



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL

FACULTAD DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD Y COMPUTACIÓN

“Emulador de perfiles de carga de un vehículo eléctrico para aplicación en sistemas de suministro de energía basado en hidrogeno”

TESINA DE SEMINARIO

Previa a la obtención del Título de:

INGENIERO EN ELECTRICIDAD

ESPECIALIZACIÓN EN ELECTRÓNICA Y AUTOMATIZACIÓN INDUSTRIAL

Presentado por:

Jorge Oswaldo Vilema Romero

Marjorie Jaqueline Balderramo Delgado

Guayaquil – Ecuador

2015

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por su Amor infinito y por las bendiciones recibidas, a mi madre por su apoyo incondicional en todas las etapas de mi vida, a mi Papá por ser ejemplo de trabajo, tenacidad y por guiarme.

Marjorie Jaqueline Balderramo Delgado

AGRADECIMIENTO

Agradeciendo primeramente a Dios por la vida y las bendiciones que me ha otorgado, a mi familia por su apoyo y esfuerzo incondicional en las diferentes etapas de mi vida, quiero darles las gracias por formar parte de mí, por todo lo que me han brindado y por todas sus bendiciones y al Dr. Wilton Agila por la colaboración en este proyecto.

Jorge Oswaldo Vilema Romero

DEDICATORIA

A Dios por darme la vida y permitirme culminar otra etapa, a mi familia por ser fuente de inspiración y fortaleza en todo momento por tener su apoyo cuando más lo necesite, gracias por la confianza que me tienen. A los profesores y compañeros con quienes compartí gustosamente parte de mi vida en el camino del aprendizaje, y así tener valiosas amistades.

Marjorie Jaqueline Balderramo Delgado

DEDICATORIA

Son muchas las personas a las que me gustaría dedicar este trabajo y agradecer su amistad, apoyo y compañía en las diferentes etapas de mi vida. A mis Padres Jorge y Teresa por su apoyo incondicional y amor. A mi familia y amigos por su amistad y ayuda. Y a todas las personas que nos apoyaron en la culminación de este proyecto.

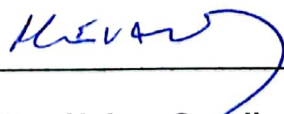
Jorge Oswaldo Vilema Romero

TRIBUNAL DE SUSTENTACIÓN



PhD. Wilton Agila

**PROFESOR DEL SEMINARIO
DE GRADUACIÓN**



MSc. Holger Cevallos

**PROFESOR DELEGADO
POR LA UNIDAD ACADÉMICA**

DECLARACIÓN EXPRESA

"La responsabilidad del contenido de este Trabajo de Grado, me corresponde exclusivamente; y el patrimonio intelectual de la misma a la Escuela Superior Politécnica del Litoral".

(Reglamento de exámenes y títulos profesionales de la ESPOL)



Jorge Oswaldo Vilema Romero



Marjorie Jacqueline Balderramo Delgado

RESUMEN

Hoy en día, se analizan distintas tecnologías emergentes que puedan reemplazar a los combustibles fósiles en diferentes aplicaciones, entre ellas están las Celdas de Combustible de Membrana Polimérica, las cuales convierten de manera directa la energía química almacenada en un combustible (generalmente hidrogeno) en energía eléctrica.

El presente trabajo se fundamenta en el diseño y análisis de un emulador de la demanda de potencia eléctrica de un vehículo eléctrico tipo Kart, cuya implementación permita analizar el comportamiento eléctrico de sistemas híbridos de suministro de energía basado en hidrogeno como alternativa a los combustibles fósiles empleados actualmente en los vehículos.

Las características seleccionadas del hardware e instrumentación del emulador de carga que permitirá configurar distintos escenarios de operación que se le pudiesen presentar al vehículo eléctrico con el objetivo de validar esta aplicación dentro del entorno de las fuentes de energía renovable.

ÍNDICE GENERAL

RESUMEN	VIII
ÍNDICE GENERAL.....	IIX
ABREVIATURAS.....	XIII
ÍNDICE DE FIGURAS	XIV
ÍNDICE DE TABLAS	XVII
INTRODUCCIÓN	
CAPÍTULO 1	1
1 PLANTENAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1 Antecedentes.....	1
1.2 Justificación	3
1.3 Objetivo General.....	4
1.4 Objetivos Específicos	4

1.5	Resultados Esperados.....	4	
CAPÍTULO 2			6
2	MARCO TEÓRICO	6	
2.1	Fundamentos de Celdas de Combustible	6	
2.2	Acumulador de Energía	8	
2.3	Generacion de Hidrógeno	9	
2.4	Almacenamiento de Hidrógeno	11	
2.5	Vehiculo Eléctrico con Pila de Hidrógeno	14	
2.6	Motor de Magneto Permanente	16	
2.7	Batería de Litio	17	
CAPÍTULO 3			20
3	ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DEL SISTEMA.....	20	
3.1	Sistema de Propulsión del Vehículo	20	
3.2	Componentes Principales del Sistema de Propulsión	21	
3.3	Esquema del Emulador de Perfiles de Carga.....	23	
3.4	Motores de Imanes Permanentes.....	27	
3.5	Sistema de Regulación y Control.....	29	

3.6 Herramienta de Modelado y Simulación.....	30
3.7 Análisis Económico.....	31
CAPÍTULO 4	34
4 MODELADO Y PARAMETRIZACIÓN	34
4.1 Suministro Eléctrico de Energía.....	34
4.1.1 Sistema Híbrido Eléctrico.....	35
4.1.2 Administrador de Energía.....	39
4.2 Emulador de Carga	40
4.2.1 Circuito Electrónico de Potencia	41
4.2.2 Dinámica del Kart	42
4.2.3 Características del Motor	45
4.2.4 Controlador de Pulsos	47
CAPÍTULO 5	49
5 VALIDACIÓN DE ESCENARIOS	49
5.1 Escenario de Arranque	49
5.2 Escenario de Crucero y Aceleración	51
5.3 Escenario de Frenado	52

5.4 Respuesta Global del Sistema.....53

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

BIBLIOGRAFÍA

ANEXOS

ABREVIATURAS

PEMFC	Celda de combustible de membrana de intercambio protónico
VHPC	Vehículo híbrido de pila de combustible
SOC	Estado de Carga
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
EMI	Interferencia Electromagnética
PWM	Modulación de ancho de pulso
KW	Kilowatt
CAN	Controller Area Network
IGBT	Transistor bipolar de puerta aislada
VDC	Voltaje corriente directa
KG	Kilogramo
H	Hidrógeno
PSI	Libra por pulgada cuadrada
TE	Torque Eléctrico

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Curva de extracción de hidrocarburos.....	2
Figura 1.2 Aumento del crecimiento de las emisiones de CO ₂	2
Figura 2.1 Estructura de una Celda de Combustible.....	7
Figura 2.2 Hidrógeno presurizado en tanque	11
Figura 2.3 Hidrógeno líquido	12
Figura 2.4 Hidruro Metálico	12
Figura 2.5.1 Vehículo Eléctrico de pila de hidrógeno	14
Figura 2.5.2 Componentesde vehículo eléctrico	15
Figura 2.6 Vista del eje del motor de imanes permanentes	17
Figura 3.2 Sistema de propulsión.....	21
Figura 3.3 Esquema de bloques de emulador.....	24
Figura 3.3.1 Sistema electrónico del emulador	25

Figura 3.5 Regeneración de energía.....	30
Figura 3.6 Componentes del vehículo.....	33
Figura 4.1 Boques del sistema.....	35
Figura 4.1.1 Suministro Eléctrico.....	36
Figura 4.1.2 Bloque Fuel Cell.....	37
Figura 4.1.3 Parámetros de la Celda de Combustible.....	38
Figura 4.1.4 Bloque administrador de energía del Kart.....	39
Figura 4.2 Emulador de Carga.....	40
Figura 4.2.1 Bloque electrónico de potencia.....	41
Figura 4.2.2 Dinámica del Kart.....	42
Figura 4.2.3 Parámetros del Kart.....	45
Figura 4.2.4 Parámetros del Motor.....	46
Figura 4.2.5 Diagrama de bloques del accionamiento del motor.....	47
Figura 4.2.6 Controlador de Pulsos.....	48
Figura 5.1.1 Aceleración y velocidad en arranque.....	50
Figura 5.1.2 Potencias en escenario de arranque.....	50
Figura 5.2.1 Aceleración y velocidad en crucero.....	51
Figura 5.2.2 Potencias en escenario de crucero y aceleración.....	52
Figura 5.3.1 Aceleración y velocidad en frenado.....	52

Figura 5.3.2 Graficas de potencias en frenado..... 53

Figura 5.4.1 Respuesta del motor 54

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Tipos de almacenamiento de Hidrógeno	13
Tabla 2.7 Densidad energética de baterías y su relación con el petróleo	18
Tabla 3.0 Parámetros de motor síncrono de magneto permanente	28
Tabla 3.1 Presupuesto para emulador	32

INTRODUCCIÓN

El ingreso de países emergentes a una economía de escala exige una demanda potencialmente creciente de la energía, la situación energética actual se ve condicionada por ciertos factores en particular con respecto a la disminución en la producción de hidrocarburos.

Adicional a ello, el mayor consumo energético corresponde al transporte, siendo los vehículos propulsados por motores térmicos los responsables de la mayor parte de las emisiones de gases de efecto invernadero; emisiones tales como el monóxido de carbono CO, dióxido de carbono CO₂, compuestos nitrogenados y sulfurados. Debido a esto es hora de impulsar a tope el uso de fuentes de energías renovables y sus derivados, lo que conlleva a la búsqueda de combustibles alternativos y su especial implementación en vehículos eléctricos.

CAPÍTULO 1

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Antecedentes

A la hora de valorar el estado de las reservas de crudo (petróleo), hay que tener en consideración que el crudo es un recurso finito y que no es renovable. Ello conlleva a que el petróleo no pueda continuar satisfaciendo la creciente demanda por mucho tiempo, Figura 1.1. El agotamiento en la producción de éste hidrocarburo no solo se da porque es un bien no renovable, sino porque también disminuye la capacidad de extracción debido a que las condiciones para llevarlas a cabo cada vez son más severas (grandes profundidades en alta mar) y que la tecnología para realizar la extracción es mucho más cara.

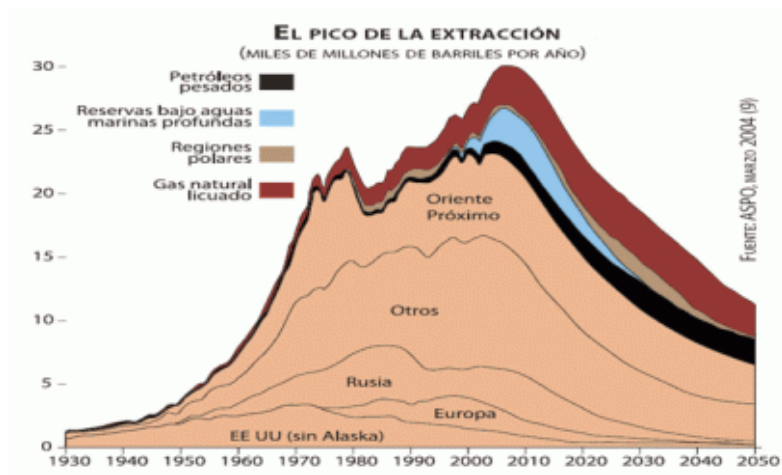


Figura1.1: Curva de extracción de hidrocarburos

De hecho, las distintas investigaciones desarrolladas por expertos dan como evidencia que la producción de petróleo convencional está teniendo ya una capacidad progresiva limitada como para satisfacer una demanda de petróleo y derivados cada vez en aumento.

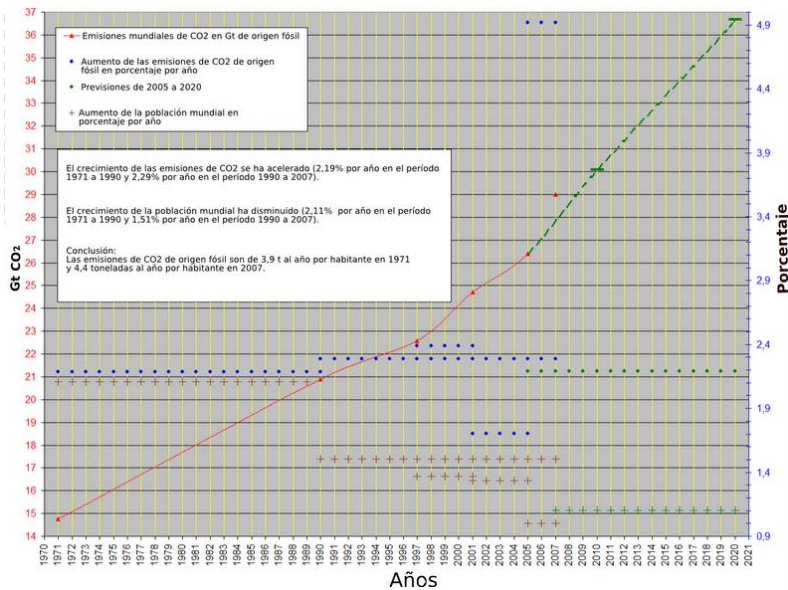


Figura1.2: Aumento del crecimiento de las emisiones de CO2

Tomando en consideración la evolución de la producción del petróleo, la inestabilidad de su precio, el consumo energético de los distintos sectores, y las actuales emisiones de los vehículos que usan combustibles fósiles [13], Figura 1.2, es el momento buscar combustibles alternativos e implementarlos en vehículos eléctricos.

1.2 Justificación

Actualmente, se estudian en diferentes aplicaciones nuevas tecnologías alternativas a los combustibles fósiles, entre ellas está las Celdas de Combustible de Membrana Polimérica, que a pesar de haber tenido en los últimos años avances tecnológicos su uso generalizado aún está en fase de desarrollo e investigación. De hecho, localmente tanto el gobierno central dentro del cambio de la matriz energética, como la ESPOL dentro de las líneas de investigación impulsan la investigación y utilización del hidrogeno y las celdas de combustible poliméricas, como sistemas de generación de energía alternativos a los derivados del petróleo.

En este contexto, el presente trabajo se centra en el diseño, análisis y simulación de un emulador de perfiles de carga de un pequeño vehículo eléctrico (tipo Kart), dicho desarrollo permitirá analizar y validar la respuesta eléctrica temporal de las celdas de combustible en

combinación con otras tecnologías para ser aplicadas como sistemas de suministro de energía en vehículos eléctricos.

1.3 Objetivo General

Desarrollar una aplicación software de Potencia e Instrumentación que permita emular de manera automática la demanda de potencia eléctrica de un pequeño vehículo eléctrico tipo Karts.

1.4 Objetivos Específicos

- Diseño, configuración y modelado del emulador de perfiles de carga.
- Simular y analizar la respuesta eléctrica de la celda de combustible frente a las variaciones de carga del emulador de carga del vehículo eléctrico tipo karts.
- Describir y validar nuevas aplicaciones de las Celdas de Combustible.
- Listado de dispositivos y equipos comerciales necesarios para la implementación del emulador de perfiles de carga.
- Recomendaciones y futuros trabajos.

1.5 Resultados Esperados

Informe económico-técnico del emulador de demanda de carga.

Informe de detalle para la adquisición de los dispositivos necesarios para su implementación.

Diseño funcional y sencillo del emulador de perfiles de carga de un pequeño vehículo eléctrico que permita generar diferentes escenarios de comportamientos reales del mismo.

Caracterización de la respuesta eléctrica temporal en el que la principal fuente de suministro de energía en el vehículo se corresponde a una pila de combustible.

CAPÍTULO 2

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Fundamentos de Celdas de Combustible

Las celdas de combustible tienen un funcionamiento similar a las baterías con respecto a componentes y principios de generación de energía eléctrica, la diferencia está en que mientras las baterías convencionales almacenan energía en su interior y producen energía hasta que éste se agote, en las celdas de combustible los reactivos se suministran de forma continua desde el exterior, lo que les permite generar energía de forma ininterrumpida.

Una celda de combustible es un dispositivo electroquímico que convierte energía química en eléctrica, este proceso se logra a través de dos electrodos: ánodo y cátodo, separados mediante un electrolito por donde circulan los iones positivos, Figura 2.1. Por uno de los electrodos se dirige el oxígeno como elemento oxidante y por el otro el hidrogeno como elemento combustible, cuando el hidrogeno es ionizado pierde un

electrón que se traslada hacia el otro electrodo mediante un material conductor externo generándose corriente eléctrica y un protón que a través del electrolito llega al otro electrodo. Finalmente, ambos se vuelven a reunir en el cátodo en presencia del oxígeno produciendo agua pura y calor útil.

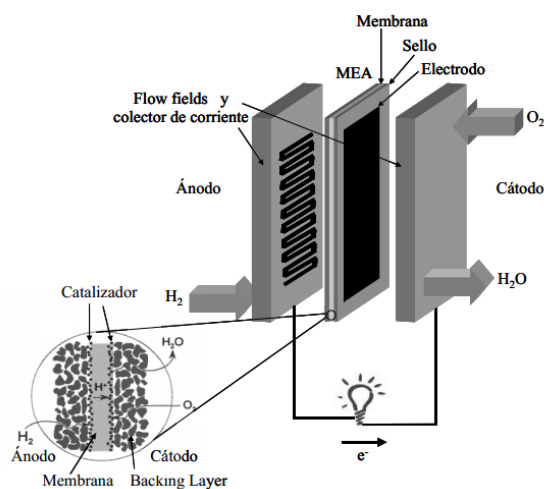


Figura2.1: Estructura de una Celda de Combustible

Una celda individual genera un voltaje cercano a 1V, para aplicaciones que requieren mayor voltaje y alta potencia es necesario agruparlas combinándolas en serie y paralelo, para formar una pila de celdas de combustible, y esto es una de las características que han estimulado el interés en el adelanto tecnológico de estos dispositivos.

Las pilas de combustible se clasifican por el tipo de electrolito empleado, dependiendo del electrolito, se producirán diferentes reacciones químicas en la propia pila, así como diferentes agentes catalíticos, rangos de

temperatura, combustible requerido y algunos otros factores. Estas características, a su vez, determinan el tipo de aplicaciones para las que son más apropiadas estas pilas.

Las PEMFC proporcionan una densidad energética elevada, y tienen la ventaja de ser ligeras y tener un tamaño pequeño, en comparación con otras pilas. Las pilas PEM usan como electrolito un polímero sólido y electrodos porosos de carbono que contienen un catalizador de platino. Necesitan hidrógeno, oxígeno y agua, y no requieren el uso de fluidos corrosivos como otras pilas de combustible. Normalmente usan hidrógeno puro como combustible almacenado en depósitos o convertidores incorporados.

Las pilas de combustible PEM se usan fundamentalmente para aplicaciones en el transporte e instalaciones estacionarias, debido a su rapidez para el arranque, baja sensibilidad a la orientación, y su relación favorable entre peso y energía producida, por ello se trabajara con la PEMFC debido a que son especialmente adecuadas para su uso en vehículos.

2.2 Acumulador de Energía

Vista la necesidad de buscar fuentes alternativas de energía, parece haber un consenso entre diferentes expertos de que el gas natural será el combustible puente hacia otra energía no fósil hasta el año 2030. La

energía no fósil consumida masivamente a partir del año 2030 sería el hidrógeno [16]. La elección de hidrógeno como combustible es debida a su elevada energía por unidad de masa (1 kg de hidrógeno contiene la misma energía que 2.7 kg de gasolina), su potencialmente sencillez en el transporte y sus reducidas emisiones nocivas. Pero, para que el hidrógeno se convierta en una fuente de energía viable se deben superar problemas técnicos en generación, almacenamiento, seguridad y distribución.

2.3 Generación de Hidrógeno

El hidrógeno se puede obtener a partir diferentes métodos, como son el reformado de combustibles fósiles o residuos biológicos y la electrólisis del agua. En la actualidad, el método más utilizado es el reformado de gas. Este método de obtención de hidrógeno es perfectamente viable en la actualidad, pero no es sostenible en el tiempo debido a las finitas reservas de gas. Desde un punto de vista medioambiental, durante el proceso de reformado se libera CO₂ como subproducto (11.8 kg de CO₂ por kg de H₂). Para evitar liberar este gas de efecto invernadero, se procede al secuestro del CO₂, que posteriormente es enterrado. Este secuestro de CO₂ incrementa el coste de la generación de hidrógeno.

Si se obtiene el hidrógeno mediante la electrólisis a partir de energías renovables, la producción sería sostenible en el tiempo y en recursos.

Además, a través de la electrólisis, el hidrógeno obtenido es de elevada pureza. Pero el precio actual es demasiado elevado para crear una economía del hidrógeno.

Hay otros métodos, como son los derivados de procesos biológicos, pero que necesitan una fuerte inversión en investigación para que sean competitivos.

Otro aspecto sobre el que se está investigando es si la producción de hidrógeno debe ser centralizada o distribuida. En un principio se sugiere comenzar con una producción descentralizada, ya que de esta forma se reducen los costes de transporte de hidrógeno y se facilita la transición desde el consumo de combustibles fósiles a hidrógeno.

Lovins propone un sistema de tres pasos [11]. En el primero se instalan pilas de combustible en los edificios, de forma que se aproveche el calor que generan. Estas pilas de combustible tendrían como combustible hidrógeno obtenido a través de un reformador de gas o de un electrolizador. El segundo paso consiste en la fabricación de vehículos súper eficientes y extra ligeros y combinarlos con las pilas de combustible de los edificios, obteniendo hidrógeno de los reformadores o electrolizadores instalados en cada edificio. Según Lovins estos dos pasos reducirían el precio de fabricación de las pilas de combustible y vehículos híbridos, además de proporcionar una infraestructura de hidrógeno. El tercer paso sería la obtención del hidrógeno a través de

fuentes de energía renovable. Al realizar esta instalación se aumenta la producción a largo plazo, ya que una vez la economía del hidrógeno esté sólidamente establecida, se puede generar hidrógeno de forma centralizada, simplificando el secuestro del CO₂.

2.4 Almacenamiento de Hidrógeno

Los métodos de almacenamiento investigados son muy variados, como se muestra a continuación:

- Almacenamiento subterráneo en acuíferos o cavernas.
- Presurizado en tanques. Si es para aplicaciones en vehículos los tanques están fabricados con un material compuesto ultraligero, Figura 2.2. Estos tanques almacenan hidrógeno comprimido a alta presión (aproximadamente 700 bares).



Figura2.2: Hidrogeno presurizado en Tanque

- En fase líquida. Se aplica en aquellos casos en los que se necesita una elevada densidad, como en aplicaciones aeroespaciales. En la actualidad se está empezando a utilizar en

- Actualmente se está investigando el almacenamiento en nanotubos de carbono y en micro esferas de cristal.

El hidrógeno es el combustible que debe ser suministrado a la pila, mientras que el oxígeno se toma del aire circundante. La Tabla 2.1 muestra una comparativa de almacenamiento de H₂.

	Gasolina Referencia	H ₂ Compr. (34–69MPa)	H ₂ Líquido (20 K)	M.Hidruro FeTi (1,2%)
Energía (MJ)	664	664	664	664
Peso Combustible (kg)	13,9	4,7	4,7	4,7
Peso Tanque (kg)	6,3	66,3-86	18,6	547,5
Peso Sistema Combustible (kg)	20,4	67,9-90,5	23,3	552
Volumen (l)	18,9	409-227	178	189,3

Tabla 2.1: Tipos de Almacenamiento del Hidrogeno

2.5 Vehículo Eléctrico con Pila de Hidrogeno

Los vehículos eléctricos con suministro de energía basado en una pila de combustible de hidrógeno son una alternativa a los vehículos eléctricos basados en baterías. En lugar de equipar grandes y pesadas baterías, se usa la energía almacenada en el combustible (hidrógeno). El hidrógeno se almacena en un tanque o depósito, que luego este es suministrado a la pila de combustible para generar energía eléctrica útil para hacer funcionar el motor eléctrico que moverá las ruedas del vehículo.

La pila de combustible en el vehículo eléctrico recibe hidrógeno y aire (para aprovechar el oxígeno presente en el aire), y mediante el proceso electroquímico genera energía eléctrica como producto, agua (se libera en forma de vapor) y algo de nitrógeno como subproductos. Estas emisiones no son contaminantes, lo que ha dado a llamar a estos vehículos como vehículo de cero emisiones locales, ya que el resultado de la combustión es agua y calor, Figura 2.5.1.



Figura2.5.1: Vehículo Eléctrico de Pila de Hidrogeno

El rendimiento de un vehículo con hidrógeno es de entre el 50% y el 60%. La pila de combustible es pesada y muy costosa (se emplea platino o paladio para recubrir las placas de los electrodos). En ocasiones el vehículo puede llevar también una batería (normalmente de iones de litio) para acumulación de electricidad (pero más pequeña que si fuera un vehículo eléctrico “puro”). Este tipo de vehículos ofrecen unas mejores prestaciones que los vehículos eléctricos actuales debido a su mayor autonomía, entre 500 y 600 kilómetros, y su mayor velocidad de repostaje, unos minutos frente a las ocho horas de los coches eléctricos.

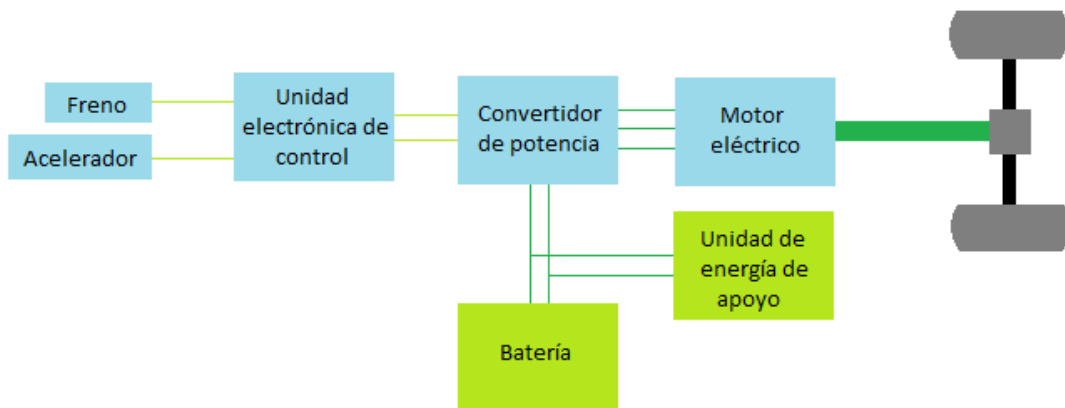


Figura2.5.2: Componentes de vehículo eléctrico

Los vehículos con pilas de combustible de hidrógeno constan de: motor eléctrico, unidad electrónica de potencia, supervisor electrónico, cargador de batería y engranaje reductor que sirve de transmisión. Además, disponen de una batería que sirve para cubrir picos instantáneos de

demanda energética, especialmente en arranques. Finalmente, tiene varios tanques de hidrógeno cuya capacidad varía según el modelo de vehículo, y por último, se dispone de la pila de combustible, observar Figura 2.5.2.

2.6 Motor de Magneto Permanente

Los motores de Imanes Permanentes son motores eléctricos que usan la combinación de campos magnéticos permanente (Imanes) y campos magnéticos inducidos por la corriente de excitación externa que circula a través de los devanados del estator.

La construcción de los rotores de los servomotores sincrónicos de imán permanente pueden adoptar una forma cilíndrica con un bajo diámetro y gran longitud (cilinder rotor) llamados de flujo radial, o pueden tener un rotor en forma de disco más liviano rotor de disco (disk rotor), también llamadas máquinas de flujo axial, resultando así en ambos casos un bajo momento de inercia y una constante de tiempo mecánica baja.

Imanes Permanentes:

Los imanes permanentes son materiales que tienen una gran capacidad de almacenamiento de energía magnética, que perdura en el tiempo y que su degradación no es significativa. Este elemento posee la curva característica de magnetización o curva de histéresis, curva que es particular para cada tipo de material magnético.

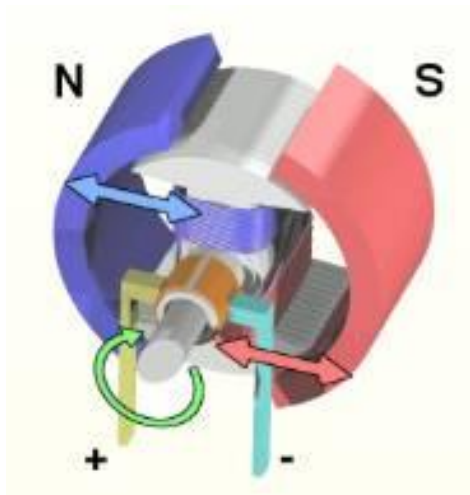


Figura 2.6: Vista del eje del motor con imanes permanentes

Aplicaciones:

Las máquinas de imán permanente son extensivamente usadas en servomotores, accionamientos eléctricos para posicionamiento, en robótica, máquinas herramienta, ascensores, etc. También es posible su aplicación en generación y bombeo a partir de energía renovable como es la solar fotovoltaica o energía eólica.

2.7 Batería de Litio

Por la excepcional cualidad del litio, de su elevada densidad energética, es decir la relación que hay entre la cantidad de energía que puede acumularse y su peso (tiene un peso específico de 0,53, muy bajo por ejemplo frente a otros elementos utilizados en baterías como 11,36 del plomo, 8,90 del níquel y 8,65 del cadmio), es la mejor alternativa para la fabricación de baterías que

accionen los automóviles eléctricos, por lo que muchas empresas están inmersas en el desarrollo de baterías de litio que provean tanto autonomías de recorrido como velocidades aceptables (a mayor velocidad menor recorrido y a la inversa), que por el momento y a pesar de los avances de las baterías de Litio-ión, no son las deseables y por ello la industria del automóvil eléctrico no tiene el avance que se había previsto, Tabla 2.7.

Tipo	Dens. ener., Wh/kg		Rel. petro.	
	Baja	Alta	Baja	Alta
Petróleo	11.670	11.670	1	1
Plomo-ácido	30	50	389	233
Níquel-Cadmio	45	80	259	146
Níquel-Metal-Hidruro	60	110	194	106
Pila alcalina	80	160	146	73
Litio-ión	90	180	130	65
Litio-aire	1.500	2.000	8	6

Tabla 2.7: Densidad energética de baterías y su relación con el petróleo

El desarrollo de la densidad energética de los principales tipos de acumuladores de energía (baterías) en Watts. Hora/kilogramo (Wh/kg) puede resumirse en el cuadro que sigue, donde se ha incluido el petróleo para compararlo especialmente con las baterías utilizadas para accionar automóviles eléctricos.

Como se observa del cuadro, todas las baterías, excepto la de Litio-aire, que está en la fase experimental, están demasiado lejos de la densidad energética del petróleo. Las baterías de Litio-ión son las más utilizadas en los automóviles eléctricos y su densidad energética es 65 a 130 veces menor a la del petróleo,

por lo que pesan bastante y aun así los recorridos por carga son muy limitados.

Las baterías de Plomo-ácido se las usa principalmente para motores de arranque de automotores. Las baterías de Níquel-Cadmio, Níquel-Metal-Hidruro (NiMH) y Litio-ión, así como las pilas alcalinas son utilizadas en dispositivos electrónicos (celulares, laptops etc.). Las baterías de Litio-ión son usadas también para el accionamiento de automóviles eléctricos o híbridos y las baterías de Litio- aire, que están en desarrollo, accionarían automóviles eléctricos con gran autonomía de recorrido.

La eficiencia energética de las baterías de Litio-ión es de 90%, comparada con 82% de las baterías de Plomo-ácido y 70% de las de NiMH. Las batería de Litio-ión pueden generar voltajes mucho mayores que las de NiMH. En lo que a ciclos de carga y descarga soportados se refiere, se tiene unos 1.400 para el NiMH frente a los 2.500-3.000 del Litio-ión.

CAPÍTULO 3

3. Especificaciones Técnicas del Sistema

Se trata de diseñar y validar una plataforma abierta que permita generar de forma automática la demanda de potencia del vehículo eléctrico en diversos escenarios de trabajo.

Por tanto el diseño del emulador de carga permitirá caracterizar el comportamiento eléctrico del sistema de suministro de energía alternativo usado en el vehículo para reducir los efectos de contaminación y dependencia del petróleo, en este caso, se usa como suministro de energía la pila de combustible de hidrogeno, para lo cual se debe conocer la descripción, funcionamiento y potencia que genera esta.

3.1 Sistema de Propulsión del Vehículo

Un vehículo híbrido alimentado con pila de combustible (VHPC) tiene una batería o ultra condensador en paralelo con el sistema de pila de combustible con la finalidad de cubrir picos de energía, en nuestro sistema de suministro de energía se dispone de un modelo de batería

de 24Ah. El funcionamiento del VHPC garantiza el uso más eficiente de la alta densidad de energía de la pila de combustible y de la alta densidad de potencia de la batería. Cuando la demanda de potencia es alta, como en una aceleración, las baterías proporcionan la potencia necesaria. Cuando la demanda de potencia es baja, como en condiciones de velocidad crucero, la pila proporciona la potencia necesaria. Las baterías se recargarán durante los periodos de baja potencia. Por tanto, dependiendo de los requerimientos de potencia y de energía, la pila se utiliza bajo el punto de vista de velocidad crucero, y la batería para proporcionar potencias pico.

3.2 Componentes Principales del Sistema de Propulsión

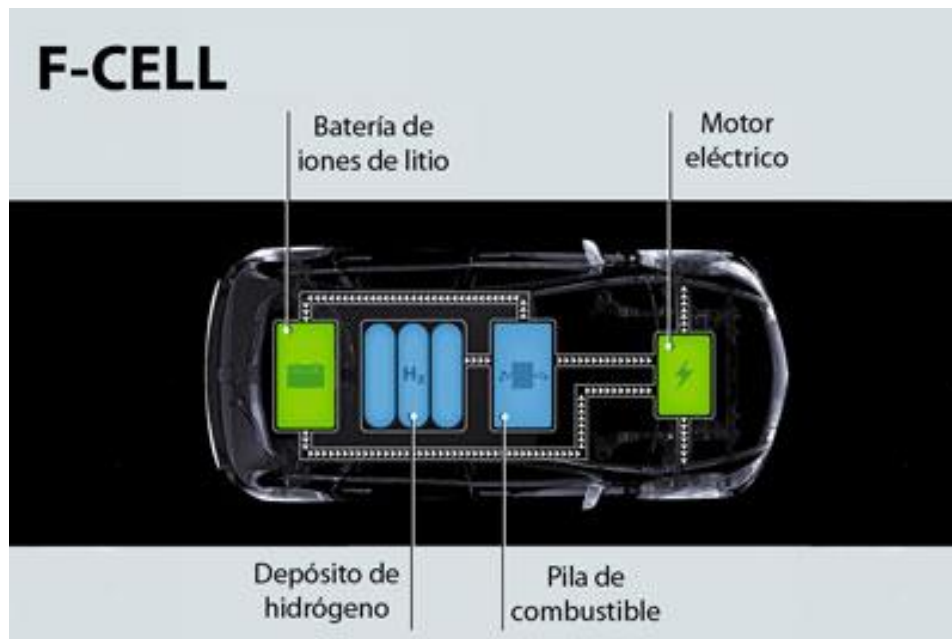


Figura3.2: Sistema de propulsión

- **Motor eléctrico:** con su unidad electrónica de potencia, supervisor electrónico, cargador y engranaje reductor (la transmisión). Para este componente se usa un motor de magneto permanente ya que brinda mejores prestaciones, como mayor torque de arranque, robustez y menor tamaño que otros motores, además, dado que los kart usados en competencias son de 9KW en su mayoría, se usó un motor de la misma potencia.
- **Batería:** normalmente de iones de litio, que almacena energía eléctrica y que sirve como búfer o reservorio de energía, para cuando se demanda mucha potencia y la pila de combustible no es capaz de generar una respuesta instantánea de electricidad y, para que el funcionamiento sea siempre suave y homogéneo. La batería no siempre es tan pequeña como se podría pensar, un coche eléctrico movido por una pila de combustible de hidrógeno como el Hyundai ix35 FCEV tiene una batería de 24 kWh, o sea, tan grande como la de un coche 100% eléctrico como el caso del Nissan LEAF, por ejemplo. Su ubicación suele ir bajo el suelo del habitáculo o debajo de los asientos traseros. Para nuestro modelo se usa una batería de 40Ah, la misma que interviene en arranques

suministrando energía, y se recarga cuando las exigencias del motor lo permiten.

- **Uno o varios depósitos de hidrógeno:** el combustible, generalmente hidrógeno gaseoso. El depósito ocupa mucho volumen, un ejemplo de ello es el Honda FCX Clarity cuyo depósito es de 171 litros de capacidad (exteriormente, debido al grueso de las paredes del tanque, todavía abulta un poco más). El depósito suele colocarse debajo o detrás de los asientos traseros, según el coche. En nuestra aplicación se usa hidrógeno gaseoso almacenado a una presión de 7,2 - 9,4 PSI.
- **Pila de combustible:** físicamente en su parte exterior parece una caja de metal del tamaño de una maleta, y que suele colocarse en el centro del coche. La celda de combustible en nuestro modelo es la PEM H-10000XP, se corresponde a una potencia de 10KW de la empresa Horizon.

3.3 Esquema del Emulador de Perfiles de Carga

El diagrama de bloques del emulador de perfiles de carga propuesto para caracterizar la respuesta eléctrica del sistema de propulsión del vehículo eléctrico, es presentado en la Figura 3.3. El mismo que consta de:

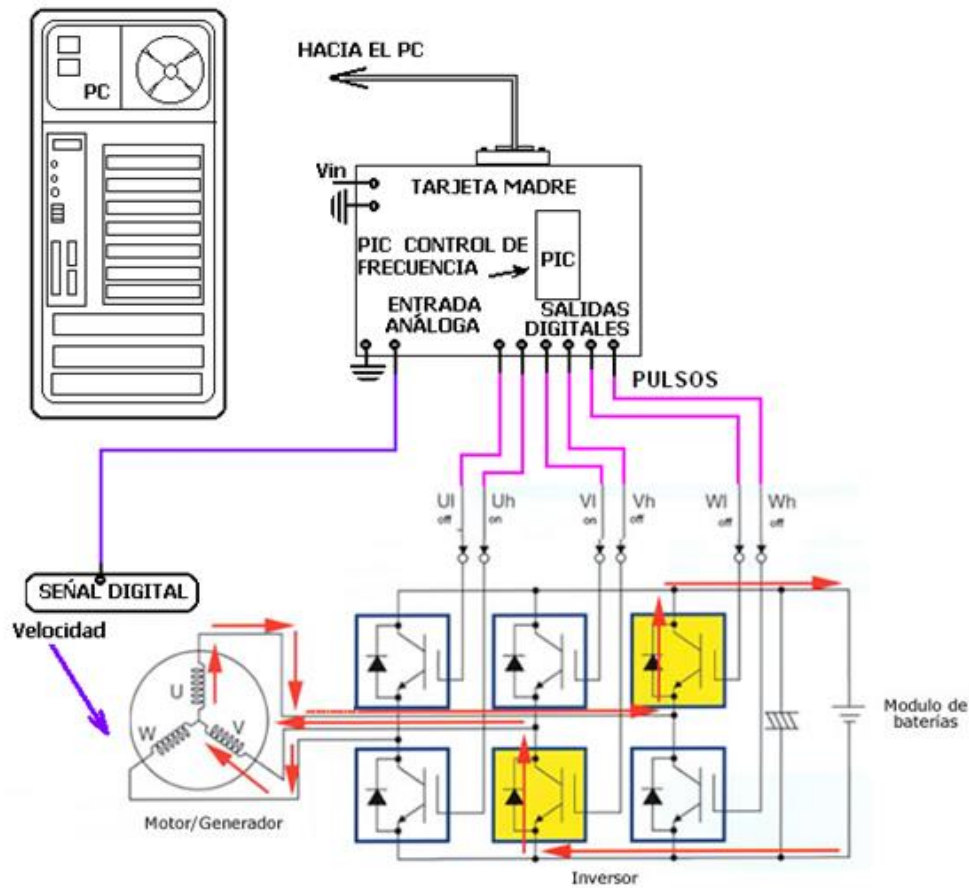


Figura3.3: Esquema de bloques de emulador

Una tarjeta electrónica (tarjeta madre) para la adquisición de datos que es la NI USB-6008 la cual está compuesta por un microcontrolador PIC, la misma que se conecta al computador personal PC, a través de una interface USB de alta velocidad. La interface electrónica permite extraer las señales eléctricas de los pulsos a los dispositivos semiconductores IGBT que a su vez accionaran el motor síncrono de magneto permanente, facilitando con ello simular el trabajo del vehículo según los

diferentes escenarios operación (carga) que sean seleccionados y configurados en la aplicación desarrollada en el programa de Matlab.

La interface electrónica que hace uso del puerto USB, permite enviar y recibir información bidireccional entre el PC y los dispositivos de potencia, manipulándose con ello el motor desde el computador. En un próximo trabajo esta interface electrónica pueda ser implementada físicamente en hardware, esto es, implementación de protocolos, utilizando técnicas de programación e implementación con MATLAB.

El sistema de potencia conformada por los dispositivos semiconductores IGBT, están configurados en una topología de puente inversor trifásico, físicamente está conectado al estator del motor magneto permanente, y retroalimentando al sistema por medio de un sensor analógico que capta la velocidad del motor y la devuelve al programa, permitiendo así realizar una interacción del software con el mundo real, Figura 3.3.1.

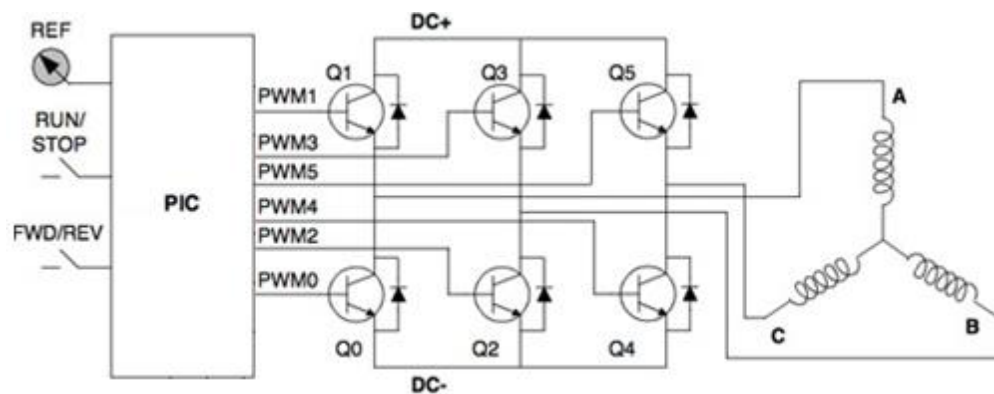


Figura3.3.1: Sistema electrónico del emulador

La función principal del inversor es cambiar el voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna, con la magnitud y frecuencia deseada para poner en marcha al kart.

Un inversor simple consta de un oscilador que controla a un transistor, el cual se utiliza para interrumpir la corriente entrante y generar una onda cuadrada. Esta onda cuadrada alimenta a un transformador que suaviza su forma, haciéndola parecer un poco más una onda senoidal y produciendo el voltaje de salida necesario.

Los inversores más modernos han comenzado a utilizar formas más avanzadas de transistores o dispositivos similares, como los tiristores, los triacs o los IGBTs. En nuestro caso se realiza el diseño de nuestro inversor con IGBT para una técnica de control vectorial. Las altas frecuencias PWM (> 16 kHz), permiten un control preciso y dinámico para los motores de alta velocidad con pérdidas de inductancia pequeña, muy complicada con inversores convencionales. A continuación se hace una breve referencia a los principales factores que determinan las características de los inversores para vehículos eléctricos.

- Control del par, velocidad y control de potencia
- Alto rendimiento en la conversión de energía
- Compactos y ligeros
- Silencioso y bajo EMI

- Regulación rápida y suave (PWM de alta frecuencia)
- Sin degradación del aislamiento del motor
- Funcionamiento para alta velocidad
- Gestión térmica
- Bus de comunicaciones compatible (CAN)
- Amplio rango de tensiones de entrada (p.ej. 42 a 700 VDC)
- Amplia gama de niveles de potencia disponibles
- Compatibilidad con el motor del vehículo eléctrico

Los datos que entran y salen de la interfaz electrónica son señales digitales en el caso de los pulsos y análogas en el caso del sensor de velocidad. La configuración se la realiza por programaciones especiales haciendo uso de rutinas específicas de MATLAB.

3.4 Motor de Imanes Permanentes

El motor usado en nuestra aplicación es una maquina eléctrica síncrona de imanes permanentes que está compuesto de un rotor de imanes permanentes y el estator bobinado. El motor es quien pone en movimiento al vehículo eléctrico, en la Tabla 3.0 se nos muestra los parámetros del motor seleccionado.

Datos técnicos de la serie BMD 400V

Parámetro	Símbolo	Unidad	Motor					
			65	82	102	118	145	170
Par a 0 rpm (dT=100K)	M_0	[Nm]	1.7	3.2	7.2	10.2	16.8	34
Velocidad nominal	n_n	[min ⁻¹]	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Tensión nominal de motor	V_n	[VAC]	311	315	311	305	308	315
Número de polos del motor	p_{mot}		8	8	8	8	8	8
Número de polos del resolver	p_m		2	2	2	2	2	2
Par nominal (dT=100K)	M_n	[Nm]	1.60	3.0	6.7	9.5	16	27.5
Corriente a velocidad nominal	I_n	[A]	1.33	2.50	5.4	7.9	12.5	18.6
Corriente a 0 rpm	I_0	[A]	1.35	2.60	5.5	8.0	13	23.3
Par máximo	M_{max}	[Nm]	4.9	8.5	21	30	46	90
Corriente máxima	I_{max}	[A]	4.6	8.9	20	28	50	70
Constante EMF	K_e	[V/1000min ⁻¹]	83	85	86	86	83	93
Par constante	K_t	[Nm/A]	1.26	1.25	1.31	1.28	1.29	1.46
Potencia nominal	P_n	[kW]	0.50	0.94	2.1	3.0	5.0	8.6
Resistencia estática entre fases (a 20°C)	R_{sp}	[Ω]	26.31	9.75	2.53	1.27	0.72	0.26
Inductancia estática entre fases	L_{sp}	[mH]						5.1
Inercia del rotor (sin freno)	J_m	[kgm ² x 10 ⁻³]						2.82
Constante eléctrica de tiempo (a 20°C)	τ_e	[ms]						20
Constante térmica de tiempo	τ_{therm}	[min]						50
Masa del motor sin freno	m_{m0}	[kg]						25



Tabla3.0: Parámetros de motor síncrono de magneto permanente

Los motores de imanes permanentes pueden ser excitados tanto con señales eléctricas en continua o en alterna, sin embargo, es importante notar que las aplicaciones de motores de excitación alterna son los más empleados y eficientes en términos de conversión de energía disponible y mantenimiento.

La expresión matemática que relaciona la velocidad de la máquina con los parámetros mencionados es representada en la ecuación (3.1):

$$n = \frac{60 \cdot f}{P} = \frac{120 \cdot f}{p} \quad (3.1)$$

Dónde:

- f: Frecuencia de la red a la que está conectada la máquina (Hz)
- P: Número de pares de polos que tiene la máquina
- p: Número de polos que tiene la máquina
- n: Velocidad de sincronismo de la máquina (revoluciones por minuto)

El motor de imanes permanentes proporciona un alto torque acoplado directamente con la carga a bajas velocidades. Al eliminar la caja de reducción, el usuario ahorra espacio, costos de instalación, elimina un punto de falla y, lo más importante, mejora la eficiencia y disminuye el mantenimiento del accionamiento.

3.5 Sistema de Regulación y Control

El inversor formado por los IGBT permite regular la potencia DC que entrega la pila de combustible y suministrarla al motor del Kart eléctrico cuando la máquina eléctrica trabaja como motor; en el instante de actuar la frenada regenerativa, el inversor debe recoger la energía de la máquina eléctrica que en este caso funcionaría como generador y dicha

energía la envía a la batería, la Figura 3.5 nos ilustra cómo se da la recarga de energía a la batería.

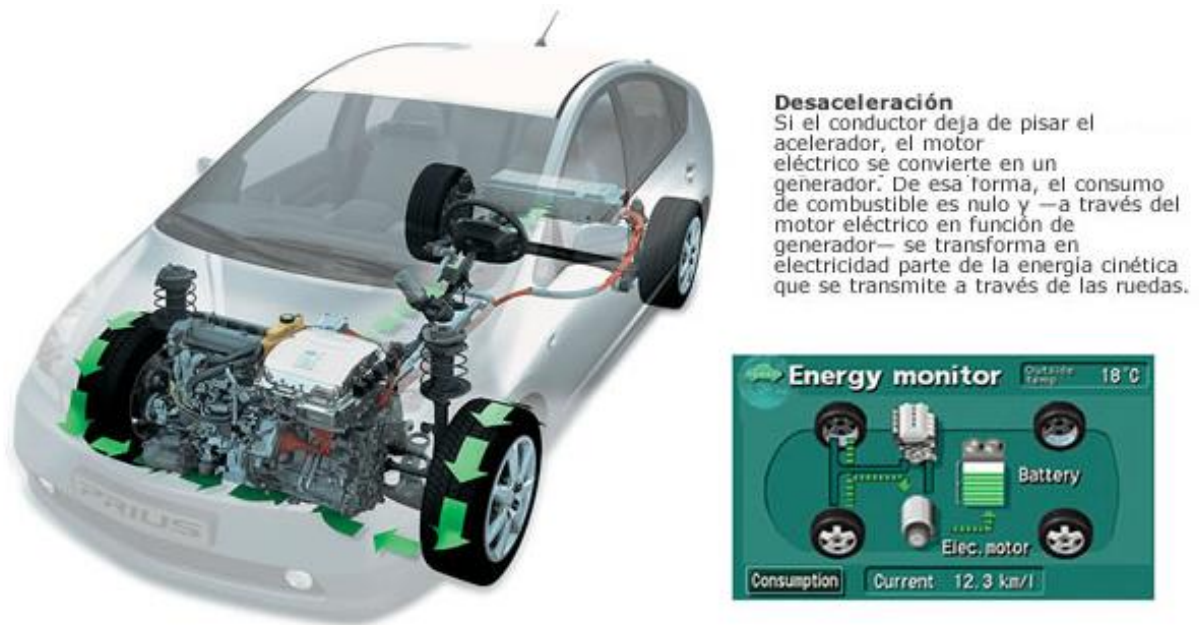


Figura3.5: Regeneración de energía

3.6 Herramienta de Modelado y Simulación

Para el diseño, modelado y simulación tanto del sistema de propulsión del vehículo como del emulador de perfiles de carga se ha utilizado MATLAB, que es un programa interactivo para computación numérica y visualización de datos. MatLab está basado en matrices para el análisis de sistemas de ecuaciones. De esta manera permite resolver problemas numéricos complejos sin necesidad de desarrollar un programa en

donde se pueden implicar elevados cálculos matemáticos y la visualización gráfica de los mismos.

MATLAB dispone en la actualidad de un amplio abanico de programas de apoyo especializado, denominados Toolboxes, que extienden significativamente el número de funciones incorporadas en el programa principal. Estos Toolboxes cubren prácticamente casi todas las áreas principales en el mundo de la ingeniería y la simulación, destacando entre ellos el 'Toolbox' de proceso de imágenes, señal, control robusto, estadística, análisis financiero, matemáticas simbólicas, redes neutrales, lógica difusa, identificación de sistemas, simulación de sistemas dinámicos, sistemas de electrónica de potencia, etc.

Además, MatLab dispone del programa Simulink, que es un entorno gráfico interactivo con el que se puede analizar, modelizar y simular la dinámica de sistemas no lineales, este programa ha sido utilizado para el modelado y configuración de sistema propuesto.

3.7 Análisis Económico

Para evaluar el estudio económico estimado del coste de implementación del emulador de escenarios de operación del vehículo tipo Karts convencional a propulsión alternativa de energía, se ha tenido en cuenta los datos presentados en la Tabla 3.1.

Núm.	Descripción	Cantidad	Precio unitario	Importe
1	Tarjeta DAQ NI USB-6008	1	\$329	\$329.00
2	Hgtg20n60 Transistor Igbt 600 V 70 A	6	\$195	\$1755.00
3	Motor 8,6Kw PM Síncrono BMD 400V 170	1	\$1050	\$1050.00
4	Sensor de Velocidad	1	\$300	\$300.00
			TOTAL	\$3434.00

TABLA 3.1: Presupuesto para emulador

Los elementos presentados en la Tabla 3.1, se corresponden a los elementos finales a utilizar para la implementación física del emulador de carga (sin contar con costes adicionales por fabricación de tarjeta electrónica para transistores), luego de realizar las debidas simulaciones y análisis de resultados durante el cambio en las prestaciones del kart.

De esta manera el modelado y simulación constituyen una herramienta básica para el ahorro de recursos y por consecuente un consumo eficiente de las materias primas a utilizar.

Todos los elementos mencionados en los capítulos anteriores irían ubicados en el kart según se muestra en la Figura 3.6.

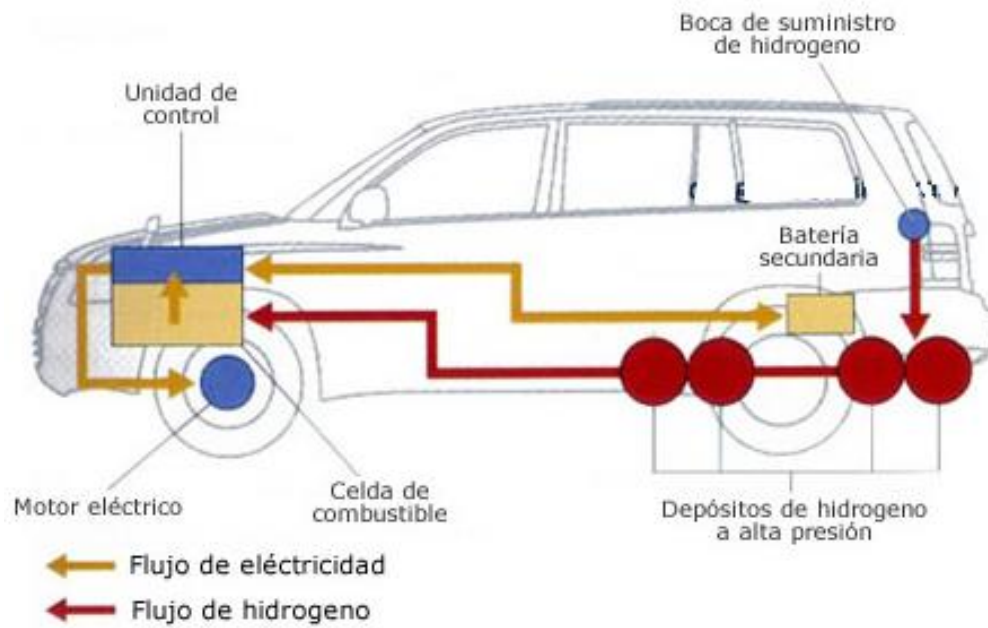


Figura3.6: Componentes del vehículo

CAPÍTULO 4

4. Modelado y Parametrización

En este capítulo se da una explicación del programa realizado en Matlab-Simulink, para emular los perfiles de carga del motor kart, detallando cada elemento usado e indicando su función.

4.1. Suministro Eléctrico de Energía

En la Figura 4.1 de la aplicación desarrollada en el presente proyecto se pueden identificar 3 bloques principales, los cuales se corresponden al sistema de suministro de energía eléctrica, el circuito eléctrico de potencia y el emulador de carga.

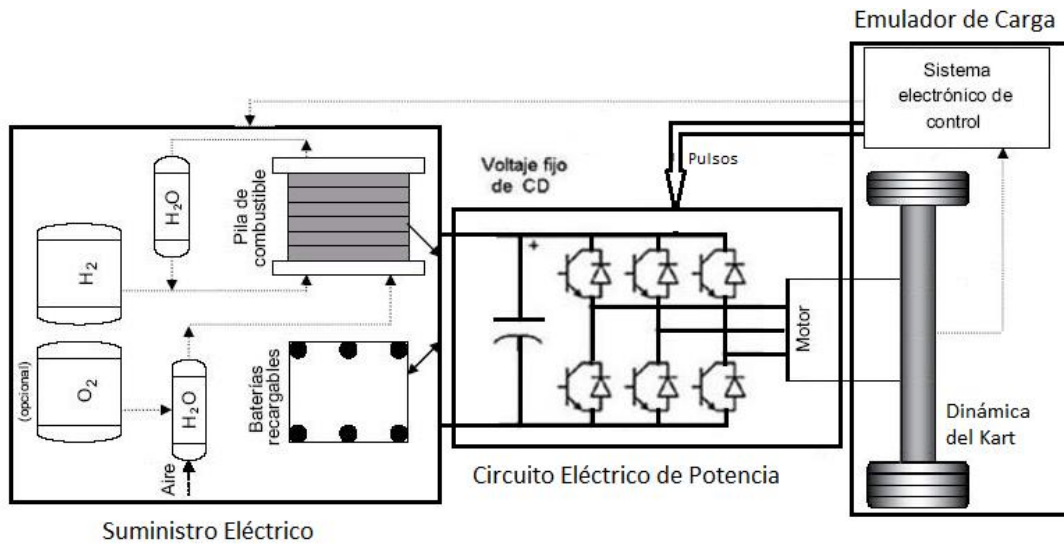


Figura4.1: Bloques del sistema

4.1.1 Sistema Híbrido Eléctrico

La potencia eléctrica entregada por el sistema de suministro de energía al Kart (Figura 4.1.1), es generada principalmente por la celda de combustible cuya tensión de salida es en corriente directa variable, por tanto, es necesario incorporar un convertidor dc-dc en línea con la pila para estabilizar la tensión de la pila de combustible.

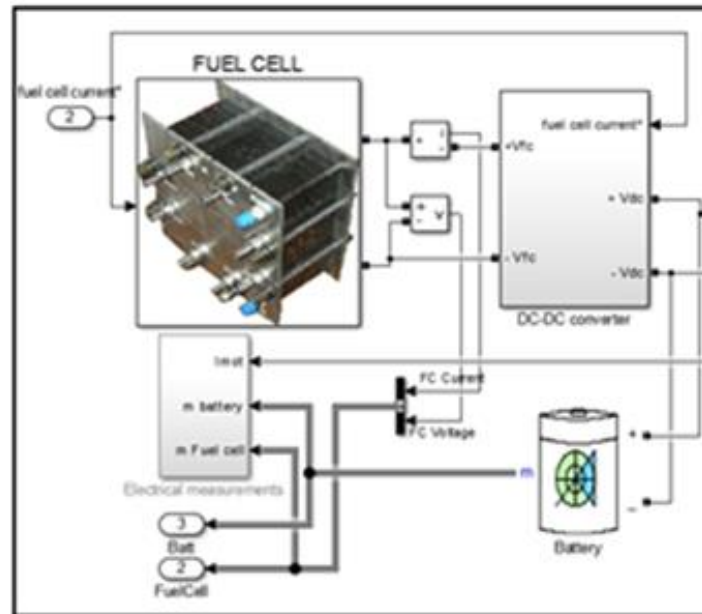


Figura4.1.1: Sistema Híbrido Eléctrico

El voltaje dc regulado alimenta al bloque del sistema eléctrico de potencia, Cuando la demanda de potencia es alta, como es el caso de una aceleración, las baterías proporcionan la potencia necesaria, pero cuando la demanda es baja, como en condiciones de velocidad crucero, la pila proporciona la potencia. Las baterías se recargaran durante los periodos de baja potencia. Así pues dependiendo de los requerimientos de potencia y de energía, la pila se diseña bajo el punto de vista de velocidad crucero, y la pila para proporcionar potencias pico.

A continuación se detalla el bloque de la PEM y los detalles de su parametrización dentro de simulink:

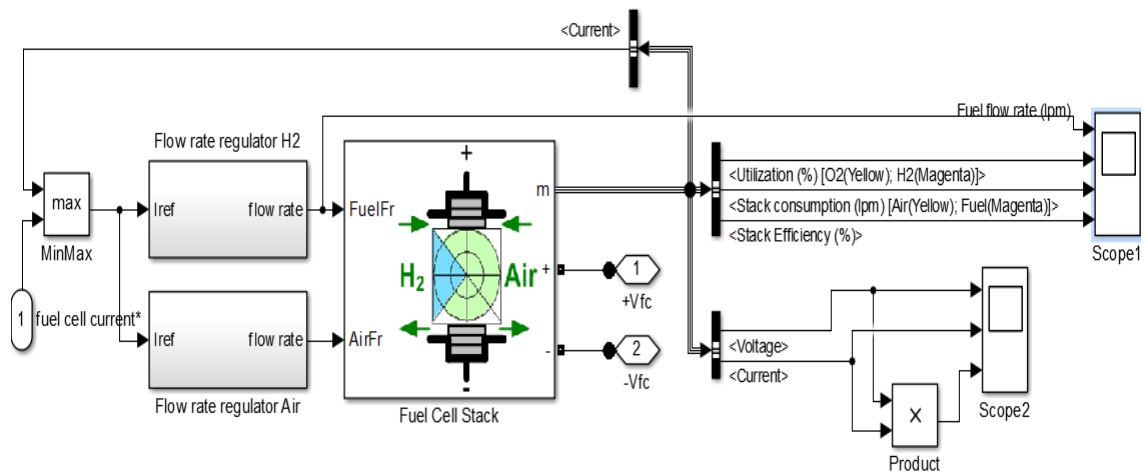


Figura4.1.2: Bloque Fuel Cell

El bloque de Fuel Cell Stack implementa un modelo genérico parametrizado para representar varios tipos de pilas de combustible alimentadas con hidrógeno y aire.

El bloque representa dos versiones del modelo de pila: un modelo simplificado y un modelo detallado. Se puede cambiar entre los dos modelos, seleccionando el nivel en la máscara bajo nivel de detalle del modelo en el cuadro de diálogo de bloque, la Figura 4.1.3 nos muestra como esta parametrizada la celda de combustible.

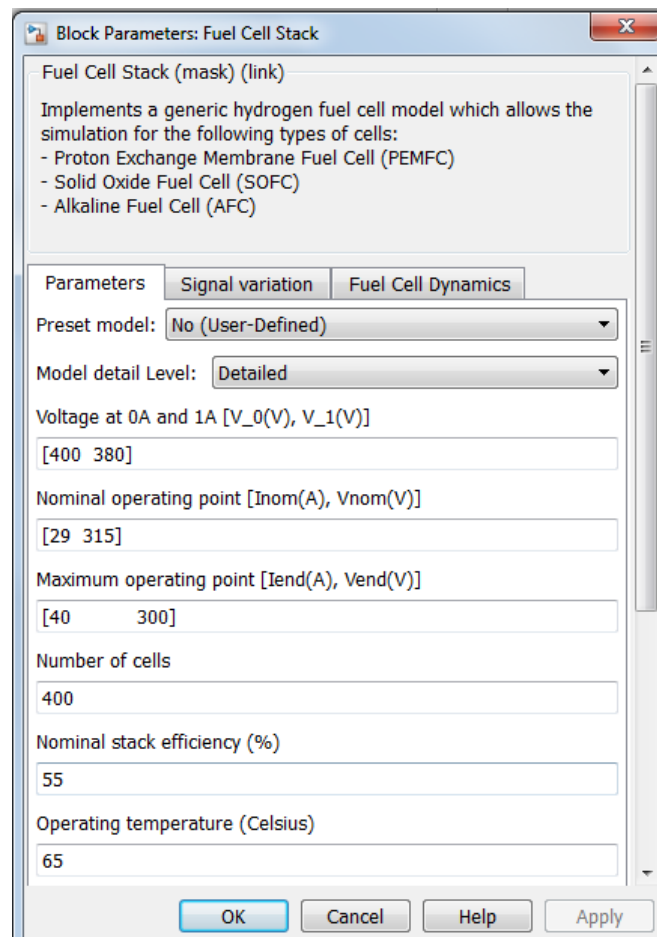


Figura4.1.3: Parámetros de la Celda de Combustible

Para nuestro caso se usó el modelo de la PEM detallada, la cual representa una pila de células de combustible cuando los parámetros tales como presiones, la temperatura, composiciones y caudales de combustible y aire varían. Puede seleccionar los parámetros que deben variar en el panel de la variación de la señal en el cuadro de diálogo de bloque. Estas variaciones afectan a la tensión de circuito abierto (EOC), la corriente de cambio (i_0) y la pendiente de Tafel (A).

El caudal se ajusta automáticamente para mantener la utilización nominal de combustible. La tensión de V_{fc} a la salida de la pila posteriormente está muy bien regulada por el convertidor.

La salida del bloque de la PEM es un vector (m) que contiene 11 señales, del cual demultiplexamos y graficamos en los bloques scope 1 y scope2 de la figura 4.1.2, las señales de corriente, voltaje, utilización de O_2 y H_2 en % y en LPM, así como la eficiencia de la PEM.

4.1.2 Administrador de Energía

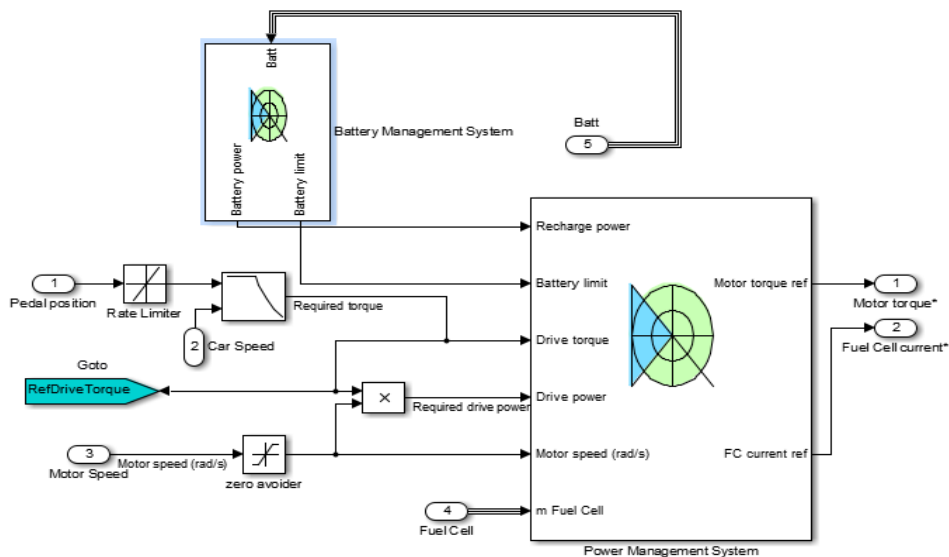


Figura4.1.4: Bloque administrador de energía del Kart

El bloque Gestión de la energía se basa principalmente en la velocidad del vehículo, aceleración de entrada (ciclo de conducción), y las variables de la batería (tensión, corriente y estado de carga). Este subsistema

contiene un controlador principal para definir la cantidad de par a producir y la corriente que debe generar la celda de combustible.

El bloque administrador de la batería recibe datos de la batería y limita el rango de SOC entre 40% y 80% y especifica la cantidad a recibir o enviar energía para la batería.

4.2 Emulador de Carga

El esquema de la Figura 4.2 se construye a partir de cuatro bloques principales. El motor PMSM, el puente inversor trifásico, el controlador de pulsos y la dinámica del kart estos dos últimos es de donde serán tomadas las señales para ser implementado nuestro emulador de carga y hacer conducir a los IGBT's para simular diferentes escenarios en un motor externo.

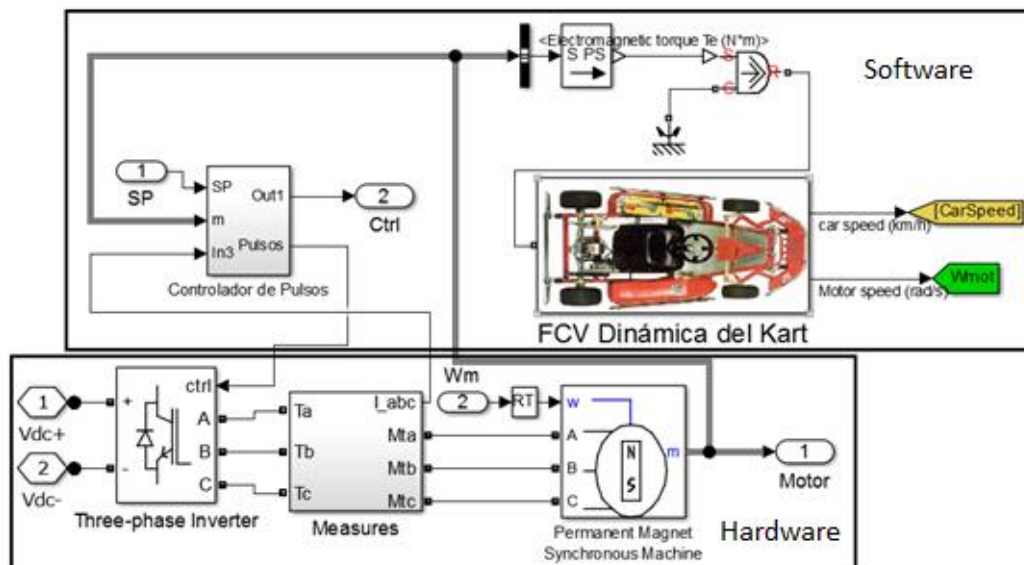


Figura4.2: Emulador de Carga

4.2.1 Circuito Electrónico de Potencia

La Figura 4.2.1 está basado en el bloque de accionamiento para motores síncronos de magneto permanente AC6 de la librería SimPowerSystems de simulink el mismo que ha sido modificado para ser usado en las simulaciones.

Este bloque toma voltaje del sistema hibrido eléctrico, este voltaje DC ingresa al puente trifásico formado por IGBT's y mediante la conmutación de los mismos se genera una salida trifásica en AC modulada en su frecuencia para alimenta al motor de magneto permanente. Para que cada IGBT del puente conmute se le aplica un tren de pulsos a su terminal de compuerta, los cuales son generados en el controlador del sistema.

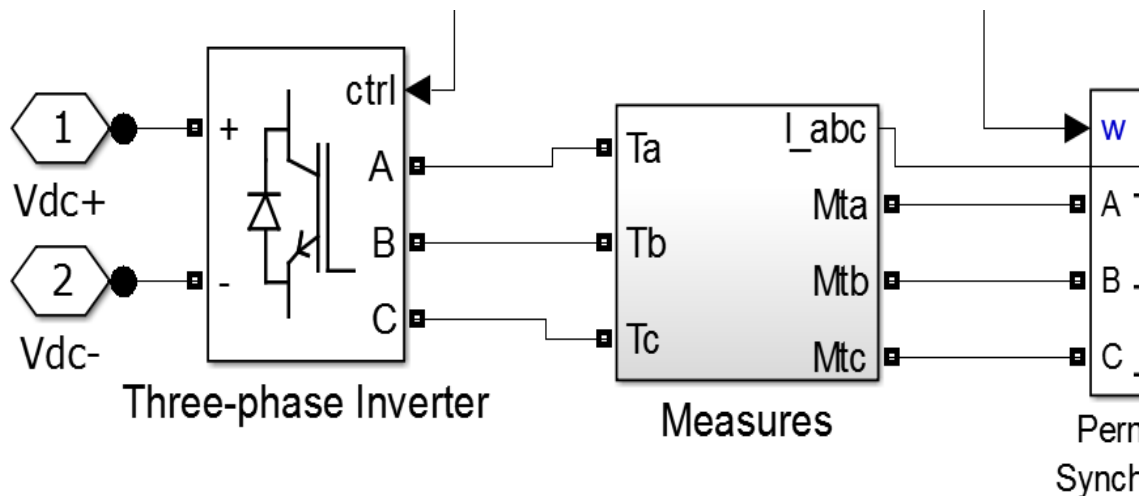


Figura4.2.1: Bloque Electrónico de Potencia

4.2.2 Dinámica del Kart

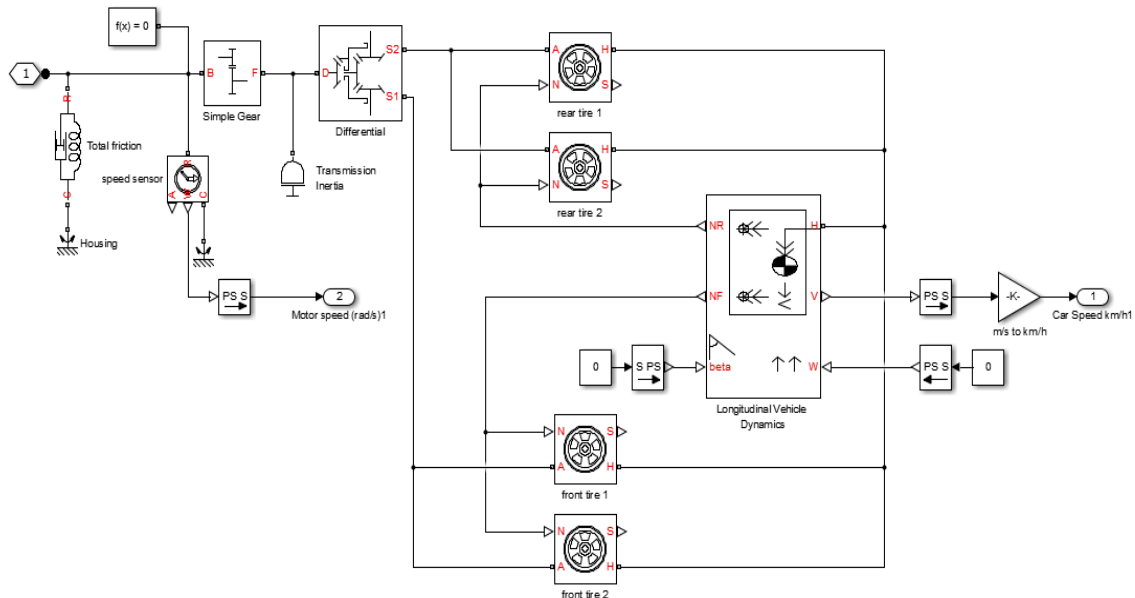


Figura4.2.2: Dinámica del Kart

La Figura 4.2.2 Nos muestra El boque de entrada Simulink PS-Converter, toma la señal de T_e (torque eléctrico) del motor y la convierte una señal física para ser usada por los bloques de la librería Simdriveline, actuando como una interface. Los principales subsistemas de la línea de conducción son: transmisión, controlador de la transmisión, vehículos y neumáticos. El modelo del motor y la transmisión están acoplados a través de un subsistema de convertidor de par.

Como embrague, un convertidor de par esta acoplado a dos ejes de transmisión independientes de tal manera que pueda transferir

movimiento angular y el par motor desde una entrada a un eje de salida. Sin embargo, a diferencia de un embrague, un convertidor de par nunca se bloquea y el eje de salida nunca llega exactamente a la velocidad de la entrada. Este bloque de engranajes simple representa una caja de cambios que limita los dos ejes de conducción conectados, y se lo define para que el eje seguidor gire en la misma dirección que el eje base.

El bloque diferencial representa un tren de engranajes para la transferencia de poder de un eje de transmisión a dos ejes accionados. Una combinación de engranajes cónicos y simples permite a los ejes accionados girar a diferentes velocidades, cuando sea necesario, y en diferentes direcciones, según el tipo de la radio de giro de cada rueda individual.

El diferencial convierte esta entrada en rotación, el par y la potencia a los ejes accionados. La relación de transmisión, que se especifica directamente en el cuadro de diálogo de bloque, ayuda a determinar la velocidad angular de cada eje conducido.

Este par de salida alimenta el subsistema de transmisión final, kart y neumáticos. Este subsistema representa la inercia del vehículo (la carga en la transmisión), las ruedas, y el contacto de la rueda

con la carretera. En este modelo dinámico sólo las ruedas traseras son impulsadas por la transmisión.

En el modelado de los neumáticos se tiene cuatro neumáticos, que aceptan el par de transmisión y la rotación de la transmisión en sus puertos de rotación del eje de la rueda (A). Dada una carga normal o vertical (N), este par de torsión y la rotación se convierten en una fuerza de empuje y la traducción en los puertos de traslación de la rueda (H). Los neumáticos no giran idealmente, desarrollando deslizamiento, ya que generan tracción y reaccionan contra la superficie de la carretera.

El modelado de la carrocería del kart se realiza conectando la línea de conducción del modelo final con el bloque del cuerpo del vehículo, que especifica la geometría del vehículo, la masa, la resistencia aerodinámica y velocidad inicial (cero), para ello se usó datos técnicos de un chasis SODIKART vehículo de un constructor francés. Este bloque genera las fuerzas normales que los bloques de neumáticos reciben como cargas verticales. El cuerpo de vehículo acepta la fuerza de empuje desarrollado y el movimiento en su puerto de traslación de movimiento horizontal (H), Figura 4.2.3.

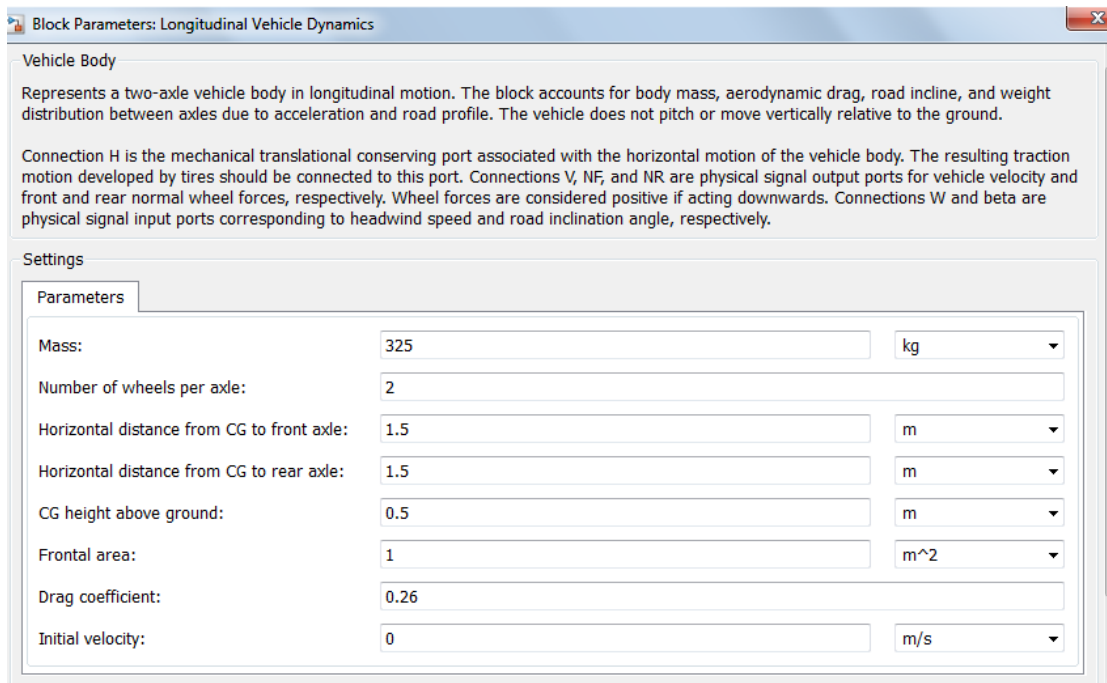


Figura4.2.3: Parámetros del Kart

El modelo de carrocería de vehículo también requiere una velocidad del viento (W) y una inclinación de la carretera (β), ambos proporcionados por constantes físicas, adicionalmente se muestra la velocidad lineal (V) del vehículo, cabe resaltar que en las simulaciones se usó inclinación de la carretera a 0 grados ya que las carreras de karts no se realizan con pendientes.

4.2.3 Características del Motor

El bloque de la máquina de imán permanente síncrono funciona como un motor y se lo programa como un modelo sinusoidal y el flujo establecido por los imanes permanentes en el estator es

sinusoidal, lo que implica que las fuerzas electromotrices son sinusoidales.

De este bloque de motor se toma la salida m del bloque de Simulink el cual es un vector que contiene señales de medición. Las señales disponibles dependen del modelo seleccionado. Del cual para efectos del control del motor se demultiplexa la velocidad del rotor, el ángulo del rotor y el torque electromagnético los cuales se usan para la generación de los trenes de pulso para los tiristores del bloque del inversor, la Figura 4.2.4 muestra la configuración del bloque del motor en Simulink.

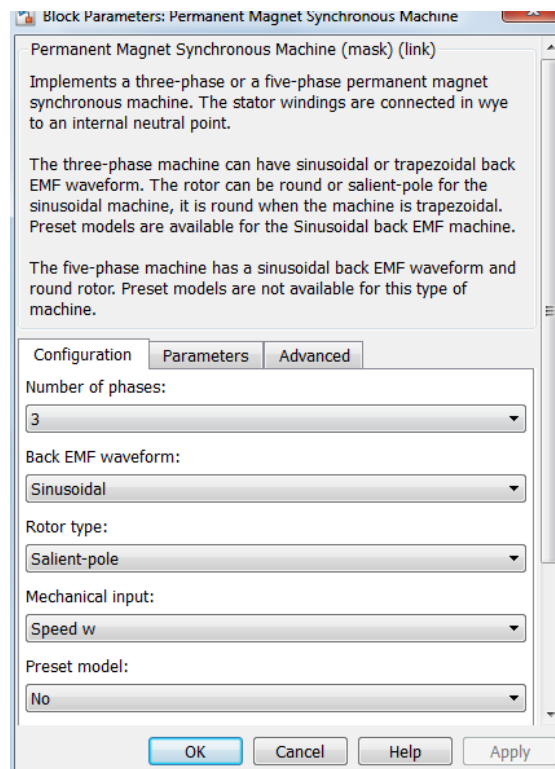


Figura4.2.4: Parámetros del motor

4.2.4 Controlador de Carga

La Figura 4.2.5 muestra un diagrama de bloques del funcionamiento del sistema.

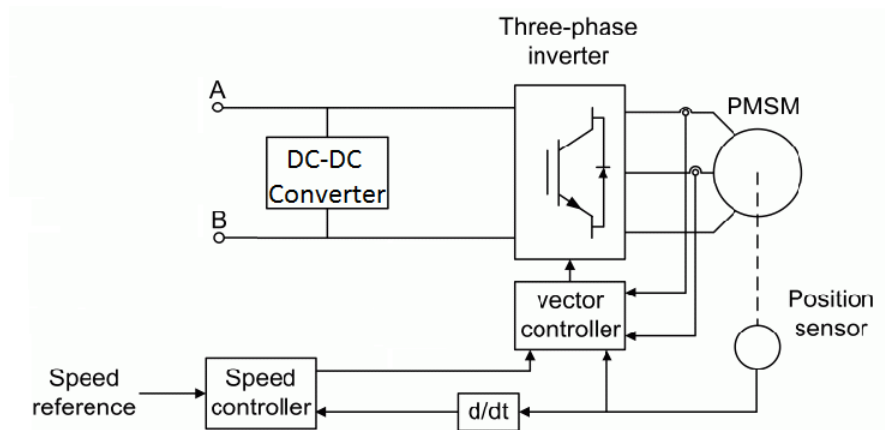


Figura4.2.5: Diagrama de bloques del accionamiento del motor

El sistema eléctrico del Kart se compone de una fuente de corriente controlada en el lado DC que proviene de la Pila de combustible y la batería esta tensión alimenta a un inversor cuya función es cambiar un voltaje de entrada de corriente continua a un voltaje simétrico de salida de corriente alterna, con la magnitud y frecuencia deseada y definida por el tren de pulsos entregados por el controlador vectorial. La corriente alimenta a un motor AC y puede ser manejada como un vector rotando.

Si se considera este vector en un marco de referencia que también esté rotando con una velocidad angular igual a la frecuencia síncrona

de la máquina, se puede separar en sus componentes reales e imaginarios, siendo correspondientemente, uno proporcional al flujo magnético que origina la rotación y el otro componente proporcional al par generado por el motor eléctrico.

El controlador de pulsos, Figura 4.2.5, se encarga de sensar la velocidad en el eje del motor para generar los pulsos que se aplicaran al puente inversor trifásico y hacer el control de los escenarios de carga, ya sea en arranque del kart, modo crucero, desaceleración o freno, también se puede simular el comportamiento del kart en una pendiente, modificando parámetros en el bloque de dinámica del kart, pero para efecto de nuestras simulaciones no se usa esto.

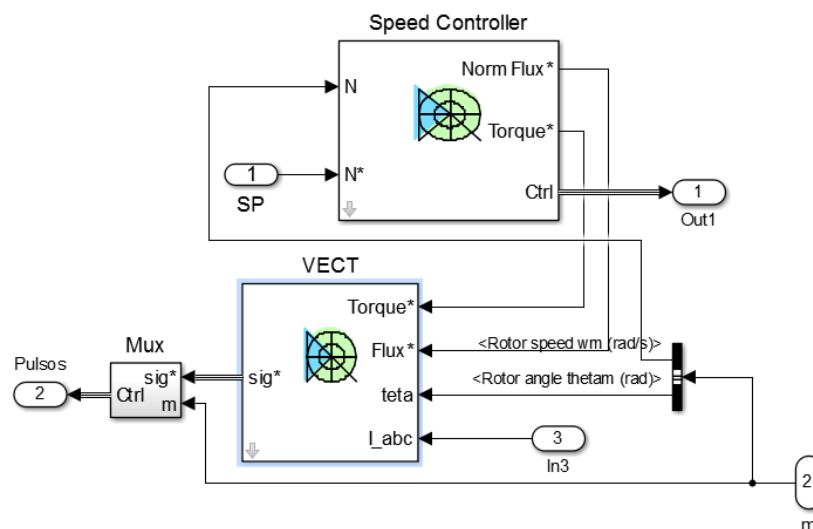


Figura4.2.6: Controlador de Pulsos

CAPÍTULO 5

5. Validación de Escenarios

Todas las gráficas de las simulaciones tienen estipulado por programación de software 16seg de duración, lo cual permite obtener los distintos datos de rendimiento del kart, tanto en el consumo de energía, como el desarrollo del motor, los comandos de freno y porcentaje de aceleración están diseñados de tal manera que se pueda simular diversos escenarios de aplicación del kart. En este trabajo se presentan 3 escenarios los cuales definen el comportamiento global de un vehículo eléctrico.

5.1 Escenario de Arranque

Mediante una función escalón se simula la aceleración al motor para generar el arranque desde el reposo del vehículo, la Figura 5.1.1 muestra en la parte superior el escalón ingresado que simula la aceleración, como resultado de esto se puede ver en la parte inferior de la gráfica como aumenta la velocidad del vehículo en 4 segundos.

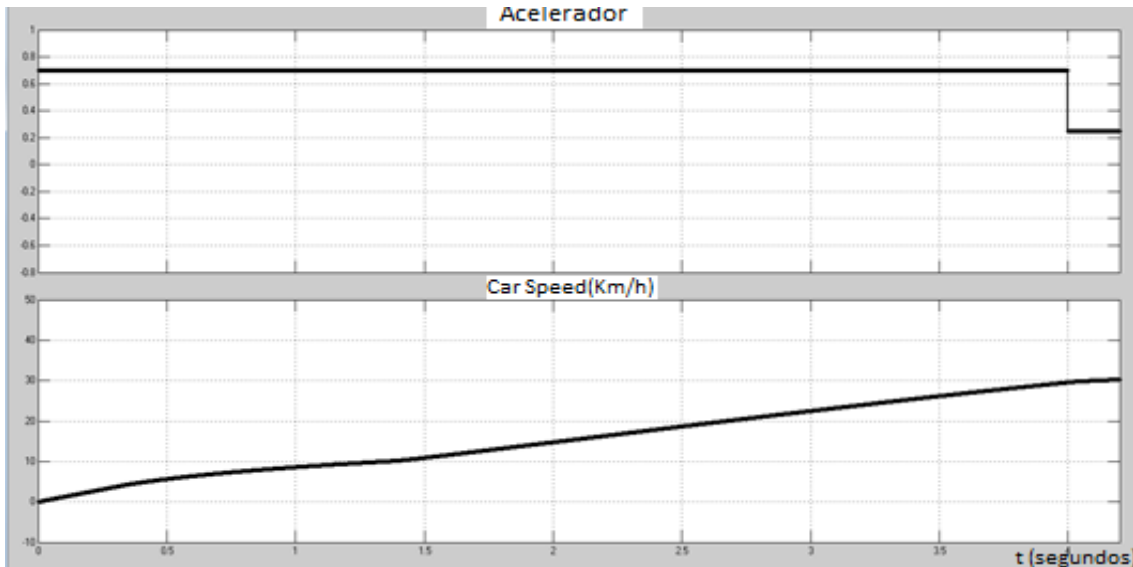


Figura 5.1.1: Aceleración y velocidad en arranque

De esto se obtiene datos de y potencias en Vatios de la PEM, batería y del motor respectivamente, las mismas que se grafican en la Figura 5.1.2. Pudiendo observar un pequeño picos de potencia en el instante inicial donde interviene la batería ya que el kart parte en estático y es allí donde se desarrolla un mayor esfuerzo.

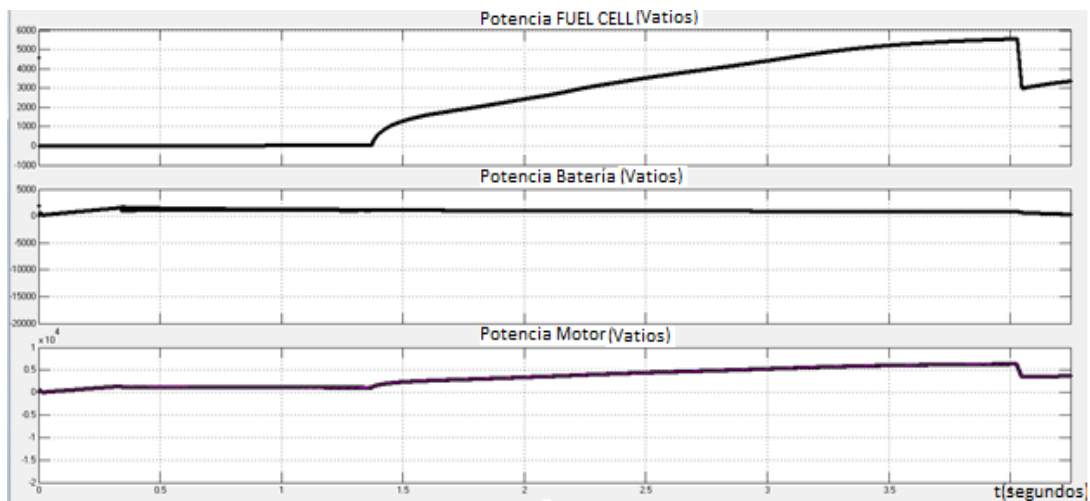


Figura5.1.2: Potencias en escenario de arranque

5.2 Escenario de Crucero y Aceleración

Una vez que el kart arranca comienza a trabajar la PEMFC proporcionando la potencia que requiere el motor tanto en régimen estable como en aceleración, para efecto de simulación una vez pasados los 4 segundos del arranque, la función que simula la aceleración disminuye a 0.23 dejando al motor en estado estable, para posteriormente a los 8 segundos se vuelve a acelerar y la velocidad aumenta hasta 50 Km/h, tal como muestra la Figura 5.2.1.

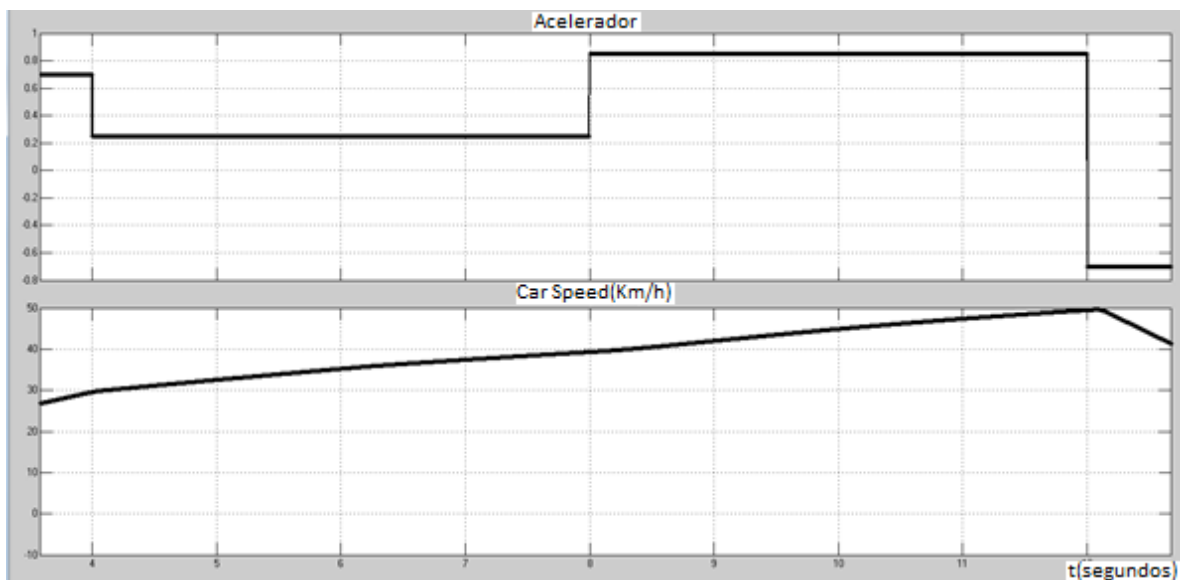


Figura5.2.1: Aceleración y velocidad en crucero

Como resultado de esto se obtienen las siguientes graficas de potencias, pudiendo observar que la batería deja de entregar energía y es la celda de combustible la que comienza a suministrar la energía que consume el motor eléctrico, Figura 5.2.2.

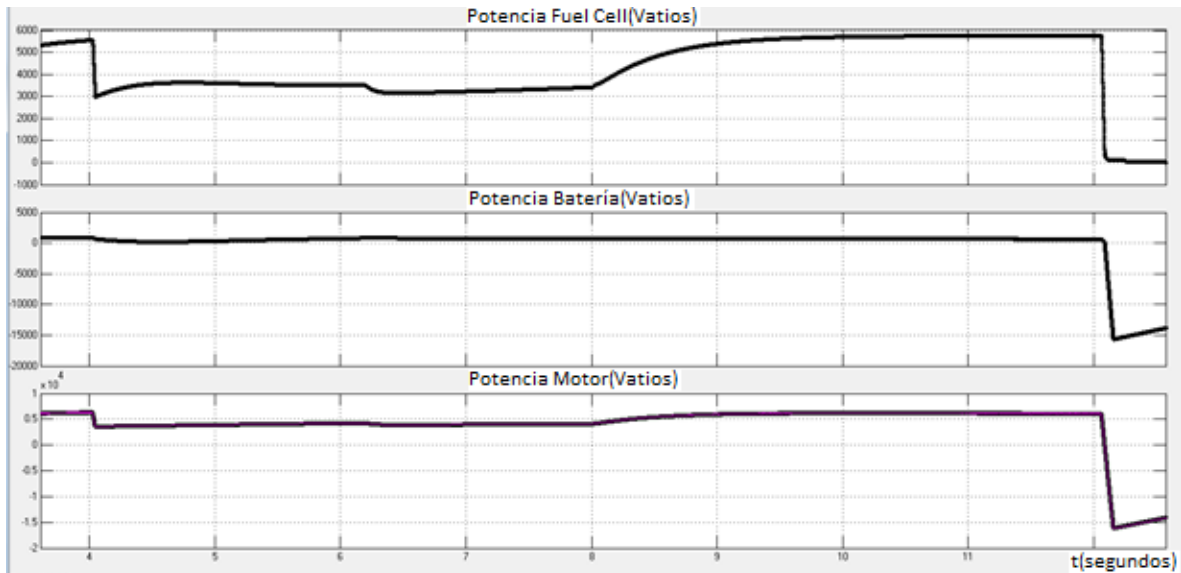


Figura5.2.2: Potencias en escenario de crucero y aceleración

5.3 Escenario de Frenado

Para efecto de simular el frenado, disminuimos la función de acelerador hasta -0.7 y observamos como inmediatamente la velocidad del kart comienza a descender hasta llegar al reposo, Figura 5.3.1.

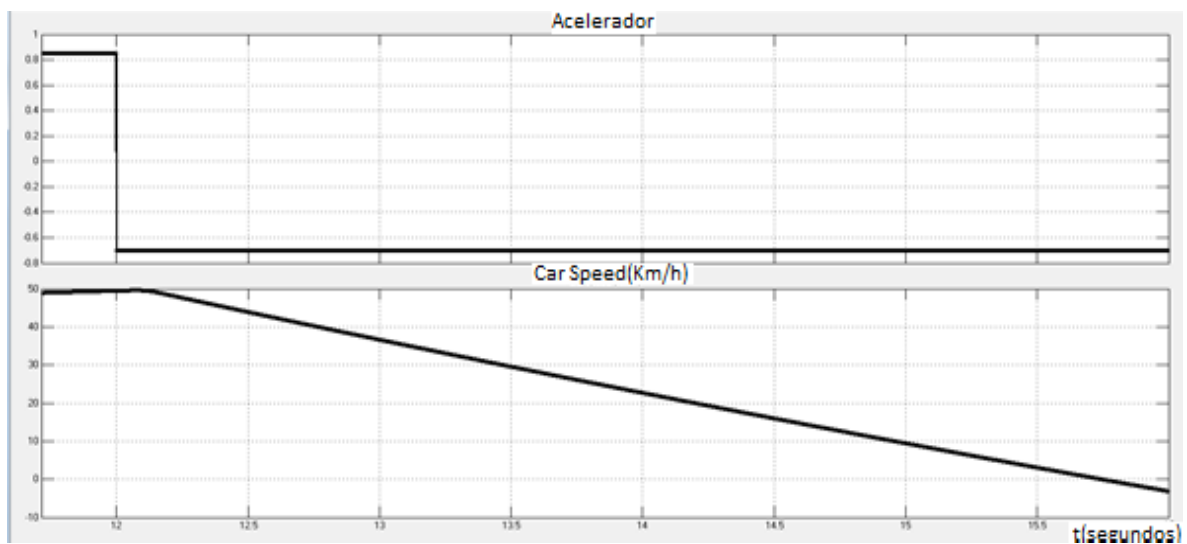


Figura5.3.1: Aceleración y velocidad en frenado

Como resultado de este frenado, podemos ver como ahora el motor pasa a trabajar como generador, regenerando la energía a las baterías y la celda de combustible deja de suministrar potencia al sistema eléctrico, Figura 5.3.2.

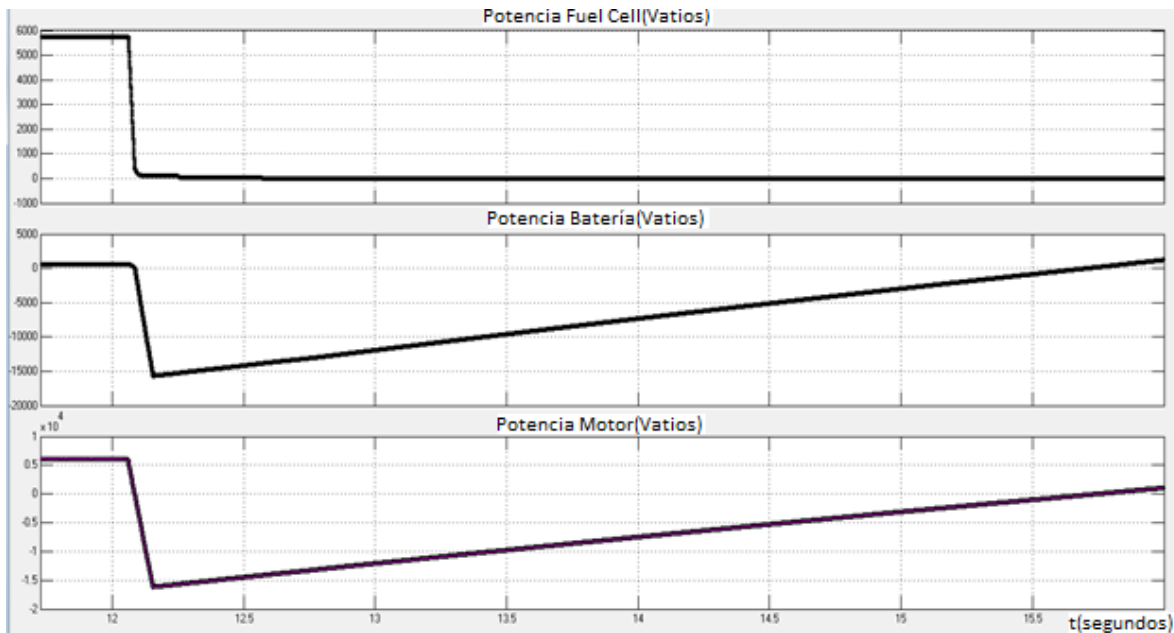


Figura 5.3.2: Graficas de potencias en frenado

5.4 Respuesta Global del Motor

La última grafica nos muestra los resultados obtenidos del rendimiento y características del motor en los distintos escenarios planteados, del cual se puede decir que se trata de un motor con altas prestaciones, en la Figura 5.4.1 se muestra una visión global del sistema durante los 16 segundos de simulación, la aceleración, velocidad, torque y potencia del motor respectivamente.

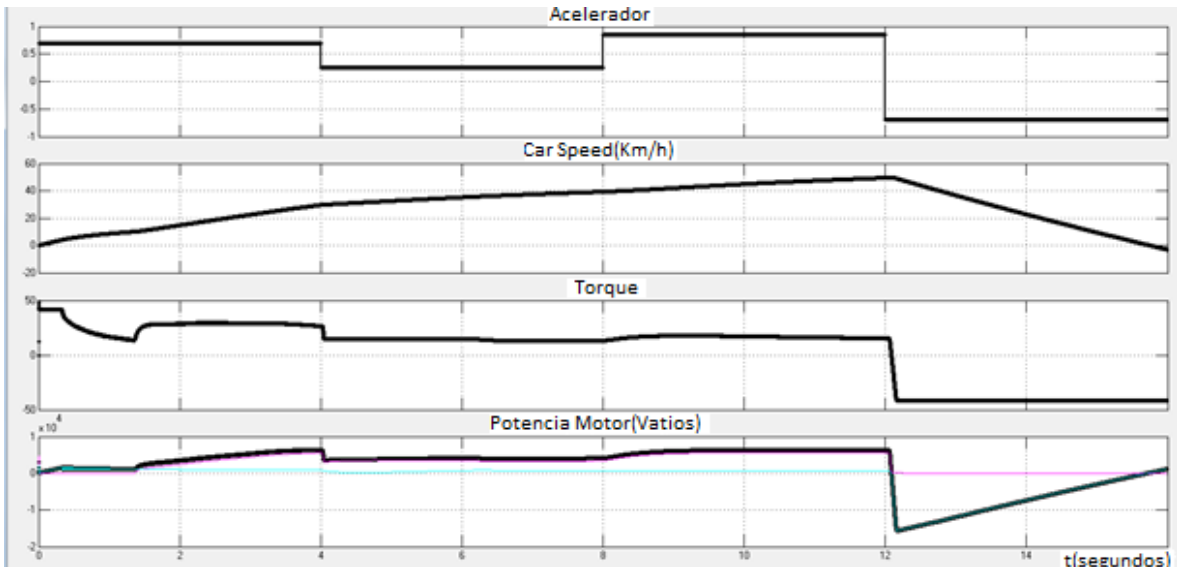


Figura5.4.1: Respuesta del motor

Hasta el momento, se ha realizado un estudio de dimensionamiento general, pero para poder ejecutar el modelo y poderlo implementar en la realidad hace falta hacer los estudios de detalle de cada uno de los campos que se han presentado en este proyecto. Como se ha ido comentando durante el transcurso de este documento, ha habido muchos campos que no se han estudiado en detalle, son precisamente cada uno de ellos los que se deben activar y llevar un estudio exhaustivo para tener todo el gran sistema que sería un kart eléctrico bajo control.

Los puntos destacados a desarrollar son:

- Estudio de detalle de seguridad de un kart eléctrico
- Estudio de detalle de la implementación del sistema eléctrico en un chasis determinado.

- Construcción e implementación del resultado global de cada estudio propuesto.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

1. Se analizó el funcionamiento y los componentes de un vehículo eléctrico para parametrizar y configurar el modelo del vehículo en MATLAB.
2. En el modelo global que representa al vehículo se identificaron 3 sistemas principales: sistema Generador de Energía, Sistema Eléctrico y Dinámica del Kart, todos ellos juntos facilitan la validación del emulador de carga.
3. Se desarrolló en MATLAB (simulink) un sistema de electrónica de potencia para emular de manera automática la demanda de potencia eléctrica de un vehículo tipo Karts operando en diverso escenarios de aplicación.
4. El desarrollo de esta plataforma hardware-software permite validar nuevas aplicaciones para las celdas de combustible como suministro de energía alternativo a los combustibles fósiles.

5. El desarrollo permitió generar una lista de dispositivos y equipos comerciales necesarios para una futura implementación del emulador de perfiles de carga, esta lista incluye las respectivas cotizaciones.
6. Los resultados de las simulaciones demuestran que las variaciones de velocidad y torque del vehículo en el periodo de arranque la batería entra a funcionar entregando energía al vehículo, lo cual era de esperar debido a que la celda de combustible tiene una respuesta lenta.
7. Para periodos de crucero y aceleraciones la celda de combustible cubre fácilmente las demandas de energía.
8. En periodos de frenado, se pudo comprobar que la celda de combustible deja de funcionar para dar paso a la batería, en este periodo la batería absorbe energía mediante el proceso de frenado regenerativo incorporado en el vehículo.
9. En las gráficas de las variables obtenidas del motor, como son: velocidad, torque, potencia, voltaje y corriente demuestran el óptimo rendimiento del mismo en los diferentes escenarios analizados.
10. Al incorporar tecnologías energéticas alternativas como sistema de propulsión del vehículo en lugar de los sistemas propulsores convencionales con combustibles fósiles, se aporta a la reducción de emisiones contaminantes a la atmósfera. De hecho, el kart eléctrico está

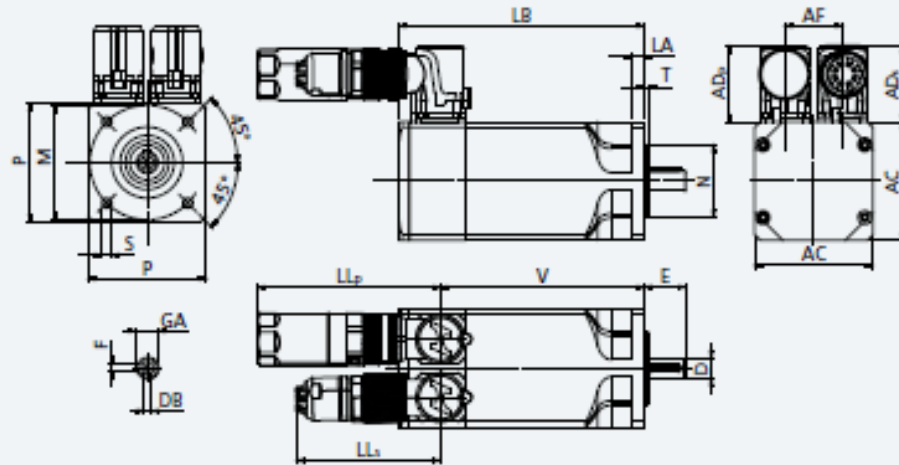
tomando gran impulso en el uso de las fuentes de energías limpias y renovables.

RECOMENDACIONES

1. Para evitar daños irreparables en los IGBT de potencia es recomendable hacer uso de disipadores de calor, ya que este al conmutar a altas frecuencias y al trabajar con corrientes elevadas tiende a calentarse.
2. Para obtener mayores parámetros a analizar será de utilidad usar una tarjeta de adquisición de datos con mayor número de entradas en la implementación del emulador de carga.

ANEXOS

Dimensiones (de BMD 118 a BMD 170)



Tipo	Eje				
	D	E	DB	GA (1)	F (1)
118	19	40	M6	21.5	6
	24	50	M8	27	8
	28	60	M10	31	8
145	19	40	M6	21.5	6
	24	50	M8	27	8
	28	60	M10	31	8
170	24	50	M8	27	8
	28	60	M10	31	8
	32	60	M12	35	10

Tipo	Brida					
	M	N	P	S	T	LA
118	130	95	118	9	3.5	10
	130	110	118	9	3.5	10
	165	130	145	11.5	3.5	10
145	165	130	145	11.5	3.5	12
170	165	130	170	11.5	3.5	12

Tipo	Motor										
	AC	LB _p	LB _s	LB ₁	LB ₂	AD _p	AD _s	AF	LL _p	LL _s	V
118	118	210	260	210	225	41.5	41.5	50	96	96	175
145	145	230	280	230	245	41.5	41.5	45	96	96	195
170	170	265	315	265	280	57.5	41.5	90	140	96	233

Notas:

(1) Está disponible una versión del motor con el eje sin chaveta.

LB, Longitud estándar del motor.

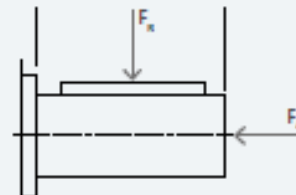
LB₁, Longitud del motor con freno o volante de inercia.

LB_p, Longitud del motor con encoder Hiperface (ENB3, ENB4).

LB_s, Longitud del motor con encoder EnDat (ENB1, ENB2).

Carga máxima en el eje

Motor	Velocidad min ⁻¹	Radial (F _r)	Axial (F _a)
		N	N
118	3000	820	165
145	3000	870	170
170	3000	1400	280

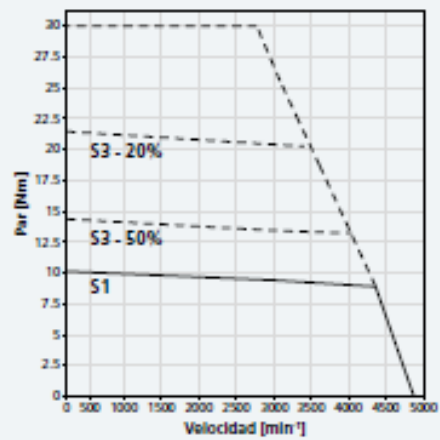


Datos técnicos de la serie BMD 400V

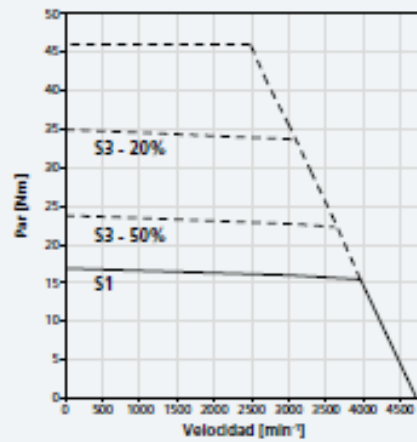
Parámetro	Símbolo	Unidad	Motor					
			65	82	102	118	145	170
Par a 0 rpm (dT=100K)	M_0	[Nm]	1.7	3.2	7.2	10.2	16.8	34
Velocidad nominal	n_n	[min ⁻¹]	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Tensión nominal de motor	V_n	[VAC]	311	315	311	305	308	315
Número de polos del motor	P_{mot}		8	8	8	8	8	8
Número de polos del resolver	P_{res}		2	2	2	2	2	2
Par nominal (dT=100K)	M_n	[Nm]	1.60	3.0	6.7	9.5	16	27.5
Corriente a velocidad nominal	I_n	[A]	1.33	2.50	5.4	7.9	12.5	18.6
Corriente a 0 rpm	I_0	[A]	1.35	2.60	5.5	8.0	13	23.3
Par máximo	M_{max}	[Nm]	4.9	8.5	21	30	46	90
Corriente máxima	I_{max}	[A]	4.6	8.9	20	28	50	70
Constante EMF	K_e	[W/1000min ⁻¹]	83	85	86	86	83	93
Par constante	K_T	[Nm/A]	1.26	1.25	1.31	1.28	1.29	1.46
Potencia nominal	P_n	[kW]	0.50	0.94	2.1	3.0	5.0	8.6
Resistencia estática entre fases (a 20°C)	R_{pp}	[Ω]	26.31	9.75	2.53	1.27	0.72	0.26
Inductancia estática entre fases	L_{pp}	[mH]	79.5	55.2	21.3	16.7	11.5	5.1
Inercia del rotor (sin freno)	J_n	[kgm ² x 10 ⁻²]	0.04	0.14	0.34	0.78	1.28	2.82
Constante eléctrica de tiempo (a 20°C)	τ_{el}	[ms]	3.0	5.7	8.4	13	16	20
Constante térmica de tiempo	τ_{therm}	[min]	20	26	31	34	36	50
Masa del motor sin freno	m_M	[kg]	1.9	3.5	5.8	9.7	15.2	25

Diagramas par / velocidad

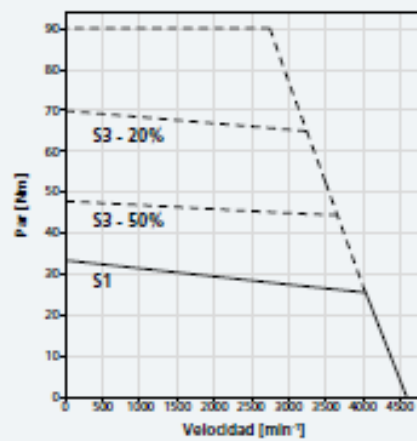
BMD 118



BMD 145



BMD 170



HGTG40N60B3

Absolute Maximum Ratings $T_C = 25^\circ\text{C}$, Unless Otherwise Specified

	HGTG40N60B3	UNITS
Collector to Emitter Voltage	600	V
Collector Current Continuous		
At $T_C = 25^\circ\text{C}$	70	A
At $T_C = 110^\circ\text{C}$	40	A
Collector Current Pulsed (Note 1)	330	A
Gate to Emitter Voltage Continuous	± 20	V
Gate to Emitter Voltage Pulsed	± 30	V
Switching Safe Operating Area at $T_J = 150^\circ\text{C}$, Figure 2	100A at 600V	SSOA
Power Dissipation Total at $T_C = 25^\circ\text{C}$	290	W
Power Dissipation Derating $T_C > 25^\circ\text{C}$	2.33	W/ $^\circ\text{C}$
Reverse Voltage Avalanche Energy	100	mJ
Operating and Storage Junction Temperature Range	-55 to 150	$^\circ\text{C}$
Maximum Lead Temperature for Soldering	260	$^\circ\text{C}$
Short Circuit Withstand Time (Note 2) at $V_{GE} = 15\text{V}$	2	μs
Short Circuit Withstand Time (Note 2) at $V_{GE} = 10\text{V}$	10	μs

CAUTION: Stresses above those listed in "Absolute Maximum Ratings" may cause permanent damage to the device. This is a stress only rating and operation of the device at these or any other conditions above those indicated in the operational sections of this specification is not implied.

NOTES:

- Pulse width limited by maximum junction temperature.
- $V_{CE(PK)} = 360\text{V}$, $T_J = 125^\circ\text{C}$, $R_G = 3\Omega$



Electrical Specifications $T_C = 25^\circ\text{C}$, Unless Otherwise Specified

PARAMETER	SYMBOL	TEST CONDITIONS	MIN	TYP	MAX	UNITS
Collector to Emitter Breakdown Voltage	BV_{CES}	$I_C = 250\mu\text{A}$, $V_{GE} = 0\text{V}$	600	-	-	V
Emitter to Collector Breakdown Voltage	BV_{ECS}	$I_C = -10\text{mA}$, $V_{GE} = 0\text{V}$	20	-	-	V
Collector to Emitter Leakage Current	I_{CES}	$V_{CE} = BV_{CES}$, $T_C = 25^\circ\text{C}$	-	-	100	μA
		$V_{CE} = BV_{CES}$, $T_C = 150^\circ\text{C}$	-	-	6.0	mA
Collector to Emitter Saturation Voltage	$V_{CE(SAT)}$	$I_C = I_{C110}$, $V_{GE} = 15\text{V}$, $T_C = 25^\circ\text{C}$	-	1.4	2.0	V
		$I_C = I_{C110}$, $V_{GE} = 15\text{V}$, $T_C = 150^\circ\text{C}$	-	1.5	2.3	V
Gate to Emitter Threshold Voltage	$V_{GE(TH)}$	$I_C = 250\mu\text{A}$, $V_{CE} = V_{GE}$	3.0	4.8	6.0	V
Gate to Emitter Leakage Current	I_{GES}	$V_{GE} = \pm 20\text{V}$	-	-	± 100	nA
Switching SOA	SSOA	$T_J = 150^\circ\text{C}$, $R_G = 3\Omega$, $V_{GE} = 15\text{V}$, $L = 100\mu\text{H}$, $V_{CE} = 480\text{V}$	200	-	-	A
		$T_J = 150^\circ\text{C}$, $R_G = 3\Omega$, $V_{GE} = 15\text{V}$, $L = 100\mu\text{H}$, $V_{CE} = 600\text{V}$	100	-	-	A
Gate to Emitter Plateau Voltage	V_{GEP}	$I_C = I_{C110}$, $V_{CE} = 0.5 BV_{CES}$	-	7.5	-	V
On-State Gate Charge	$Q_{G(ON)}$	$I_C = I_{C110}$, $V_{CE} = 0.5 BV_{CES}$, $V_{GE} = 15\text{V}$	-	250	330	nC
		$I_C = I_{C110}$, $V_{CE} = 0.5 BV_{CES}$, $V_{GE} = 20\text{V}$	-	335	435	nC
Current Turn-On Delay Time	$t_{d(ON)}$	IGBT and Diode Both at $T_J = 25^\circ\text{C}$ $I_{CE} = I_{C110}$ $V_{CE} = 0.8 BV_{CES}$ $V_{GE} = 15\text{V}$ $R_G = 3\Omega$ $L = 100\mu\text{H}$ Test Circuit (Figure 17)	-	47	-	ns
Current Rise Time	t_{ri}		-	35	-	ns
Current Turn-Off Delay Time	$t_{d(OFF)}$		-	170	200	ns
Current Fall Time	t_{fi}		-	50	100	ns
Turn-On Energy	E_{ON}		-	1050	1200	μJ
Turn-Off Energy (Note 1)	E_{OFF}	-	800	1400	μJ	

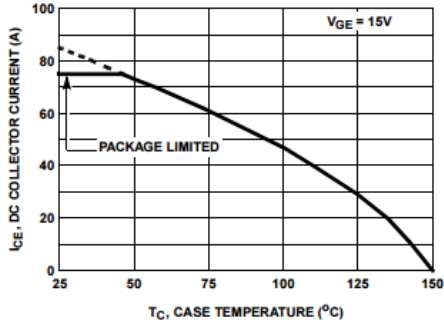


FIGURE 1. DC COLLECTOR CURRENT vs CASE TEMPERATURE

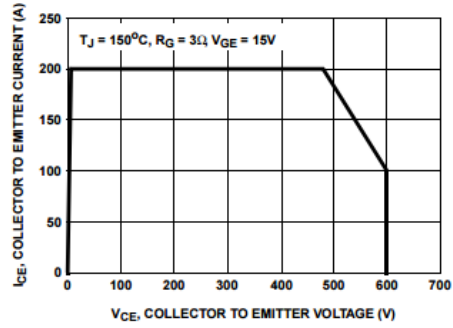


FIGURE 2. MINIMUM SWITCHING SAFE OPERATING AREA

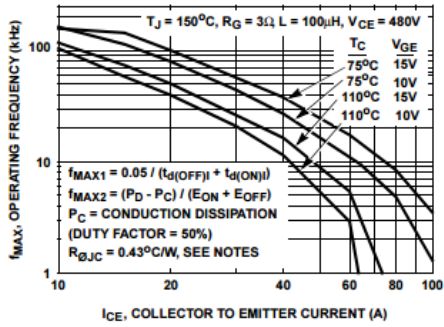


FIGURE 3. OPERATING FREQUENCY vs COLLECTOR TO EMITTER CURRENT

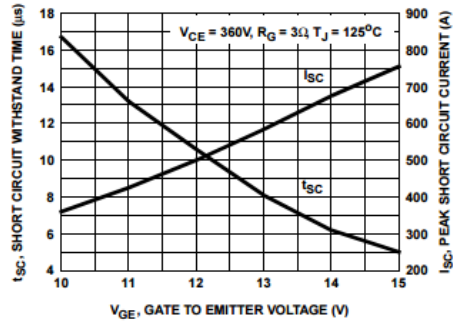


FIGURE 4. SHORT CIRCUIT WITHSTAND TIME

USER GUIDE AND SPECIFICATIONS

NI USB-6008/6009

Bus-Powered Multifunction DAQ USB Device

[Français](#) [Deutsch](#) [日本語](#) [한국어](#) [简体中文](#)
ni.com/manuals

This user guide describes how to use the National Instruments USB-6008 and National Instruments USB-6009 data acquisition (DAQ) devices and lists specifications.

The NI USB-6008/6009 provides connection to eight single-ended analog input (AI) channels, two analog output (AO) channels, 12 digital input/output (DIO) channels, and a 32-bit counter with a full-speed USB interface. Table 1 compares the devices.

Table 1. NI USB-6008 and NI USB-6009 Comparison

Feature	NI USB-6008	NI USB-6009
AI resolution	12 bits differential, 11 bits single-ended	14 bits differential, 13 bits single-ended
Maximum AI sample rate, single channel*	10 kS/s	48 kS/s
Maximum AI sample rate, multiple channels (aggregate)*	10 kS/s	48 kS/s
DIO configuration	Open collector†	Each channel individually programmable as open collector or active drive†

* System-dependent.

† This document uses NI-DAQmx naming conventions. Open-drain is called open collector and push-pull is called active drive.

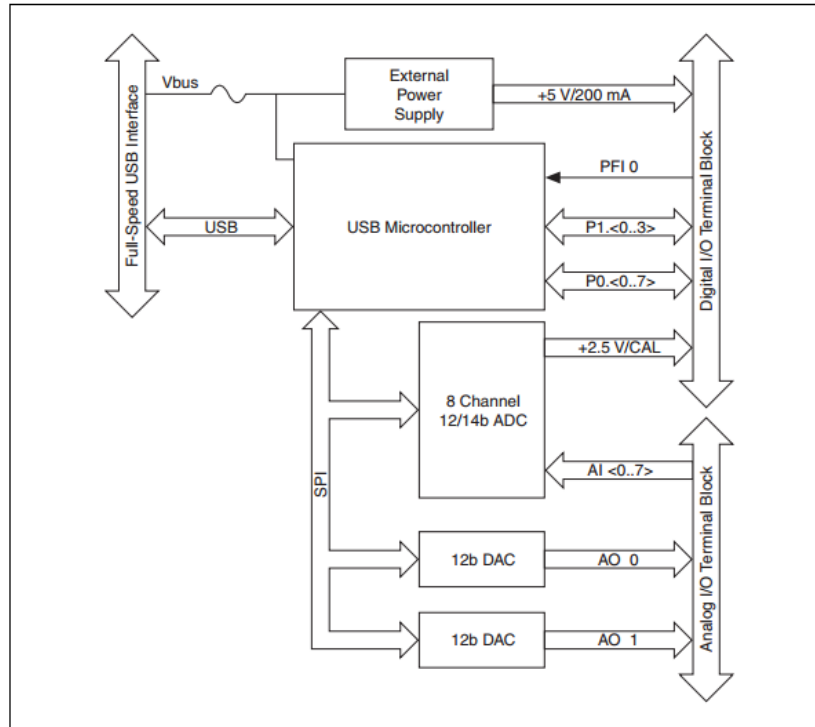


Figure 1. NI USB-6008/6009 Block Diagram

4. Affix the provided signal labels to the screw terminal connector plugs. You can choose labels with pin numbers, signal names, or blank labels, as shown in Figure 3. Choose one of the labels, align the correct label with the terminals printed on the top panel of your device and apply the label, as shown in Figure 2.

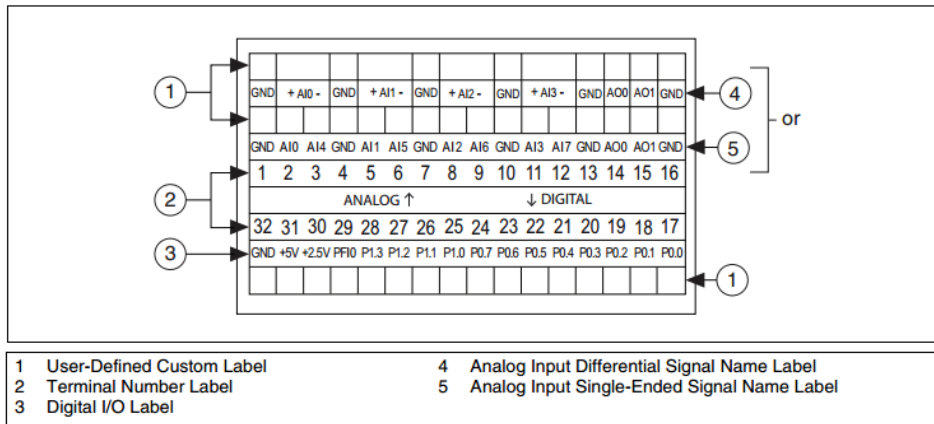


Table 5. Signal Descriptions

Signal Name	Reference	Direction	Description
GND	—	—	Ground —The reference point for the single-ended analog input measurements, analog output voltages, digital signals, +5 VDC supply, and +2.5 VDC at the I/O connector, and the bias current return point for differential mode measurements.
AI <0..7>	Varies	Input	Analog Input Channels 0 to 7 —For single-ended measurements, each signal is an analog input voltage channel. For differential measurements, AI 0 and AI 4 are the positive and negative inputs of differential analog input channel 0. The following signal pairs also form differential input channels: AI<1, 5>, AI<2, 6>, and AI<3, 7>. Refer to the <i>Analog Input</i> section for more information.
AO <0, 1>	GND	Output	Analog Output Channels 0 and 1 —Supplies the voltage output of AO channel 0 or AO channel 1. Refer to the <i>Analog Output</i> section for more information.
P0.<0..7>	GND	Input or Output	Port 0 Digital I/O Channels 0 to 7 —You can individually configure each signal as an input or output. Refer to the <i>Digital I/O</i> section for more information.
P1.<0..3>	GND	Input or Output	Port 1 Digital I/O Channels 0 to 3 —You can individually configure each signal as an input or output. Refer to the <i>Digital I/O</i> section for more information.
PFI 0	GND	Input	PFI 0 —This pin is configurable as either a digital trigger or an event counter input. Refer to the <i>PFI 0</i> section for more information.
+2.5 V	GND	Output	+2.5 V External Reference —Provides a reference for wrap-back testing. Refer to the <i>+2.5 V External Reference</i> section for more information.
+5 V	GND	Output	+5 V Power Source —Provides +5 V power up to 200 mA. Refer to the <i>+5 V Power Source</i> section for more information.

BIBLIOGRAFÍA

[1] Fuel Cells Modeling, Control, and Applications / Bei Gou, Woon Ki Na, Bill Diong; CRC Press, 2009.

[2] PEM Fuel Cell Electrocatalysts and Catalyst Layers: Fundamentals and Applications/ Jiujun Zhang; Springer Science & Business Media, 2008.

[3] Modeling and Control of Fuel Cells: Distributed Generation Applications / M. H. Nehrir, Mohammad Hashem Nehrir, C. Wang; John Wiley & Sons, 2009.

[4] Fuel Cell Engines / Matthew M. Mench; John Wiley & Sons, 2008.

[5] PEM Fuel Cell Modeling and Simulation Using Matlab / Colleen Spiegel; Academic Press, 2011.

[6] PEM Fuel Cells: Theory and Practice / Colleen Spiegel; Frano Barbir, Academic Press, 2013.

[7] www.fueleconomy.gov

[8] W. HANKACHE, S. CAUX, D. HISSEL, Real time Fuzzy Energy management of Fuel Cell and Ultracapacitor Powertrains. (2009).

[9] KAMPET, T. Report on Research and Development of Energy Technologies. IUPAP Working Group on Energy, 2004.

[10] GRAM, S. Sustainable Energy Catalogue for European Decision-makers. European Scientific Technological Options Assessment.

[11] LOVINS, A. Twenty Hydrogen Myths. Rocky Mountains Institute. 2003.

[12] BARBIR, F. PEM Fuel Cells, Theory and Practice. 1a edición. EEUU: 2005. 433 p. ISBN 0120781425.

[13] <http://www.ecologiahoy.com/emisiones-de-co2>

[14] <https://www.ipcc.ch/pdf/technical-papers/climate-changes-biodiversity-sp.pdf>

[15] www.teinteresa.es/motor/hidrogeno-vehiculos_0_1163885660.html

[16]

<http://www.madrimasd.org/informacionIdi/analisis/analisis/analisis.asp?id=21616>