

# Propulsión del Segway RMP 200 mediante pilas de combustible tipo PEM

E. Asunción, E. Castañeda, A. Husar \*

IRI, CSIC-Univ. Politecnica de Catalunya  
Llorens I Artigas 4-6, 08028 – Barcelona (Spain)  
(\* ) corresponding author: [ahusar@iri.upc.edu](mailto:ahusar@iri.upc.edu)

Keywords: Hydrogen, Fuel Cells, Segway, Metal Hydride, System integration

## 1 Introducción

Utilizando las últimas innovaciones en las tecnologías de pilas de combustible y en el de almacenamiento de hidrogeno disponibles en el mercado, en este trabajo se pretende equiparar las prestaciones de un prototipo a las de un robot autónomo basado en la plataforma Segway RMP200. Mediante la utilización de pilas PEM el sistema pretende satisfacer las actuales prestaciones que ofrecen las baterías del vehículo Segway y proporcionar diferentes niveles de alimentación a los dispositivos del robot (230VAC para PCs, 24VDC y 12VD para sensores y motores, 5VDC), los cuales son equiparables a los consumos de la propulsión del robot.

Las fases del trabajo realizado son:

- Caracterización de la alimentación
- Diseño del sistema de alimentación
- Implementación del prototipo
- Experimentación en el laboratorio
- Diseño final
- Experimentación en el vehículo autónoma

## 2 Caracterización y especificaciones de la alimentación del Segway RMP200

Basandonos en la consecución de un sistema de alimentación sustitutivo se hace fundamental estudiar primero el QUE y POR QUE el segway equipa un sistema formado por dos baterías de NiMH con sus especificaciones particulares.

Tras el desmontaje e inspección podemos constatar los elementos presentes en el Segway (disposición de los acelerómetros, colocación de los motores, placas de control, etc). El Segway mantiene una distribución simétrica (duplicidad) que hace las funciones de un sistema redundante. Por lo que se hace necesaria la adopción de dicho esquema dadas las características de un vehículo de transporte sujeto a fallos y en el que la seguridad y robustez deben estar aseguradas.

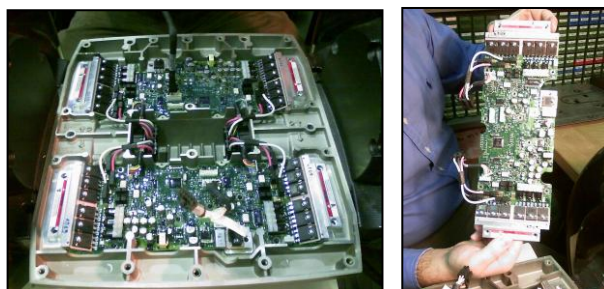


Fig.1 y 2: Detalles de la distribución de los componentes y la placa de control.

### 2.1 Especificaciones de las Baterías.

El Segway RMP200 usa dos baterías de NiMH, diseñadas en colaboración con SAFT (división de Alcatel), funcionando a un nominal de 72 voltios (2 x 36 V).

- El proceso de carga de las 60 celdas se realiza en serie. El circuito de carga está basado en el Microchip PIC 16F876
- La fuente de alimentación proporcionan una potencia de 600mah por batería
- En plena carga el consumo eléctrico se establece cerca de los 120Watts
- En modo de carga lento el consumo oscila en pulsos de entre 10 y 20watts
- El consumo global está entorno a 0,8kw-h en un ciclo de carga de 12 horas

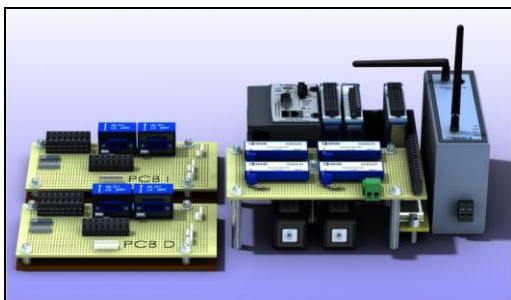
Fuente: <http://www.spinfoot.com/SegwayBatteryFAQ.htm>

### 2.2 Adquisición de Datos.

El siguiente paso es conocer e ilustrar con el mayor detalle el carácter dinámico y la respuesta una vez el equipo se encuentra en funcionamiento. Se evidencia la necesidad de realizar un equipo de medición hasta cierto punto complejo. El sistema finalmente implementado cumple con un conjunto de requisitos:

- Equipo versátil y compacto
- Registro de Datos a Distancia
- Registro de Datos en Tiempo Real
- Visualización de Muestras a Tiempo Real

- Resolución y precisión adecuadas



**Fig.3:** Adquisición de datos: NI Compact RIO 9012, NI WAP 3711, NI 9203, NI 9205, AD202JN, HAS50S, RE-COMRP202415DFW, ENIX Lion15V.

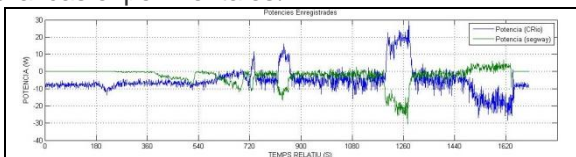
Variables utilizadas	Batería 1:	Batería 2:
Dos señales de Intensidad	(I11 e I12)	(ID1 e ID2)
Dos señales de Tensión	(TI1 y TI2)	(TD1 y TD2)
<b>Variables secundarias:</b> Su necesidad es ilustrar el entorno y referenciar el momento y duración del experimento.		
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Velocidad de Desplazamiento</li> <li>• Torque Aplicado en la Rueda 1</li> <li>• Torque Aplicado en la Rueda 2</li> <li>• Pendiente de Ascensión/Descenso</li> <li>• Inclinación Segway RMP-200(Yaw)</li> </ul>		
*Datos obtenidos gracias a la colaboración del equipo URUS		

### 2.2.1 Pruebas de consumo del Segway.

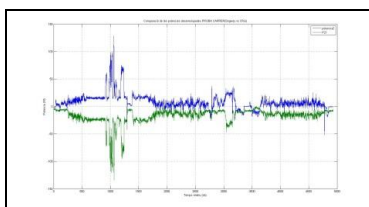
Tal y como hemos comentado anteriormente, las mediciones realizadas en el segway RMP-200 nos deben configurar estados estacionarios y transitorios. Para ello se define un plan de test:

- Consumo en reposo
- Consumo en marcha a velocidad constante (POTENCIA CONSUMIDA CONSTANTE)
- Transitorios de aceleración y frenado (PICOS DE POTENCIA MÁXIMA CONSUMIDA)
- Velocidad máxima constante (POTENCIA MÁXIMA CONSTANTE)
- Situaciones variables derivadas de la acción de una fuerza externa

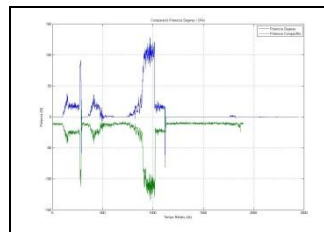
Graficas experimentales:



**Fig.4:** Prueba N°1: Desplazamiento en modo tractor.



**Fig.5:** Prueba N°2: Desplazamiento en modo tractor.



**Fig.6:** Prueba N°3: Desplazamiento en modo tractor a velocidad de 2m/s.

En las gráficas se observan tanto el umbral de consumo en reposo así como el estabilizado en velocidad constante y los distintos transitorios asociados tanto a aceleraciones como deceleraciones. La sincronización de los datos se realizará posteriormente mediante Matlab.

### 2.2.2 Estudio de los perfiles de carga:

Una vez estudiados los distintos diagramas podemos estimar los Consumos del segway: Configuración de Máximos:

- Electrónica del segway: 60 Watts
- Potencia de Tracción: 120 Watts + Perdidas Rend. Motor (Aprox.  $n = 0.95$ ) + Electrónica Motor (Aprox.  $n = 0.90$ ) = 140 Watts
- Potencia TOTAL: Electronica del segway + Potencia de Tracción = 200 Watts

Datos de interés:
1. Consumo remanente: 60 Watts (reducidos a la electrónica)
2. Desplazamiento a velocidad constante en subida(velocidad 1m/s i pendiente media aprox: 4.25%): 100 Wattios
3. Consumo máximo (Para velocidad de 1m/s i bloqueando el desplazamiento): 250 Watts.
4. Desplazamiento a velocidad constante en plano(2m/s): 100 Watts

Mediciones realizadas en el modo Tractor.

El sistema esta provisto de ciclo regenerativo.

Para realizar el estudio fue necesario realizar un negativo del connector de potencia Ref:293-0064-00100D-0527 Mediante las herramientas de rapid prototyping.

## 3 Diseño del Sistema de Alimentación con PEM

### 3.1 Pre-diseño del sistema de alimentación

Debido a la complejidad de la conexión entre las baterías y el sistema de control del segway, generada por los puertos de comunicación de datos existentes (temperatura y estado de carga de las celdas), se plantea abordar el proyecto mediante la siguiente configuración:

- Alimentación del segway con pilas de Hidrógeno mediante la entrada AC de carga de la batería, manteniendo las actuales baterías

Por lo que el diseño da lugar a un sistema híbrido a modo de "range extender".

Finalmente a los consumos obtenidos en los estudios de los perfiles de carga, se sumaran la alimentación que necesitan las unidades robotizadas del equipo.

Así pues, el sistema de alimentación queda determinado por la utilización de dos pilas H-300, con una potencia instalada total de 600Watts. Con las siguientes salidas de potencia de AC (up to 600W), de DC12V (up to 100W) y de DC24V (up to 100W).

### 3.2 Experimentación en el Laboratorio

Una vez dispuestas en el laboratorio las pilas HORIZON H-300, se procede a realizar las pruebas de comportamiento frente a una carga programable. La carga receptora en continua está parametrizada en tiempo real mediante el sistema de adquisición de datos vía Wifi de National Instruments.

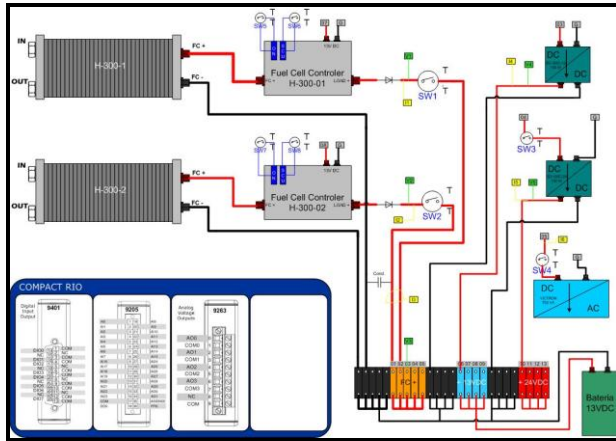


Fig.7: Esquema y disposición de los distintos componentes en la fase de compatibilidad eléctrica

En las gráficas adjuntas se muestra el comportamiento y zonas de características de funcionamiento de las pilas de combustible PEM. Se observaron también particularidades del proceso de purga de hidrogeno, en las que pese a mantener la misma frecuencia entre purga y purga la duración de las mismas es variable. Esta se prolonga en a bajas potencias y se acorta a medida que se aumenta la solicitud.

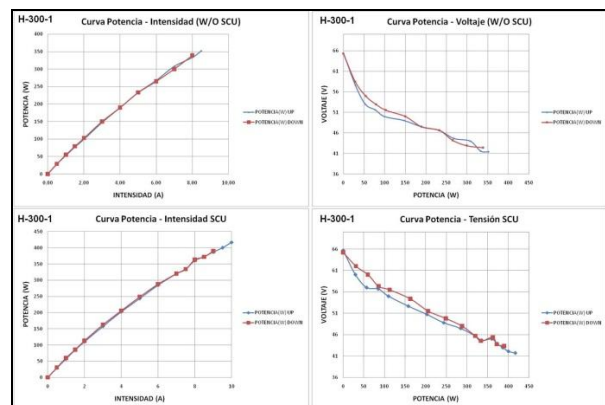


Fig.8: Gráficas del ciclo completo (Open Circuit - MaxOutput - Open Circuit) para SCU desactivado y activado.

Otro fenómeno de gran interés es el efecto Short Circuit (SCU). Para las pilas H-300 de HORIZON existe la posibilidad mediante un interruptor de habilitar o deshabilitar su uso. Las gráficas evidencian un aumento de la potencia proporcionada para los mismos rangos de tensión si dejamos el interruptor cerrado.

### 3.3 Implementación del prototipo de Alimentación.

El funcionamiento de la pila de combustible se caracteriza por una curva de polarización, es decir, la tensión e intensidad prosiguen curvas con tendencias opuestas. Así en vacío (OPEN CIRCUIT), mientras la intensidad es nula la tensión se mantiene estable entorno de los 65V. Al incrementar la carga aplicada en bornes de la pila la intensidad incrementa al tiempo que la tensión disminuye. Todo ello delimita unos rangos de tensión-intensidad que nos son imprescindibles para realizar el diseño del sistema de potencia.

- El primer punto y fundamental hace referencia a la necesidad de adecuar la tensión de salida
- El segundo punto es tener claro las cargas que alimentaremos ya sean de continua o alterna
- También resulta imprescindible dimensionar el consumo total, así como las cargas parciales máximas

En el estudio de parametrización se delimitaron las distintas franjas útiles delimitadas por dos variables: Tensión de entrada y potencia de salida. A continuación se muestra la tabla con los resultados obtenidos.

TENSIÓN [V]	INVERSOR DC/AC (230V)	INVERSOR DC/DC (12V)	INVERSOR DC/DC (24V)	SEGWAY	FUEL CELL	APROX. POWER
E6	OFF	OFF	OFF	OFF	ON	OPEN CIRCUIT
62.5	ON	ON	ON	ON	ON	60
56.5	ON	ON	ON	ON	ON	60+
44	ON	ON	ON	ON	ON	75%
42.1	ON	ON	ON	ON	ON	90%
41.9	OFF	ON	ON	OFF	ON	950
						650-!!!

Fig.9: Tabla con los distintos rangos de utilización de los componentes. Escala de restricciones.

Del estudio identificamos como el elemento sensible y restrictivo es el inversor DC/AC. El funcionamiento del inversor se caracteriza por mantener un nivel de tensión con amplitud contenida, mientras que en el caso de la intensidad sufre un más que notable ríppel. Este ríppel de frecuencia 100Hz aumenta su amplitud conforme se demanda mayor potencia en la salida (amplitud ríppel a plena carga de 5A).

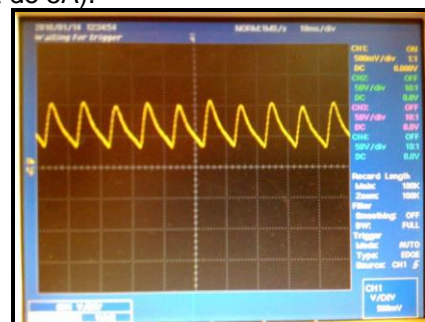


Fig.10: En pantalla se muestran tanto el ríppel de la tensión (color rojo), como el de la intensidad (color amarillo). Ambos están dentro del margen de respuesta de nuestras pilas H-300. Tampoco significan un problema

#### 4 Diseño disipador para las bombonas MH

El objetivo del disipador es básico por varios motivos:

- Aumentar la eficiencia del sistema global, utilizando el aire caliente procedente de la pila
- Servir de plataforma firme de apoyo para la colocación de las bombonas MH-20
- Aumentar la eficiencia del proceso de carga
- Formar una unidad modular accesible y removable

El proceso de descarga de un módulo de almacenamiento de las características Metal hydride implica la absorción de energía. El flujo de salida implica un proceso endotérmico en el cual la bombona se enfría. Esto tiene implicaciones directas sobre el funcionamiento y rendimiento de las mismas. Las bombonas vienen caracterizadas por un flujo nominal a temperatura ambiente. Este flujo es dependiente de la temperatura, de manera que a mayores temperaturas podemos obtener mayores caudales y se restringe el flujo en disminuir la temperatura de la bombona.

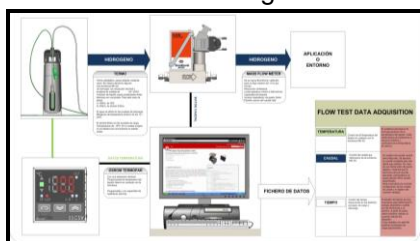
Para cada Pila PEM del sistema, cuya potencia nominal es de 300 Watts, el flujo aproximado es de 4ln/minuto de Hidrogeno. El sistema de acumuladores de Hidrogeno está dotado de 20 bombonas MH por pila. Estas a su vez tienen un flujo nominal a temperatura ambiente (25°C) de 0.2ln/minuto.

*Como vemos el diseño de acumulación está optimizado para poder aportar el flujo necesario a la pila de combustible en regimen nominal y temperatura ambiente.*

El propio funcionamiento de la pila puede implicar que pese estar en condiciones de temperatura ambiente, 25°C, la convección de la pila con el entorno no sea suficiente. Este desequilibrio provocará la disminución de la temperatura de la bombona, que acarrará la disminución del caudal disponible, entrando el sistema en una zona de riesgo si se solicitan potencias elevadas.

El equipo de alimentación diseñado debía poder trabajar a temperaturas inferiores a la temperatura ambiente descrita. Por tanto el problema de la restricción de flujo a temperatura ambiente debe quedar resuelto.

El problema reside en el cálculo de dicho disipador. En vista de la problemática se ha optado por implementar un sistema de experimentación que nos ha permitido evaluar y cuantificar los valores de potencia que debemos aportar para mantener el sistema en condiciones de seguridad.



**Fig.10:** Sistema de medición para el cálculo de la potencia absorbida y disipada por litro nominal y minuto.

#### 5 Diseño final

Dado que no podemos acceder o sustituir la electrónica de comunicación entre el Segway y sus baterías, procederemos conforme a lo siguiente.

- Mantendremos el sistema de baterías.
- Introduciremos la alimentación externa vía el cargador provisto en el RMP-200

Finalmente se cumple el objetivo paralelo de gran importancia que supone la sustitución del sistema de baterías del cual se alimentan los dispositivos, equipos e instrumentación. Entre estos equipos se encuentran diversos Pan&Tilt, sensores Láser, una Pantalla Táctil, diversos Laptop, etc. Con ese objetivo se establecen:

- Un Inversor de corriente DC-AC. Punto de carga para los portátiles o diferentes aplicaciones que requieran de alimentación AC
- Un convertidor de corriente DC-DC 24V. Dado que la mayoría de componentes electronicos de los cuales están provistos, requieren de corriente continua a 24V, se establece un único convertidor con una potencia nominal de 100Watt
- Un convertidor de corriente DC-DC 12V. Si bien este convertidor tiene como misión fundamental alimentar los controladores de la pilas PEM H-300, existe un concepto de sobredimensión sobre los mismos. Esto permite que se pueda disponer de una salida a 12V para pequeños consumos
- La potencia final instalada es de 600Watt. A su vez un sistema protector mediante un controlador embebido con respuesta inteligente ante el comportamiento del sistema (Activación de SCU, parada de convertidor programada,etc)

Fijada una autonomía mínima de 1hora y 30 minutos se diseñaba el sistema de acumulación con dicha capacidad. El resultado era una configuración de 40 bombonas MH-20 para una capacidad total de 800ln. Finalment obtenemos una autonomía mínima de 1hora y 40minutos a plena carga y 3horas en configuración estándar.



**Fig.11:** Diseño Final de la pila H-300 W\_MHHeat

#### 6 Reconocimientos

El proyecto se ha llevado a cavo en el laboratorio de pilas de combustible del IRI, con la colaboración del CSIC y la UPC. Subvencionado con el proyecto CICYT DPI2010-15274 del Gobierno de España.