50 km/h, esto se lo realiza de acuerdo al radio de la rueda del kart.

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

En la figura 5.7 se muestra el requerimiento de potencia, según la velocidad y torque aplicados, para distintos tiempos en un ciclo de 150s.

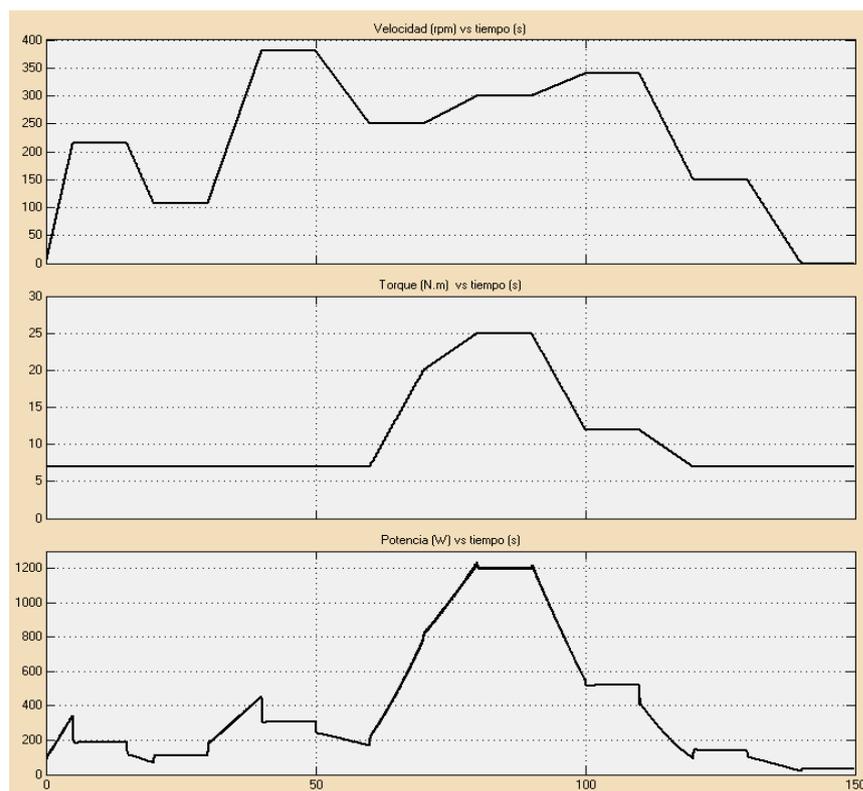


Figura 5.7 Velocidad, Torque y Potencia en la carga

En la simulación se observa que al momento de acelerar el Kart hay un aumento en la potencia, esto se debe a su arranque el cual llega hasta un valor de 345W. Cuando se mantiene constante la velocidad luego de haber acelerado, su potencia baja a un cierto valor y se mantiene fija, de igual manera al disminuir la velocidad disminuye la potencia con un torque constante. Cuando se empieza a variar el torque, la potencia también varía directamente.

### 5.1.8 Voltaje, corriente y potencia en la carga

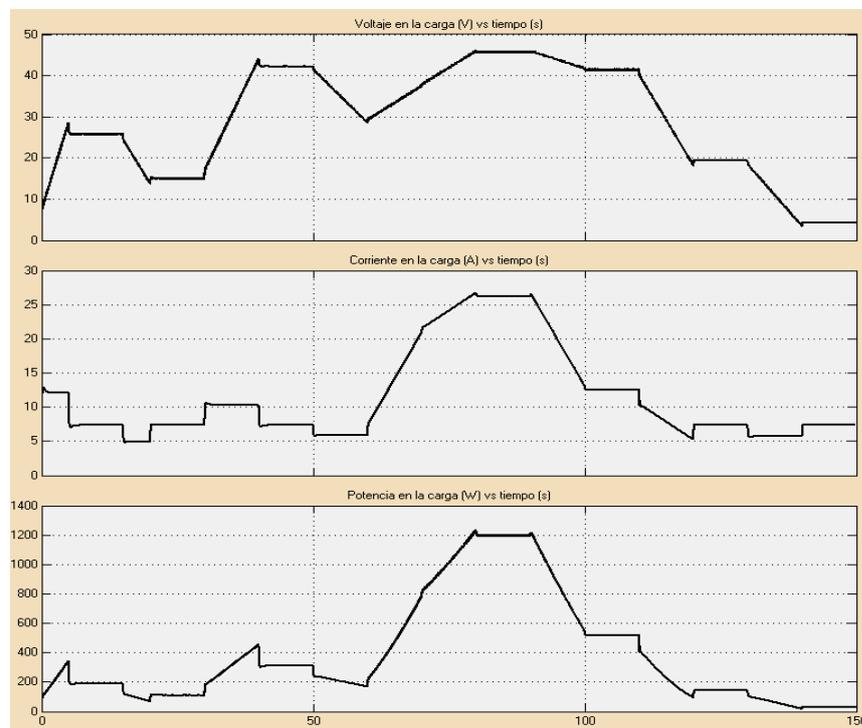


Figura 5.8 Voltaje, corriente y potencia en la carga

En la figura 5.8 se observa la potencia en la carga, la energía es suministrada por la batería y pila de combustible.

## 5.2 Pruebas realizadas Suministro híbrido 2

### 5.2.1 Estado de carga, corriente y voltaje en la batería.

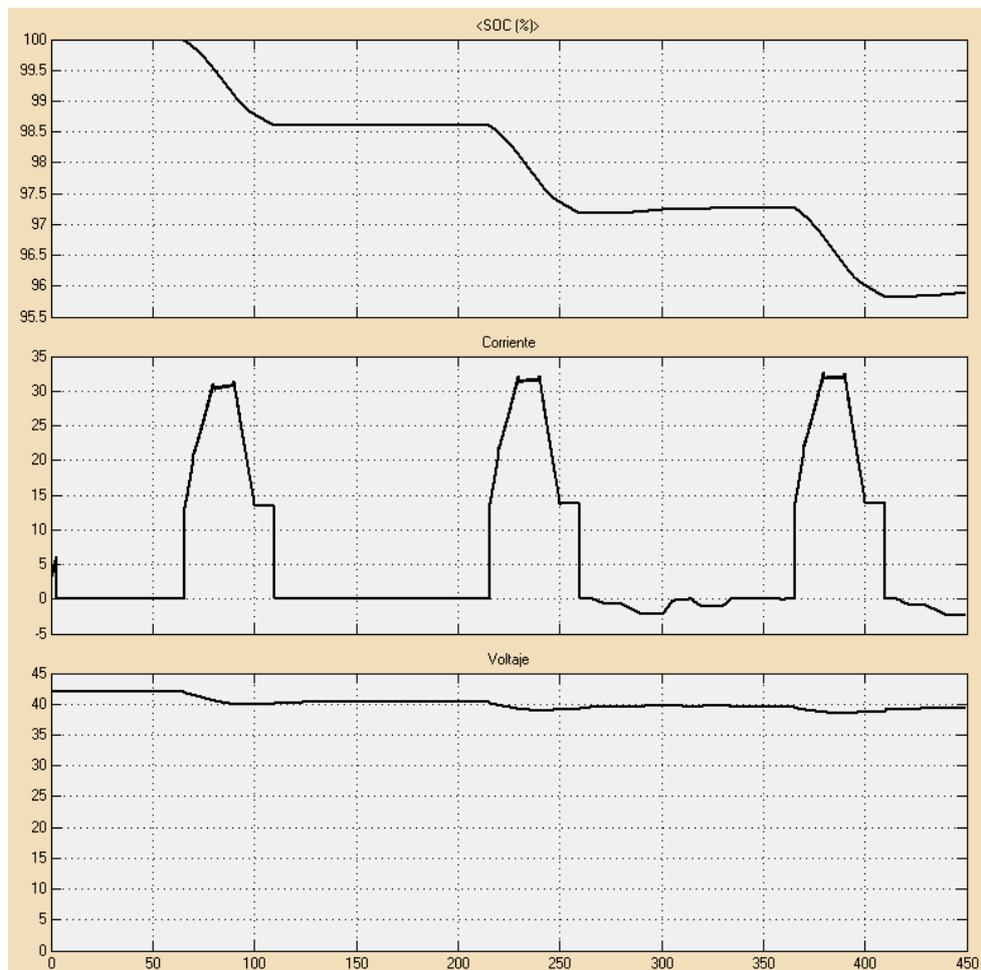


Figura 5.9 Estado de carga en 3 ciclos

A diferencia del sistema anterior, cuando el SOC sea menor a 98.5% luego de haberse usado la batería, su intervalo de carga es menor que en el primer sistema debido a que la pila de combustible le suministra energía directamente a la batería sin hacer uso de un convertidor para cada fuente de energía como se observa en la figura 5.9 para 3 ciclos. El suministro de energía será igual que en el sistema anterior como se observa en las siguientes figuras.

### 5.2.2 Voltaje, corriente en la pila de combustible

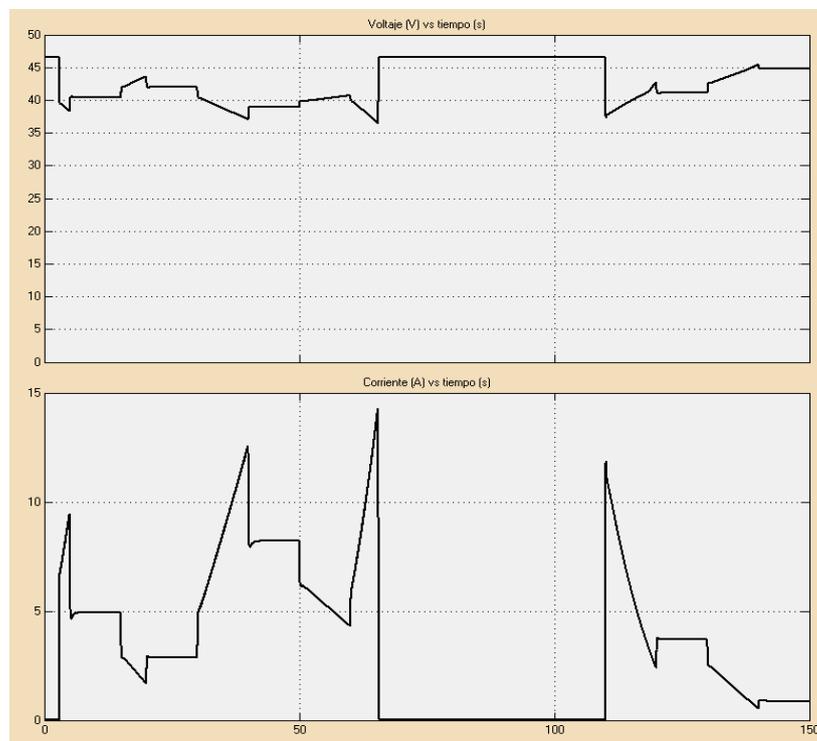


Figura 5.10 Voltaje, corriente en la pila de combustible.

Como podemos ver en la gráfica 5.10 las señales de voltaje y corriente son las mismas del sistema híbrido 1.

### 5.2.3 Potencia suministrada por la batería y pila de combustible

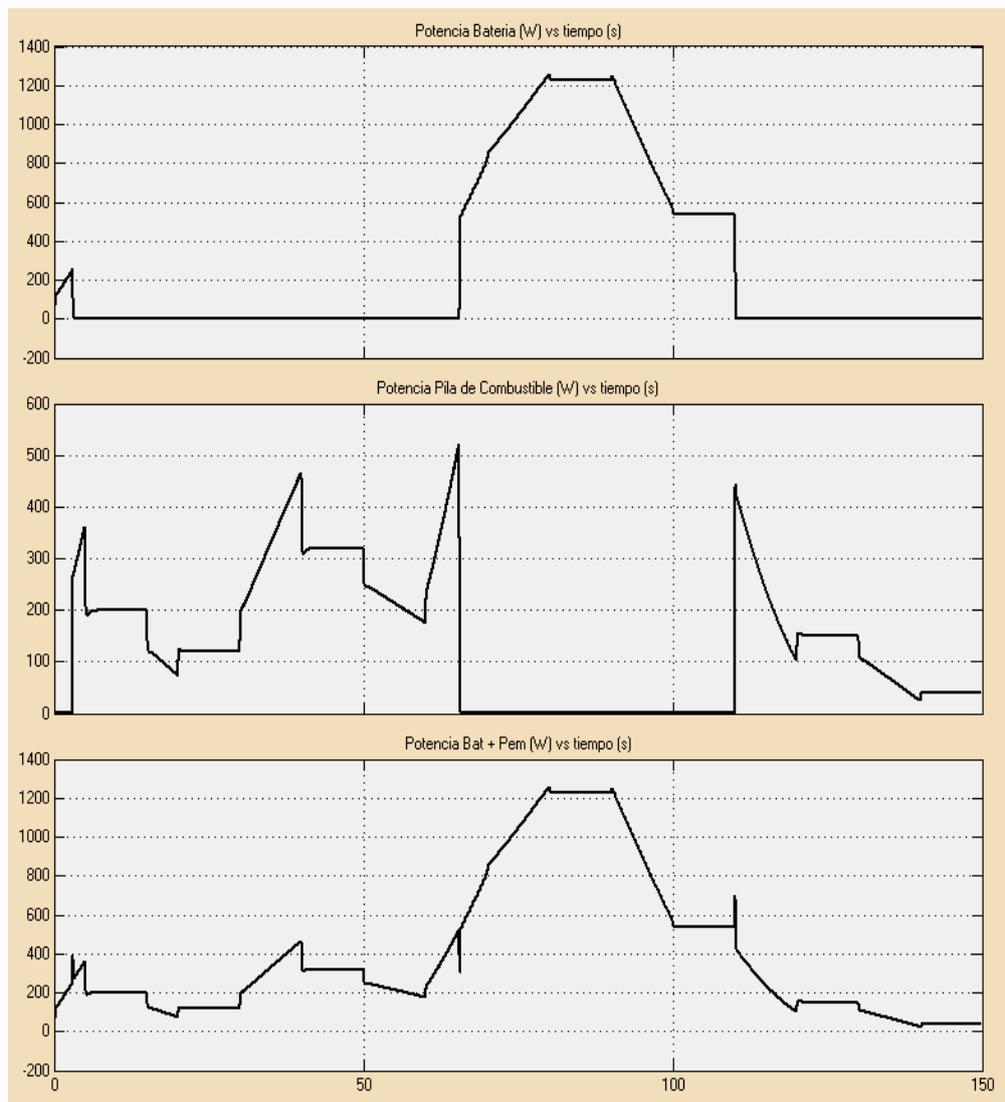


Figura 5.11 Potencia Batería + Pila de combustible

Como podemos ver en la gráfica 5.11 las señales de potencia de batería y pila de combustible son las mismas del sistema híbrido 1.

#### 5.2.4 Conmutación de la batería y pila de combustible

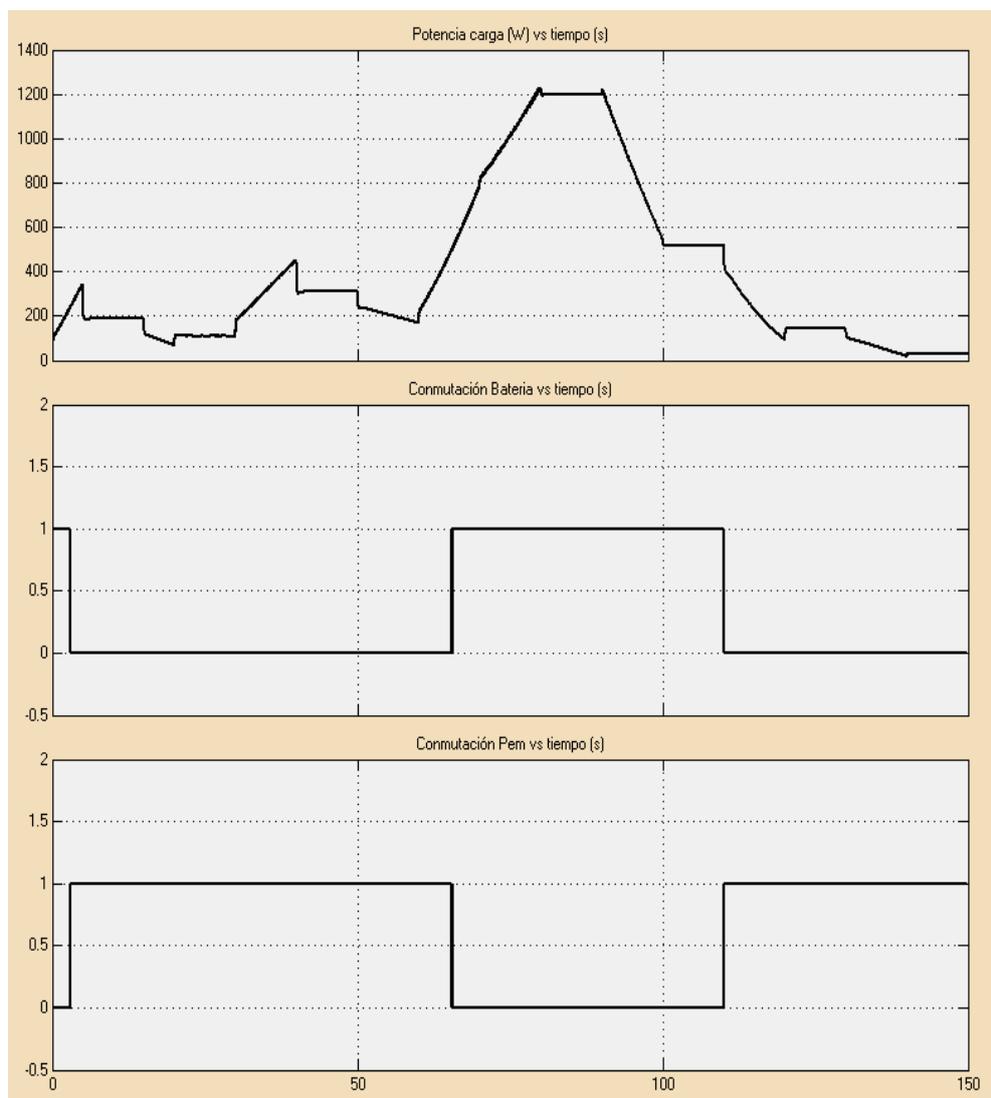


Figura 5.12 Conmutación de la batería y pila de combustible

Como podemos ver en la gráfica 5.12 las señales de conmutación de batería y pila de combustible son las mismas del sistema híbrido 1.

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

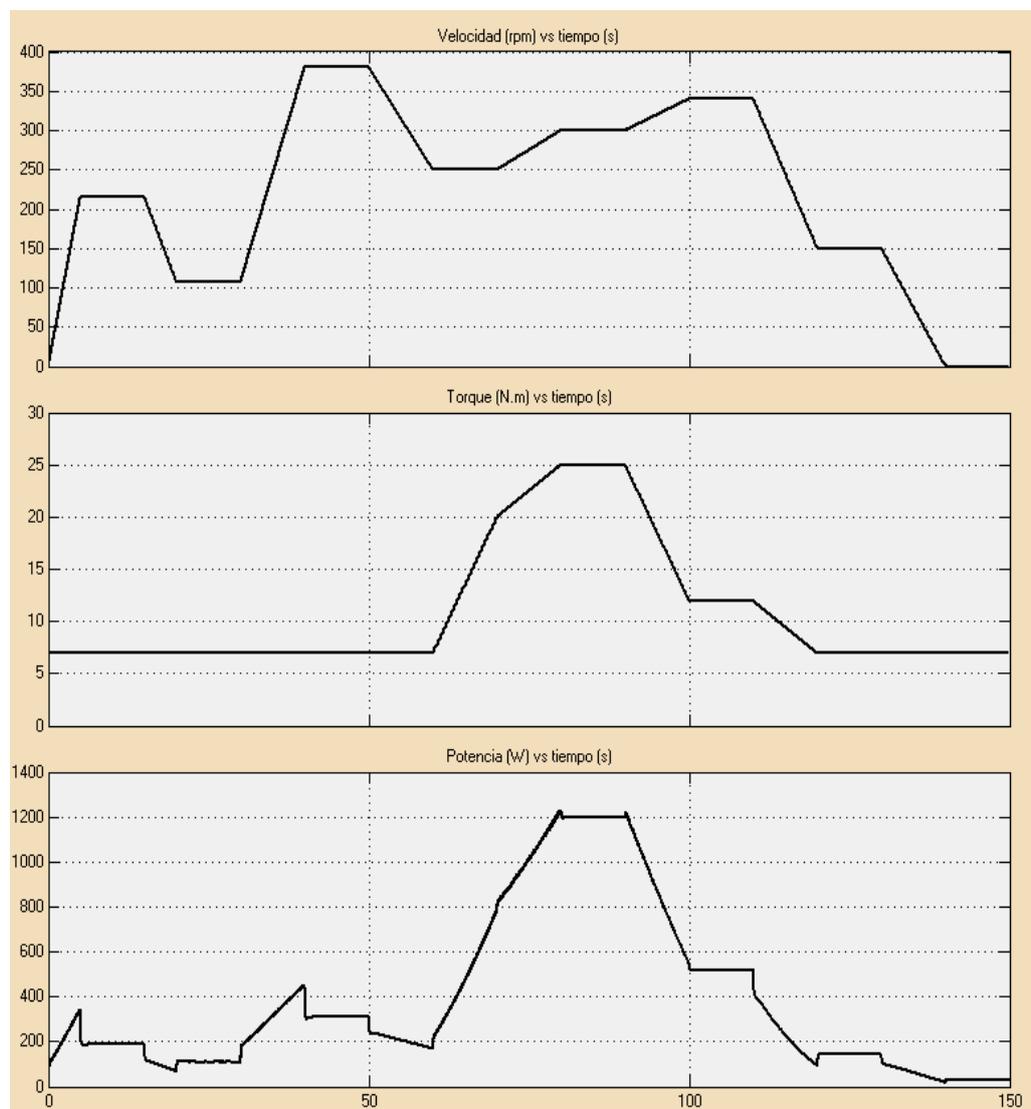


Figura 5.13 Velocidad, Torque y Potencia en la carga

Como podemos ver en la gráfica 5.13 las señales de potencia de la carga es las mismas del sistema híbrido 1.

### 5.2.6 Voltaje, corriente y potencia en la carga

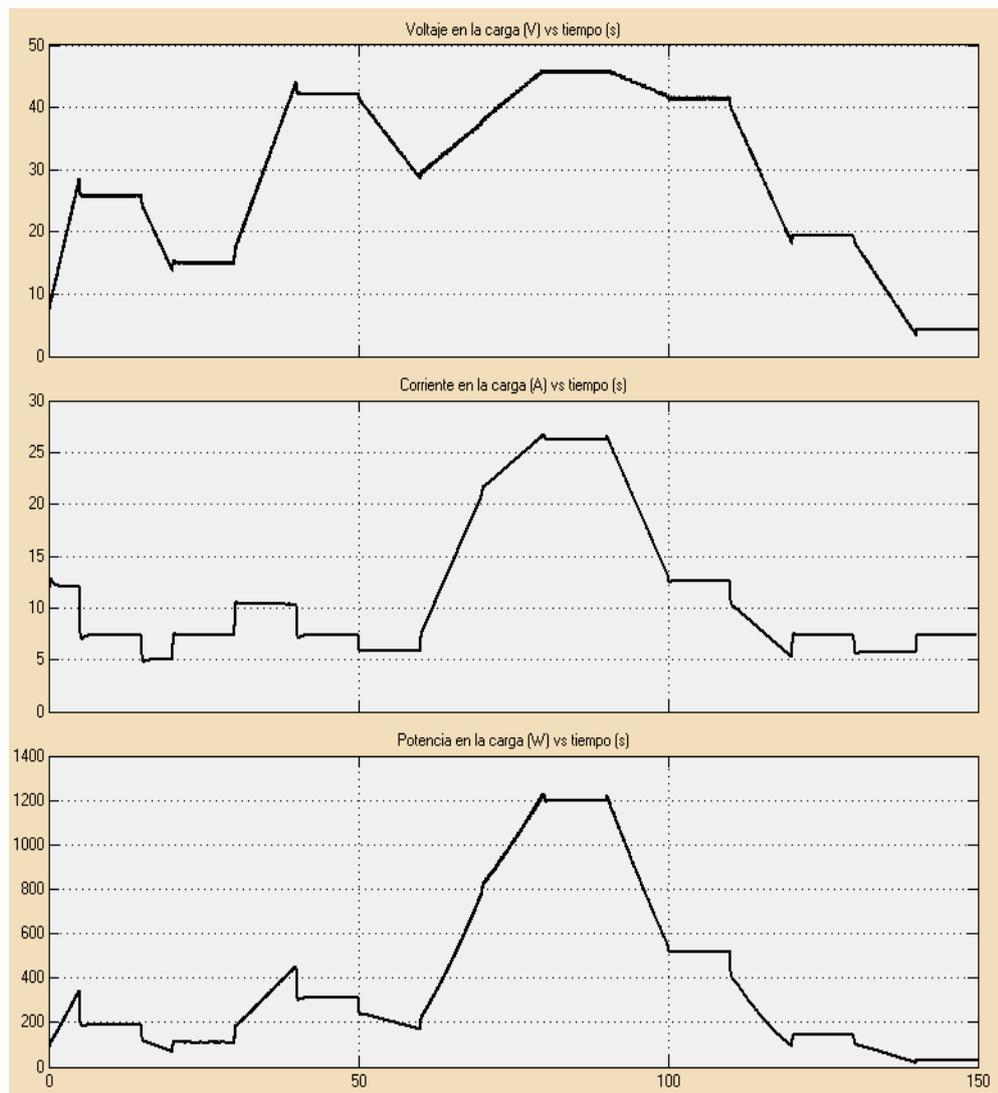


Figura 5.14 Voltaje, corriente y potencia en la carga

Como podemos ver en la gráfica 5.14 las señales de voltaje, corriente y potencia en la carga son las mismas del sistema híbrido 1.

### 5.3 Pruebas realizadas Suministro híbrido 3

#### 5.3.1 Estado de carga, corriente y voltaje en la batería

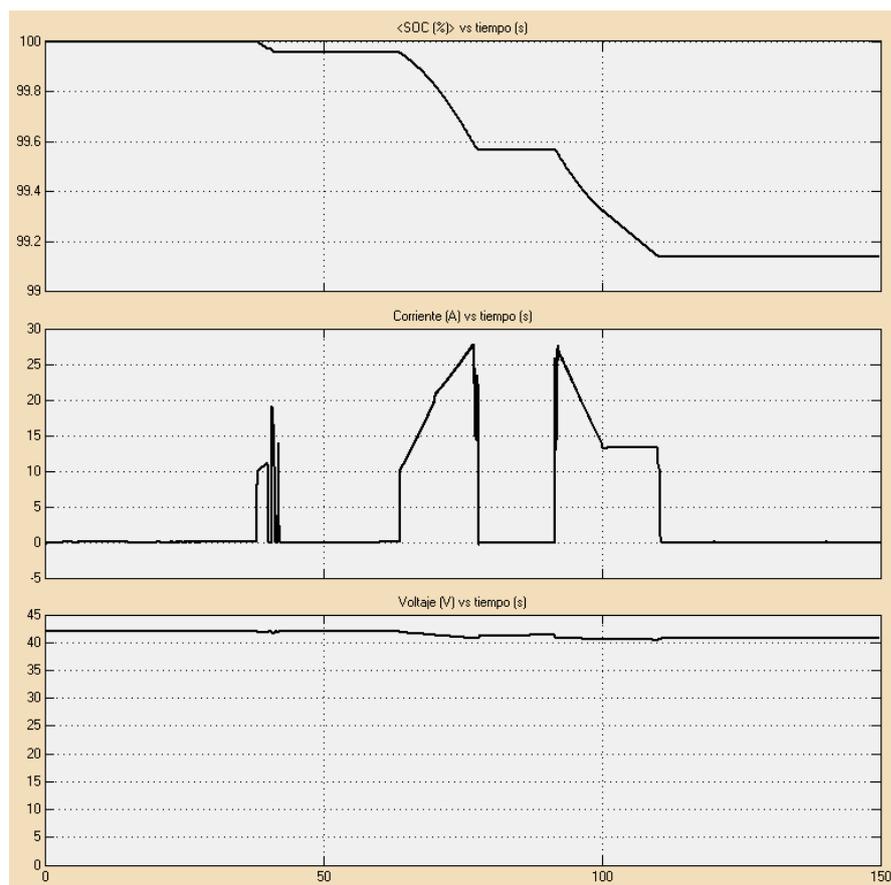


Figura 5.15 Estado de carga, corriente y voltaje en la batería.

Como se visualiza en la figura 5.15 el estado de carga de la batería disminuye luego haber entregado potencia a la carga. Este empezará a cargarse cuando el SOC sea menor al 98.5% a través de la pila de combustible.

### 5.3.2 Voltaje, corriente en la pila de combustible

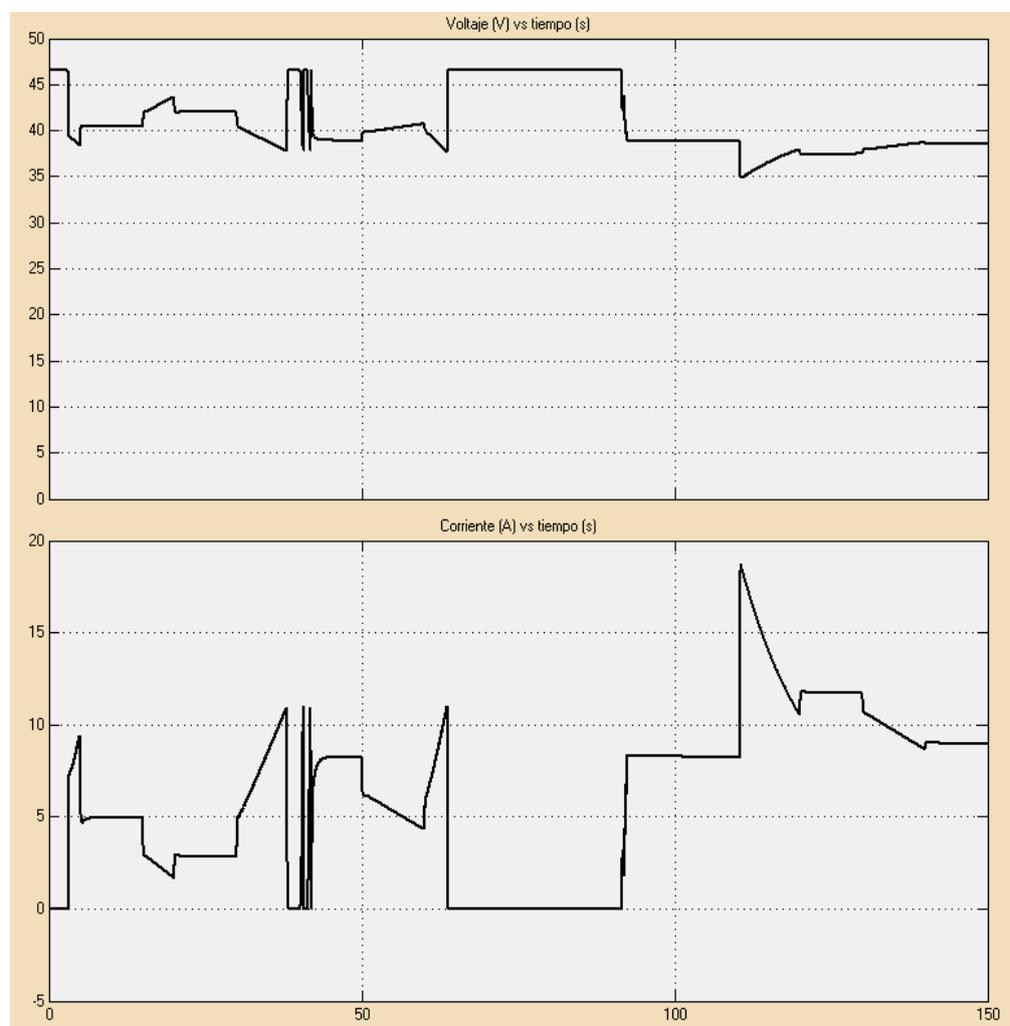


Figura 5.16 Voltaje, corriente en la pila de combustible.

En la figura 5.16 se visualiza el voltaje y la corriente que entrega la pila de combustible para suministrar energía a la carga. En los intervalos donde la corriente es cero, la potencia es suministrada por la batería o supercapacitor mientras que en los valores altos de corriente entrega energía a la batería o supercapacitor cuando se descargan de acuerdo a las condiciones del SOC.

### 5.3.3 Voltaje, corriente y estado de carga en el supercapacitor

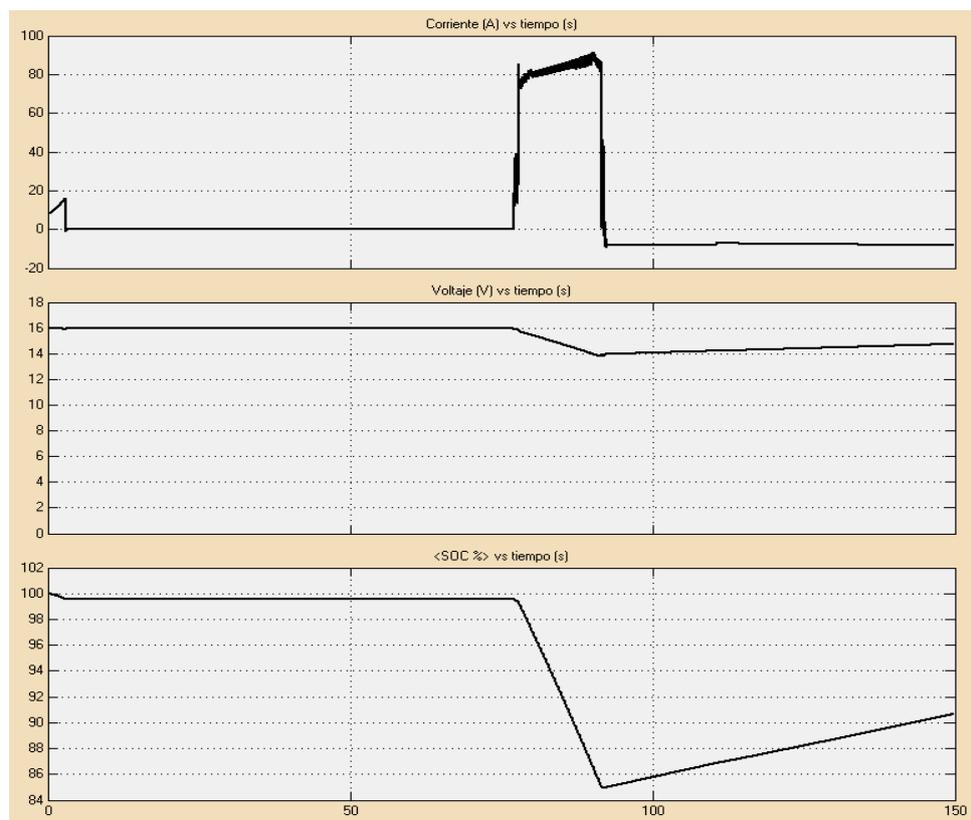


Figura 5.17 Voltaje, corriente y estado de carga en el supercapacitor.

En la figura 5.17 se visualiza el voltaje y la corriente que entrega el super capacitor 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% como se visualiza en la figura 5.18 en un tiempo de 450 s.

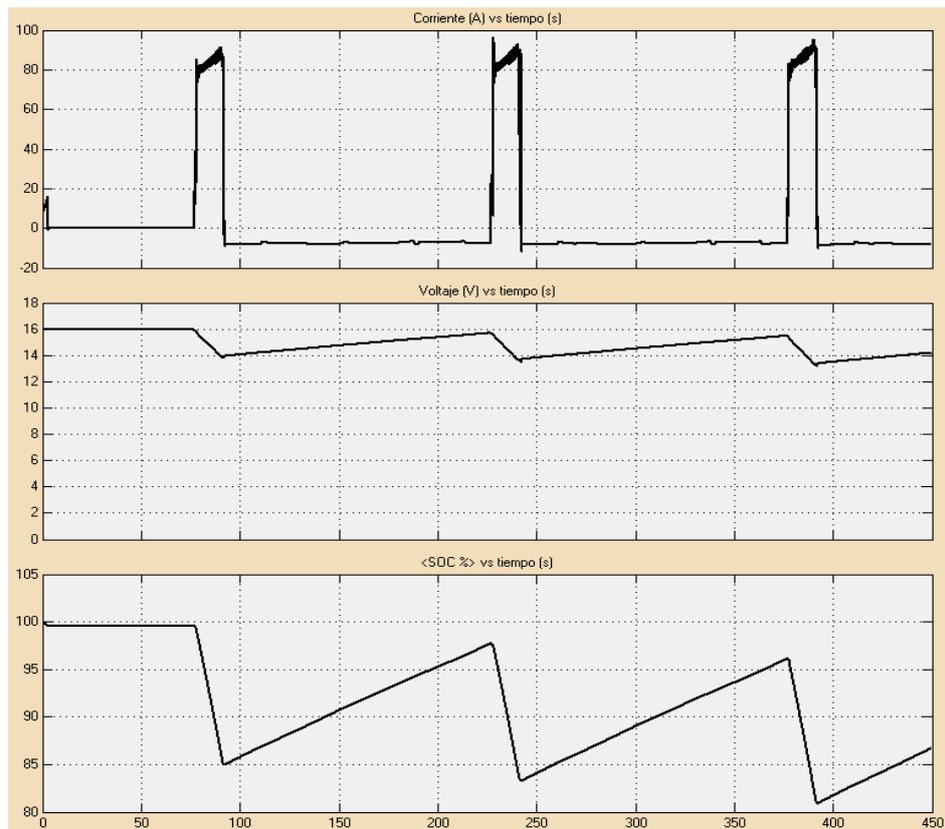


Figura 5.18 Estado de carga supercapacitor en 3 ciclos

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

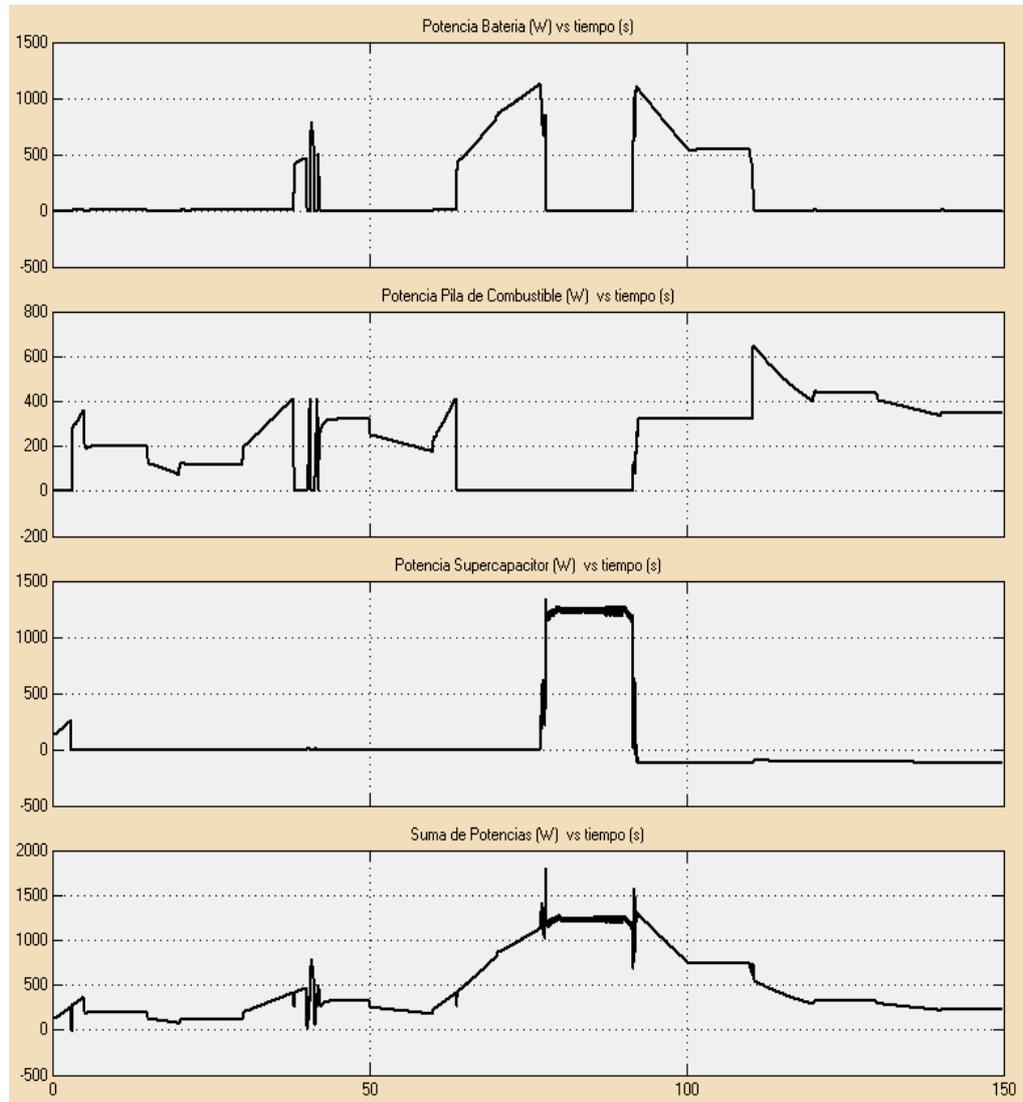


Figura 5.19 Potencia Batería + Pila de combustible + Supercapacitor

En la figura 5.19 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.

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

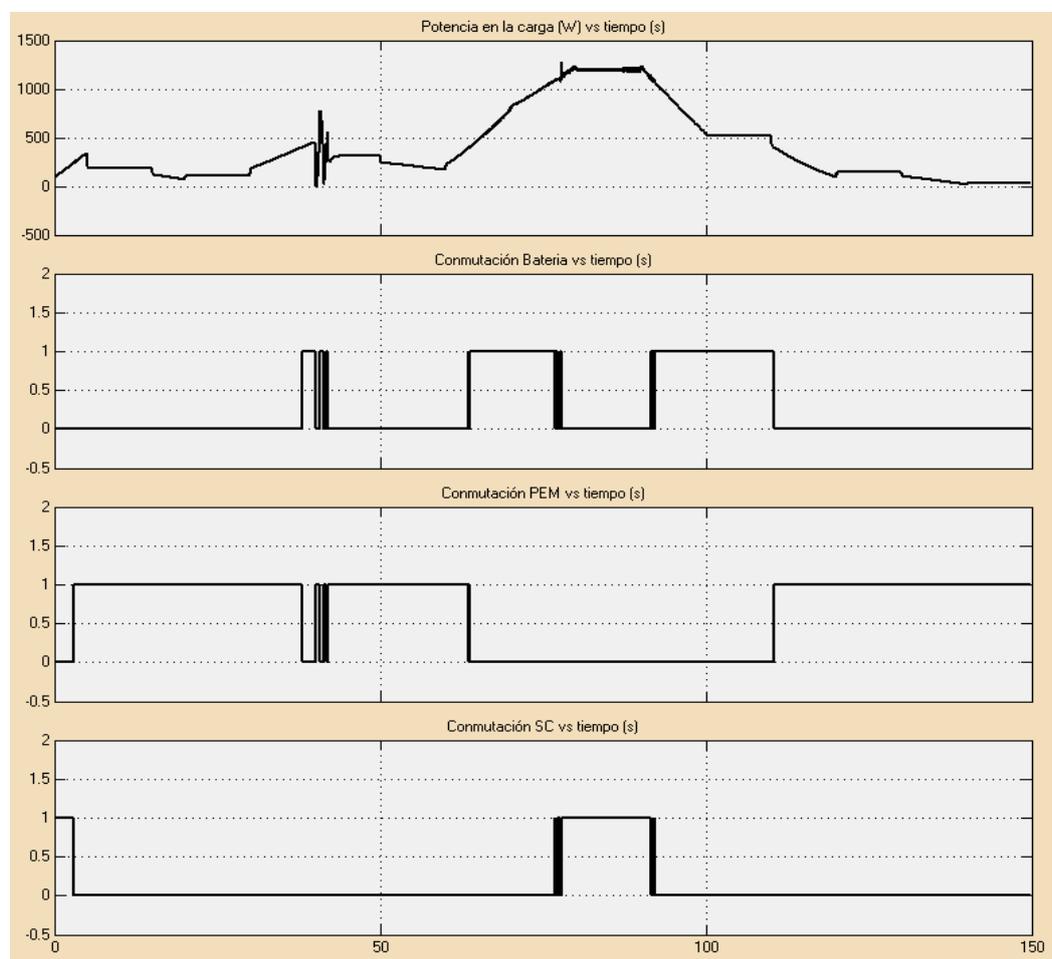


Figura 5.20 Conmutación de la batería, pila de combustible y supercapacitor.

En la figura 5.20 se visualiza cada una de las conmutaciones de las fuentes de energía, 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.

### 5.3.6 Velocidad de referencia y velocidad de control

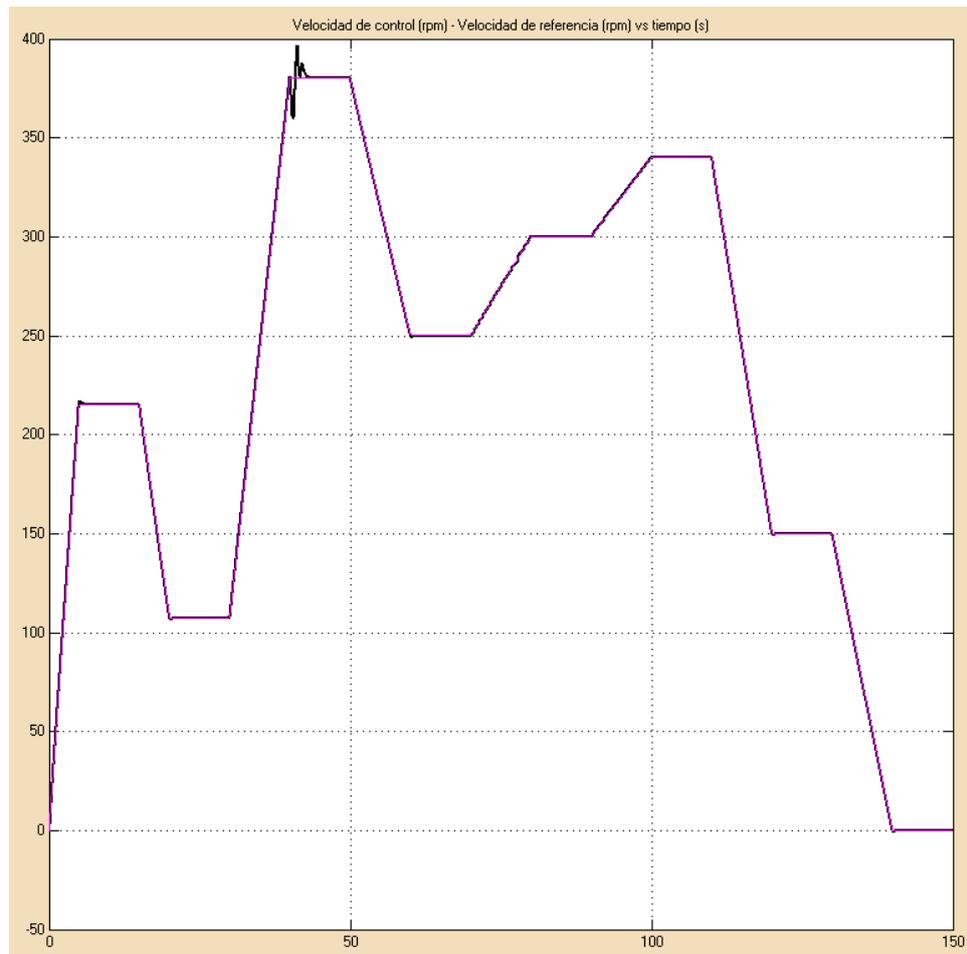


Figura 5.21 Velocidad de referencia y velocidad de control

En la figura 5.21 se observa como la velocidad de control sigue a la de referencia. En un tiempo de 40 s se observa varias oscilaciones esto es debido a que en el sistema está conmutando entre el supercapacitor y la batería, luego de un tiempo se estabiliza.

### 5.3.7 Velocidad en km/h y rpm

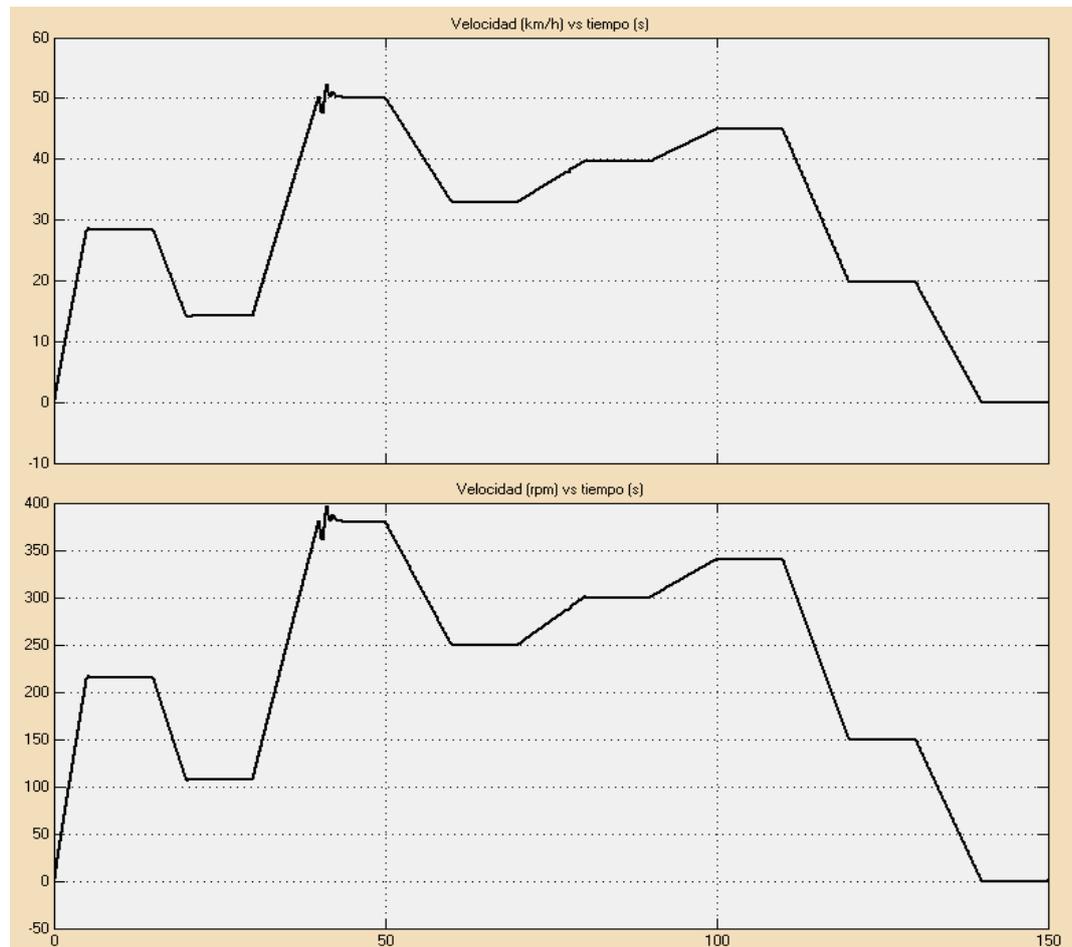


Figura 5.22 Velocidad en km/h y rpm

En la figura 5.22 se observa las velocidades en rpm y km/h para un sistema de suministro de 3 fuentes de energía es similar que con 2, las oscilaciones son normales debido a la conmutación del suministro debido a las condiciones de potencia que requiere la carga.

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

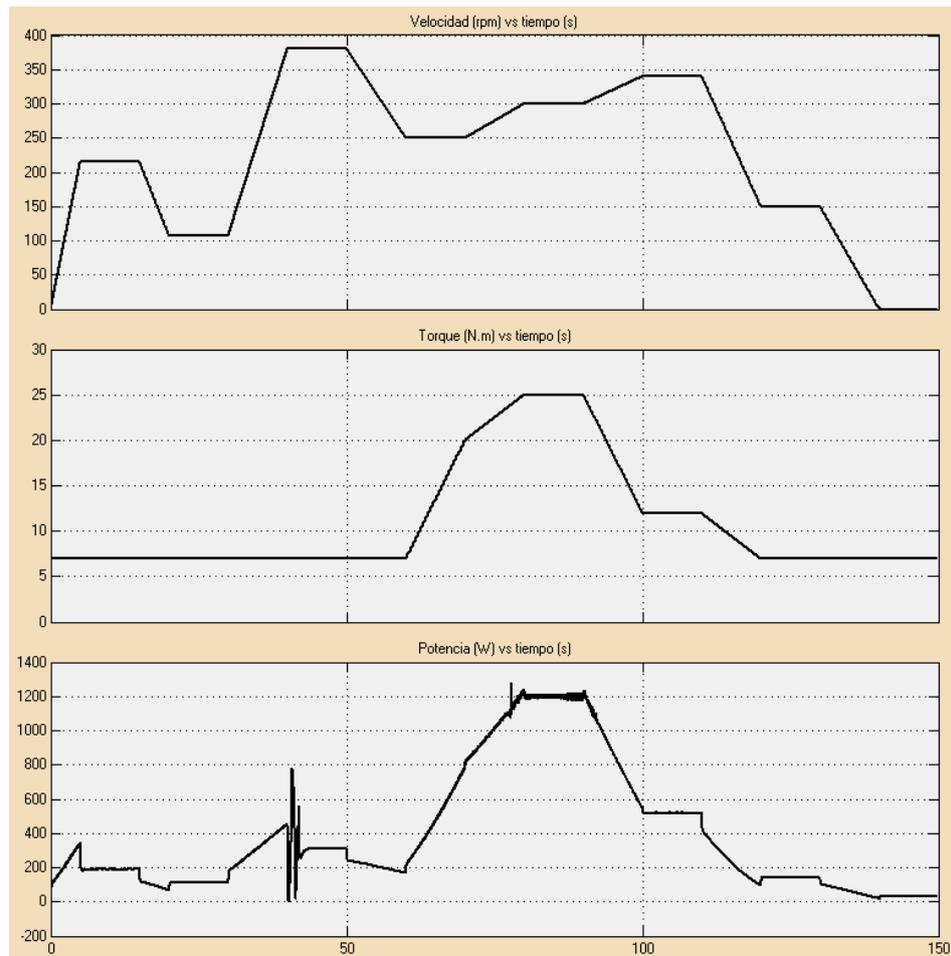


Figura 5.23 Velocidad, Torque y Potencia en la carga

En la figura 5.23 se observa que 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.

### 5.3.9 Voltaje, corriente y potencia en la carga

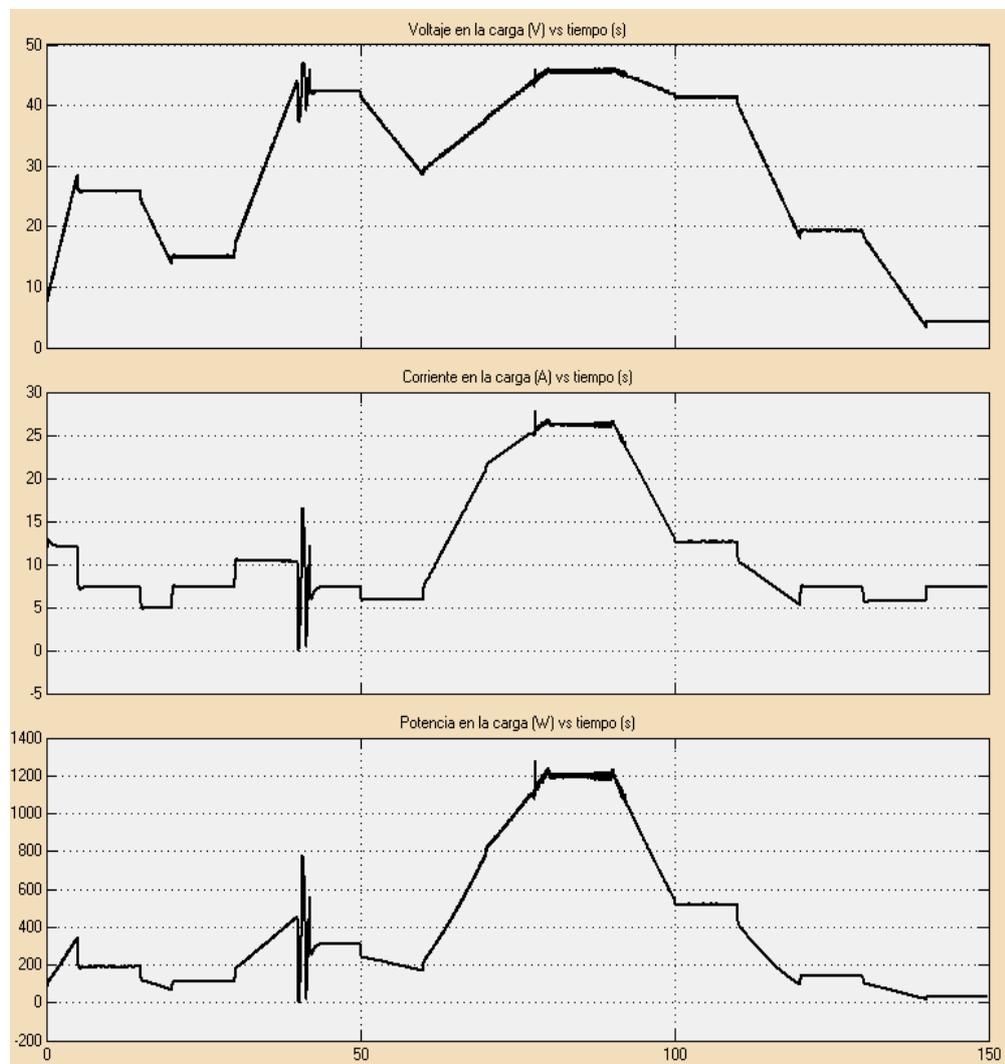


Figura 5.24 Voltaje, corriente y potencia en la carga

En la figura 5.24 se visualiza la potencia que requiere la carga, el sistema con las 3 fuentes de energías cubre correctamente la demanda de potencia requerida.

#### **5.4 Pruebas realizadas Suministro híbrido 4**

A diferencia del sistema anterior, este solo usa un convertidor elevador de 48Vdc a la salida del controlador, y como se visualiza en las siguientes gráficas el sistema no es estable.

### 5.4.1 Estado de carga, corriente y voltaje en la batería

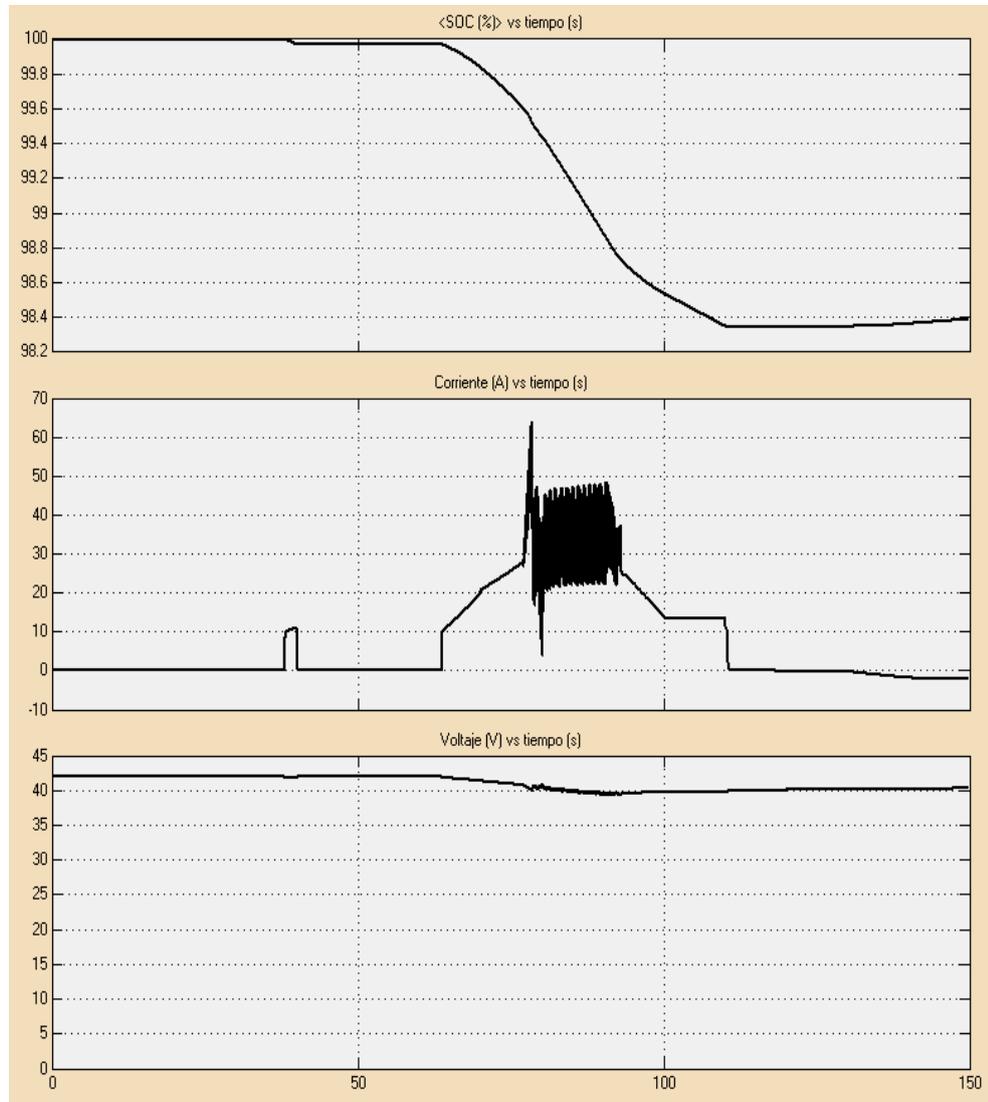


Figura 5.25 Estado de carga, corriente y voltaje en la batería

Se puede observar en la figura 5.25 oscilaciones de corriente y de voltaje debido a la inestabilidad del sistema.

#### 5.4.2 Voltaje, corriente en la pila de combustible

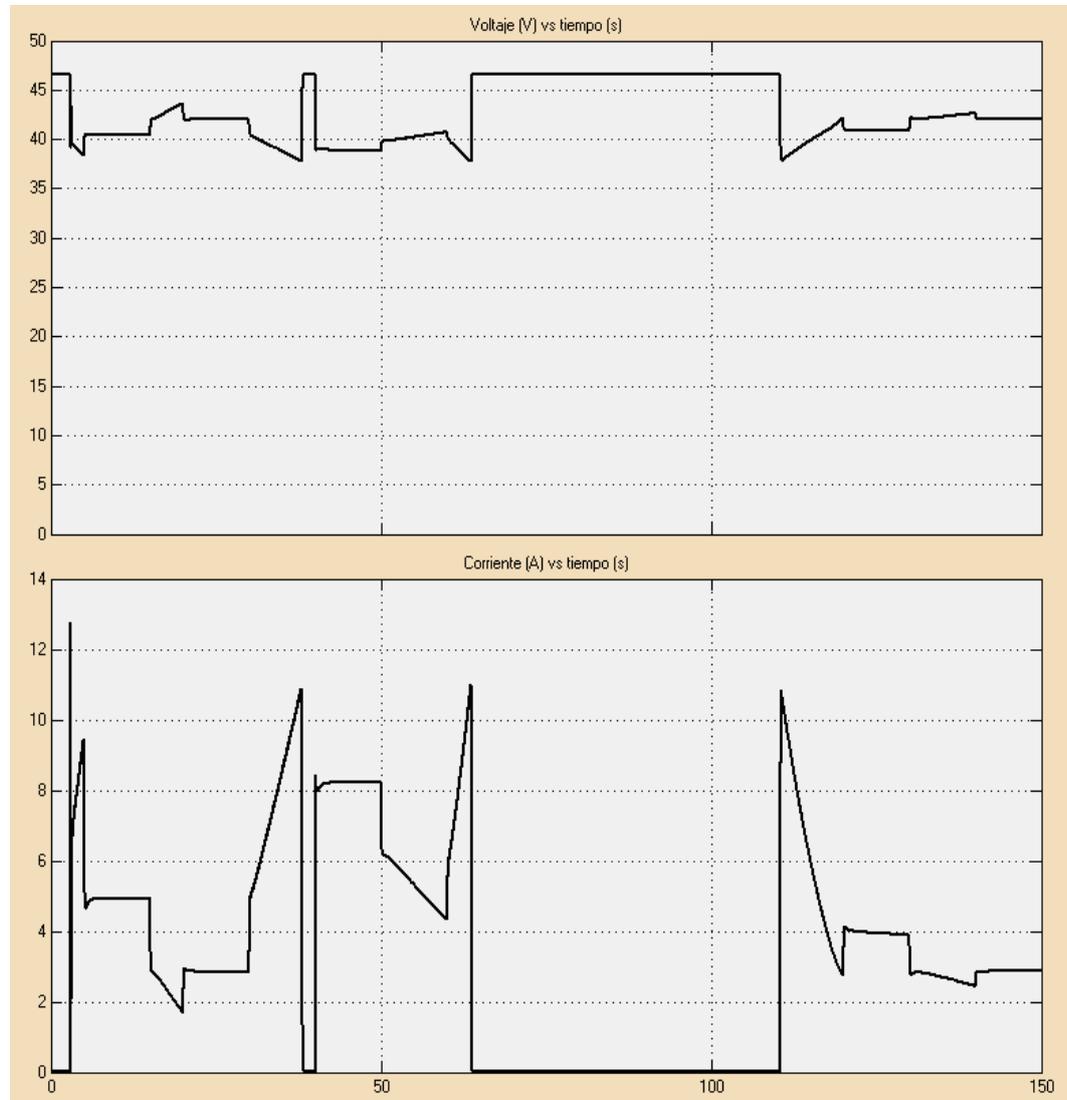


Figura 5.26 Voltaje, corriente en la pila de combustible.

Observando en la figura 5.26 la inestabilidad del sistema no afecta a la pila de combustible debido a que esta interactúa solo con potencias bajas.

### 5.4.3 Voltaje, corriente y estado de carga en el supercapacitor

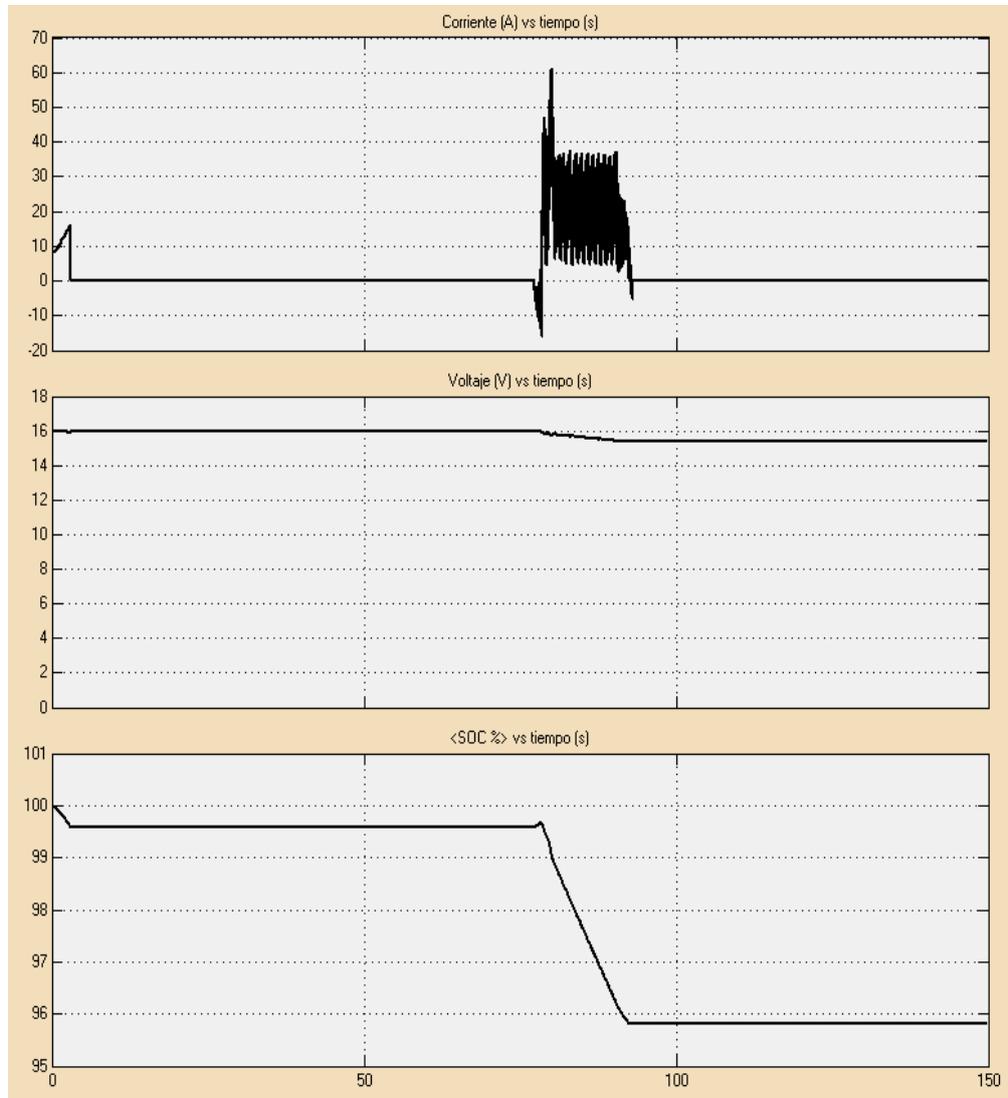


Figura 5.27 Voltaje, corriente y estado de carga en el supercapacitor

En la figura 5.27 podemos observar la inestabilidad de corriente en el supercapacitor, mientras el valor de voltaje va decreciendo.

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

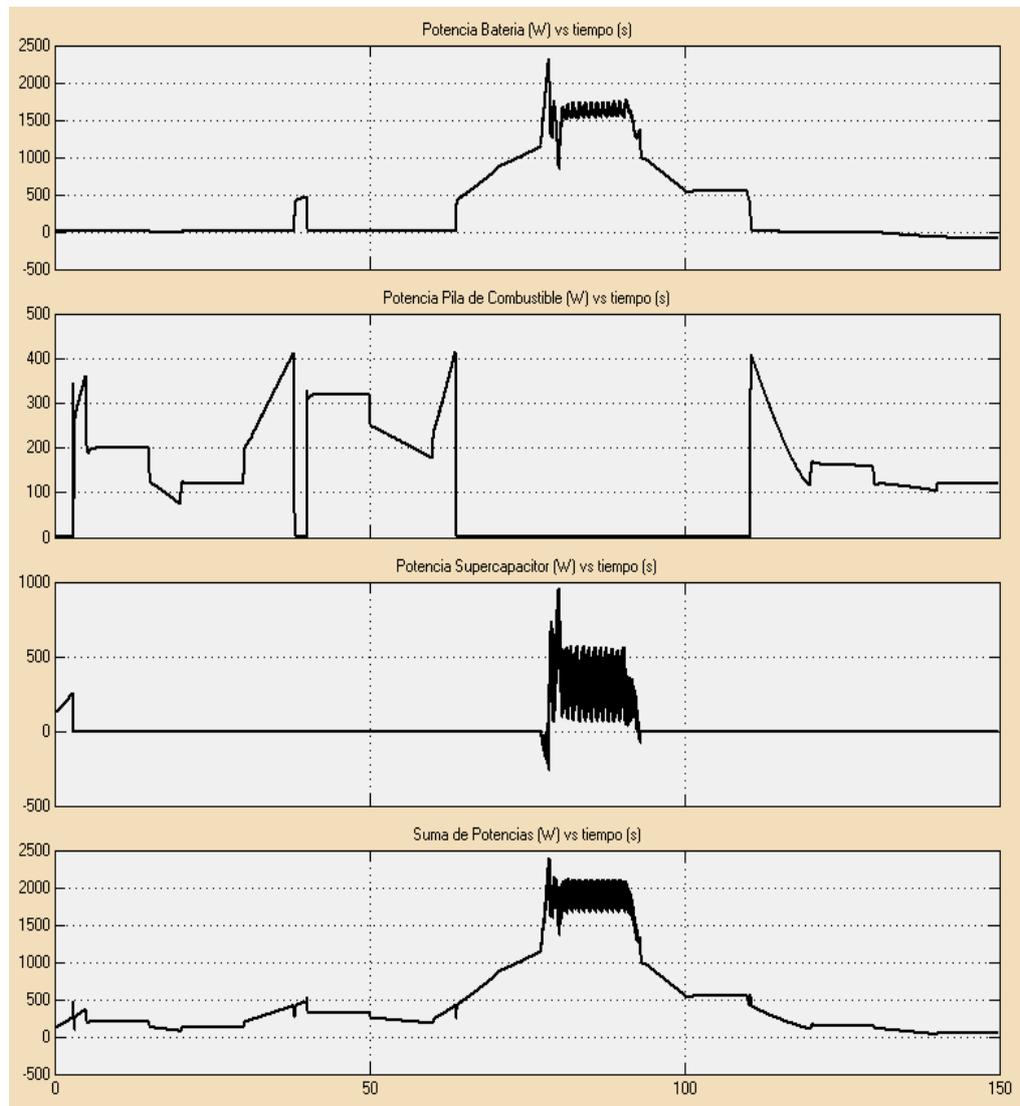


Figura 5.28 Potencia Batería + Pila de combustible + Supercapacitor

Se puede observar en la figura 5.28 la inestabilidad de potencia del supercapacitor y batería, nos lleva a tener una deficiencia

del sistema donde su potencia excede su valor nominal, acortando el porcentaje de carga de cada uno.

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

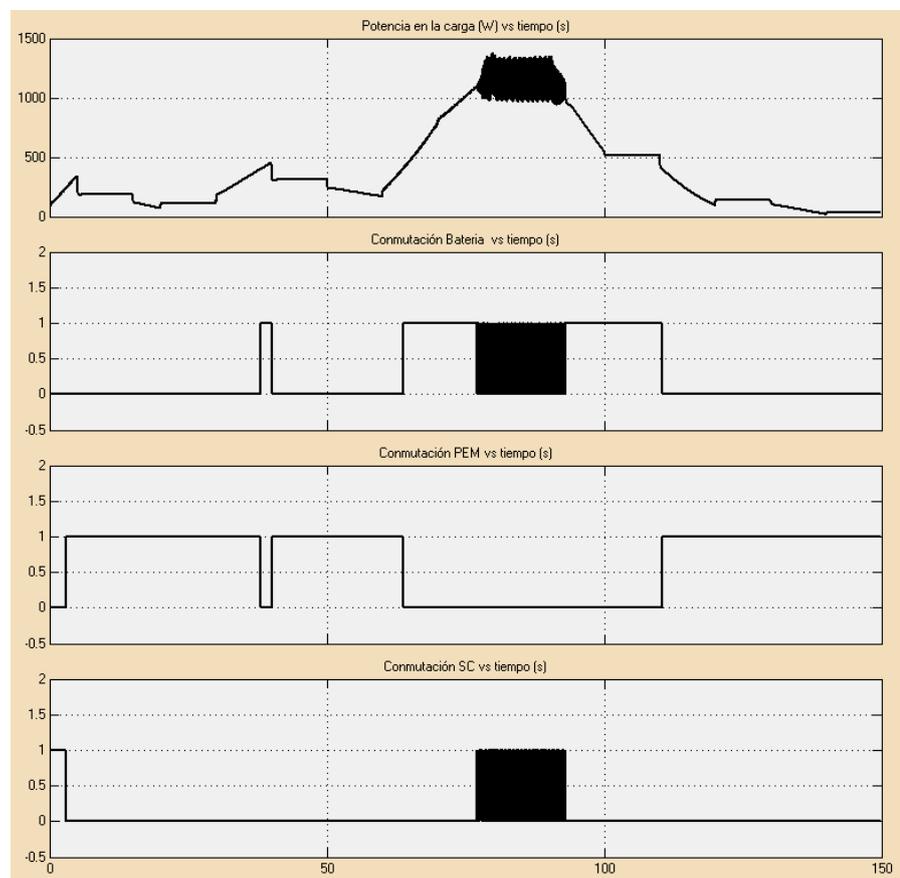


Figura 5.29 Conmutación de la batería, pila de combustible y supercapacitor.

Se puede observar en la figura 5.29 las conmutaciones entre la batería y el supercapacitor en tiempos muy pequeños inestables con valores máximos de potencia.

#### 5.4.6 Velocidad de referencia y velocidad de control

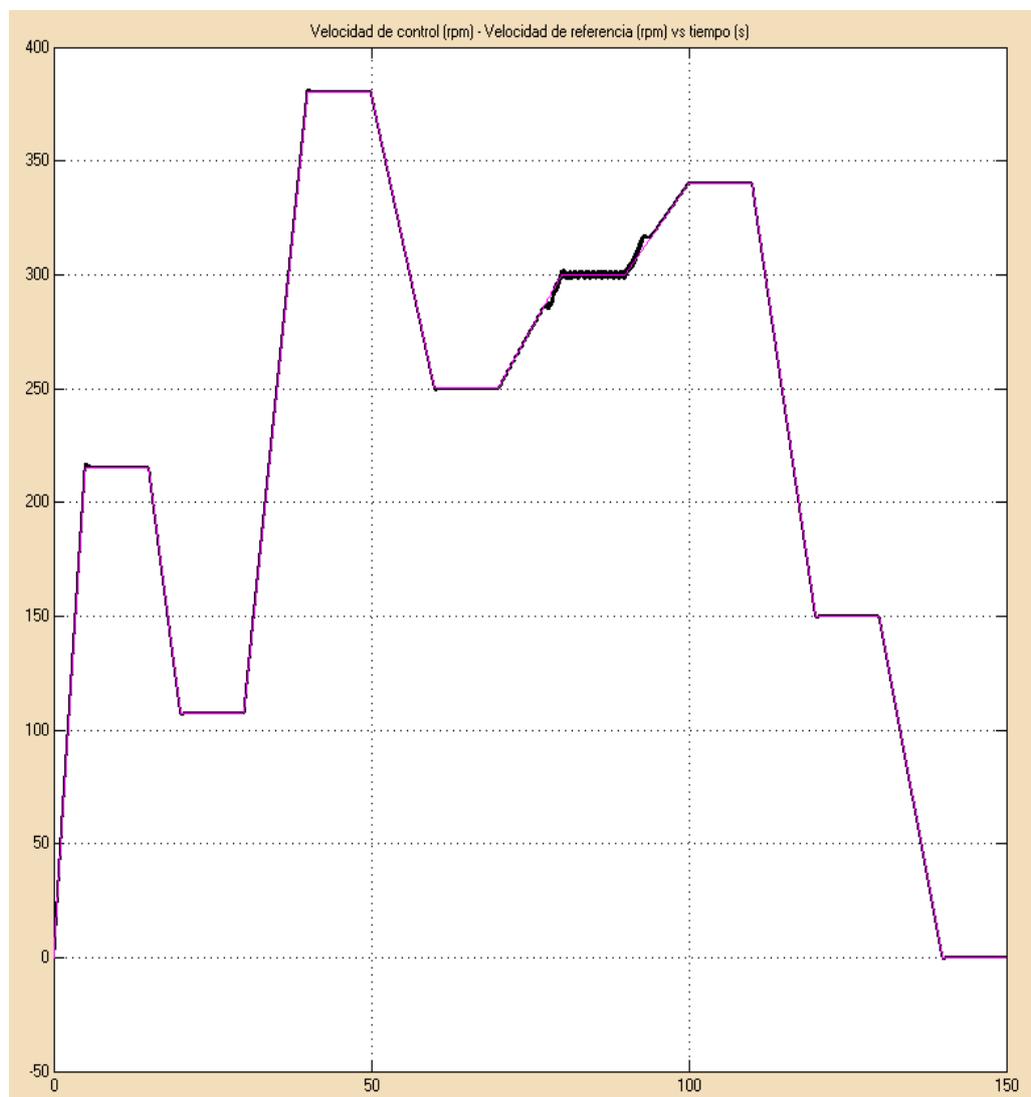


Figura 5.30 Velocidad de referencia y velocidad de control

Observando la figura 5.30 el uso de un único elevador DC/DC afecta al sistema de control, de manera que la velocidad de salida varié con la velocidad deseada.

#### 5.4.7 Velocidad en km/h y rpm

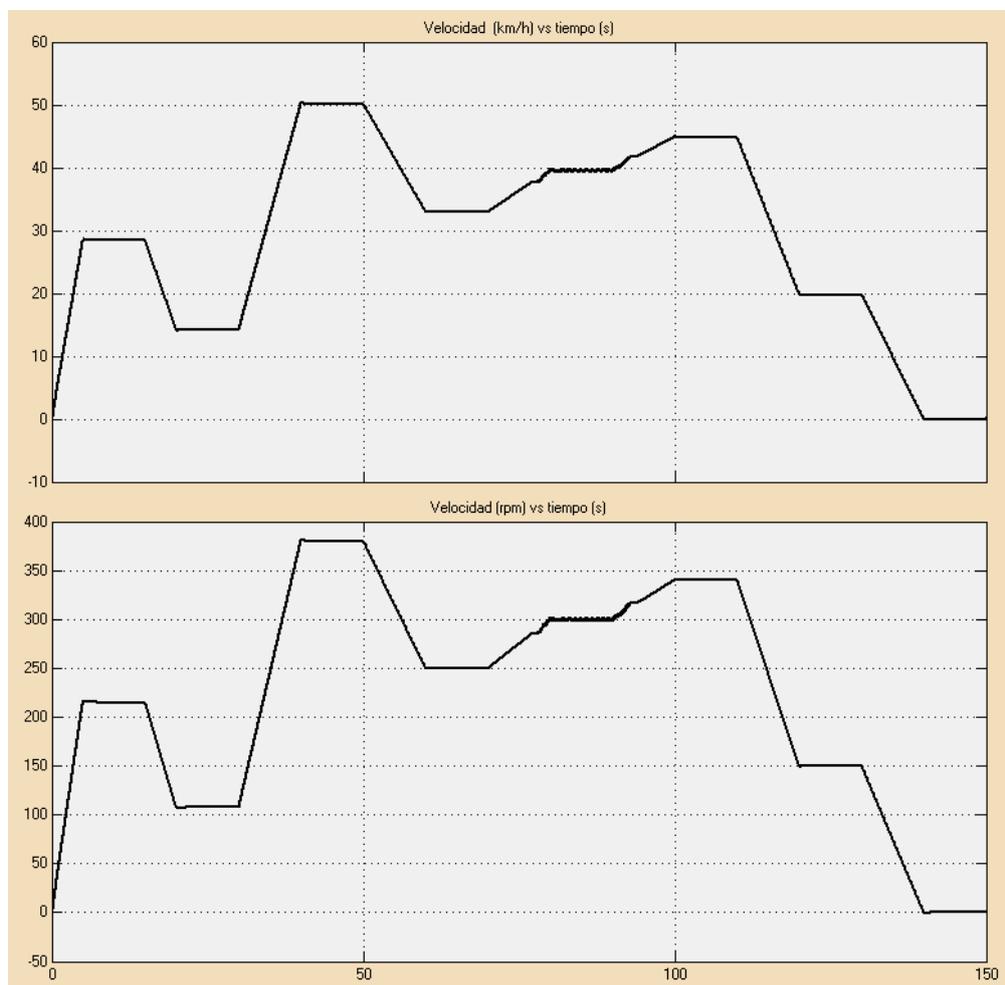


Figura 5.31 Velocidad en km/h y rpm

Se observa en la figura 5.31 velocidades que oscilan según su referencia, de esta manera disminuye la eficiencia del control de velocidad.

#### 5.4.8 Voltaje, corriente y potencia en la carga

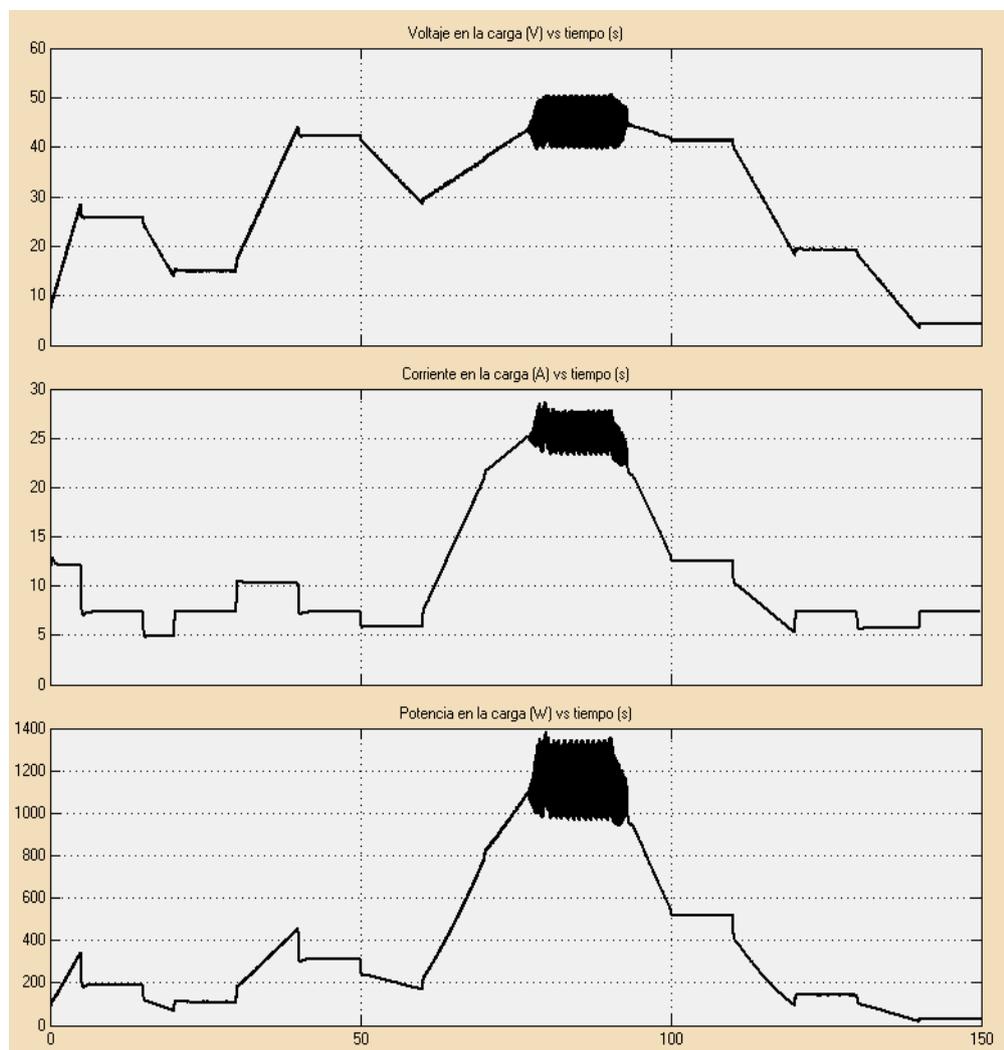


Figura 5.32 Voltaje, corriente y potencia en la carga

Como se observa en la figura 5.32 de potencia en la carga, su oscilación con valores sobrepasan los 1300 w, los cuales hacen un desgaste al motor por elevadas corriente de esta manera llevándolo a una corta vida de duración. No es recomendable hacer uso de este sistema.

### 5.5 Informe económico de todos los componentes del modelo híbrido seleccionado

En la tabla 6 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 6** Informe económico

ITEM	PRECIO UNI.	PRECIO TOT.
Banco de baterías PB36 500W 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

Super Capacitor 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
		\$ 12255.95

## **CONCLUSIONES**

1. 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.
2. 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.

3. El convertidor elevador de 48 Vdc es quien se encarga de suministrar tensión estable al controlador del motor DC, y este último, mediante un sistema de chopeo varía el voltaje permitiendo un control de velocidad.
4. 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.
5. 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.
6. Los tiempos de simulación mostrados son de máximo 450 s debido a que Matlab toma intervalos pequeños para realizar el muestreo y los cálculos analíticos respectivos, por ende su tiempo de espera es notable.

7. 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, así mismo para el supercapacitor. Los cuales son cargados mediante la pila de combustible.
  
8. 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.

## **RECOMENDACIONES**

1. 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.
2. Tener en cuenta que los valores voltaje son troceados por el controlador de velocidad, por lo que se es necesario utilizar valores medios DC.
3. 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.

4. Los diferentes sistemas simulados puede ser fácilmente escalables en potencia y velocidad ajustándose con ello a diferentes tipos de vehículos híbridos u otras aplicaciones.
5. El uso del controlador es necesario para la utilización de la carga almacenada de las fuentes de energía y poder aumentar la vida útil de todo el conjunto, por lo que se requiere que estos sean de elevada densidad energética, alta eficiencia y ciclos de carga rápidos.
6. Es recomendable el uso de tanque de almacenamiento de hidruros metálicos de hidrógeno, ya que estos sistemas garantizan una operación más segura y eficiente que el almacenamiento gaseoso del hidrógeno.
7. 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.

## **ANEXOS**

## Batería

### Top Quality LiFePO4 Battery Pack for Electric Bikes

24V20AH/36V10AH/36V12AH/48V10AH 

#### Product Characteristics:

- Large and safe LiFePO4 cells inside
- Compact in size and light in weight (dimensions)
  - BMS manages to each cell for high reliability
- Extra long cycle life - 5 times life of Lead Acid and 2 times of NiMH
- Extremely safe: no explosion, no fire under collision, over charged or short circuit



**LiFePO4 Battery Pack with BMS/Charger and Optional Sliding Rack**

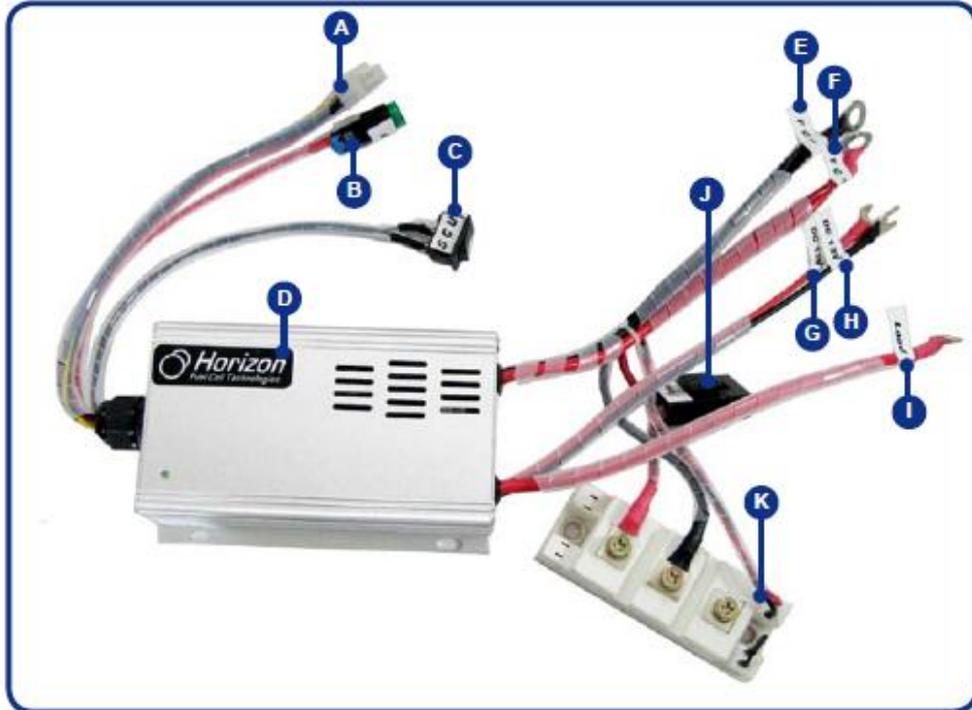
**Pila de combustible**



# **H-1000 Fuel Cell Stack**

## **User Manual**





- A: Controller connection with the multi-connector
- B: ON/OFF button
- C: SCU(short circuit units) switch
- D: HORIZON company logo
- E: Connect to FC+
- F: Connect to FC-
- G: Controller power supply DC 13V+
- H: Controller power supply DC 13V-
- I: Connect to Load+
- J: Fuse
- K: SCU mode

#### 4. Technical Specification

Type of fuel cell	PEM
Number of cells	48
Rated Power	1000W
Performance	28.8V @ 35A
H2 Supply valve voltage	12V
Purging valve voltage	12V
Blower voltage	12V
Reactants	Hydrogen and Air
External temperature	5 to 30°C
Max. stack temperature	65°C
H2 Pressure	0.45-0.55bar
Hydrogen purity	≧ 99.995 % dry H2
Humidification	self-humidified
Cooling	Air (integrated cooling fan)
Stack weight (with fan & casing)	4000 grams(±100grams)
Controller weight	400 grams(±30grams)
Dimension	23.3cm x 26.8cm x 12.3cm
Flow rate at max output*	13 L/min
Start up time	≧ 30S at ambient temperature
Efficiency of stack	40% @ 28.8V
Low voltage shut down	24V
Over current shut down	42A
Over temperature shut down	65°C
External power supply**	13V(±1V),8A

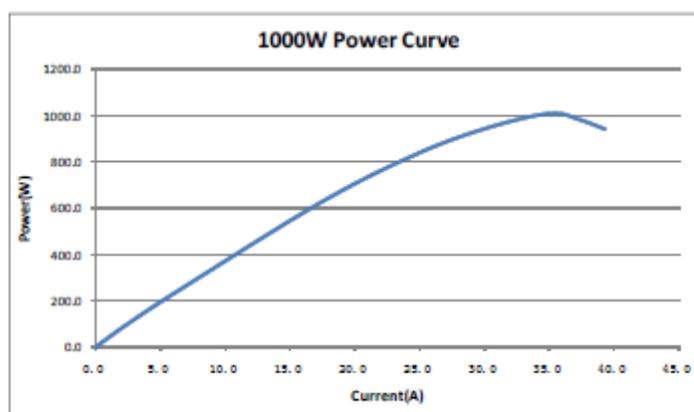
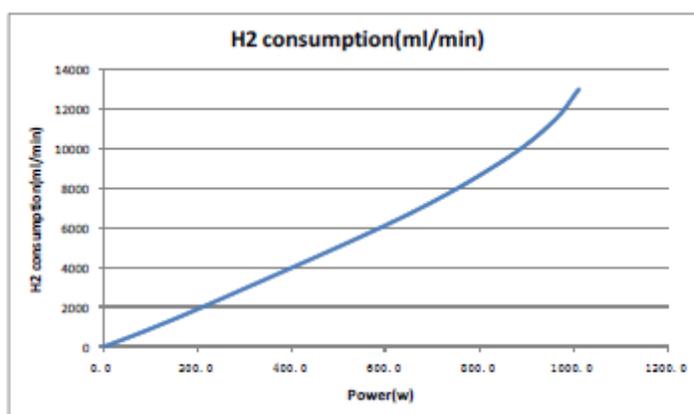
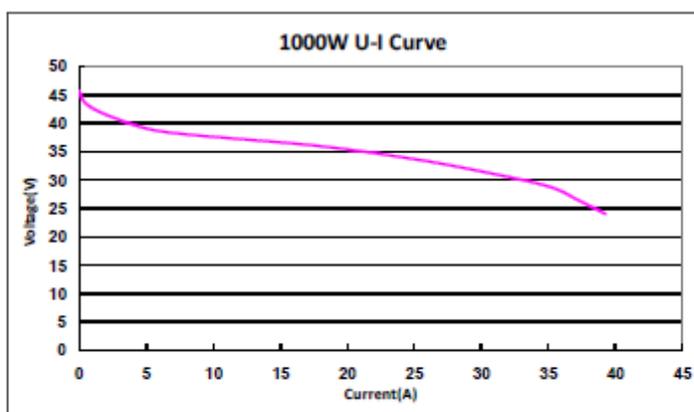
\*The flow rate may change with the power output

\*\*System electronics need external power supply

\*\*\* The Specification is subject to change without notice.

## 9. Polarization curves

Performance characteristics of the stack are presented. All performance data is given for baseline operating conditions, defined at sea-level and room ambient temperature.



## Super Capacitor

### DATASHEET 16V MODULES

#### FEATURES AND BENEFITS\*

- Up to 1,000,000 duty cycles or 10 year DC life
- 16V DC working voltage
- Resistive or active cell balancing available
- Temperature output
- Overvoltage outputs available
- High power density
- Compact, rugged, fully enclosed splash-proof design

#### TYPICAL APPLICATIONS

- Wind turbine pitch control
- Transportation
- Heavy industrial equipment
- UPS systems



#### PRODUCT SPECIFICATIONS

ELECTRICAL	BMOD0500 P016 B01	BMOD0500 P016 B02
Rated Capacitance <sup>1</sup>	500 F	500 F
Minimum Capacitance, initial <sup>1</sup>	500 F	500F
Maximum Capacitance, initial <sup>1</sup>	600 F	600 F
Maximum ESR <sub>DC</sub> , initial <sup>1</sup>	2.1 mΩ	2.1 mΩ
Test Current for Capacitance and ESR <sub>DC</sub> <sup>1</sup>	100 A	100 A
Rated Voltage	16 V	16 V
Absolute Maximum Voltage <sup>2</sup>	17 V	17 V
Absolute Maximum Current	1,900 A	1,900 A
Leakage Current at 25°C, maximum (B01 Suffix - VMS 2.0) <sup>2</sup>	5.2 mA	N/A
Leakage Current at 25°C, maximum (B02 Suffix - Passive Balancing) <sup>2</sup>	N/A	170 mA
Maximum Series Voltage	750 V	750 V
Capacitance of Individual Cells <sup>11</sup>	3,000 F	3,000 F
Maximum Stored Energy, Individual Cell <sup>11</sup>	3.0 Wh	3.0 Wh
Number of Cells	6	6
TEMPERATURE		
Operating Temperature (Cell Case Temperature)		
Minimum	-40°C	-40°C
Maximum	65°C	65°C
Storage Temperature (Stored Uncharged)		
Minimum	-40°C	-40°C
Maximum	70°C	70°C

\*Results may vary. Additional terms and conditions, including the limited warranty, apply at the time of purchase. See the warranty details for applicable operating and use requirements.

## PRODUCT SPECIFICATIONS (Cont'd)

PHYSICAL	BMOD0500 P016 B01	BMOD0500 P016 B02
Mass, typical	5.5 kg	5.5 kg
Power Terminals	M8/M10	M8/M10
Recommended Torque - Terminal	20/30 Nm	20/30 Nm
Vibration Specification	SAE J2380	SAE J2380
Shock Specification	SAE J2464	SAE J2464
Environmental Protection	IP65	IP65
Cooling	Natural Convection	Natural Convection
MONITORING / CELL VOLTAGE MANAGEMENT		
Internal Temperature Sensor	NTC Thermistor	NTC Thermistor
Temperature Interface	Analog	Analog
Cell Voltage Monitoring	Overvoltage Alarm	N/A
Connector	Deutsch DTM	Deutsch DTM
Cell Voltage Management	VMS 2.0	Passive
POWER & ENERGY		
Usable Specific Power, $P_d^4$	2,700 W/kg	2,700 W/kg
Impedance Match Specific Power, $P_{max}^5$	5,500 W/kg	5,500 W/kg
Specific Energy, $E_{max}^6$	3.2 Wh/kg	3.2 Wh/kg
Stored Energy, $E_{stored}^7$	18 Wh	18 Wh
SAFETY		
Short Circuit Current, typical (Current possible with short circuit from rated voltage. Do not use as an operating current.)	7,600 A	7,600 A
Certifications	RoHS, UL810a (150 V)	RoHS, UL810a (150 V)
High-Pot Capability <sup>12</sup>	2,500 VDC	2,500 VDC

## Convertidor DC/DC

# Power

### CXDF 24-48/2kW

Cordex™ Series DC-DC Converters



CXDF 24-48/2kW Converter Module

- > DC-DC converter supports small to medium 48Vdc loads from legacy 24V power systems
- > High power density modular design, up to 2kW output per module
- > Advanced monitoring and control capability including remote accessibility
- > Internal low voltage shutdown for cost effective integration into existing systems

Cordex DC-DC converters bring advanced technology to the DC power industry. Innovative engineering combines the best in efficiency and reliability meeting a wide array of power requirements. The converter system is a perfect solution for providing 24Vdc output from a standard 48Vdc power system for a variety of dual-voltage system applications including powering of wireless radios.

The fan-cooled CXDF 24-48/2.0kW converter has extremely high density, providing the most power in the least amount of space. Each 19" shelf can accommodate up to 4 compact 2RU modules. The converter system can be controlled and monitored by a central Cordex CXC controller and optionally via a shelf integrated CXCI controller solution for stand alone operation.

Local and remote setup, adjustment and control is a simple single-step process with the Cordex CXC system controller. By utilizing TCP/IP technology, complete configuration and monitoring of power equipment is possible through a network web browser.

*Your Power Solutions Partner*





## CXDF 24-48/2kW Cordex™ Series DC-DC Converters

Part Number: 012-526-20

### Electrical

Input voltage:	21 to 30Vdc
Input current:	Up to 94A @ 24V
Efficiency:	>88%
Input noise:	
Voice band:	<32dBmC
Wide band:	<10mW RMS to 10MHz <150mVp-p to 100MHz
Output power:	2000W max @ -54V
Output voltage:	-54Vdc nominal
Output current:	37A max
Regulation:	-1% +/-0.1% load (static) +/- 0.1% line (static)
Output noise:	
Voice band:	<38dBmC
Wide band:	<10mW RMS to 10MHz <150mVp-p to 100MHz
Acoustic noise:	<60dBa @ 1m (3ft)

### Performance / Features

Indicators:	Input ok LED (green) Output ok LED (green) Module fail LED (red)
Adjustments:	Via CXC controller
Protection:	Input fuse Input inrush current limit Output fuse Over temperature limiting Input high and low voltage shutdown Current limit/short circuit protection
Miscellaneous:	Control and monitoring via CXC controller (requires v1.96 min) Low voltage cutoff (LVD)

### Mechanical

Dimensions:	
mm:	84H x 100W x 235D
in:	3.3H x 3.94W x 9.25D
Weight:	2.8kg (6.2lbs)

### Environmental

Temperature:	-40 to 55°C (de-rated power up to 75°C)
Humidity:	0 to 95% NC

### Shelves

24-48V 5-Mod 23" shelf (single input) P/N: 030-900-20
24-48V 4-Mod 19" shelf (single input) P/N: 030-839-20

#### > Mechanical

24-48V 5-Mod 23" shelf dimensions:	
mm:	89H x 584W x 304D
in:	3.5H x 23.0W x 12.0D
Weight:	10.4kg (23.0lbs)

#### 24-48V 4-Mod 19" shelf dimensions:

mm:	89H x 438W x 310D
in:	3.5H x 17.2W x 12.2D
Weight:	8.5kg (19lbs)

#### > Performance / Features

CAN bus communication  
Optional integrated CXC controller  
+/- Input busbar integration with standard 3.1kW systems (S-mod shelf)

### Related Components

External Options:	
567-808-19:	Kydax cover, 23" CXDF shelf
567-809-19:	Kydax cover, 19" CXDF shelf

### Agency Compliance

Safety:	CSA/UL C22.2 60950 (NRTL) CE IEC/EN 60950 CE marked
EMI:	Class A radiated Class A conducted EN 6100-4-2, -3, -4, -6 GR-1089 (where applicable) GR-63



CXDF 24-48/2kW 23", 5-module shelf

## Controlador PLC SIMATIC S7-1200

# Modular. Potente. Fácil de usar.

Interfaces compartidas, comunicación integrada y un sistema de ingeniería común, fácil de usar e integrado: éstos son los puntos que marcan la diferencia.

La interacción entre el nuevo controlador SIMATIC S7-1200, nuestra oferta completa de paneles de la gama SIMATIC HMI Basic Panels y el sistema de ingeniería SIMATIC STEP 7 Basic ofrece una solución de automatización excepcionalmente integrada, perfecta para los controladores de categoría compacta.

### La interacción lo es todo

El nuevo controlador modular SIMATIC S7-1200 es el núcleo de nuestra nueva línea de productos para tareas de automatización sencillas pero de alta precisión. Nuestros paneles de la gama SIMATIC HMI Basic Panels han sido optimizados para mejorar su rendimiento, y su diseño los hace perfectamente compatibles con el nuevo controlador y el sistema de ingeniería totalmente integrado. Esto simplifica la creación, acelera el arranque, optimiza la monitorización y ofrece la máxima comodidad para el usuario. La interacción de estos productos y sus innovadoras funciones imprimen a los sistemas de automatización de la línea "mini" una eficiencia desconocida hasta ahora.

### El controlador

El controlador SIMATIC S7-1200 es modular, compacto y de aplicación versátil: una inversión segura, idónea para una completa gama de aplicaciones. Un diseño escalable y flexible, una interfaz de comunicación a la altura de las máximas exigencias de la industria, y toda una gama de elementos tecnológicos potentes e integrados hacen de este controlador un componente clave en soluciones completas de automatización.

2	La interacción	4	El controlador	6	El controlador, en detalle
22	La interacción a su alcance	14	Los paneles	8	– Diseño escalable y flexible
		18	El software	10	– Comunicación industrial
				12	– Funciones tecnológicas integradas
				16	Los paneles, en detalle
				20	El software, en detalle



### Los paneles

En muchos casos, es posible mejorar aún más el funcionamiento de máquinas o aplicaciones sencillas, recurriendo a elementos adicionales para la visualización. Los paneles de la gama SIMATIC HMI Basic Panels y su funcionalidad básica permiten obtener un potencial de rentabilidad que abre la puerta a nuevas posibilidades para unas soluciones de automatización creativas. Los paneles de la gama SIMATIC HMI Basic Panels ofrecen pantallas táctiles gráficas de alto contraste, con teclas de función táctiles, funcionalidad básica de red y comunicación homogénea, características todas que los hacen perfectos para las aplicaciones del nuevo SIMATIC S7-1200.

### El software

El sistema de ingeniería totalmente integrado SIMATIC STEP 7 Basic con SIMATIC WinCC Basic está orientado a la tarea, es inteligente y ofrece editores intuitivos y fáciles de usar para una configuración eficiente de SIMATIC S7-1200 y de los paneles de la gama SIMATIC HMI Basic Panels. SIMATIC STEP 7 Basic se inspira en un marco común de ingeniería para la configuración de componentes de hardware y red, esquemas de diagnóstico y mucho más. La funcionalidad de este sistema es el elemento central que otorga esta gran potencia a la interacción de controlador y HMI.

En el mundo de la automatización, los componentes de alto rendimiento son la clave del éxito. Pero el verdadero valor añadido se pone de manifiesto sólo cuando todos los componentes interactúan perfectamente.

## Controlador de velocidad BAC-282 de Magic Pie

Cruise Controller User Guide

V1.2

6/10/2009

New Generation Controller -- Technology Breaking Through!



*Magic!* ... It can drive your ebike even with failed motor hall sensors, throttle, breaker, or all of them failed together!

It acts as sensorless controller when your motor hall effect sensors fail!



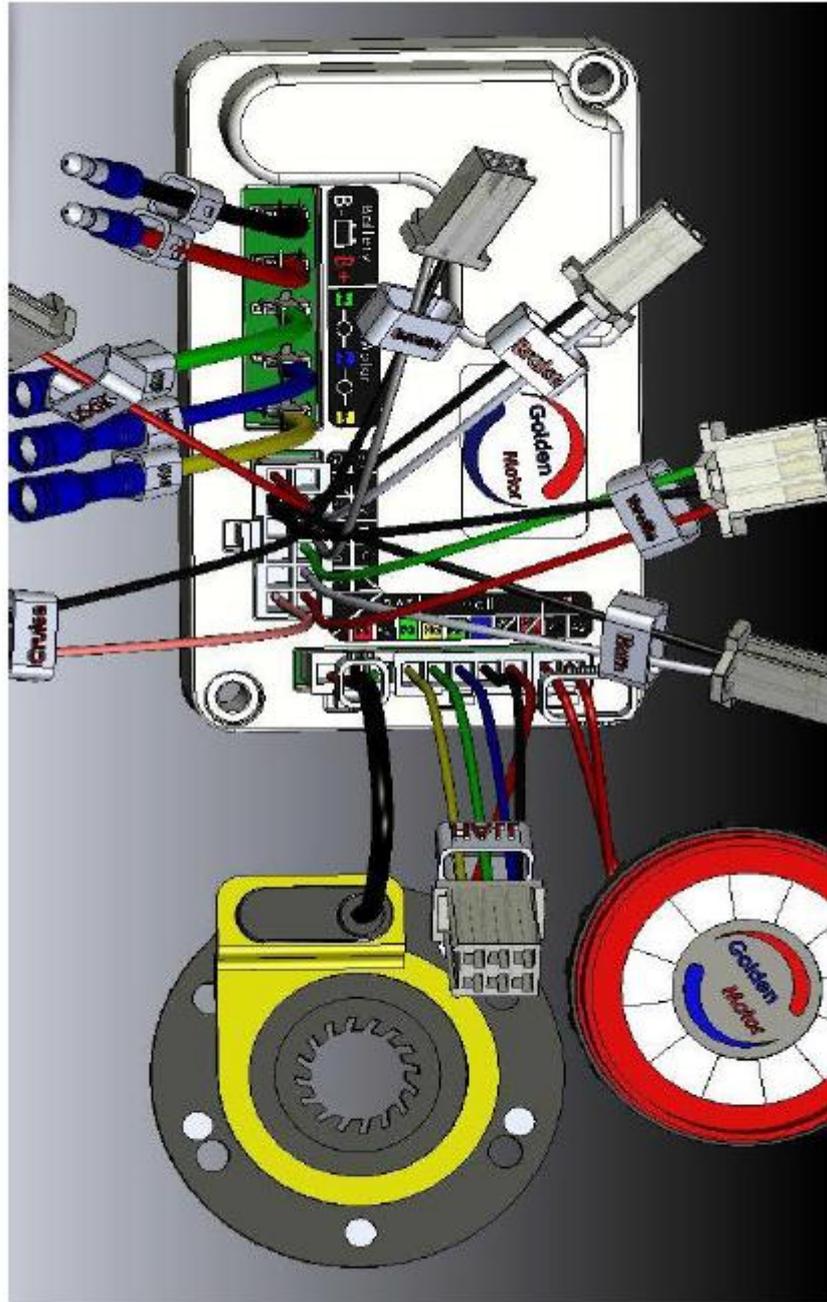
[Wiring Diagram \(.pdf\)](#) [\(.jpg\)](#) [\(3D\)](#) – [Download eDrawing to view \(12.6Mb\)](#)

### Special Features:

- [Cruise Speed Control](#)
- Motor hall sensor failure redundancy (Automatically switch to sensorless control)
- Anti-theft alarm and wheel-locking by detection of vibration
- Other failures redundancy (Work with failed throttle and power breaker)
- You can force it to work with higher voltages (e.g 24V controller can drive 36V and 48V motors)
- Report failure components by beeps
- Motor phase self detection and calibration
- Support Forward and Reverse Control
- Excessive Current Protection
- Low Voltage Protection
- High Reliability

### Controller Models:

BAC-0281	BAC-0282	BAC-0283
36V/30A	48V/30A	24V/30A



3D Drawing URL: <http://www.goldenmotor.com/e-Bike-DIY/BAC-028X.EASM>

### Motor Eléctrico Golden motor



Hongyue Science&Technology

**Especificaciones del artículo**

Se puede personalizar: Sí

Diseño: Sin escobillas

Tipo de motor: Motor sin engranaje sin escobillas

Potencia: >400W

Tensión: Otros

Speed: max. 480rpm can be customized

Motor wheel size: 245mm

With Controller or Not: NO

Efficiency: 85%

Model Number: 014

Application: electric scooter, electric bicycle, electric car

Type: 14.5" hall sensor conversion kit 48v electric scooter hub

## BIBLIOGRAFÍA

- [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 Technology 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.
- [9] APPICE <http://www.appice.es/app.php>.
- [10] Catalá de Alemany, J. (1963). Física general (3ª edición).
- [11] M. Laughton, “Fuel Cells”, Power Engineering Journal, February, 2002.
- [12] K. Rajashekara, “Propulsion System Strategies for Fuel Cell Vehicles”, Fuel Cell Technology for Vehicles, 2000.
- [13] W. Yang, B. Bates, N. Fletcher, R. Pow, “Control Challenges and Methodologies in Fuel Cell Vehicles Development”, Fuel Cell Technology for Vehicles, 1998.