

# Kart de Hidrógeno Formula Zero

Marcos Rupérez Cerqueda

29 de marzo de 2010

## **Resumen**

Formula Zero es una competición internacional de automovilismo basada en coches de hidrógeno (Pila de combustible). Un equipo, liderado por la "Fundación para el desarrollo de las nuevas tecnologías del hidrógeno en Aragón" se formó para participar en dicha competición. Se realizó un testeo de todos y cada uno de los equipos presentes en el kart (Pila de combustible, condensadores, DC/DC, demanda de energía...) de manera que se tuvieran bien caracterizados, conociendo su funcionamiento y respuesta. Los datos obtenidos en los test son utilizados para construir modelos de cada uno de los equipos en matlab simulink. El modelo global del coche se ha utilizado con el fin de diseñar el mejor control del sistema de potencia. Se simulan diferentes configuraciones de interconexión entre los bloques buscando la que mejores resultados obtenga. Finalmente la configuración seleccionada es implementada en el kart de hidrógeno y testada en circuito para un mejor ajuste de sus sistemas. Esta configuración del kart será la que finalmente competirá durante la próxima temporada.

# Índice general

<b>1. Marco, Objetivos y motivación</b>	<b>4</b>
1.1. Introducción . . . . .	4
1.2. Motivación y Estructura del proyecto . . . . .	5
1.3. Objetivos . . . . .	6
<b>2. Caracterización de los equipos</b>	<b>7</b>
2.1. introducción . . . . .	7
2.2. Célula de combustible . . . . .	7
2.2.1. Caracterización de la curva de polarización . . . . .	7
2.2.2. Caracterización Dinámica . . . . .	9
2.3. Step up . . . . .	11
2.4. Super condensadores . . . . .	13
2.4.1. Resistencia serie . . . . .	13
2.4.2. Resistencia Paralelo . . . . .	15
2.5. Test de funcionamiento conjunto . . . . .	16
2.6. Test sobre el terreno ( Circuito) . . . . .	18
2.7. Conclusión . . . . .	20
<b>3. Simulaciones</b>	<b>22</b>
3.1. Introducción . . . . .	22
3.2. Bloques de la simulación . . . . .	22
3.2.1. Pila de combustible . . . . .	23
3.2.2. Supercondensadores . . . . .	25
3.2.3. Step Up . . . . .	25
3.2.4. Dinámica del vehículo y controles . . . . .	26
3.3. Conexionado general de los bloques y configuraciones de potencia . . . . .	28
3.4. Simulación del trazado . . . . .	29
3.5. Escenarios de simulación . . . . .	30
3.5.1. Escenario 1 . . . . .	32
3.5.2. Escenario 2 y 3 . . . . .	33
3.6. Resultados . . . . .	34
3.6.1. Escenario 1 . . . . .	34
3.6.2. Escenario 2 . . . . .	35
3.6.3. Escenario 3 . . . . .	38
3.7. Conclusiones . . . . .	40
<b>4. Conclusiones</b>	<b>42</b>
<b>5. Continuación del trabajo</b>	<b>44</b>
<b>6. Figuras, Tablas y bibliografía</b>	<b>45</b>

<b>A. Data sheets</b>	<b>50</b>
A.1. Fuel cell . . . . .	50
A.2. Super Capacitors . . . . .	54
A.3. Step Up . . . . .	60
A.4. Motors . . . . .	62
<b>B. Formula Zero Championship</b>	<b>65</b>
B.1. Introduction . . . . .	65
B.2. The race . . . . .	66
B.3. The technical rules . . . . .	67
B.4. Our team . . . . .	68
<b>C. Car configuration</b>	<b>69</b>
C.1. General energy configuration . . . . .	69
C.2. Fuel Cell . . . . .	70
C.2.1. Life line . . . . .	72
C.3. Motors and Controllers . . . . .	73
C.4. DC/DC converter (Step Up) . . . . .	74
C.5. Capacitors . . . . .	75
C.6. Chassis and mechanical parts . . . . .	76
<b>D. Pressure Box</b>	<b>78</b>

# Nomenclatura

BUS CAN Es un protocolo digital de comunicación

C Capacidad ( condensador) se mide en Faradios

Carga Se denomina carga a la potencia demandada por los motores electricos. La potencia necesaria para impulsar el kart en cada momento.

Cruce de voltajes en el step-up Situacion que se produce cuando el voltaje a la salida del step-up es menos que a la entrada. En esta situación se pierde el control de la limitación de corriente del step-up

DC/DC Circuito de corriente continua que eleva o disminuye la tensión ( equivalente a un transformador en alterna)

FC Fuel Cell (Pila de combustible)

FHA Fundación Para el Desarrollo de las Nuevas Tecnologías del Hidrógeno en Aragón

K Constante proporcional de un controlador PI

Ki Constante integral de un controlador PI

PEM Polimer Electrolyte Membrane ( Membrana de electrolito polimérico)

PI Controlador Proporcional Integral

Rp Resistencia de autodescarga o paralelo (supercondensadores)

Rs Resistencia en serie al supercondensador

SPS Sim Power Systems. Libreria que emula circuitos electricos dentro de un entorno de señales simulink. Interactua con señales de simulink convencionales.

Step-Up (Boost) Circuito DC/DC que eleva el voltaje de una corriente continua. Dispone de un PWM.

V Voltaje

Vc Voltaje Instantaneo

Vo Voltaje inicial antes de descarga

ESS Energy Storage System ( Sistema de almacenamiento de energia)

FIA Federation Internationale de l'Automobile

SME Small and Medium Size Enterprise (Pequeña y mediana empresa)

# Capítulo 1

## Marco, Objetivos y motivación

### 1.1. Introducción

El sector energético mundial esta evolucionando rápidamente. La principal motivación para este rápido avance es la reducción de las reservas de petróleo mundiales, lo que conlleva el incremento del precio de los principales combustibles fósiles. Este problema promueve la búsqueda de nuevas fuentes de energía que aseguren el abastecimiento en un futuro.

Otro importante factor que promueve el cambio son las emisiones de efecto invernadero. La mayor parte de la energía proviene de combustibles que arrojan ingentes cantidades de CO<sub>2</sub> a la atmósfera que provocan el calentamiento global del planeta. Otro de los grandes objetivos de las nuevas fuentes de energía es la reducción de estas emisiones.

A nivel local se presenta el problema de la no homogénea distribución mundial de los combustibles fósiles. La mayor parte de los países abogan por una menor dependencia externa de su sistema energético. Estas nuevas fuentes de energía acercan el idilio de que cada red energética se auto abastezca de sus propios recursos territoriales.

Respecto al uso de combustibles fósiles, la tendencia es a incrementar la eficiencia de la producción de energía. Lo cual implica un mejor aprovechamiento del combustible, emitiendo menos cantidad de CO<sub>2</sub>, reduciendo la dependencia energética de los países.

La clara alternativa son las energías renovables, que no emiten CO<sub>2</sub> en la producción. Pues se obtienen de recursos no fósiles. La mayor parte de las energías renovables son estacionarias ( Viento, energía solar, hidráulica,.....) y de producción aleatoria, ( no producen cuando se requiere, sino cuando se dispone de ellas...). Por tanto es necesaria una vía de almacenamiento energético a gran escala que disponer de energía en épocas no productivas o de producción inferior a la demanda. También es necesario almacenamiento energético si se quieren utilizar dichas energías renovables en aplicaciones móviles.

De ahí la virtud del hidrógeno como vector energético, pues puede producirse, almacenarse y ser utilizado cuando y de donde sea necesaria la energía, tanto en aplicaciones móviles como estacionarias, regulando de esta manera las fuentes de energía renovables y potenciando así su uso generalizado [14, 15].

El hidrógeno como vector energético tiene el problema del alto precio de sus equipos. Este precio es debido su baja producción industrial y un necesario proceso de adaptación en la sociedad. Los obstáculos a salvar para la evolución de la economía del hidrógeno pasan por una difusión social de la tecnología para conseguir una posterior aceptación de la misma.

Formula Zero es una competición mundial de karts basados en hidrógeno con pila de combustible, que tiene como objetivo la promoción e incentivación del desarrollo de este tipo de vehículos. La base de este 'proyecto es la mejora mediante la simulación y experimentación del prototipo de kart Formula Zero desarrollado por la Fundación Hidrógeno Aragón..

## 1.2. Motivación y Estructura del proyecto

Este proyecto fin de carrera se enmarca dentro del proyecto Formula Zero de la Fundación para el Desarrollo de las Nuevas Tecnologías del Hidrógeno en Aragón (FHA)[3]. El proyecto general de la FHA consiste en la realización de un kart de hidrógeno basado en pila de combustible y competir en el torneo Internacional Formula Zero. La explicación de la normativa y fundamentos de Formula Zero puede ser consultada en el apéndice B.2.

Al comienzo de este proyecto de fin de carrera se plantea el reto de una nueva temporada de carreras y su correspondiente necesidad de mejora del kart. El principal punto de competitividad es lograr una gestión adecuada de la energía. De manera que el coche reciba la potencia idónea en los momentos mas adecuados para conseguir un menor tiempo en la vuelta. Por tanto en este proyecto se parte de unos elementos del vehículo conocidos y se quiere optimizar la gestión de la energía. (Los sistemas y elementos de los que se compone el kart y sus características están explicados en el apéndice C)

El proyecto se estructura en 4 partes fundamentales:

1. Caracterización de los equipos: Los equipos son sometidos a diferentes test, para conocer de manera exacta su funcionamiento así como las leyes por las cuales se rige su comportamiento. El objetivo final de esta fase es obtener todas las características de los equipos
2. Creación de modelos: En base al paso anterior, se obtienen ecuaciones físicas para cada equipo. Y se implementa un bloque en matlab simulink con las ecuaciones de cada uno de ellos. También se crea un modelo de la demanda de energía de los motores, basada en datos mecánicos aportados por expertos mecánicos del equipo de competición Team Elias[7]. Y un modelo del circuito, que sera modificado para adaptarlo al trazado de cada competición.
3. Creación de escenarios/Simulación: Una vez han sido construidos los bloques que representan cada equipo, se crean 2 configuraciones diferentes de conexión entre ellos. Cada configuración se correspondería con una configuración diferente en el kart real.

a) Paralelo:

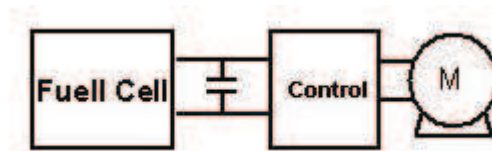


Figure 1.1: Configuración con condensador en paralelo

Un pack de supercondensadores se conecta en paralelo a los bornes de la pila de combustible. y este se conecta directamente a las controladoras de los motores

b) Step-up



Figura 1.2: Configuración con step-up

Se conecta un circuito DC/DC tipo step-up que eleva la tensión de la pila a 72V y esta se aplica al pack de condensadores.

Paralelamente se crean dos controles diferentes para el modelo de demanda de energía. Dichos controles implementan diferentes modos de gestión de la energía a lo largo del trazado.

Finalmente se crean combinaciones de los 2 controles con las 2 configuraciones, a cada una de estas configuraciones se les llama escenarios de simulación.

4. Selección del control óptimo: Se establece como criterio de selección el tiempo de vuelta al circuito y se simulan cada uno de los escenarios de simulación planteados.

Con el resultado de este proceso se obtiene cual de las configuraciones creadas sería la mejor para ser implementada en el kart. Y que control de los creados debería ser implementado en ella.

### 1.3. Objetivos

- Experimentar los equipos en busca de posibles fallos de funcionamiento..
- Conocer en profundidad del funcionamiento de los elementos/equipos que componen el kart.
- Implementar un modelo veraz y acorde con la realidad para cada equipo, que a su vez pueda ser utilizado en el futuro para testeo de nuevas ideas de mejora.
- Crear configuraciones del tren de potencia que cumplan con los requisitos de la competición
- Crear métodos de gestión de la energía (controles) que supongan una mejora competitiva en las carreras.
- Obtener finalmente una configuración mejorada del kart. Contrastada con las simulaciones realizadas



## Capítulo 2

# Caracterización de los equipos

### 2.1. introducción

En primer lugar ,cada uno de los equipos es caracterizado por separado. Definiendo así las ecuaciones por las que se rige su funcionamiento. También se realiza un ensayo de todos los elementos conectados en una configuración similar al coche, de esta manera se asegura que el funcionamiento es similar tanto por separado como en conjunto.

Los principales objetivos de los experimentos son:

- Asegurar que todos los elementos funcionan correctamente antes de su montaje en el coche
- Caracterizar cualitativa y cuantitativamente los elementos
- Buscar los limites de estabilidad y operación de cada elemento
- Chequear que los elementos funcionan de manera similar al estar conectados he influenciados entre si.

El conocimiento adquirido de los elementos sera utilizado para crear los bloques de la simulación (capitulo 3).De esta manera se consigue que la simulación sea lo mas cercana a la realidad fisica posible.

### 2.2. Célula de combustible

La célula de combustible viene caracterizada por el fabricante mediante su curva de polarización (apéndice A). Al tratarse este caso de un coche de competición, se deben explorar los limites de funcionamiento en experimentos reales. Los principales objetivos del testeo de la pila son:

- Chequear el correcto funcionamiento, ( la pila lleva mucho tiempo sin ponerse en marcha)
- Conocer la curva de polarización real (algo diferente a la de las especificaciones técnicas)
- Conocer los limites de estabilidad en los que se puede operar
- Conocer la dinámica de la pila, ya que esta no es especificada en el la hoja de especificaciones.

Para lograr estos objetivos se realizan 2 experimentos, uno estático con el que se consigue la respuesta estacionaria y otro dinámico con el que se consigue la respuesta transitoria.

#### 2.2.1. Caracterización de la curva de polarización

El experimento consiste en extraer potencia de la pila a diferentes corrientes midiendo el voltaje. Así se obtienen los diferentes puntos de operación (Voltaje , Corriente) que forman la curva de polarización. Se utiliza una carga electrónica programable para de mandar bajas corrientes (0-30A) y dos motores eléctricos para demandar altas corrientes.

Para la primera parte del experimento la pila de combustible es conectada directamente a una carga variable electrónica controlada por ordenador (ZSAC 5kW Electrónica AC Load). La carga tiene una corriente máxima de trabajo de 30A. La carga puede ser controlada por corriente o por impedancia, en este caso es controlada por corriente.

La carga es configurada de manera que someta a la pila a una rampa de corriente lenta entre 0 y 30 A. Dicha rampa debe ser lo suficientemente lenta para que cada punto de la rampa pueda ser considerado como un punto estacionario de trabajo. Durante el experimento la carga guarda datos de voltaje y corriente cada 0.1 segundo en una base de datos, de esta manera los datos pueden ser analizados (figura 2.1).

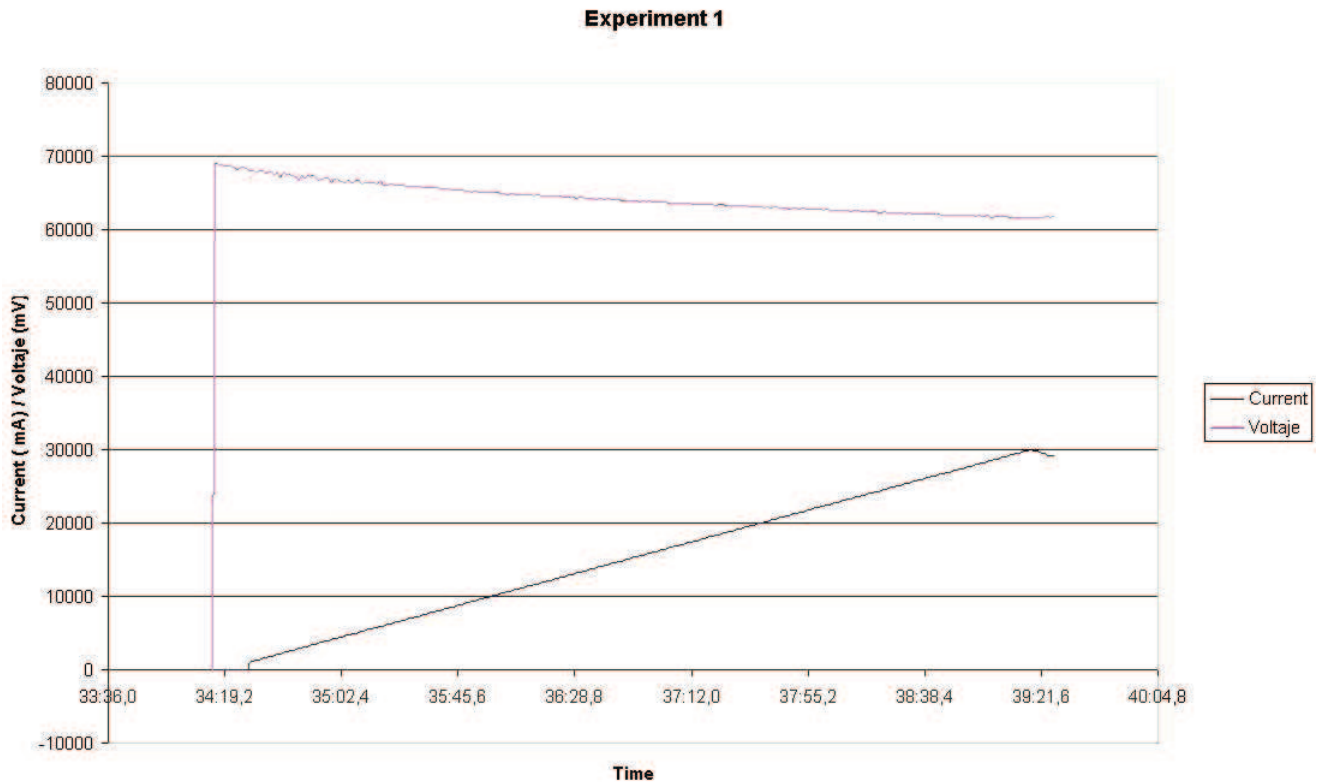


Figura 2.1: Resultado del experimento, pila de combustible conectada a la carga electrónica

De esta manera se obtiene la relación entre corriente y voltaje (curva de polarización) en la pila para bajas potencias.

Como no se dispone de una carga de mayor corriente en el laboratorio, se utilizan como carga dos motores de imán permanente conectados a unos discos de freno que actúan como carga mecánica de fricción. Cada uno de los motores tiene 20kW de potencia de pico, y pueden llegar a consumir potencias muy superiores al máximo de la pila y de esta manera obtener la curva de polarización para todo el rango de corrientes. Las medidas de corriente y tensión en este caso se realizan con un polímetro y pinza amperimétrica. El proceso seguido para la obtención de diferentes puntos de trabajo es el siguiente:

1. Con la pila de combustible conectada a los motores y funcionando, se aceleran los motores en vacío a una velocidad baja.
2. Se impone una fuerza constante de frenado en los discos.
3. Se espera a que la velocidad de los motores se estabilice, asegurando así una carga estable.
4. Se mide la tensión y la corriente. En caso de no ser estables se espera hasta que lo sean.

5. Una vez se ha medido y anotado el valor, se aumenta la velocidad de los motores y se repite el proceso.
6. El proceso termina cuando la pila de combustible se para debido a que la demanda de los motores es superior a la máxima corriente que la pila puede suministrar.

Los puntos de trabajo medidos en este proceso se muestran en la tabla 2.1. El punto de máxima corriente no pudo ser medido ya que la carga mecánica se tornaba muy inestable para corrientes superiores a 150A ( Probablemente debido a la imposibilidad de los discos de disipar térmicamente tal flujo de energía).

Cuadro 2.1: Pila de combustible conectada a los motores

Punto de trabajo	Voltaje (V)	Corriente(I)
1	57,700	65,000
2	57,100	76,000
3	56,000	86,000
4	56,000	92,000
5	51,000	150,000

Combinando los datos obtenidos con la carga electrónica (figura 2.1) y los obtenidos con los motores como carga (figura 2.1) se puede obtener la curva de polarización (Figure 2.2):

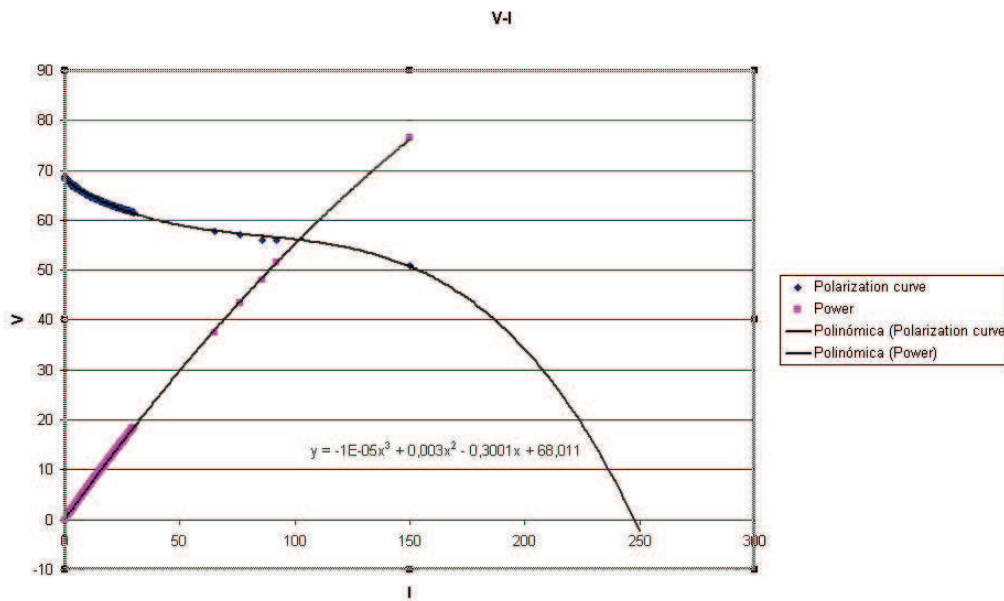


Figura 2.2: Curva de polarización

Como primera aproximación la curva de polarización es ajustada por un polinomio de tercer orden (ecuación 2.1).

$$V = -10^{-5} \cdot I^3 + 0,003 \cdot I^2 + 0,3001 \cdot I + 68,011 \quad (2.1)$$

Donde V es el voltaje de la pila e I es la corriente suministrada por la misma; tomando como positiva la corriente de salida.

### 2.2.2. Caracterización Dinámica

El propósito del segundo experimento es estudiar la respuesta dinámica frente a demandas bruscas de corriente. La pila (FC) es sometida a diferentes rampas de corriente, la de mayor pendiente que sea soportada por la pila sin pararse será supuesta como el límite dinámico.

Como primer paso se somete a la pila a un escalón pequeño de 0 a 30 para ello se utiliza la carga electrónica (usada anteriormente en la sección 2.2.1). Este escalón es perfectamente soportado por la pila. Los sistemas y controles de la pila parecen funcionar casi en transitorio, luego este experimento esta lejos de los limites dinámicos de la pila(figura 2.2.2). Hay que tener en cuenta que la potencia máxima demandada por este escalón es de 1800W, y la potencia máxima de la pila son 8500W.

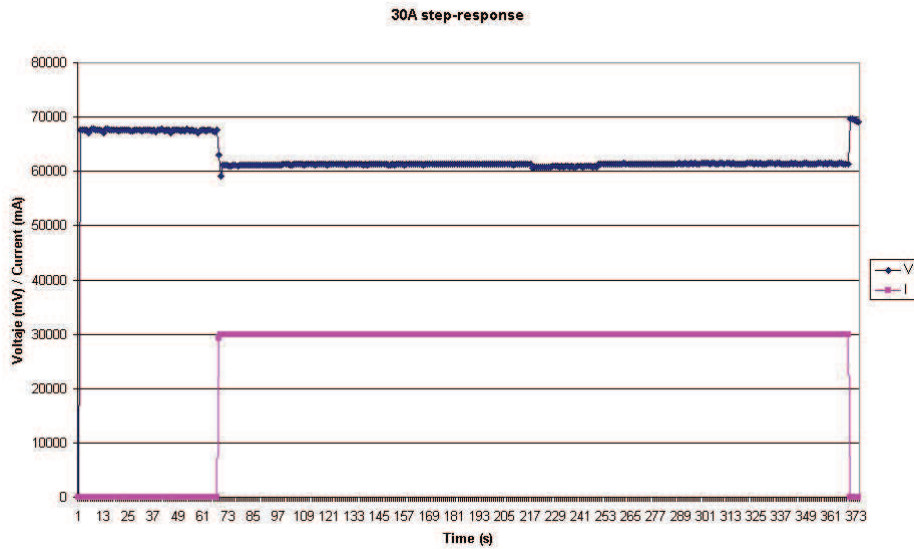


Figura 2.3: Respuesta al escalón de la pila

Para someter a la pila a cargas superiores a las de la carga electrónica se utilizan los dos motores de imanes permanentes conectados a unos discos de freno . La pila es conectada a un circuito DC/DC (Step Up) que limita la corriente de la pila.

Aguas abajo del DC/DC se conectan los motores y una batería de condensadores para entregar los picos de corriente que demanden los motores sin desestabilizar el sistema. El diagrama de conexiones es similar al usado en la configuración real del coche.



Figure 2.4: Esma general del sistema

El procedimiento del experimento es el siguiente:

1. Ajustar el limite de corriente del DC/DC a 150A. ( Corriente cercana al limite máximo de la pila, 180A)
2. Ajustar el control de los motores de manera que su tiempo de respuesta sea de 10 segundo. Transcurrirán 10 segundos hasta que los motores demanden su potencia máxima desde el momento que se acelere al máximo
3. Someter a los discos de freno a una fuerza constante.
4. Acelerar las controladoras al máximo.
5. Si la pila de combustible:

- a) SI sigue encendida 10 segundos después: Aumentar la pendiente de la rampa de corriente bajando el tiempo de respuesta de los controladores de los motores 0,1 seg.
  - b) Se para: Disminuir la pendiente de la rampa de corriente subiendo el tiempo de respuesta de los controladores de los motores 0,1 seg.
6. El experimento termina cuando se encuentra el tiempo de respuesta mínimo para que la pila no se pare.

La rampa mas rápida que la pila soporta se muestra en la figura 2.5. En esta gráfica se representan todas las corrientes del sistema, pero para este caso solo es relevante la  $I_{stack}$ , que es la corriente de la pila.

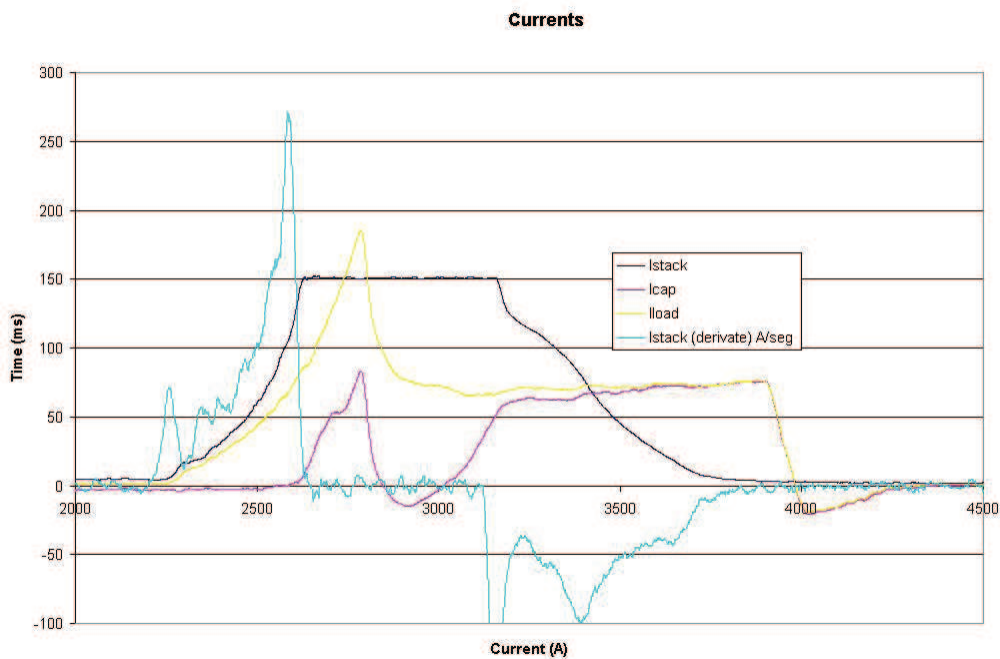


Figura 2.5: Test de respuesta de la pila con motores

La pila de combustible alcanza los 150 A en 0.5 segundos. Por tanto el máximo ratio de ascenso es de 250A/seg. Este experimento es el máximo extremo, ya que la pila envió una señal de "hard recovery" (vía BUS CAN). esto significa que la pila no podía asegurar esa demanda de corriente y estaba a riesgo de pararse. Para el resto del proyecto se considerara que 250A/seg es la máxima rampa que la pila puede soportar.

Las mediciones de corriente se realizan mediante sensores lem y un sistema de adquisición de datos basado en un microprocesador (Modelo: Arduino). Este sistema de adquisición de datos fue desarrollado por la empresa Inycom especialmente para este proyecto [5].

## 2.3. Step up

El step up es un circuito eléctrico que eleva la tensión de una corriente continua y a la vez limita la corriente de entrada. Dispone de dos controles, uno de voltaje a su salida y otro de limitación de corriente de entrada. El de voltaje se controla mediante una tensión de referencia ( $V_{ref}$ ) que fija la tensión de salida. El control de corriente se manipula mediante un potenciómetro que fija la corriente máxima de salida.

En primer lugar es testado sin activar la función de limitación de corriente para caracterizar el control de voltaje. El voltaje de salida se controla mediante una señal de referencia de 0 a -5V( $V_{ref}$ ).

La tensión de referencia ( $V_{ref}$ ) se disminuye hasta el momento en que la tensión de salida deja de disminuir. De esta manera se obtiene la máxima diferencia que puede haber entre el voltaje de entrada y de salida. Ya que al ser step up, la tensión de salida no debería ser nunca inferior a la de entrada. Pero realmente permite un voltaje de salida algo inferior al de entrada. Como puede observarse en la tabla 2.2 la diferencia entre voltajes puede llegar a ser de 1V. De esta tabla también se obtiene la relación entre el voltaje de referencia ( $V_{ref}$ ) y el voltaje real de salida, lo cual sera muy útil para el control real del step up.

Punto de trabajo	$V_{ref}$	$V_{bat}$	$I_{in}$	$V_{out}$	$I_{out}$
1	-4,76	34	33,5	70	15
2	-3,42	34,86	23,6	50	15
3	-2,45	35	17,1	36	15
4	-2,38	35	16,7	35,1	15
5	-1,62	35	16,2	34,3	15

Cuadro 2.2: Ensayo sin limitación de corriente

En el segundo experimento se investiga sobre la forma de funcionamiento de la limitación de corriente. Lo primero que se observa es que si el voltaje de salida es forzado a ser inferior al de entrada se desactiva la limitación de corriente. En el kart esta situación se puede dar si los condensadores están muy descargados (figure: C.1). Dicha situación debe ser evitada ya que el limitador de corriente es necesario para no forzar la pila.

Con el objetivo de conocer el funcionamiento de la limitación de voltaje se ejecuta el siguiente proceso:

1. Se fija la corriente de salida 9A mediante la carga electrónica.
2. La limitación de corriente del step up se fija en 13A.
3. Se alimenta la entrada del step up a tensión constante 35V.
4. Se incrementa la tensión de referencia que controla el voltaje, hasta que la tensión de salida no aumenta más. En este punto la corriente de entrada esta limitada. Por tanto la tensión de salida no puede aumentar mas ya que el balance de energía debe conservarse, si se pudiera aumentar más la tensión se estaría entregando mas potencia de la que se obtiene de la fuente, lo cual es físicamente imposible.
5. Finalmente se comprueba que el funcionamiento a bajos voltajes es similar a cuando no estaba activado el limitador de corriente.

Punto de trabajo	Ref (Lim, corriente)	$V_{ref}$ (Voltaje)	$V_{bat}$	$I_{in}$	$V_{out}$	$I_{out}$ (A)
6	56ohm (max $V_{out}$ )	-3	34,95	13	44,2	9
7	56ohm	-2,72	35,06	12	40	9
8	56ohm	-2,59	35,03	11,3	38	9
9	56ohm	-2,45	35,05	10,7	36	9
10	56ohm	-2,38	35,05	10,5	35	9
11	56ohm (min $V_{out}$ )	-2	35,06	10,2	34,2	9

Cuadro 2.3: Ensayo con el limitador de corriente activado

Como conclusión se obtiene que el voltaje de salida puede llegar a ser 1V inferior al de entrada. El limitador de corriente se inutiliza si el voltaje de salida es inferior al de entrada. Luego el limitador de corriente fija la potencia máxima de salida. por eso si aumenta la corriente suficiente el voltaje de salida cae. En el kart este fenómeno es utilizado para obtener potencia de los condensadores cuando la demanda de potencia es superior a la producción de la pila.

## 2.4. Super condensadores

Para la caracterización de los condensadores se asume el modelo básico de condensador real mostrado en la figura 2.6. Este modelo consta de una resistencia en paralelo al condensador y otra en serie. Representan la pérdidas en vacío y en carga respectivamente.

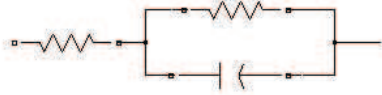


Figura 2.6: Circuito equivalente a los condensadores

La caracterización de los condensadores se basa en obtener experimentalmente el valor de las dos resistencias. En los siguientes apartados se explica el proceso experimental en el que se obtiene el valor de las resistencias.

### 2.4.1. Resistencia serie

Se conecta el banco de condensadores cargados a 63 voltios a la carga electrónica. Los condensadores son sometidos a diferentes demandas de corriente. Para cada demanda de corriente se mide el voltaje que cae en la resistencia en serie. Este voltaje es la diferencia entre los voltajes en carga y en circuito abierto. De esta manera se calcula la resistencia serie para diferentes situaciones de corriente y voltaje.

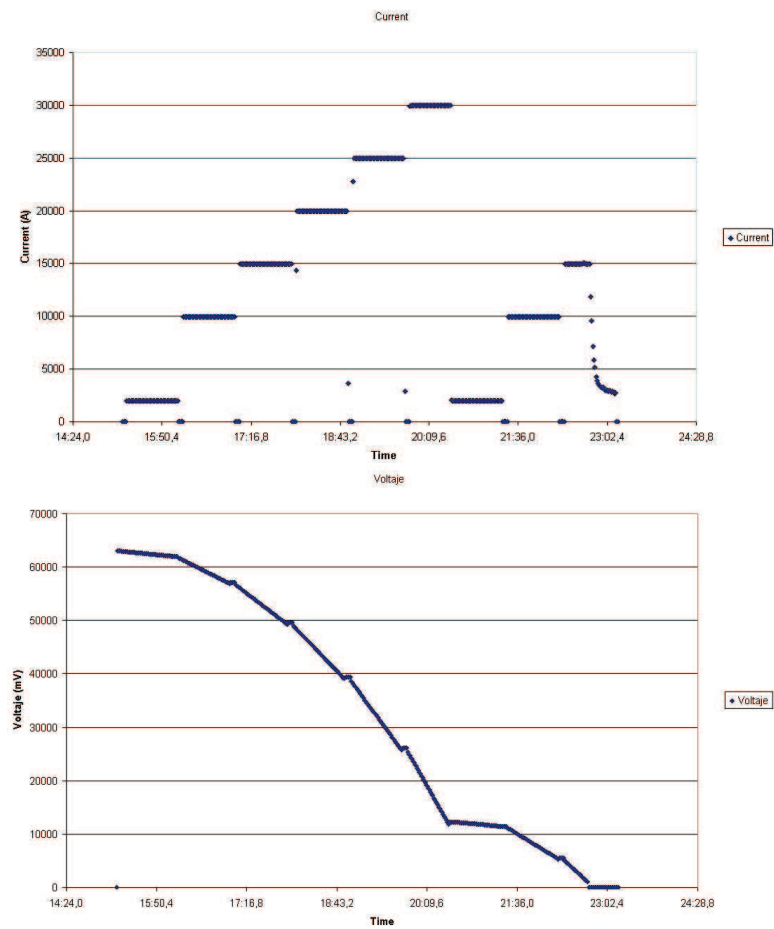


Figura 2.7: Experimento de determinación de la resistencia en serie (Corriente (mA), Voltaje(V))

Con estos datos se representa la dependencia de la resistencia serie con la tensión y con la corriente.

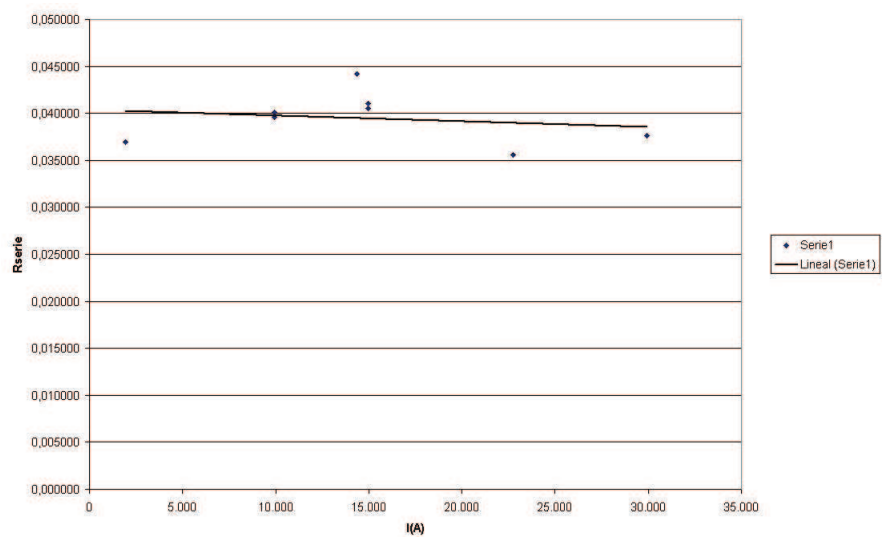


Figura 2.8: Resistencia en seria VS Corriente



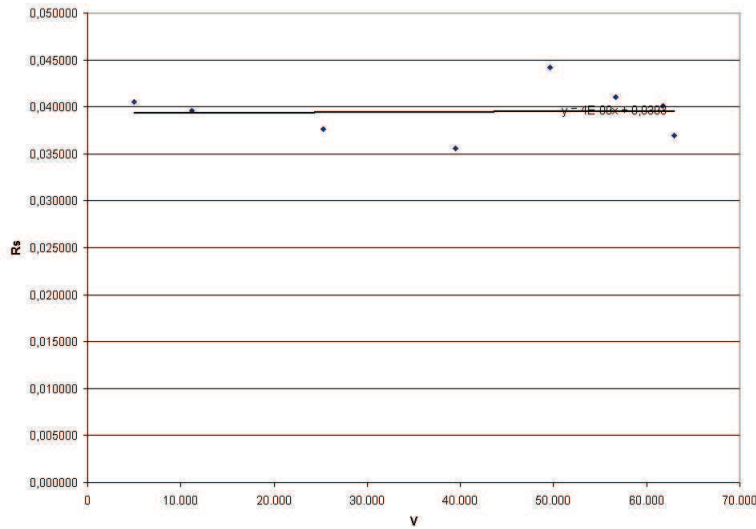


Figura 2.9: Resistencia en serie VS voltaje

Se observa que la resistencia es practicamente constante e igual a 0.04 ohmios para los valores de corriente y voltaje ensayados. De aquí en adelante la resistencia serie de los condensadores se considerara constante he igual a 0.04 en cualquier situación.

Podría existir una variación de la renitencia debido a un aumento de temperatura, pero no se han observado cambios de temperatura reseñables durante los experimentos y la disposición de los condensadores esta diseñada para una correcta refrigeración.

#### 2.4.2. Resistencia Paralelo

La resistencia de paralelo se mide realizando una auto descarga de los condensadores. Es decir, se cargan los condensadores a un voltaje, se aíslan y se van realizando medidas del voltaje a lo largo del tiempo. Con este proceso se obtiene una curva de auto descarga del condensador (figura 2.10).

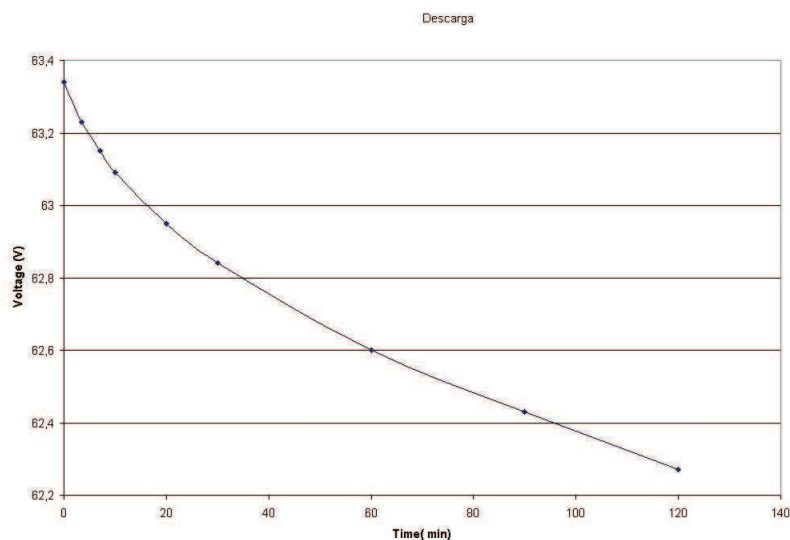


Figura 2.10: Auto descarga de los condensadores

Aplicando la formula de descarga RC [8]se obtiene una aproximación del valor de la resistencia paralelo.( formula 2.2)

$$\frac{t}{R_p} = \ln(V_0) - \ln(V_c) \quad (2.2)$$

Donde  $V_0$  es el voltaje inicial,  $V_c$  es el voltaje instantáneo  $t$  es el tiempo en segundos desde  $V_0$  a  $V_c$  y  $R_p$  es la resistencia paralelo.

La resistencia varía dependiendo del punto de la curva utilizado para el cálculo, pero es siempre superior a 1000 ohm.

Se deduce que esta resistencia no es realmente importante para esta aplicación ya que el ratio de auto descarga es rangos de magnitud mas lento que los sucesos del sistema. Las carreras del kart duran del orden de 5 minutos y los condensadores se descargan 1V cada 2 horas. De aquí en adelante la aproximación de 1000ohm se asume como aceptable para la resistencia paralelo debido a la baja influencia de la autodescarga.

## 2.5. Test de funcionamiento conjunto

El propósito del ultimo experimento es comprobar que todos los elementos tiene el mismo comportamiento en conjunto que por separado. Para ello se realiza una conexión de los componentes similar a la del kart pero en estático ( No se mueven, simplemente se aplica una carga mecánica a los motores).

Los elementos se conectan de la misma forma que en la figura 2.2.2. La pila de combustible se conecta a los bornes de baja tensión del step up. A los bornes de salida del bus (tensión más elevada) se conectan en paralelo los condensadores y la carga mecánica (controladoras de motores, motores y frenos de disco). En este experimento el limite de corriente de entrada del step up es fijado a 50A y se eleva a 150 A a mitad del experimento. El voltaje de referencia del step up es fijado para obtener 72V a la salida del mismo. Los motores se aceleran de manera que la corriente demandada supere la entregada por el step up ( primero se aceleran hasta que demandan mas de 50A y una segunda vez a mas de 150A). Las corrientes son monitorizadas mediante sensores de efecto lem y se muestran en la figura 2.11 .Los voltajes se muestran en la figura 2.12. Y las corrientes calculadas mediante ambas medicas en la figura 2.13.

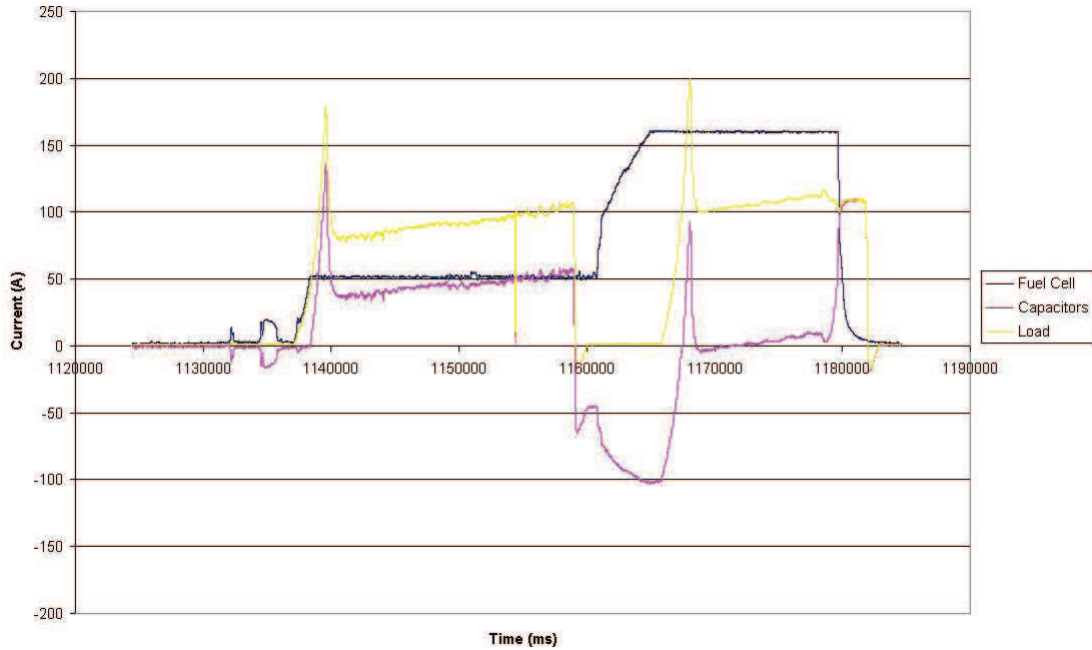


Figura 2.11: Test de conexión(corriente)

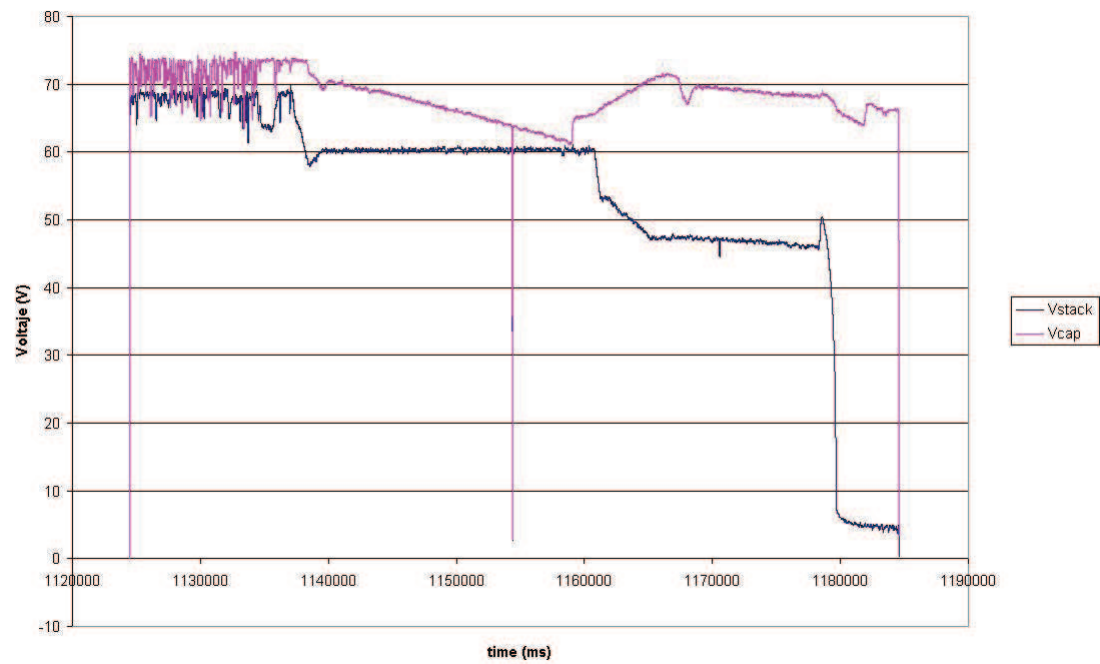


Figura 2.12: Test de conexión ( Voltajes)

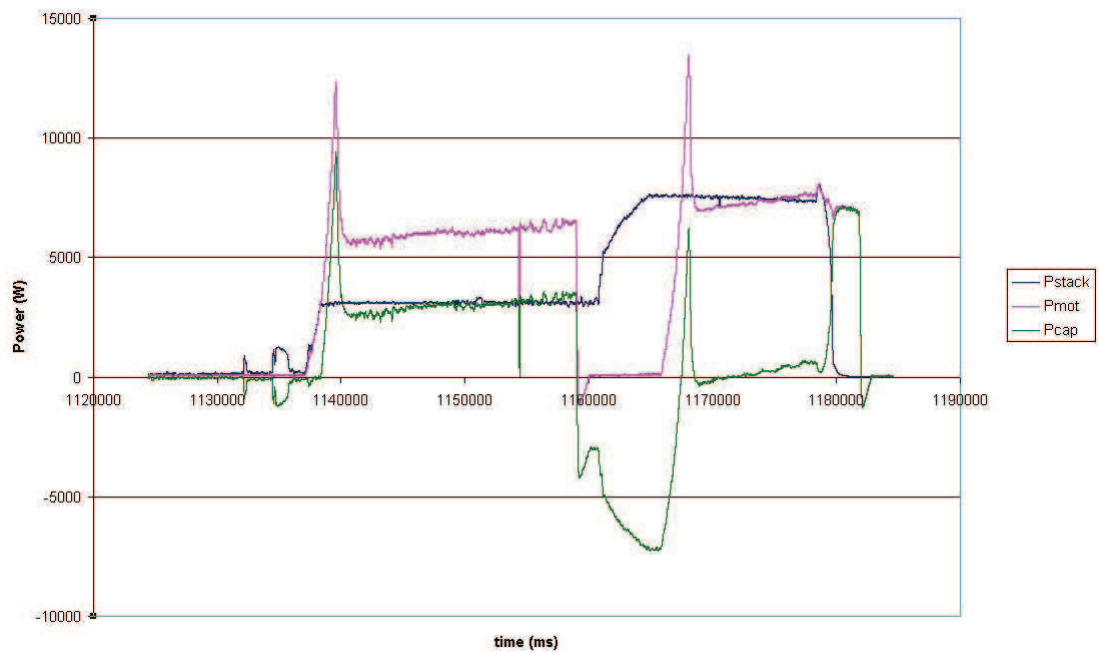


Figura 2.13: Test de conexión(potencia)

Las figuras 2.13, 2.11 y 2.12 muestran como se comporta el sistema real ante demandas superiores al límite de corriente fijado por el step up. Cuando la demanda es inferior al límite de corriente (50 ó 160A), el voltaje se mantiene cercano a 72V y toda la potencia es obtenida de la pila. En caso de que la demanda sea superior al límite de corriente fijado la tensión del bus a la salida del step up decrece, logrando con ello un aporte de corriente por parte de los supercondensadores, compensando así la insuficiente producción de la pila. Mas adelante cuando la demanda de los motores vuelve a ser inferior al límite, la pila sigue produciendo el máximo para cargar los condensadores. Incluso

si la demanda cae a cero, la pila continua produciendo hasta alcanzar 72 voltios de consigna en el bus de los condensadores.

En el caso el segundo pico de demanda el limite de corriente esta fijado a 160A luego la pila suple la energía demandada, a excepción del pico de arranque donde actúan los condensadores, inyectando puntualmente energía al sistema.

## 2.6. Test sobre el terreno ( Circuito)

Tras el montaje del coche, se llevo a cabo un test en el circuito de Alcañiz (Motorland)[16], Motorland contribuye con este proyecto prestando sus instalaciones para eventos y entrenos. El principal objetivo del test era el chequeo del correcto funcionamiento en pista de todos los equipos y realizar una primera aproximación y ajuste de los elementos allá set up de carrera. Otro de los objetivos fue organizar la coordinación del equipo en el box y habituarse al uso de la telemetría.

Para medir las variables del coche en todo momento se emplearon 2 sistemas. El primero de ellos mide aceleraciones en dos ejes, velocidades y tiempos de vuelta. Los datos son analizados con "Race Studio" un programa de adquisición de datos para coches de competición, este programa te indica la trazada realizada por el coche así como el valor de las variables mecánicas en cada uno de los puntos del circuito(2.14).

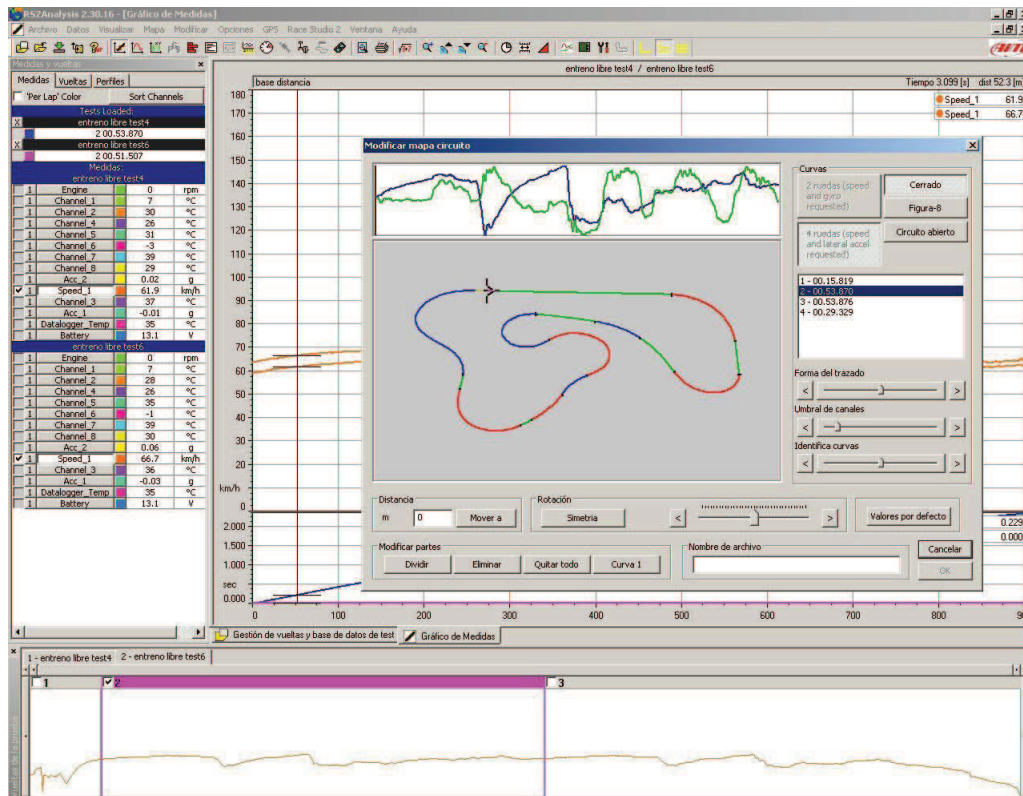


Figura 2.14: Interface de usuario de Race Studio

Inycom[5] realizo un sistema en el que se adquieren de datos de todas las variables eléctricas del coche. Estos datos son analizados en un programa java desarrollado por la misma compañía. Donde se puede observar la evolución de las variables respecto al tiempo (2.15).

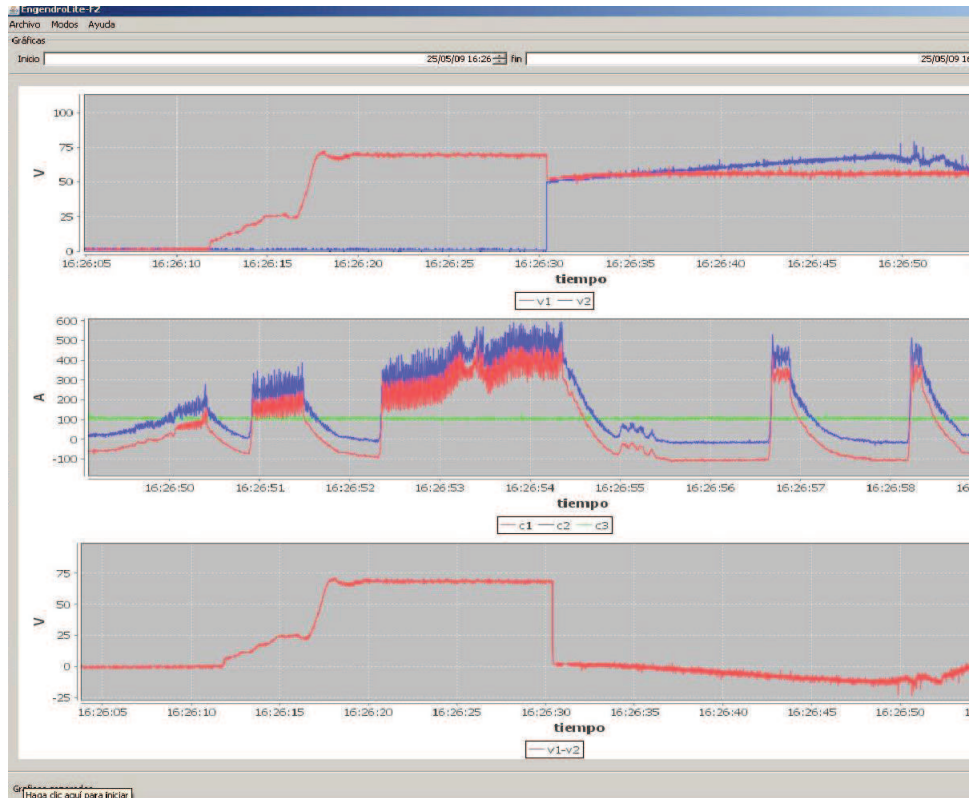


Figura 2.15: Interface de usuario del programa de adquisición de datos de Inycom

Se realizaron 7 salidas a pista, cada una de ellas suponía varias vueltas al circuito. Posteriormente se han comparado las mediciones obtenidas por la adquisición de datos y las calculadas en la simulación (Igualando las demandas de energía a la real). Como se puede observar en la figura

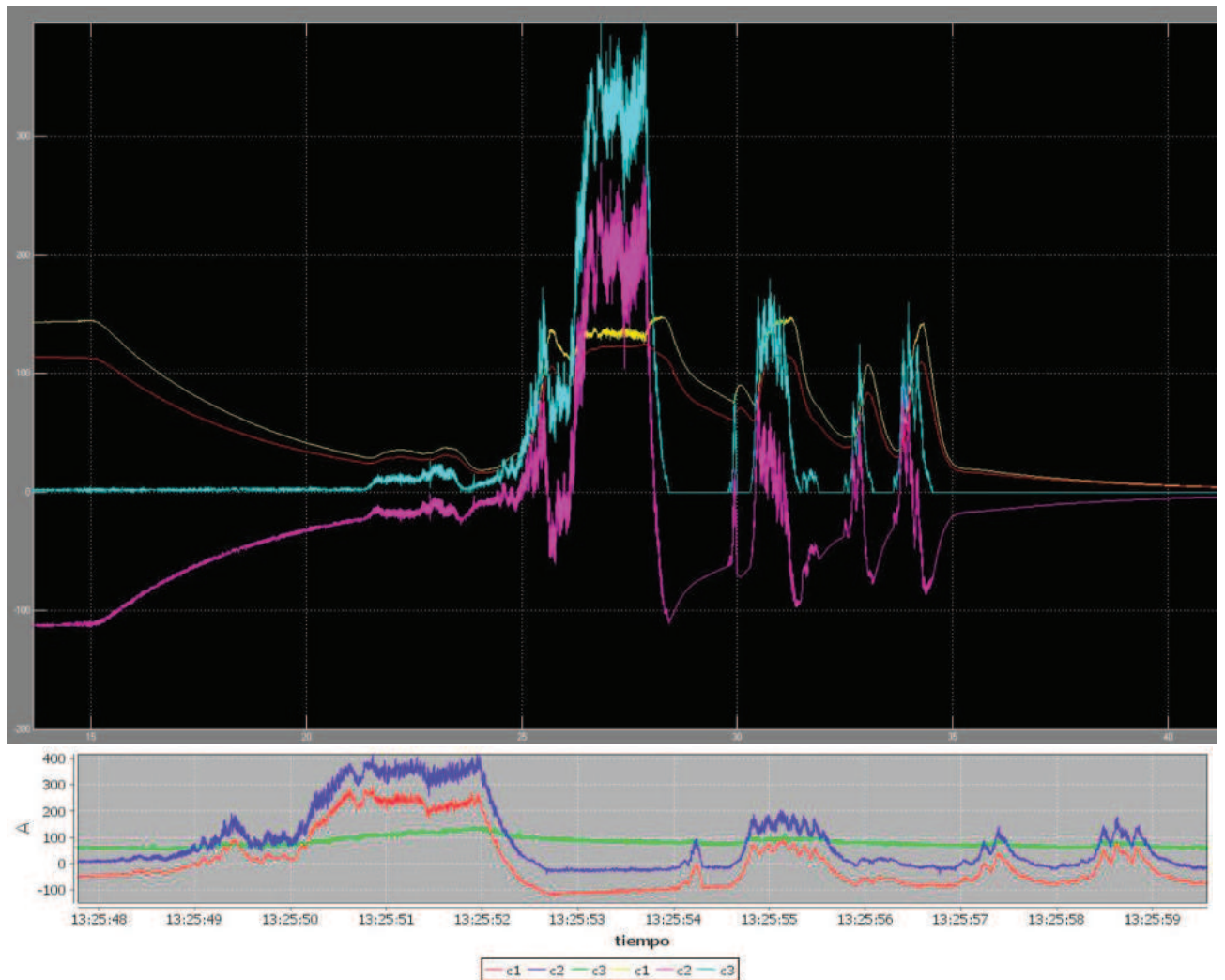


Figura 2.16: Comparación de simulaciones y datos reales

Se puede observar en la figura que las tendencias y valores de todas las gráficas son similares. La única diferencia es el tiempo de respuesta de la pila, siendo algo menor en la realidad, con lo que debe ser ajustado. Se ajusta la pila a un tiempo de respuesta de 2seg para los siguientes apartados.

## 2.7. Conclusión

Se han investigado el funcionamiento todos los equipos del tren de potencia. De esta manera caracterizado cada uno de los equipos del tren de potencia del kart.

- Se han obtenido los diferentes puntos de operación de la célula de combustible (V-I) así como la máxima rampa de corriente que soporta(transitorio). Se ha asumido que puede ascender como máximo de 0 a 150A en 0,5 segundos.
- El efecto de la resistencia paralelo del condensador se ha considerado despreciable debido a los diferentes ordenes de magnitud entre el tiempo de auto descarga y los tiempos que dura la carrera. La resistencia serie ha sido determinada.
- El step-up se ha destacado como el elemento clave del sistema ya que permite controlar el flujo de potencia de la pila ( limitando su corriente) y a su vez bajar la tensión del bus de los condensadores haciéndolos así entregar energía . Por tanto controla al mismo tiempo potencia entregada por la pila y por los condensadores.

- Se ha deducido la siguiente manera de funcionamiento general del sistema:
  - El step-up fija la corriente máxima a suministrar por la pila
  - Los condensadores suplen la potencia que la pila no logra suministrar ( en picos de potencia)
  - Si la demanda es inferior a la producción máxima de la pila. La pila produce energía en exceso para cargar los condensadores.
  - Si la demanda es superior a la producción de la pila. Los condensadores se van descargando y la tensión del bus va cayendo.

Una vez comprobada la veracidad de las simulaciones con la realidad,el siguiente paso es el modelizado de las características de cada uno de los elementos. De manera que se encuentre una función de transferencia para cada elemento cuya reacción y parámetros se aproxime lo máximo a cada elemento real.



# Capítulo 3

## Simulaciones

### 3.1. Introducción

Una vez los caracterizados componentes experimentalmente se pasa a modelar sus ecuaciones en matlab. De esta manera se conseguirá un modelo completo del coche, en el que poder probar controles y set-up con mayor rapidez y versatilidad. El objetivo principal es lograr el control y la configuración en la que el coche sea lo mas rápido posible. El máximo reto es determinar cuando debe gastar energía el sistema y cuando debe almacenarla.

Las limitaciones del sistema son:

- El voltaje máximo de operación es de 72V( fijado por el step-up) y el mínimo 50V ( fijado por la pila). El voltaje de la pila nunca puede ser superior al del bus de los condensadores, ya que el step-up no permite este punto de operación, se produce un cruce de voltajes.
- El consumo (demanda) medio del sistema debe ser igual o inferior a la potencia máxima entregada por la pila. De otra manera los condensadores se descargarían hasta hacer el sistema inestable.
- El tiempo de respuesta de la pila ha de ser tenido en cuenta. No puede entregar toda su potencia instantáneamente como se ha demostrado en los experimentos anteriores.
- El límite de pico de demanda lo fija la potencia máxima de los motores 28,8kW (apéndice C.3)
- La cantidad de hidrógeno disponible en la botella es suficiente para que la pila funcione a plena carga durante toda la carrera. Luego el consumo de hidrógeno (eficiencia de la pila) no es un limitante a priori.

### 3.2. Bloques de la simulación

Todo el sistema completo es simulado mediante matlab simulink. De manera que cada elemento representa un bloque independiente.

Para simular los sistemas eléctricos se utiliza la librería ‘‘Sim Power Systems’’(SPS)[11].

Para la simulación de los sistemas mecánicos se utiliza la librería ‘‘Sim Drive Line’’ [12]. Las señales de las librerías y Simulink se comunican mediante bloques de transformación de señal. Todos los bloques no pertenecientes a las librerías y sus ecuaciones han sido desarrollados en este proyecto.

Los bloques implementados son:

- La pila de combustible
- Los condensadores
- El step-up (DC/DC)
- La dinámica del vehículo



- El trazado del circuito
- Controles

La manera que se ha elegido para controlar el sistema es limitando la potencia disponible en el pedal del acelerador. De manera que el pedal a fondo no siempre significa la misma entrega de potencia por parte del coche. De esta manera la demanda puede ser adaptada al estado energético del kart.

### 3.2.1. Pila de combustible

Para crear el bloque que simula la pila de combustible se realiza una regresión sobre las ecuaciones teóricas. De esta manera se determinan los valores teóricos que generan una curva de polarización similar a la real.

El voltaje de una pila de combustible PEM se expresa en función de su voltaje de circuito abierto  $U_o$  (ecuación 3.2) menos las pérdidas de voltaje de Activación, óhmicas y de difusión. (ecuación 3.1).[2][23]

$$U_{cell} = U_o - \eta_{act} - \eta_{ohmic} - \eta_{diff} \quad (3.1)$$

Donde  $U_{cell}$  es el voltaje de una celda de la pila,  $\eta_{act}$  son las pérdidas de voltaje debidas a activación,  $\eta_{ohm}$  son las pérdidas óhmicas y  $\eta_{diff}$  son las pérdidas por difusión. El voltaje de circuito abierto  $U_o$  se calcula con la ley de Nerst.

$$U_o = E^o + \frac{\Delta s}{nF}(T - T_o) \quad (3.2)$$

Donde  $T$  es la temperatura,  $\Delta s$  es el cambio en la entropía,  $F$  la constante de Faraday,  $n$  el número de moles de electrones que toman parte en la reacción,  $T_o$  la temperatura de referencia (25<sup>o</sup>) y  $E^o$  potencial electroquímico de la reacción en condiciones normales.

Las pérdidas óhmicas se obtienen mediante la resistencia óhmica  $R_{ohm}$  (ecuación 3.3).[17] Para calcularla se toma la zona central de la curva medida experimentalmente, y con la pendiente entre voltaje y corriente en esa zona se obtiene directamente  $R_{ohm}$ .

$$\eta_{ohmic} = iR_{ohm} \quad (3.3)$$

Donde  $i$  es la densidad de corriente que atraviesa la membrana medida en A/cm<sup>2</sup>.  $R_{ohm} = 0,000341806$

Las pérdidas por activación se calculan mediante la siguiente fórmula (ecuación 3.4) :[18]

$$\eta_{act} = \frac{RT}{4\alpha F} \cdot \ln \left( \frac{i + i_o}{i_o} \right) \quad (3.4)$$

Donde  $R$  es la constante de los gases ideales,  $i_o$  es la corriente límite y  $\alpha$  es el coeficiente de transferencia de carga. los valores usados en estas variables son obtenidos del paper [17].

Finalmente, sabiendo que las pérdidas por difusión tiene forma logarítmica ascendente. Se realiza una regresión a esta forma mediante la ecuación 3.5.[18]

$$\eta_{diff} = a \cdot \ln \left( 1 - \left( \frac{i}{b} \right) \right) \quad (3.5)$$

Donde el valor de  $b$  indica el punto (corriente A) donde Hipotéticamente la curva de polarización llegaría a 0 voltios (las pérdidas de difusión se hacen infinitas) y  $a$  es un coeficiente de ajuste.

Una vez todos los valores han sido ajustados (tabla 3.1) se obtiene una curva de polarización muy cercana a la real, y en la que se conocen los parámetros característicos (figura 3.2.1).

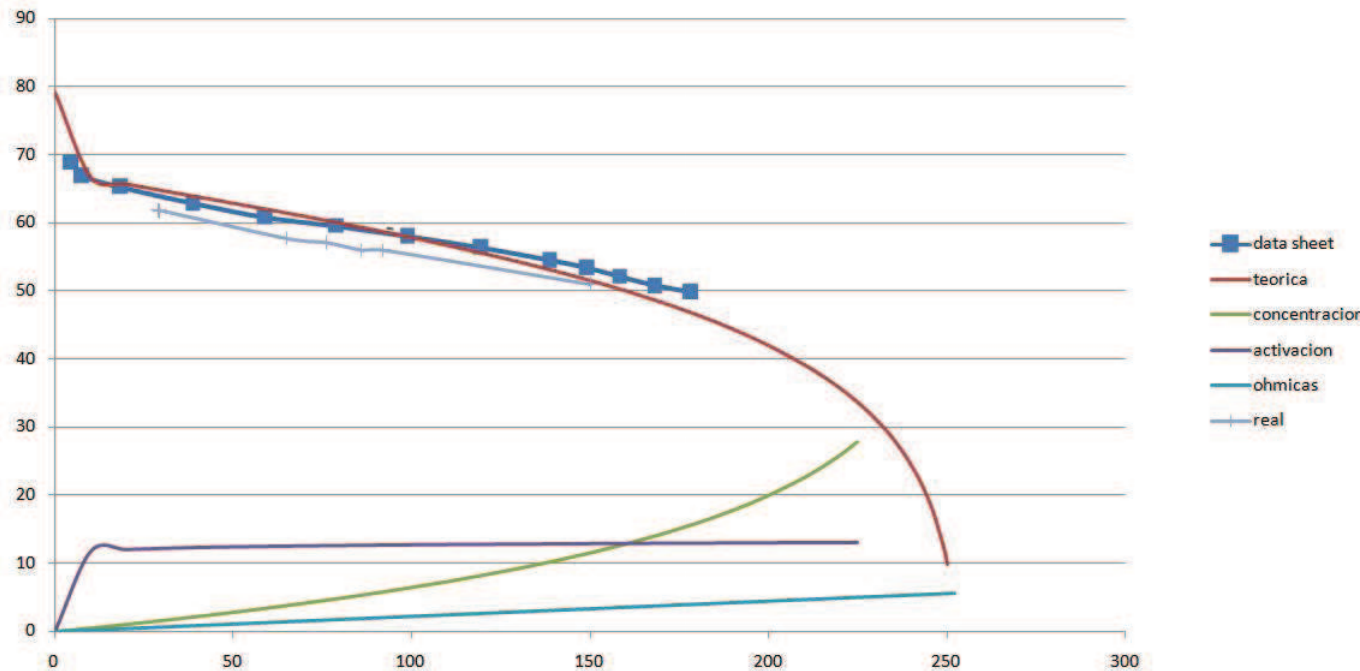


Figura 3.1: Aproximación teórica de la curva de polarización.

Eje X: Corriente (A) ,Eje Y: Voltios (V)

Real: Medida en EXPERIMENTO

Teórica: Obtenida en los cálculos

Datasheet: Dada por el fabricante

Activación,Óhmicas,Concentración: diferentes pérdidas teóricas desglosadas.

Los parámetros deducidos de la regresión de las ecuaciones se muestran en la tabla 3.1.

Variable	Nomenclatura	Valor Numérico	Unidades
Temperatura de trabajo	$T$	80	$^{\circ}\text{C}$
Potencial electroquímico	$E^{\circ}$	1,229253112	V
Cambio de entropía	$\Delta s$	-44.43	$\text{J}/(\text{mol}^{\circ}\text{K})$
Electrones que interviene en la reacción	$n$	2	$\text{mol } e^{-}/\text{mol reactivo}$
Constante de Faraday	$F$	96400	$\text{C}/\text{mol}$
Temperatura de referencia	$T_o$	25	$^{\circ}\text{C}$
Resistencia óhmica	$R_{ohm}$	0,000341806	ohmios
Constante de los gases ideales	$R$	8.31	$\text{J}/(\text{molK})$
Coefficiente de transferencia de carga	$\alpha$	1,166223538	-
Corriente límite	$i_o$	1,09355E-11	$\text{A}/\text{cm}^2$
Coefficiente de ajuste	$a$	0,2	-
Coefficiente de ajuste	$b$	255	A

Cuadro 3.1: Valores de las variables ajustadas

Todas las ecuaciones anteriores se introducen en un bloque que tendrá como entrada V y como señal de salida I o viceversa (dependiendo el caso de estudio).

Para simular la dinámica de la pila se usa una función de transferencia con tiempo de respuesta 1 seg(3.2). Se toma un segundo ya que de esta manera la pila reacciona mas lentamente que en la realidad y por tanto es mas restrictivo que el caso limite visto en los experimentos (0.5 segundos).

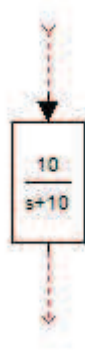


Figura 3.2: Primer orden, tiempo de respuesta 1 seg

### 3.2.2. Supercondensadores

El condensador es modelado como un condensador ideal con una resistencia en paralelo ( auto descarga) una resistencia en serie (perdidas de potencia). En la sección C.5 se asumió la resistencia paralelo de un valor alto que no supone perdidas perceptibles, por tanto puede ser eliminada. En la misma sección miden 0.04 ohmios de resistencia serie.. C.5).

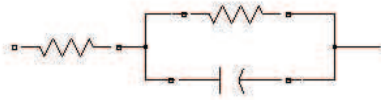


Figura 3.3: Circuito equivalente a los condensadores simulado en Sim Power Systems

Este bloque (figura 3.3) solo puede ser conectado directamente a señales SPS ( Sim Power Systems).

### 3.2.3. Step Up

El step-up es modelado como una fuente de corriente variable SPS. La corriente que entrega esa la fuente de corriente es controlada midiendo el voltaje entre los extremos de la misma. Un controlador PI utiliza el voltaje y lo compara con el voltaje de referencia ( el voltaje máximo deseado en el bus 72V), en función de esta comparación inyecta mas o menos corriente al sistema. De esta manera si el voltaje es inferior al deseado el step-up inyecta corriente a su salida para mantener el voltaje a 72V.

La corriente máxima entregada por la fuente es limitada a un valor .De esta manera se modela el limitador de corriente del que dispone el step up real. Este límite de corriente es ajustado para que el step up nunca entregue mas de 8,5kW( potencia máxima de la pila).

En serie con el control se coloca una función de transferencia de primer orden con un tiempo de respuesta de 1seg, de esta manera se limita la dinámica del a 1seg para dar la potencia máxima,. Con esta medida se simula la dinámica de la pila, el step up nunca exigirá a la pila una rampa de corriente superior a la que puede soportar.

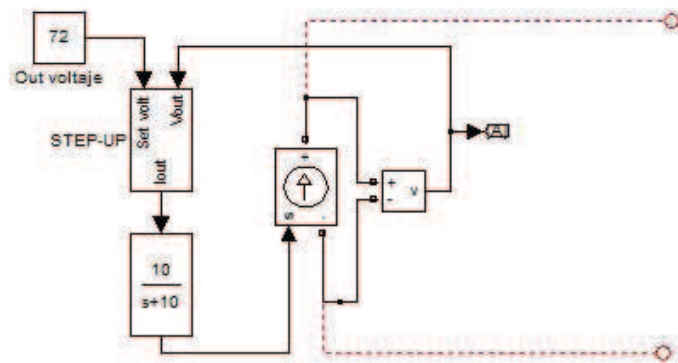


Figura 3.4: Step-up, fuente de corriente controlada por PI

Funciones del step up:

- Un controlador PI inyecta corriente al bus intentando mantener el voltaje a 72V
- El controlador esta limitado para modelar la limitación de corriente del step-up. Nunca demanda mas de 8,5kW a la pila.
- Una función de primer orden asegura que se cumple la dinámica real de la pila ( algo mas lenta que la real, mas restrictivo)

### 3.2.4. Dinámica del vehículo y controles

El objetivo de este bloque es calcular la demanda eléctrica de los motores cada situación. El bloque principal ‘‘Longitudinal Vehicle Dynamics’’ de Sim Drive Line(figura 3.5) simula las ecuaciones dinámicas de un automóvil en linea recta. Dicho bloque calcula la velocidad del vehículo mediante la fuerza de empuje. Internamente este bloque tiene implementadas las características concretas del vehículo, cálculos mecánicos realizados experimentalmente por Team Elias (ApéndiceB.4)[7].

La distancia total recorrida se calcula haciendo la integral de la velocidad. Esta distancia es utilizada para conocer en que zona del circuito se encuentra el coche. Dependiendo de la zona del circuito donde se encuentre el coche, el bloque ‘‘circuit’’ genera una señal 1 -1 o 0 (Acelerar a fondo, frenar a fondo o dejar el coche a vela). Estas señales seleccionan si se aplica la fuerza de aceleración, deceleración o no se le aplica ninguna fuerza al coche(Bloque Longitudinal Vehicle Dynamics).

El bloque ‘‘circuit’’ es diferente dependiendo del circuito para el que se quiera ajustar el coche.

La potencia demandada por el sistema se calcula multiplicando la fuerza de aceleración aplicada por la velocidad.

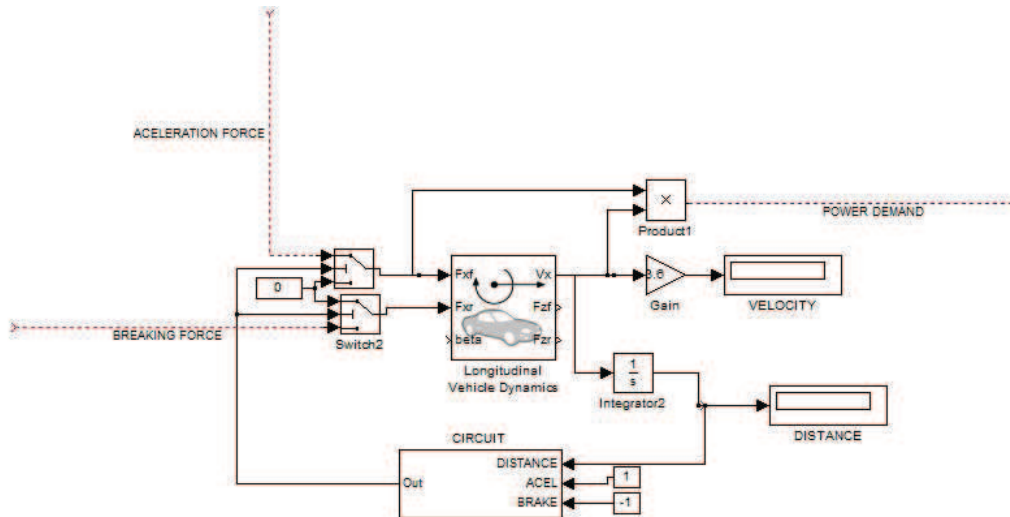


Figura 3.5: Bloques que configuran la carga de potencia

En el coche real el piloto manda una señal a las controladoras de aceleración máxima mediante el pedal de acelerador, pero el nivel de esa aceleración puede ser controlado electrónicamente. En este apartado se plantean dos tipos diferentes diseños para el control (figura 3.2.4) de la fuerza de empuje (aceleración):

- Control 1: Utiliza la velocidad del coche para controlar la fuerza. Cuando la velocidad supera un cierto valor de corte (fijado previamente) la fuerza disponible en el pedal es reducida. La velocidad de corte, y los valores de fuerza pueden ser ajustados para cada circuito. De esta manera se reduce la demanda de potencia cuando es mayor, a altas velocidades.
- Control 2: Este control trata de evitar que la tensión del bus sea inferior a la de la pila, situación peligrosa puesto que se pierde el control del step-up y el sistema se vuelve inestable. Un Control PI lee la diferencia de voltajes entre la pila y el BUS ( salida step-up). Este PI intenta mantener 3 voltios de diferencia entre estas dos tensiones. De esta manera , cuando la tensión del bus es muy alta ( condensadores muy cargados) permite mucha fuerza de empuje, pero cuando estos están descargados la reduce al máximo posible para no inestabilizar el sistema. La fuerza máxima es limitada para no demandar mas potencia de la que los motores reales pueden dar. Igualmente la mínima fuerza es limitada de manera que el piloto siempre tiene fuerza disponible en el acelerador.

La fuerza de deceleración y aceleración máxima fue estimada por el Team Elias mediante cálculos basados en su experiencia[7] (aceleración 2300N).

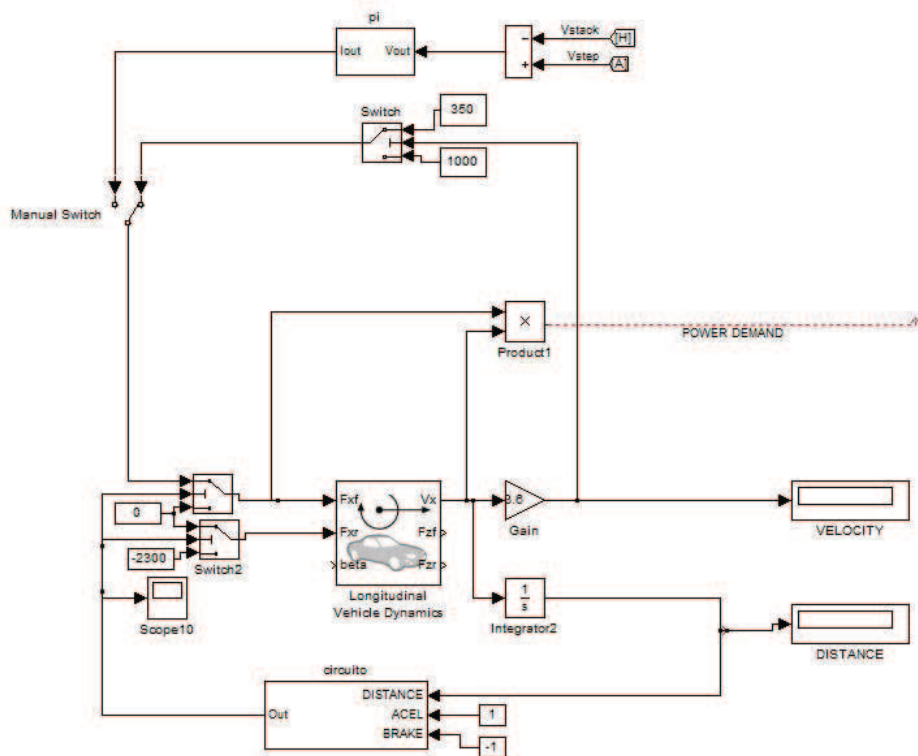


Figura 3.6: Load Control Bloques

### 3.3. Conexionado general de los bloques y configuraciones de potencia

Con el fin de realizar una comparativa se simulan dos tipos de configuraciones de potencia. En la primera se conecta el condensador en paralelo a los bornes de la pila (figura 3.7) por otro lado se conecta la pila a los condensadores a través de un step-up (figura 3.8). Ambas configuraciones tienen sus ventajas e inconvenientes:

- La primera de ellas requiere de menores componentes y por tanto es mas barata, robusta y ligera. Pero se corre el riesgo de una sobre demanda a la pila, ya que no existe protección alguna. También limita mucho el rango de trabajo de los condensadores, ya que el rango de voltajes de la pila es reducido, además no hay control de los condensadores , estos actúan según varía la tensión en los bornes de la pila.[13] .

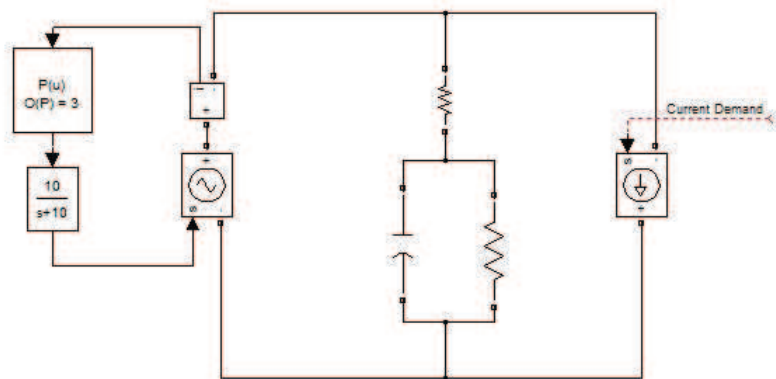


Figura 3.7: Sistema con el condensador situado en bornes de la pila de combustible FC

- La segunda configuración dispone de un step-up para elevar el voltaje del Bus de los condensadores a 72V. El limitador de corriente del step-up evita que se le exija una sobre demanda a la pila, permite control sobre los condensadores y aumenta la eficiencia de los controladores de motor; al hacerlos trabajar a mayor voltaje. Además esta configuración solo emplea los condensadores cuando se supera la potencia de pico de la pila, ya que hasta ese momento el voltaje del bus no decrece. De esta manera la energía de los condensadores es utilizada únicamente para suplir picos de potencia. El inconveniente es que un elemento más aumenta el peso del kart y es un componente mas que puede fallar.

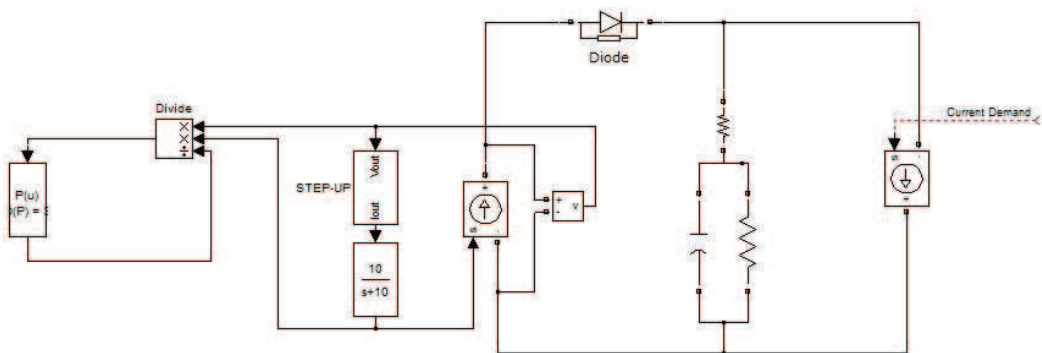


Figura 3.8: Sistema con elevación de voltaje del bus mediante step-up

### 3.4. Simulación del trazado

Las 2 configuraciones mostradas en el apartado anterior (3.3) han sido simuladas , conectando cada una de ellas a la carga desarrollada en el apartado 3.2.4. Para comparar objetivamente los resultados se ha tomado un trazado estándar de circuito(figura3.9). Este circuito consta de 4 rectas y 3 curvas, la longitud del circuito es de 850m

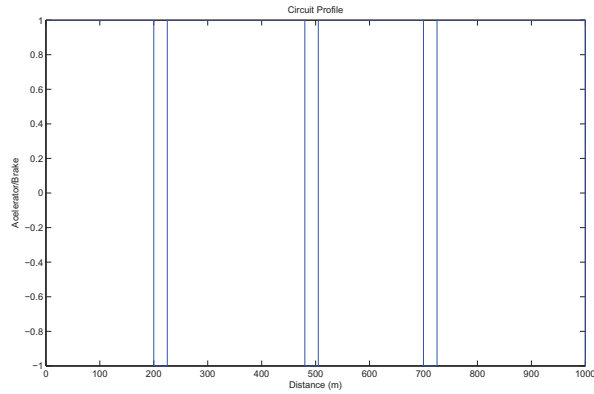


Figura 3.9: Trazado estándar ( 1 significa aceleración máxima, -1 significa freno al máximo)

Este trazado es implementado en el bloque ‘circuit’(figura 3.5) de manera que la señal de aceleración/freno sea la mostrada en la figura anterior (figura 3.9)

Como criterio de comparación de los sistemas se utiliza el tiempo necesario para completar el trazado(figura 3.10). La configuración que menor tiempo obtenga sera considerada la mejor configuración.

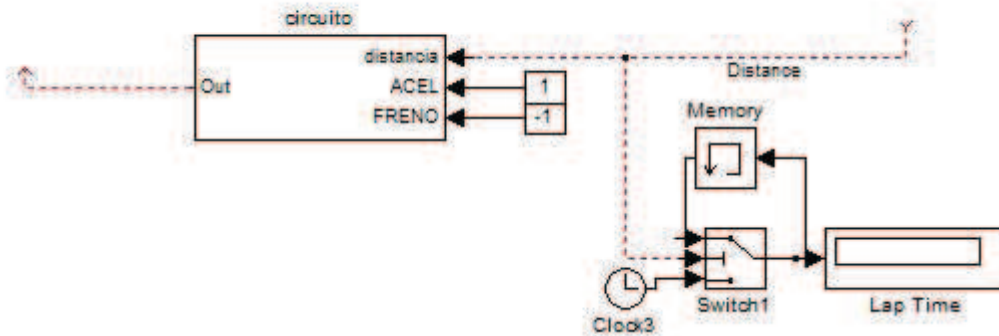


Figura 3.10: Calculo del tiempo para completar el trazado ( tiempo de vuelta)

### 3.5. Escenarios de simulación

Para elegir la configuración que mejor se adapta a las necesidades se simulan 3 escenarios diferentes.

- En el primero de ellos se utiliza la configuración sin step-up (figura 3.7 ) y el control de velocidad, control 1 (sección3.5).
- En el segundo se utiliza la configuración con step up (figura 3.8) y el control de velocidad, control 1 (sección3.5).
- Para el tercer escenario se utiliza la configuración con step-up (figura 3.8) y el control 2.

No se simula la configuración sin step-up y el control 2 ya que carece de sentido, por no poder medirse la diferencia de voltajes en el step-up ( base de calculo del control 2).

Los controles son ajustados para obtener el máximo rendimiento del sistema , manteniéndolo estable en cada caso:



- Control 1: Se ajustan la fuerza de aceleración a bajas velocidades de manera que se obtenga el menor tiempo por vuelta. Se aumenta dicha fuerza hasta llegar a la inestabilidad del sistema y se ajusta el control a una fuerza algo inferior que lo mantenga estable . La fuerza a altas velocidades ( $V > 60 \text{ Km/h} \rightarrow F = 350 \text{ N}$ ) es calculada de manera que el sistema necesite algo menos de la potencia de pico de la pila, pudiendo de esta manera cargar los condensadores mientras acelera.
- Control 2: Las constantes del controlador PI ( $K, K_i$ ) son ajustadas de manera que el sistema se mantenga estable. Dentro de la zona estable se busca mediante el matlab toolbox los valores para los que se obtiene el menor tiempo por vuelta.

### 3.5.1. Escenario 1

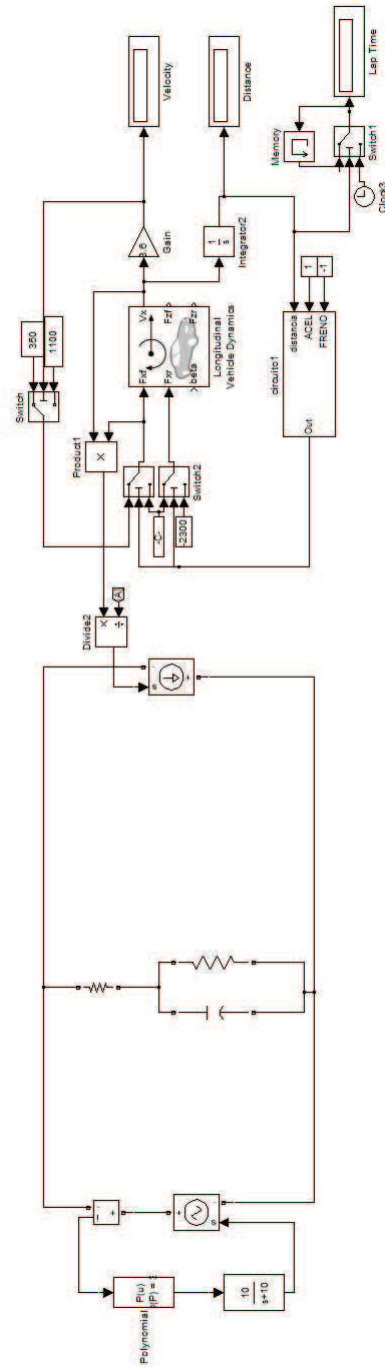


Figura 3.11: Escenario de simulación 1

### 3.5.2. Escenario 2 y 3

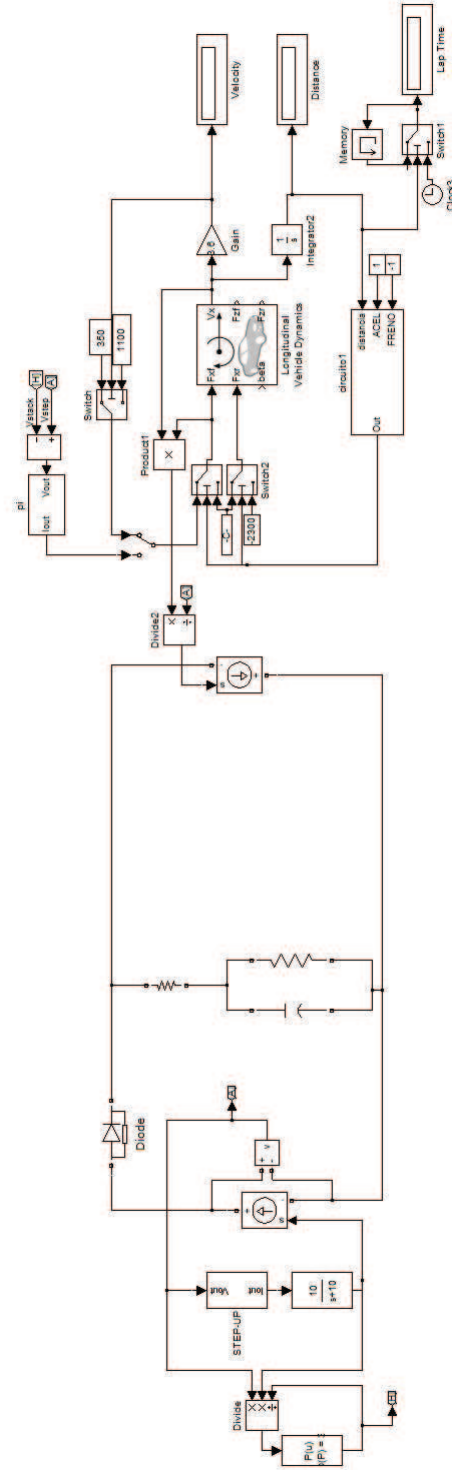


Figure 3.12: escenario de simulación 2 y 3 ( dependiendo de la posición del interruptor manual se selecciona el control 1 o 2 )

## 3.6. Resultados

### 3.6.1. Escenario 1

El escenario mostrado en la figura 3.11 es simulado en este apartado. El control se ajusta a 800N de empuje si la velocidad es inferior a 60Km/h y a 350N en caso de ser superior. Se ajusta así por ser el caso límite de estabilidad.

Simulando se obtiene un tiempo de vuelta al trazado de 58,46 segundos.

Si se observa la gráfica de corrientes (figura 3.13) se aprecia claramente que el condensador solo aporta una pequeña parte de la potencia en los picos, la mayor parte de la potencia la aporta la pila. Se observa también que la pila no produce el máximo (180 A) todo el tiempo, luego existe la posibilidad de mejorar el control, para mejorar el rendimiento. Se supone óptimo que la pila funcione a máximo régimen todo el tiempo de la carrera, de manera que entregue la máxima cantidad de energía posible al coche.

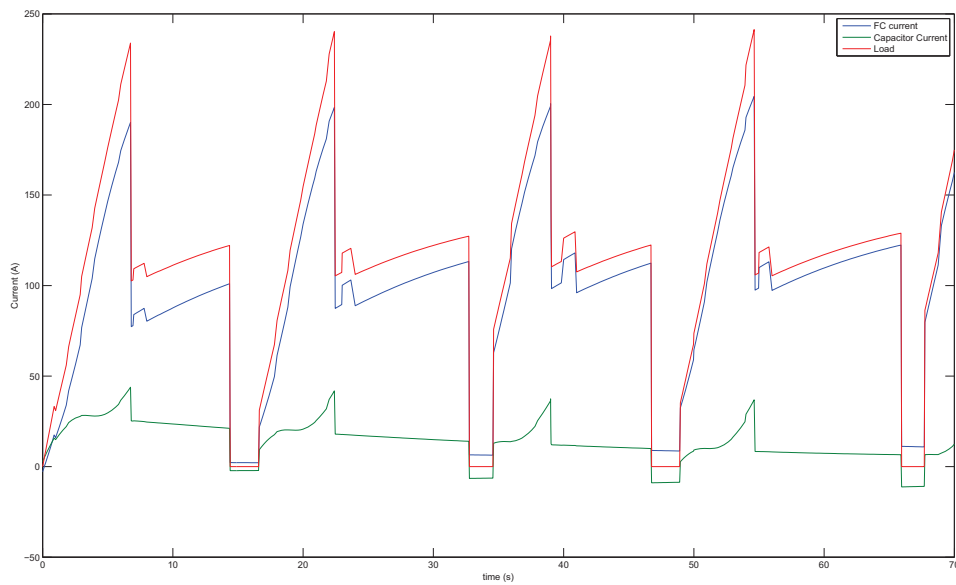


Figura 3.13: Escenario 1 Corrientes (A)

La gráfica de potencias (figura 3.14) muestra las mismas tendencias que la de corrientes. Se observa además que la potencia aportada por los condensadores es de 2000W de pico y que este valor decrece vuelta tras vuelta. Además se aprecia que se le está sometiendo a la pila a una carga de 9.5 kW que no es soportable por ella, esto es debido a que no existe limitador de corriente en esta configuración.

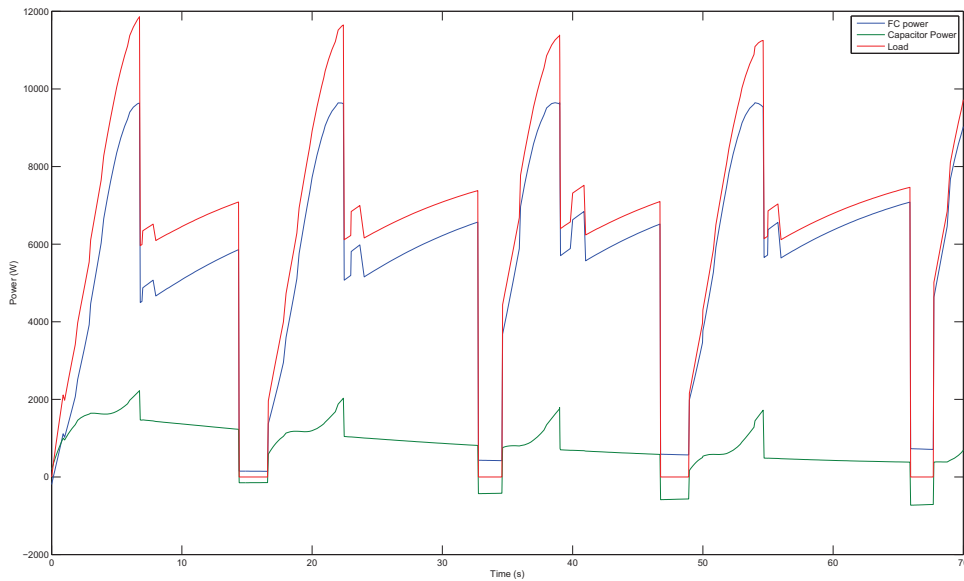


Figura 3.14: Escenario 1 potencias (W)

Si observamos los voltajes (figura 3.15), se aprecia clara mente que la energía almacenada en el condensador va decreciendo, y esta es la razón de que cada vez aporte menos potencia al sistema.

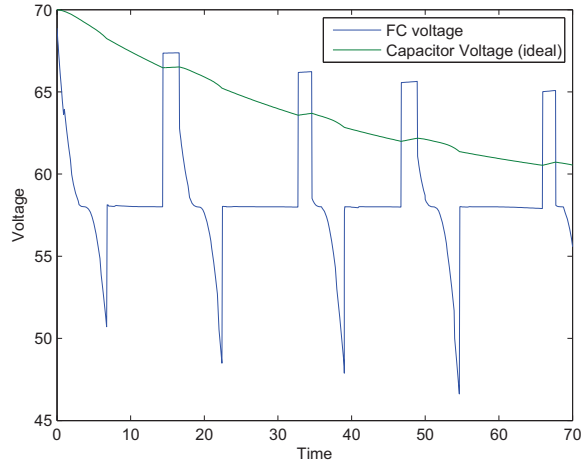


Figura 3.15: Escenario 1 Voltajes (V)

Esta configuración sería muy inestable en la realidad ya que la pila probablemente se pararía por sobrecarga. Además, en una carrera larga sería probablemente mas positivo ahorrarse el peso de los condensadores, ya que acabarían por no contribuir a la demanda de potencia.

### 3.6.2. Escenario 2

En este caso el controlador de velocidad se puede ajustar de manera que la fuerza aplicada al coche sea mayor. Esto es debido a que esta configuración; gracias al step-up puede soportar picos de demanda mayores que la configuración con el condensador en paralelo (escenario 1). El controlador se ajusta para aplicar 1100N si la velocidad es inferior a 60Km/h y 350N si es superior.

Simulando este escenario se obtiene un tiempo de vuelta de 53,91 segundos.

Se puede observar (figura 3.16) que en este caso el sistema esta entregando 18kW de pico ( En el escenario 1 eran 12kW). El condensador entrega 12 kW en los picos de potencia, ayudando así a la pila a suplirlos. Además la célula de combustible tiene una producción prácticamente constante e igual a su máximo, lo cual esta cerca del óptimo. La pila entrega prácticamente toda la energía que es capaz de entregar en el periodo de tiempo de la carrera. Los únicos momentos en los que la pila produce menos son en los que la demanda cae y simplemente se cargan los condensadores con la potencia de la pila.

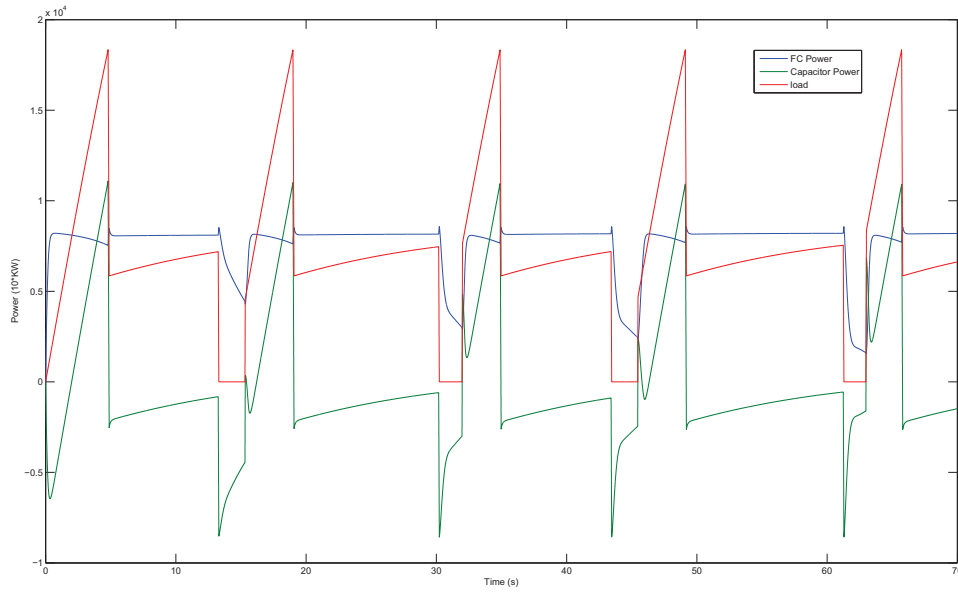


Figura 3.16: Escenario 2 potencias (W)

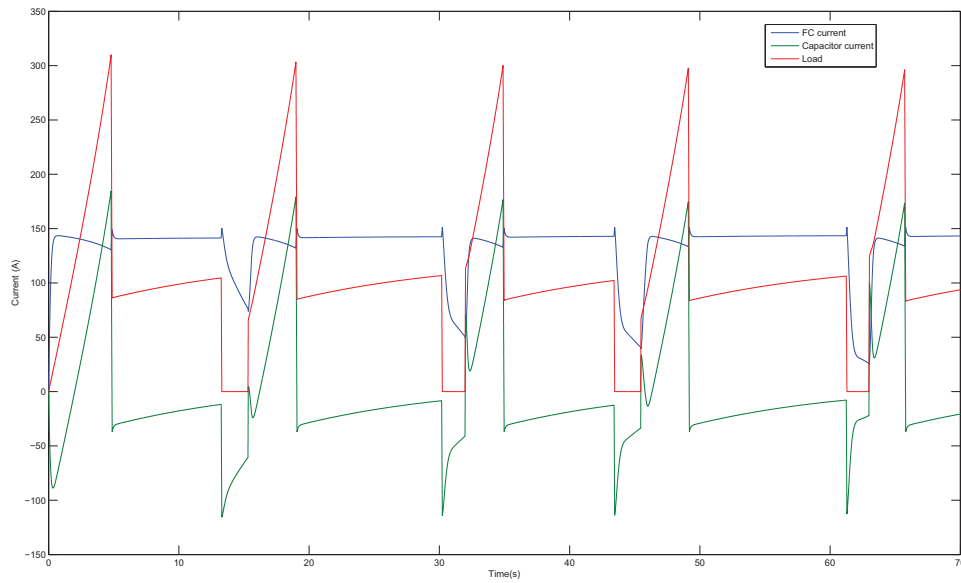


Figura 3.17: Escenario 2 corrientes

En este caso la potencia entregada por los condensadores no desciende a lo largo de la carrera, sino que mantiene sus valores. Esto es debido a que los condensadores no tienen tendencia a descargarse durante la carrera, sino que la energía que entregan la recuperan en los momentos de baja demanda. Por ello el voltaje medio de los condensadores a lo largo de la carrera va ascendiendo (figura 3.6.2). Absorben algo mas de energía de la que entregan, y así se asegura un sistema estable a largo plazo.

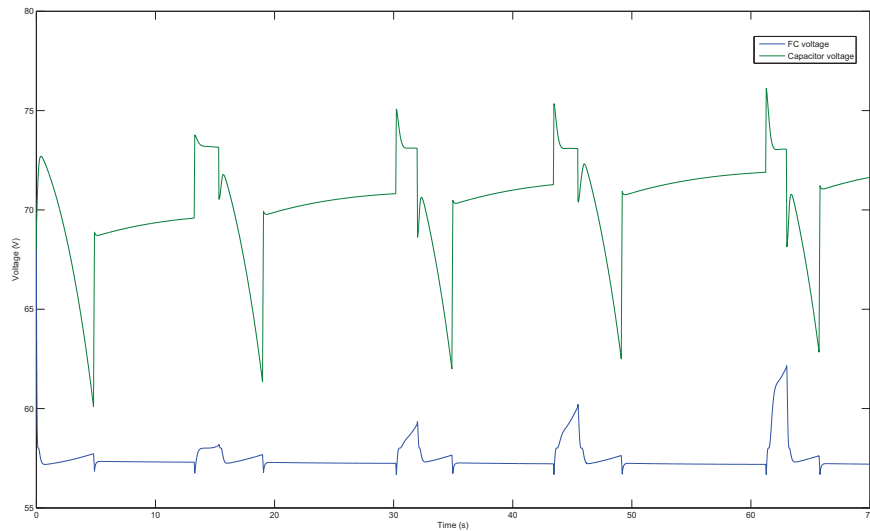


Figura 3.18: Escenario 2 Voltajes (V)

Observando como actúa el controlador de velocidad (figura 3.19) se comprueba la reducción de aceleración cuando se alcanzan los 60Km/h de velocidad de corte, este es el momento en que el controlador reduce la fuerza de empuje. Este fenómeno se puede observar en todas las gráficas, ya

que en ese instante el condensador pasa de entrega la máxima potencia a cargarse. El efecto real es que se limita la velocidad del kart en rectas para así cargar los condensadores y tener una mejor salida en la siguiente curva.

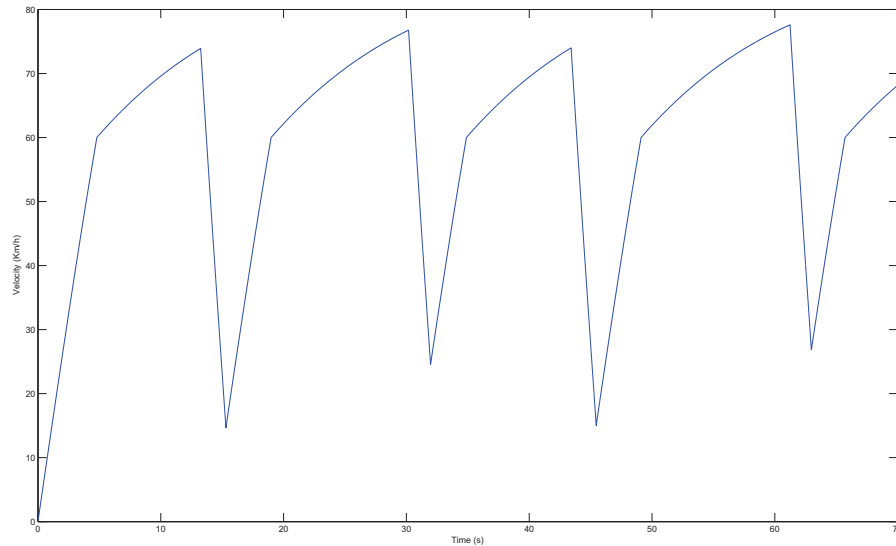


Figura 3.19: Escenario 2 Velocidad

Este sistema funciona perfectamente y mejora cualitativa y cuantitativamente el sistema de el escenario 1. Además asegura que puede ser usado para mucho mas tiempo del simulado, ya que la tendencia de los condensadores es ascendente, luego el tiempo de vuelta en la siguientes vueltas sera igual o menor. Si se ajusta el controlador con mayores fuerzas de empuje, el tiempo por vuelta se reduce algo, pero el condensador se ve descargado a lo largo de la carrera y el kart no tendría el mismo comportamiento vuelta tras vuelta. Luego el ajuste del controlador es el mas rápido que mantiene el sistema estable a lo largo del tiempo.

### 3.6.3. Escenario 3

Como el fenómeno que se quiere evitar es el cruce de voltajes .El controlador 2 intenta evitar este fenómeno. Intenta mantener una diferencia de voltaje de 3V entre la salida del step-up (condensadores) y la entrada (pila).

cruce de voltajes: La tensión a la salida del step-up es inferior a la entrada. Se produce descontrol del limite de corriente y riesgo de sobrecarga de la pila

Con este controlador se obtiene un tiempo de vuelta de 49,72 segundos.

La producción e la pila es constante a lo largo de toda la carrera.Esta practicamente en el óptimo de producción energética. El condensador sule perfectamente los picos. Los picos son mucho menos agresivos que con el controlador 1 ya que regula la fuerza de forma lineal. Y



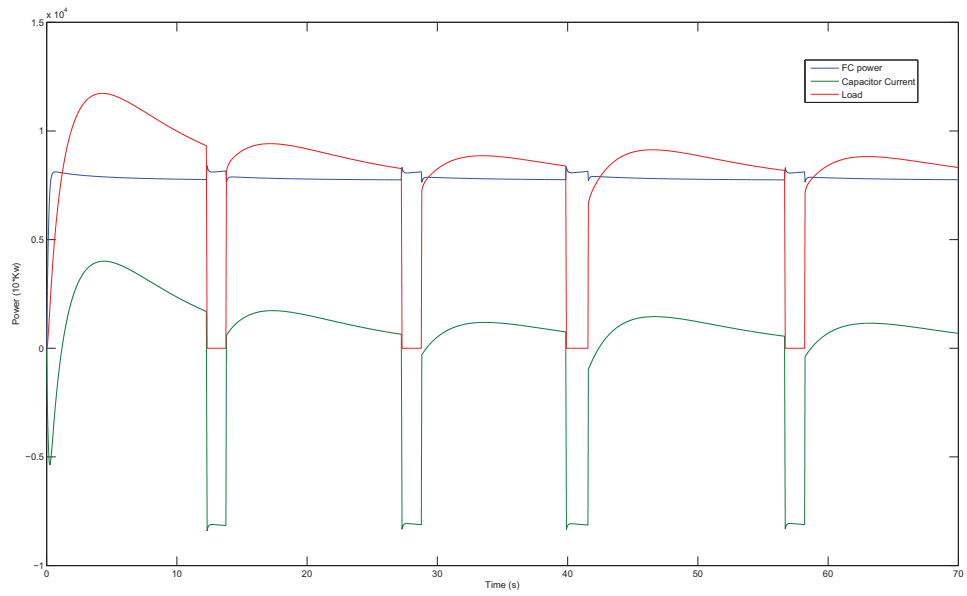


Figura 3.20: Escenario 3 Potencia (W)

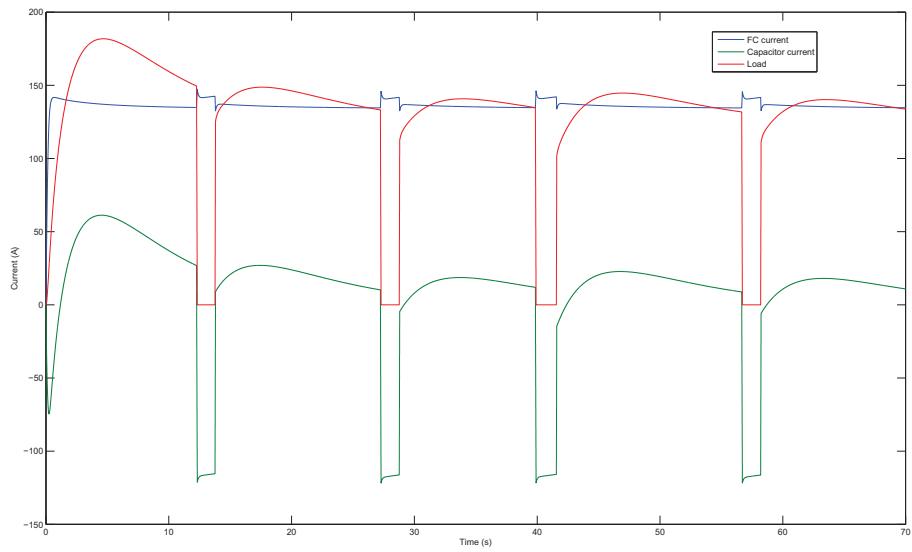


Figura 3.21: Escenario 3 Corriente (A)

Los condensadores son descargados suavemente, incrementando así su durabilidad, evitando su calentamiento y aumentando su eficiencia.

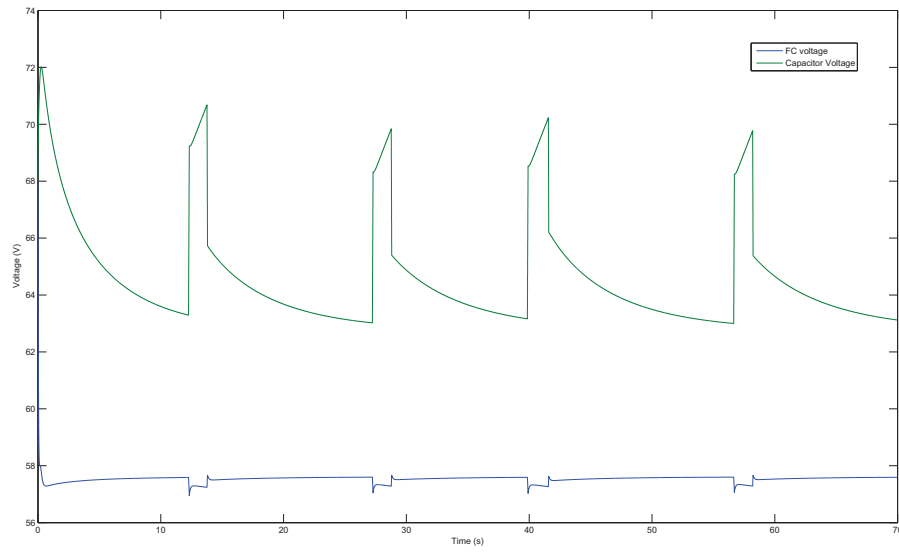


Figura 3.22: Escenario 3 Voltajes (V)

La fuerza disponible en el pedal es muy variable debido a las constantes cargas y descargas del condensador. Originan una mayor disponibilidad de energía en los condensadores y por tanto el controlador permite utilizar mas fuerza de empuje.

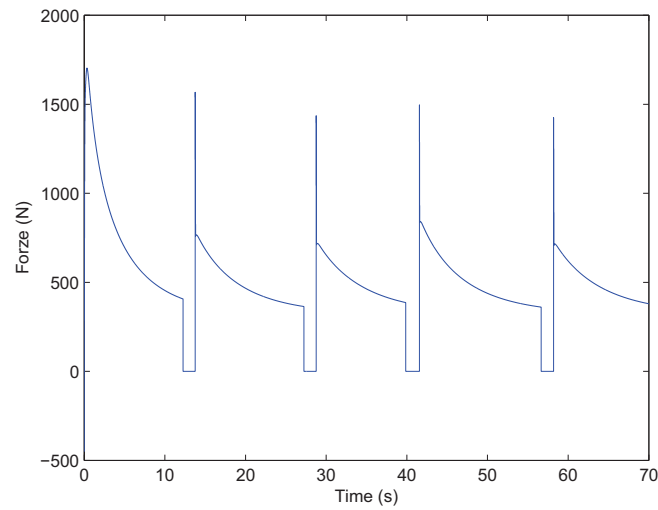


Figura 3.23: Escenario 3 Fuerzas (N)

### 3.7. Conclusiones

Se han optimizado dos configuraciones diferentes del sistema. Se han diseñado he implementado 2 controles diferentes de la carga. De la combinación de los 2 escenarios y los 2 controles han surgido 3 escenarios posibles de simulación. Para compararlos se han sometido al mismo trazado(sección 3.4):

- Escenario 1: Es el mas lento de los tres. Podría ocasionar problemas de sobrecarga de la pila, al no estar limitada la corriente que se le demanda. Además los condensadores se van

descargando, luego no es un sistema completamente estable a largo plazo.

- Escenario 2: Obtiene un mejor tiempo que el anterior. Evitando a su vez el riesgo de sobre carga de la pila mediante la limitación de corriente del step-up.
- Escenario 3: Es el que obtiene un mejor tiempo por vuelta. Al tener un control mas suave y lineal los componentes electrónicos son sometidos a menores esfuerzos. Esta suavidad incrementa la estabilidad del sistema. La única desventaja de este sistema es la dificultad de conducción debido a la variación de la aceleración disponible en el pedal.

A la vista de la tabla comparativa 3.2 es claro que la mejor opción es el escenario 3. Ya que es el que menor tiempo por vuelta obtiene, debido al mejor aprovechamiento que hace de la energía de la pila y a que consigue obtener mayor cantidad de energía de la misma.

Escenario	Vuelta (seg)	Vmed	Ajuste del control	Configuración
1	58,46	45,37	Control 1: 350N-800N	Paralelo( figura C.2)
2	53,91		Control 1:350N-1100N	Step-up (figura C.1)
3	49,72	63,5	Control 2: $K=150$ , $K_d=0.0001$	Step-up (figura C.1)

Cuadro 3.2: Comparación Escenarios

El único inconveniente posible al escenario 3, es el hecho de que la fuerza disponible en el pedal varía considerablemente y no sigue un patrón claro para el piloto, lo cual puede confundir al piloto en su condición.

## Capítulo 4

# Conclusiones

En este proyecto se han experimentado y caracterizado todos los elementos de los que se compone el Kart de Hidrógeno Formula Zero construido por la Fundación Hidrógeno Aragón. Se ha comprobado que todos ellos funcionan correctamente y de una manera razonablemente próxima a lo indicado en su hoja de características y por tanto válida.

Con el fin de ampliar el conocimiento sobre dichos elementos ( step-up, pila, condensadores, carga) se ha realizado un análisis exhaustivo con ensayos y experimentos de cada uno. Como resultado se han obtenido sus características, modo de funcionamiento y límites reales.

Para cada uno de estos equipos se ha desarrollado un modelo matemático, que posteriormente ha sido implementado en una simulación (matlab simulink):

- Pila de combustible: Ha sido modelada según sus formulas físicas elementales (apartado 3.2.1) . Se ha realizado una regresión de las ecuaciones teóricas para lograr la mayor proximidad posible a la pila real.
- Condensador: Ha sido modelado mediante su circuito equivalente (figura 3.3). Los valores de las resistencias de dicho circuito se obtuvieron directamente de la experimentación realizada (apartado 2.4).
- Step-Up: Para su simulación se ha utilizado una fuente de corriente controlada por un control PI. Dicho control trata de mantener el voltaje deseado (72V) en los condensadores. La corriente de salida a sido limitada mediante una saturación en el integrador (apartado 3.2.3).
- Dinámica del vehículo: Se establecen diferentes fuerzas de empuje, mediante las ecuaciones mecánicas del vehículo se obtiene la velocidad y aceleración. A partir de la velocidad y la fuerza aplicada se obtiene la potencia necesaria para mover el vehículo. La fuerza aplicada depende de si el piloto pisa el acelerador o no y de como se decida gestionar la energía (apartado 3.2.4).

Se plantean dos configuraciones de conexión de bloques diferentes, una con los condensadores en paralelo a los bornes de la pila y otra con step-up para elevar la tensión en los condensadores (apartado 3.3). Cada configuración se corresponde con una conexión eléctrica de los elementos reales del kart.

Con el fin de realizar una mejor gestión de la energía se diseñan dos controles que varían la fuerza aplicada sobre el vehículo. El primero de ellos se basa en la velocidad, reduciendo la fuerza a altas velocidades. Y el segundo se basa en la diferencia de voltajes existente entre la pila y los condensadores, tratando de mantener la diferencia en 3 voltios (apartado 3.2.4).

Combinando las 2 configuraciones y los 2 controles planteados se dispone de 3 escenarios de simulación. La combinación del control 2 con la configuración en paralelo no se simula por carecer de sentido físico ( No existen las variables de control en el sistema).

Para poder comparar objetivamente los escenarios, todos ellos se someten al mismo trazado estándar ( apartado 3.4).

Como resultado de la simulación se determina que el escenario mas favorable es el numero 3( menor tiempo por vuelta al circuito/trazado), que es la combinación de la configuración con step-up y el control numero 2. Por tanto este seria el que debería implementarse. El único inconveniente

del control sería la dificultad de conducción por parte del piloto debido a la constante variación de la fuerza disponible en el pedal del acelerador.

El aporte mas importante de este proyecto es la creación de un modelo veraz en el que poder evaluar rápidamente la validez de un control para el sistema. Los controles planteados son los que parecen mas adecuados a la vista del autor, pero el verdadero reto es mejorarlos e desarrollar nuevas estrategias de control ayudándose del modelo existente para probarlas.

## Capítulo 5

# Continuación del trabajo

- Implementar los controladores en un circuito (electrónico) real y comprobar su funcionamiento
- Buscar nuevos e ingeniosos controles para el sistema. El modelo es valido para testear cualquier control rápidamente.
- Ajustar el control para los diferentes trazados del calendario de competiciones
- Intentar ajustar por otro método el control PI
- Modelizar los motores eléctricos y conectarlos con el sistema mecánico con la librería ‘sim drive line’
- Estudiar la idea de variar el voltaje del bus de los condensadores (cambiando el DC/DC).
- Realizar una comparativa exhaustiva de las simulaciones y la realidad para validar completamente el modelo ( Modificarlo si fuera necesario)
- Simular motores eléctricos para calcular la fuerza de empuje.
- Realizar la simulación transitoria de la pila de combustible con ecuaciones teóricas.

## Capítulo 6

# Figuras, Tablas y bibliografía

# Índice de figuras

1.1. Configuración con condensador en paralelo . . . . .	5
1.2. Configuración con step-up . . . . .	5
2.1. Resultado del experimento, pila de combustible conectada a la carga electrónica . .	8
2.2. Curva de polarización . . . . .	9
2.3. Respuesta al escalón de la pila . . . . .	10
2.4. Esma general del sistema . . . . .	10
2.5. Test de respuesta de la pila con motores . . . . .	11
2.6. Circuito equivalente a los condensadores . . . . .	13
2.7. Experimento de determinación de la resistencia en serie (Corriente (mA), Voltaje(V))	14
2.8. Resistencia en serie VS Corriente . . . . .	14
2.9. Resistencia en serie VS voltaje . . . . .	15
2.10. Auto descarga de los condensadores . . . . .	15
2.11. Test de conexión(corriente) . . . . .	16
2.12. Test de conexión ( Voltajes) . . . . .	17
2.13. Test de conexión(potencia) . . . . .	17
2.14. Interface de usuario de Race Studio . . . . .	18
2.15. Interface de usuario del programa de adquisición de datos de Inycom . . . . .	19
2.16. Comparación de simulaciones y datos reales . . . . .	20
3.1. Aproximación teórica de la curva de polarización. . . . .	24
3.2. Primer orden, tiempo de respuesta 1 seg . . . . .	25
3.3. Circuito equivalente a los condensadores simulado en Sim Power Systems . . . . .	25
3.4. Step-up, fuente de corriente controlada por PI . . . . .	26
3.5. Bloques que configuran la carga de potencia . . . . .	27
3.6. Load Control Bloques . . . . .	28
3.7. Sistema con el condensador situado en bornes de la pila de combustible FC . . . . .	29
3.8. Sistema con elevación de voltaje del bus mediante step-up . . . . .	29
3.9. Trazado estándar ( 1 significa aceleración máxima, -1 significa freno al máximo) . .	30
3.10. Calculo del tiempo para completar el trazado ( tiempo de vuelta) . . . . .	30
3.11. Escenario de simulación 1 . . . . .	32
3.12. escenario de simulación 2 y 3 ( dependiendo de la posición del interruptor manual se selecciona el control 1 o 2 ) . . . . .	33
3.13. Escenario 1 Corrientes (A) . . . . .	34
3.14. Escenario 1 potencias (W) . . . . .	35
3.15. Escenario 1 Voltajes (V) . . . . .	35
3.16. Escenario 2 potencias (W) . . . . .	36
3.17. Escenario 2 corrientes . . . . .	37
3.18. Escenario 2 Voltajes (V) . . . . .	37
3.19. Escenario 2 Velocidad . . . . .	38
3.20. Escenario 3 Potencia (W) . . . . .	39
3.21. Escenario 3 Corriente (A) . . . . .	39
3.22. Escenario 3 Voltajes (V) . . . . .	40
3.23. Escenario 3 Fuerzas (N) . . . . .	40



C.1. System General sketch . . . . .	69
C.2. Capacitor directly connected to the Fuel Cell terminals . . . . .	69
C.3. Fuel Cell input/output flows . . . . .	70
C.4. Cooling circuit sketch . . . . .	71
C.5. Fuel Cell control sketch . . . . .	72
C.6. Life line sketch . . . . .	73
C.7. Motor characteristics . . . . .	74
C.8. Maxwell Super capacitor . . . . .	76
C.9. Chassis design . . . . .	77
D.1. Pressure box ( solid work design) . . . . .	79

# Índice de cuadros

2.1. Pila de combustible conectada a los motores . . . . .	9
2.2. Ensayo sin limitación de corriente . . . . .	12
2.3. Ensayo con el limitador de corriente activado . . . . .	12
3.1. Valores de las variables ajustadas . . . . .	24
3.2. Comparación Escenarios . . . . .	41
B.1. Races puntuations . . . . .	66

# Bibliografía

- [1] <http://www.formulazero>.
- [2] Jay T.Pukrushpan, Anna G. Stefanopoulou, Huei peng. Control of Fuel Cell Power Systems. 23
- [3] <http://www.hidrogenoaragon.org/> 5
- [4] <http://circe.cps.unizar.es/>
- [5] [http://www.inicom.es/cms/template/home\\_tmpl.asp?obj=9&publish=true](http://www.inicom.es/cms/template/home_tmpl.asp?obj=9&publish=true) 11, 18
- [6] <http://www.eupla.unizar.es/index.phtml>
- [7] <http://www.teamelias.com/es/es/intro.php> 5, 26, 27
- [8] Scott Hamilton. An Analog Electronics Companion Basic Circuit Design for Engineers and Scientists. University of Manchester 15
- [9] <http://www.fia.com/en-GB/Pages/HomePage.aspx>
- [10] <http://www.solidworks.com/>
- [11] <http://www.mathworks.es/products/simpower/> 22
- [12] <http://www.mathworks.com/products/simdrive/> 22
- [13] <http://www.hydrogenics.com/> 28
- [14] Hidrógeno y pilas de Combustible, estado de la tecnica y posibilidades de Aragón. Fundacion para el desarrollo de las tecnologias del Hidrogeno Aragón 4, 66
- [15] Hidrogeno y Pilas de Combustible, Estudio de Prospectiva. Ministerio de Industria, Turismo y Comercio 4, 66
- [16] <http://www.motorlandaragon.com/index.aspx?lang=GB> 18
- [17] Anders R.Korsgaard, Mads P.nielsen, Søren, K.Kær. A novel model of HTPEM-based micro-combined heat and power fuel cell system. International Journal of Hydrogen 33(2008) 1921-1931 23
- [18] Anders R.Korsgaard, Mads P.nielsen, Søren, K.Kær. Conference on simulation modelling. Aalborg University 23
- [19] O'Hayre, Ryan, Suk-Won Cha, whitney Colella, and Fritz B.Prinz. Fuel cell fundamentals. New York: Jhon Wiley and sons, 2006.
- [20] Larminie, James, and Andrew Dicks. Fuel Cell Systems Explained. West Sussex: Wiley, 2003
- [21] Parker, Barry. Isaac Newton school of driving: Physics and your car. Baltimore: The Johns Hopkins university Press, 2003
- [22] Ogata, Katsuhiko. Modern control engineering. New Jersey: Prentice Hall, 2002
- [23] A.C.Olesen, J.R.Jensen and M.Ruperez Cerqueda, Shell Eco racer-Modelling and design of a fuel cell propulsion system, Aalborg university 2007 23

## Apéndice A

### Data sheets

#### A.1. Fuel cell