

# 4. Descripción del sistema real

---

## 4.1. Introducción

En este apartado se pretende identificar el sistema físico sobre el que se va a trabajar, y en el cual se basan los modelos matemáticos utilizados y sobre los que se simularán las distintas estrategias de control desarrolladas.

El modelo del coche que se está estudiando y desarrollado es un *Santana Vitara* proporcionado por la empresa *Santana motors* del cual sólo se conservará el chasis y algunos elementos, puesto que tanto el motor como el sistema de potencia, junto con la central de control de potencia, van a ser sustituidos en este proyecto. En la siguiente imagen (Figura 4.1) puede verse una fotografía del coche original cuya apariencia física se mantendrá intacta.



**Figura 4.1: Fotografía del coche en estudio**

## 4.2. Punto de partida

Para el desarrollo de este proyecto se ha partido de un trabajo ya realizado sobre el modelado matemático del coche [29]. Éste trabajo está formada por modelos en Matlab/Simulink, y consta de las siguientes partes:

- Modelo físico del coche: A partir de un determinado ciclo de conducción (conjunto de velocidades alcanzadas en cada instante de tiempo) obtiene la potencia demandada por el motor eléctrico para seguir dicho ciclo, y con ella la potencia demandada por los convertidores de potencia que unen el motor eléctrico con los dispositivos de potencia del coche. Ésta potencia es la que deben satisfacer las baterías y la pila de combustible.
- Modelo de la pila de combustible y del depósito de combustible: A partir de las potencias de referencia que el controlador supervisor le ordena, se obtiene la evolución del consumo de hidrógeno.
- Modelo del conjunto de baterías: A partir de las potencias de referencia que el controlador supervisor le ordena, se obtiene la evolución del estado de carga (SOC) de las baterías así como la tensión y la intensidad en ellas.
- Modelo del sistema de disipación de potencia: Resistencia donde es posible disipar potencia. El modelo obtiene la evolución de la energía disipada.

Aunque no era el objetivo principal de este proyecto, a estos modelos se les han realizado algunas modificaciones para intentar acercarlos un poco más a la realidad. Estas modificaciones son las siguientes:

- Introducción de una cierta dinámica al motor eléctrico (mediante un cierto tiempo característico de respuesta).
- Introducción de la curva de eficiencias a la pila de combustible (la pila de combustible tiene distintas eficiencias en cuanto al consumo de hidrógeno dependiendo de la potencia que se le demanda en cada instante).

Todos estos conceptos serán explicados en detalle posteriormente.

### 4.3. Sistema real

Para comenzar es importante presentar las características del coche convencional para más tarde compararlo con el nuevo coche híbrido [29]. Muchas de las características que se muestran a continuación se conservan en el nuevo vehículo, como por ejemplo aquellas relativas a la estructura física de coche. En el modelado que se presentará posteriormente se utilizan muchos de los datos que a continuación se muestran.

En la tabla 4.1 se muestran las dimensiones del coche estudiado (las cuales se mantendrán constantes). Junto a algunas variables se presenta el rango de tolerancia que permiten.

La tabla 4.2 muestra las masas permitidas para circular y las que pueden soportar ejes, etc. Ésta tabla es muy útil en la fase de diseño del sistema de potencia, puesto que restringe el peso, el tamaño y la colocación sobre los ejes en el coche de los componentes requeridos.

- **Bastidor:**
  - Tipo: Monocasco en chapa de acero, unido a chasis de largueros y travesaños de acero.
- **Suspensión:**
  - Delantera: De ruedas independientes con brazos oscilantes, tipo McPherson, muelles helicoidales y amortiguadores.
  - Trasera: Eje rígido con brazos longitudinales oscilantes, triángulo central, muelles helicoidales y amortiguadores.
  - Amortiguadores:
    - Delanteros: Telescópicos de doble acción.
    - Traseros: Telescópicos de doble acción.
  - Barra estabilizadora:
    - Delantera: Sí.
    - Trasera: No.
- **Transmisión:**
  - Tipo mecánica, a las ruedas traseras, opcionalmente a las cuatro ruedas.
- **Motor:**
  - Marca o fabricante: PEUGEOT-CITRÖEN.
  - Tipo (siglas): 9HX.
  - Potencia efectiva/fiscal: 66,2kW/11,47CV F.
  - Combustible: Gasoleo A.
  - Número de cilindros: 4.
  - Cilindrada y diámetro: 1560cm<sup>3</sup> y 75mm.

- **Embrague:**
  - Tipo: M/T.- De diafragma, monodisco en seco.
- **Caja de cambios:**
  - Tipo: Manual de 5 velocidades hace delante y 1 atrás.
  - Mando: Manual.
  - Numero de relaciones: 12 (6 carretera+6 campo).
- **Dispositivos de alumbrado y señalización:**
  - Nº proyectores corto alcance: 2.
  - Nº proyectores largo alcance: 2.
  - Nº proyectores marcha atrás: 1.
  - Nº proyectores antiniebla: 2 opcional.
  - Nº proyectores antiniebla atrás: 1.
  - Nº proyectores de pare (S1): 2.
  - Nº proyectores de pare (S3): 1.
- **Dirección:**
  - Diámetro volante: 375 mm (sin Air Bag), 385 mm (con Air Bag).
  - Asistencia: Sí.
- **Neumático:**
  - Número: 4 más 1 de repuesto.
  - Dimensiones: 195R15 94Q ó 94R ó 94S.
  - Neumáticos de uso temporal: N.A.
- **Dispositivos de frenado:**
  - Servicio: Doble circuito hidráulico en paralelo servo asistido, delante de disco y trasero de tambor.
  - Estacionamiento: Mecánico a las ruedas traseras.
  - Socorro: uno de los circuitos de frenado de servicio.
  - Asistencia: Servofreno de vacío y depresor.
  - Dispositivo antibloqueo: Opcional.
- **Instalación eléctrica:**
  - Tensión: 12 voltios.
  - Batería: 1.
  - Alternador/dinamo: Alternador.
- **Sistema de combustible:**
  - Capacidad del depósito: 55 l.
- **Equipamiento:**
  - Espejos retrovisores: 3.
  - Exteriores: 2.
  - Interiores: 1.
  - Asientos: 2 delanteros y 2 traseros.
  - Número de plazas: 5.

- **Puertas:**  
4 puertas y portón trasero.
- **Ruido vehículo parado:**  
81dB (A) a 3000 rpm.

**Cuadro 4.1: Dimensiones del Santana Vitara**

Dimensiones	Valores (mm)
Longitud total	3672/3702
Distancia entre ejes	2200
Voladizo trasero	777/807
Altura total	1675/1740
Anchura total	1630/1655
Vía anterior	1395/1425
Vía posterior	1400/1430

**Cuadro 4.2: Pesos y masas del Santana Vitara**

Pesos y masas	Valores (Kg)
M.T.M.A.	1850
M.M.A.	1850
Primer eje	850
Segundo eje	1100
Tara nominal	1342
MMR s/F	1500
MMC s/F	2300
MMC c/F	3350

Teniendo en cuenta las características presentada por el coche original se ha realizado un diseño de los componentes de manera que se mantuviesen unas condiciones mínimas exigidas para un turismo. De esta forma las expectativas de diseño han sido los siguientes:

- Tiempo de aceleración de 0 a 100 km/h: 35s.
- Consumo mixto (litros H<sub>2</sub>/100km): 66.7.
- Consumo mixto (litros gasolina equivalente/100km): 6.9.
- Autonomía urbana: 180 km.
- Autonomía extraurbana = 130 km.
- Autonomía mixta = 150 km.

Además ha sido necesario realizar un estudio de la distribución de los pesos en el coche híbrido para compensar y mantener así la estabilidad que se alcanzaba con el coche original. En la siguientes figuras (figuras 4.2 y 4.3) se presenta la estructura del coche original y su localización dentro del vehículo, así como también se muestran los componentes que van a ser necesarios aportar al vehículo híbrido y

sus localizaciones. Puede verse cómo han variado considerablemente el número de equipos necesarios, siendo en el caso del coche híbrido mayores y más voluminosos que en el caso inicial. Se ha intentado mantener la disposición más similar posible a la del vehículo inicial para poder compensar así las masas y mantener la estabilidad en la conducción. Además en el caso de los depósitos de hidrógeno, hay que seguir unas normativas estrictas para la colocación en un lugar lo más seguro posible en caso de colisión. Si comparamos las dos figuras vemos que la disposición de los depósitos es la misma que en el caso de la gasolina, detrás cerca del maletero ya que es la parte que menos sufre en caso de accidente.

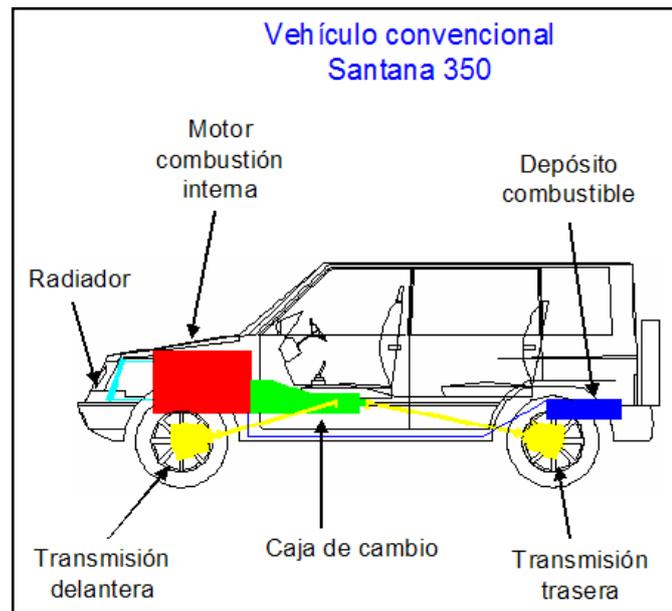


Figura 4.2: Esquema del coche de partida con sus componentes

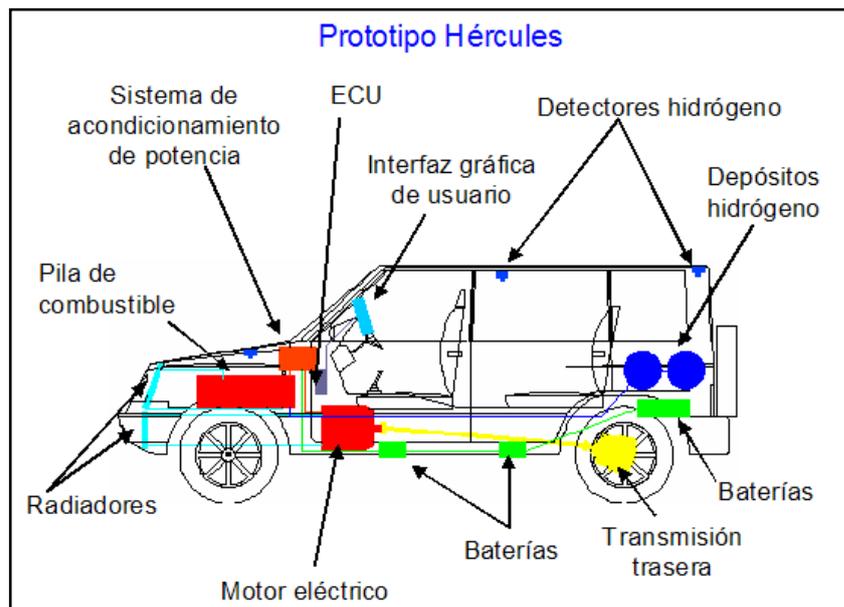


Figura 4.3: Esquema del coche híbrido con sus componentes

### 4.3.1. Pila de combustible

#### a) Stack:

El coche híbrido que se va a desarrollar tiene una configuración de vehículo híbrido en serie, con pila de combustible y baterías como fuentes de energía para alimentar al motor eléctrico, el cual es el encargado de proporcionar la potencia mecánica que mueve al vehículo.

Para seleccionar la pila de combustible se han considerado los datos de diseño, así como el hecho de que ha de ser capaz de satisfacer la demanda característica del coche en circulación, y llegar a un compromiso entre potencia suministrada por la pila y el peso del vehículo, manteniendo el carácter híbrido del coche, es decir, haciendo que la pila de combustible no sea utilizada simplemente para alimentar a las baterías y equipos auxiliares, sino que sea capaz de mover al vehículo independientemente de los demás equipos.

Por las razones anteriores se ha optado por una pila de combustible tipo PEM (Polymeric Electrolyte Membrane), que funciona a temperaturas bajas (entorno a 80 °C) y además soporta unos tiempos de arranque y parada bastante rápidos en comparación con otros tipos de pilas. Todo esto hace que este tipo de pila sea muy apropiada para aplicaciones automovilísticas como la que se estudia en este proyecto.

En la siguiente figura 4.4 se muestra una imagen de la pila de combustible elegida. Es bastante compacta, y trae un sistema de control local embebido.



Figura 4.4: Pila de combustible elegida

En la siguiente tabla se muestran las características de la pila de combustible:

**Cuadro 4.3: Características de la pila de combustible**

Característica	Valor
Potencia nominal	56 kW
Número de celdas	256
Tensión de salida	150 – 247
Rizado	5% a 1Hz
Peso	96 Kg
Dimensiones	480/200/578 mm
Temperatura de operación	5 – 45 °C
Vida útil	1500 h

**b) Sistema de control:**

El sistema de control local, que ya viene embebido en la pila, recibe y envía señales para la supervisión y su correcto funcionamiento. Todas las medidas realizadas en la pila se transmiten por CAN bus, que es un bus de datos típicamente usado para transmitir señales en coches.

La pila consta de un sistema de seguridad que interrumpe el funcionamiento de ésta en caso de que se detecte una sobrecarga, evitándose así un posible daño en las membranas de la pila.

**c) Sistema de refrigeración:**

El sistema de refrigeración de la pila de combustible usa agua, estando compuesto por una bomba de impulsión en el circuito primario y por un radiador que impulsa también agua en el secundario. Además incluye un tanque de expansión y un intercambiador de placas.

**d) Compresor de aire – Alimentación del cátodo**

Para la alimentación del cátodo de forma correcta es necesaria una cierta presión de hidrógeno, con lo que ha de incluirse una soplante con las características que se muestran en el siguiente cuadro 4.4:

**Cuadro 4.4: Características del compresor de entrada de aire**

Flujo de aire (lpm)	Presión (bar)	Potencias de la pila (kW)
584	1,12	0
584	1,13	7,8
1229	1,26	27,6
1935	1,48	43,4
2350	1,60	51,7
2611	1,26	56,1

**e) Humidificador:**

El fabricante de la pila de combustible recomienda un humidificador de la corriente de hidrógeno a la entrada del ánodo. Además como la pila va a funcionar en modo 'Flow-through' tiene que ser necesario una recirculación del hidrógeno a la salida para reducir el consumo de hidrógeno.

**4.3.2. Baterías**

Las baterías que se van a utilizar son de Ion-Litio, debido a las buenas características que presentan, como su alta energía y potencia específicas. Así, son bastante adecuadas para su uso en vehículos híbridos.

A continuación se muestra una tabla comparativa entre distintos tipos de baterías, donde pueden apreciarse las ventajas de las baterías escogidas:

**Cuadro 4.5: Comparativa entre distintos tipos de batería**

Tipo de batería	Wh/kg	W/Kg	ciclos
Lead-acid	35	180	600
Nickel-cadmium	50	120	1500
Nickel-metal hydride	60	200	100
Lithium-ion	135	430	1200

Finalmente se ha estimado que se requieren de 8 módulos de las baterías de ion-litio cuyas características se presentan a continuación. Así mismo, puede verse una fotografía de uno de los módulos de batería en la siguiente figura 4.5.



Figura 4.5: Imagen de uno de los módulos de batería

- Voltaje: 19,2 V.
- Capacidad (C/5): 65 Ah.
- Dimensiones (incluyendo terminales): 268/148/269 mm.
- Peso: 14,8 kg.
- Energía específica: 84 Wh/kg.
- Densidad de energía: 117 Wh/l.
- Descarga estándar 23 °C:
  - Intensidad continua máxima: 120 A.
  - Intensidad máxima en pulsos de 30s: 200 A.
  - Voltaje de cortocircuito: 15 V.
- Carga estándar:
  - Voltaje de carga: 21,9 V.
  - Intensidad recomendada: 30 A.
  - Tiempo de carga completa: 2,5 h.
- Resistencia interna: 10mOhm.

Además de las anteriores características, se presentan las curvas de descarga para distintas intensidades y la curva de descarga para una tensión dada en las figuras 4.6 y 4.7. Estas curvas permiten la obtención de los parámetros necesarios para el modelo.

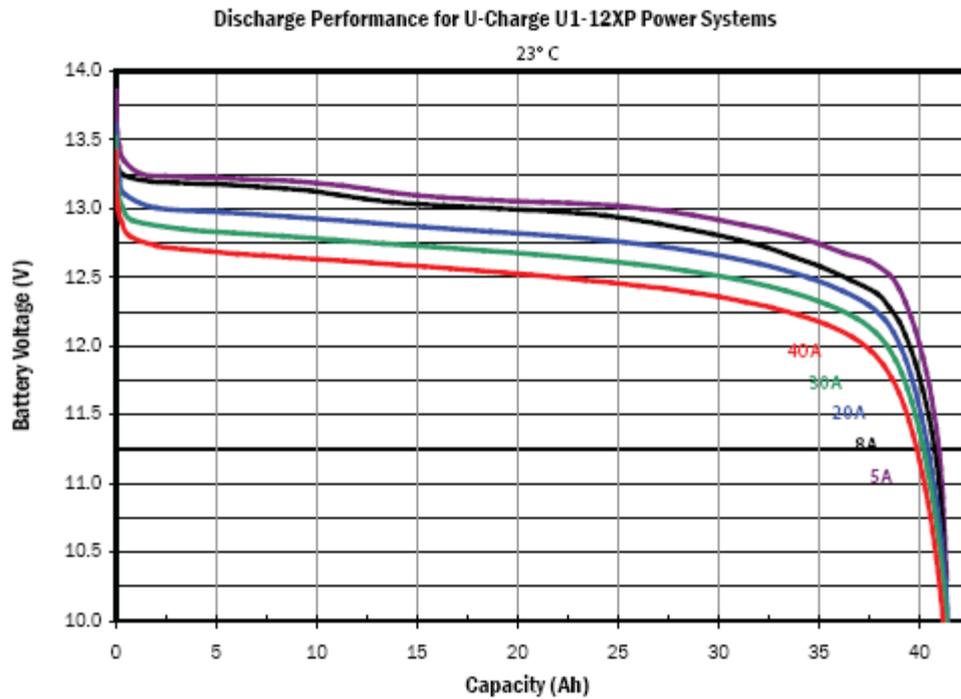


Figura 4.6: Curva de descarga para valores constantes de intensidad

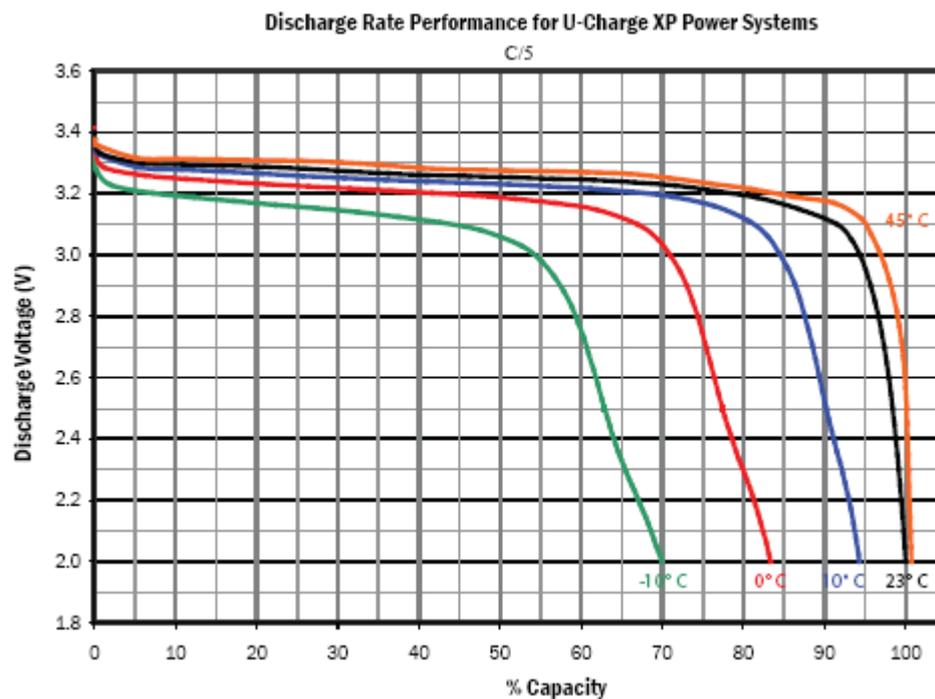


Figura 4.7: Curva de descarga para valores constantes de temperatura

### 4.3.3. Motor eléctrico

El motor eléctrico va acoplado a la dirección trasera mediante una transmisión directa, luego no existe la caja de cambios convencional.

Se ha escogido un motor eléctrico síncrono de imanes permanentes (PMSM). En este tipo de motor la excitación del rotor se realiza mediante imanes permanentes, aplicando una corriente alterna trifásica sobre la armadura del estator. La forma de onda de la corriente aplicada sobre el estator es sinusoidal.

A continuación se enumeran las principales características del motor eléctrico elegido:

- Velocidad máxima: 150 km/h a 5976 rpm.
- Potencia máxima: 66kW.
- Par máximo: 460 Nm.
- Dimensiones: 300 mm de diámetro y 310 mm de longitud.
- Peso: 75 kg.

Como el vehículo híbrido tiene frenado regenerativo, la máquina va a tener dos modos de funcionamiento: como motor, y como generador. Las pérdidas variarán según el modo de funcionamiento.

Seguidamente se presentan las curvas par – velocidad angular, y potencia – velocidad angular.

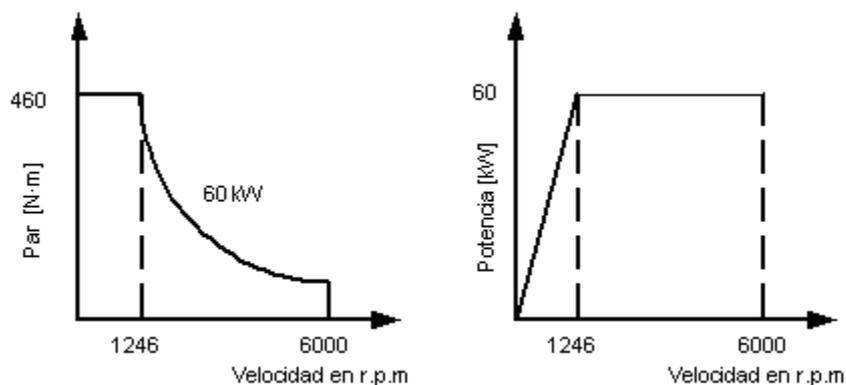


Figura 4.8: Curvas del motor eléctrico

#### 4.3.4. Resistencia de frenado (sistema de disipación de potencia)

Estas resistencias tienen la función de absorber toda la potencia que no pueda ser recuperada por las baterías durante el frenado regenerativo. Simplemente será un dispositivo de disipación de potencia (resistencia eléctrica).

#### 4.3.5. Sistema de acondicionamiento de potencia

El sistema de acondicionamiento de potencia está compuesto por los inversores y convertidores necesarios para adaptar las fuentes de potencia con el motor y que el sistema se comporte correctamente. En la siguiente figura puede verse el esquema eléctrico del sistema global.

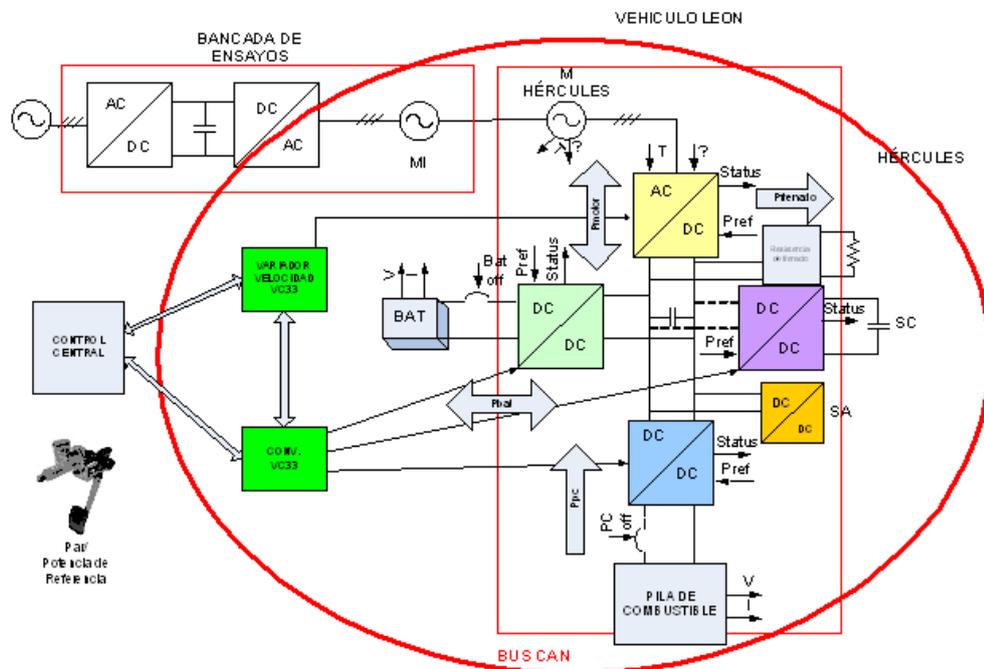


Figura 4.9: Esquema eléctrico del sistema de acondicionamiento de potencia

En esta figura se observa que el sistema de acondicionamiento de potencia está compuesto por un convertidor CC/CC que acondiciona la potencia de la pila de combustible al bus de continua que va a alimentar al motor. Este convertidor es unidireccional ya que la pila no puede absorber potencia. El convertidor CC/CC va a tener una tipología de convertidor Boost. Además, hay otro convertidor CC/CC bidireccional que une al bus de continua con las baterías. Este convertidor tiene una tipología boost/buck, y tiene que permitir la circulación de potencia en ambos sentidos, para que las baterías puedan cargarse y descargarse. Hay otro convertidor CC/CA para transformar la continua del bus de continua en alterna y así poder alimentar al motor. Este convertidor conecta al bus de continua con el motor, y

también es bidireccional, para que pueda circular potencia hacia el motor cuando éste lo necesite, así como desde el motor cuando este funcione en modo generador durante la frenada regenerativa.

#### 4.3.6. Depósitos de hidrógeno

La autonomía del vehículo debe ser de al menos 100 km y la presión de almacenamiento de 350 bares. Tras unos estudios se ha llegado a que éstos tienen que tener una capacidad de 100 l y 2,4 kg de H<sub>2</sub>. Según la normativa europea no puede haber más de 4 depósitos por vehículo (Directiva Europea). La posición más segura para los tanques es en la parte posterior, ya que es la parte donde menos probabilidad hay de colisión, y es la que frecuentemente se ve menos afectada en un choque severo y la que tiene una menor energía de deformación.

## 4.4. Modelado del vehículo

En este apartado se van a exponer los modelos matemáticos que han sido utilizados para las simulaciones del vehículo híbrido. Como se decía anteriormente, se ha partido de un trabajo ya realizado sobre el modelado del vehículo [29]. Éstos conforman un modelo cuasi-estático del sistema total.

Sobre éste trabajo se le han realizado las siguientes modificaciones para hacerlo un poco más real:

- Introducción de una cierta dinámica al motor eléctrico (mediante un cierto tiempo característico de respuesta). Esta modificación sólo será tomada en cuenta para simular la estrategia de control predictivo, que es para la que tiene sentido.
- Introducción de la curva de eficiencias a la pila de combustible (la pila de combustible tiene distintas eficiencias de consumo de hidrógeno dependiendo de la potencia que se le demanda).

Con estos modelos será posible simular las estrategias de control de gestión de potencia desarrolladas en este proyecto .

En la siguiente figura 4.10 puede verse un diagrama de bloques simplificado del vehículo. Por una parte puede verse el modelo del motor, junto con la transmisión y el chasis, y por otra parte se ve la pila de combustible y el depósito de hidrógeno, las baterías y las resistencias de frenado. Así mismo, entre cada dos bloques se aprecian las distintas señales básicas de entrada y salida. Con éste esquema queda representado el flujo de potencia con que serán simulados los modelos, lo cual queda resumido en los siguientes pasos:

1. En cada instante de simulación, las velocidades que marca el ciclo de conducción hace que se ordene al coche seguir esas velocidades  $v(t)$ , con una cierta aceleración  $a(t)$  (derivada de la velocidad respecto al tiempo) y con la inclinación  $\alpha(t)$  del terreno que se haya definido para la simulación (cero por defecto).
2. Según el modelo físico del coche, esto se traduce en una necesidad de un cierto par y una cierta velocidad angular en las ruedas:  $T(t)$  y  $\omega(t)$ .
3. Con las ecuaciones de la transmisión se calcula entonces el par y la velocidad angular que tiene que tomar el motor eléctrico:  $T_m(t)$  y  $\omega_m(t)$ .
4. Para seguir este par y esta velocidad angular, con el modelo del motor eléctrico se calcula la potencia eléctrica necesaria:  $P_m(t)$ .
5. Como decíamos, enlazando el motor eléctrico y las fuentes de potencia del coche, hay un sistema de acondicionamiento de potencia, el cuál conlleva ciertas pérdidas (las cuales vienen definidas por unos rendimientos). Así,

con el modelo del sistema de acondicionamiento de potencia se calcula la potencia necesaria:  $P_d(t)$ .

- Ésta potencia, que según el modo de funcionamiento del motor (como motor o como generador) podrá ser positiva o negativa, ha de repartirse entre los dispositivos de potencia: pila de combustible  $P_p(t)$ , baterías  $P_b(t)$  y resistencias disipadoras  $P_r(t)$ .

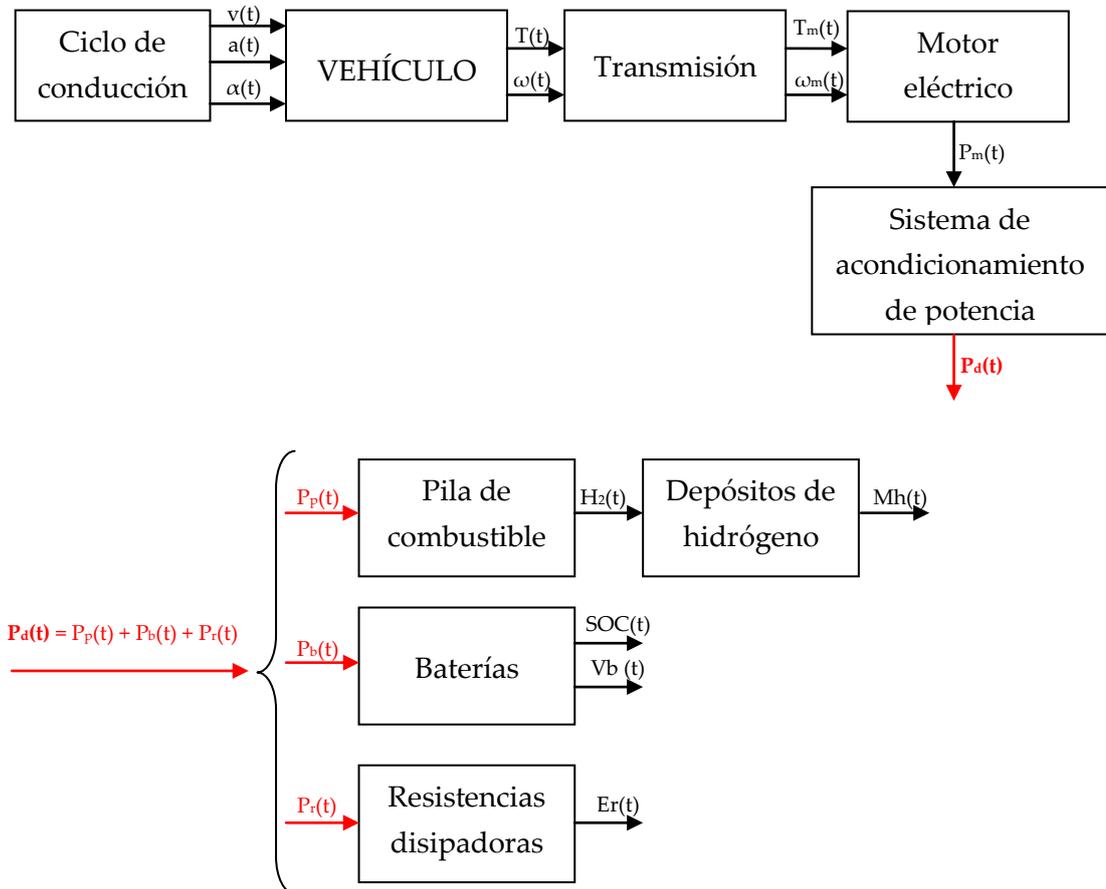


Figura 4.10: Esquema del modelo del coche

En resumidas palabras, la primera parte del modelo se corresponde con el vehículo, y proporciona la potencia necesaria para alimentar al motor y así alcanzar las velocidades requeridas por el ciclo de conducción (que será un dato de entrada en las simulaciones). Por otra parte, la segunda parte del modelo se corresponde con los componentes generadores y consumidores de potencia, los cuales son la pila de combustible, las baterías y las resistencias disipadoras. Estos dispositivos reaccionarán de una manera u otra, variando el estado de carga de las baterías (SOC), la tensión de éstas ( $V_b(t)$ ) y la cantidad de  $H_2$  en el depósito.

A continuación se entra en un poco más de detalle en cada uno de los modelos anteriores.

#### 4.4.1. Ciclo de conducción

El bloque que se denomina “ciclo de conducción” proporciona un dato de entrada al programa con el que se simula el comportamiento del vehículo, dando en cada instante la velocidad del vehículo, la inclinación del terreno y la aceleración. En general los ciclos de conducción sólo proporcionan la velocidad del vehículo en cada instante, ya que la inclinación del terreno es una variable complicada de indicar si no se conoce previamente el circuito que va a realizar el coche, por lo que normalmente se considera un terreno plano (ángulo de inclinación igual a 0°).

La aceleración del vehículo se calcula simplemente por derivación de la velocidad:

$$a = \frac{dv(t)}{dt} \quad (1)$$

Puede diferenciarse claramente entre dos tipos de ciclo de conducción: conducción en ciudad y conducción en autopista, de forma que en cada tipo de conducción los requerimientos de potencia son diferentes. Puede verse que la forma de las curvas es bastante diferente. Véase por ejemplo en la figura 4.11 el ciclo de conducción Europeo NEDC (New European Driving Cycle), donde hay un primer tramo que se corresponde con conducción en ciudad (4 ciclos iniciales que se repiten) y un segundo tramo que se corresponde con conducción en autopista.

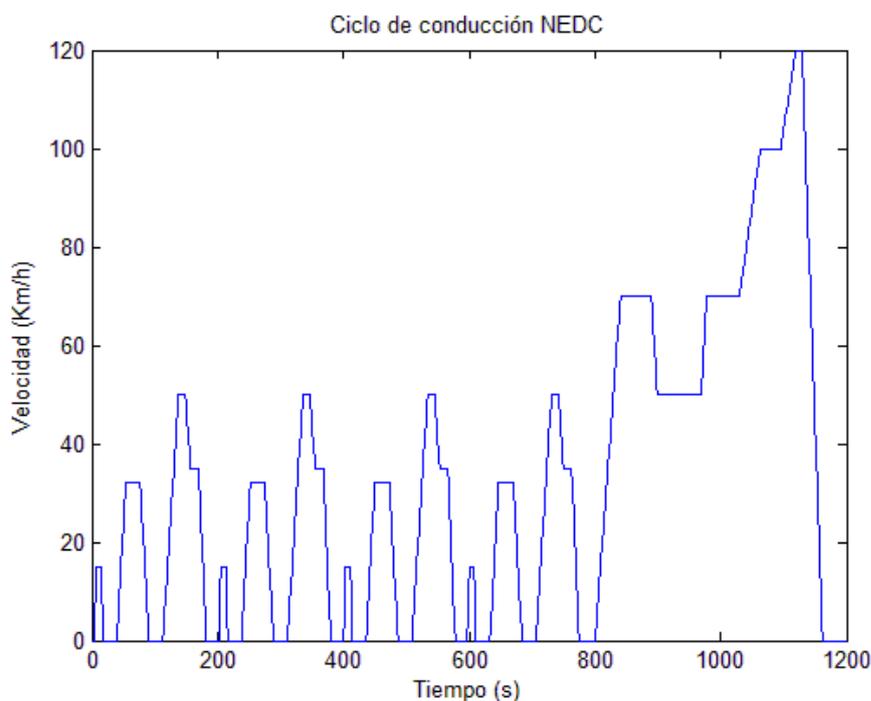


Figura 4.11: Ciclo de conducción europeo NEDC

#### 4.4.2. Vehículo

El bloque denominado “vehículo” calcula el par y la velocidad angular en las ruedas para que el vehículo (con sus características determinadas de peso, resistencia aerodinámica, etc.) pueda seguir el ciclo de conducción. Para esto, las entradas del bloque son la velocidad lineal del vehículo en cada instante, la aceleración y la inclinación del terreno.

Los cálculos realizados en este bloque se basan en el siguiente balance de fuerzas en la rueda:

$$F_t(t) = m_v \cdot a_v(t) + F_a(t) + F_r(t) + F_g(t) \quad (2)$$

donde  $F_t$  es la fuerza de tracción en la rueda,  $m_v$  es la masa del vehículo,  $a_v$  es la aceleración lineal del vehículo,  $F_a$  es la fuerza de rozamiento aerodinámico,  $F_r$  es la fuerza de rozamiento y  $F_g$  es la fuerza de la gravedad. Estas fuerzas se calculan como dice a continuación:

$$F_a(v) = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot c_d \cdot v^2 \quad (3)$$

$$F_r = c_r \cdot m_v \cdot g \cdot \cos(\alpha), \quad v > 0 \quad (4)$$

$$F_g(\alpha) = m_v \cdot g \cdot \sin(\alpha) \quad (5)$$

donde  $c_d$  es el coeficiente aerodinámico que va a variar por muchos factores pero que en este caso va a considerarse constante,  $A_f$  es el área frontal del vehículo,  $\rho_a$  es la densidad del aire atmosférico,  $c_r$  es el coeficiente de rozamiento (que al igual que el aerodinámico va a variar por muchos factores pero que en este trabajo se considera constante),  $g$  es la aceleración de la gravedad y  $\alpha$  es la inclinación del terreno.

De estas ecuaciones se obtiene el par de tracción aplicado sobre la rueda y la velocidad angular:

$$T(t) = F_t(t) \cdot r \quad (6)$$

$$\omega(t) = \frac{v(t)}{r} \quad (7)$$

donde  $T$  es el par de tracción sobre las ruedas,  $r$  es el radio de la rueda y  $\omega$  es la velocidad angular de la rueda.

Los parámetros que se han utilizado para particularizar el modelo y simular el sistema son los que se presentan en la siguiente tabla (cuadro 4.6):

**Cuadro 4.6: Parámetros del modelo del vehículo**

Parámetro	Valores
Masa del vehículo	1950 kg
Coefficiente de rozamiento	0,011
Coefficiente aerodinámico	0,34
Radio de la rueda	0,35 m
Área frontal	1,9765 m <sup>2</sup>

#### 4.4.3. Transmisión

En este proyecto no se considera ninguna caja de cambio, por lo que la transmisión es directa. La función de este bloque es relacionar el par y la velocidad angular requeridos en las ruedas con el par y la velocidad angular requeridos del motor. Para ello hay un coeficiente denominado “constante de transmisión”. En un caso en que se tuviese una caja de cambios este coeficiente variaría dependiendo de la marcha que se esté utilizando.

Viendo simplemente las especificaciones del motor, se aprecia que para una velocidad lineal del vehículo de unos 150 km/h, la velocidad angular del motor es de 6000 rpm, de lo que se deduce la constante de transmisión ( $\gamma$ ):

$$\omega_e = \frac{\gamma \cdot v(t)}{r} \quad (8)$$

donde  $\omega_e$  es la velocidad angular del motor, y  $\gamma$  es el coeficiente de transmisión. De esta ecuación resulta que:

$$\gamma = 5,427$$

Finalmente, las ecuaciones del modelo de la transmisión son las siguientes:

$$T_e(t) = \frac{T(t)}{\gamma} \quad (9)$$

$$\omega_e(t) = \omega(t) \cdot \gamma \quad (10)$$

donde  $T_e$  es el par del motor, y  $\omega_e$  es la velocidad angular en el motor.

La evolución en el tiempo del par y de la velocidad angular del motor tendrá la misma forma que la evolución del par y de la velocidad angular en las ruedas, solo que escaladas por el coeficiente de transmisión, como puede verse en las ecuaciones.

#### 4.4.4. Motor

El bloque denominado como “motor” proporciona la potencia necesaria para seguir el ciclo de conducción, funcionando en dos modos: tracción y generador (en el caso del frenado regenerativo).

La potencia del motor viene determinada por el par y por la velocidad angular de la siguiente manera:

$$P_e = T_e(t) \cdot \omega_e(t) \quad (11)$$

Esta potencia no tiene en cuenta las pérdidas por generación de potencia (caso del motor funcionando en modo tracción). Estas pérdidas vienen dadas por:

- Para  $\omega_e < 2000$  rpm

$$P_{\text{pérdidas}} = 0,016 \cdot T_e^2 + 0,0082 \cdot \omega_e^2 \quad (12)$$

- Para  $\omega_e \geq 2000$  rpm

$$P_{\text{pérdidas}} = 4,05 \cdot T_e^2 \cdot \omega_e^2 + 0,0082 \cdot \omega_e^{1,5} \quad (13)$$

Finalmente, la potencia total demandada por el motor viene determinada para el caso del motor funcionando en modo tracción por:

$$P_m = P_e + P_{\text{pérdidas}} \quad (14)$$

En el caso del motor funcionando en modo generador, se va a considerar un rendimiento más pequeño y constante, de valor 0,8. De esta forma, la potencia total entregada por el motor funcionando en modo generador es:

$$P_m = P_e \cdot \eta, \quad \text{con } \eta = 0,8 \quad (15)$$

Adicionalmente al modelado que ya se tenía realizado, en este proyecto se ha incluido cierta dinámica del motor eléctrico. Esta dinámica se ha modelado como una constante de tiempo de valor constante e igual a 0,1s. De todos modos, esta pequeña modificación sólo se tendrá en cuenta cuando se simule con el controlador predictivo debido a la estructura de los modelos, como se verá más adelante, y debido a que el otro controlador no es predictivo y no tiene mucho sentido considerar esta dinámica tan rápida.

#### 4.4.5. Sistema de acondicionamiento de potencia

El sistema de acondicionamiento de potencia tendrá unas pérdidas de potencia debido a que los elementos de los circuitos no son ideales y se ven influenciados por el calentamiento, etc. El modelo de estos sistemas de acondicionamiento de potencia va a considerarse como un simple rendimiento igual a 0,95. De esta forma la potencia requerida por el sistema de acondicionamiento de potencia será igual a la requerida por el motor eléctrico más las pérdidas:

$$P_{\text{bus,DC}} = \frac{P_m}{\eta_c}, \quad \text{con } \eta = 0,95 \quad (16)$$

#### 4.4.6. Pila de combustible

El modelo de la pila de combustible se ha realizado de forma quasi-estática, sin considerar las dinámicas internas de la pila. De esta forma la pila se caracteriza por una curva de polarización proporcionada por el fabricante, la cual relaciona la intensidad demandada a la pila y la tensión. El modelo dará como salida el caudal de hidrógeno que se está consumiendo.

La pila tiene un controlador local embebido que la controla y que la hace funcionar de forma óptima en cada punto de operación que le dicta el controlador supervisor.

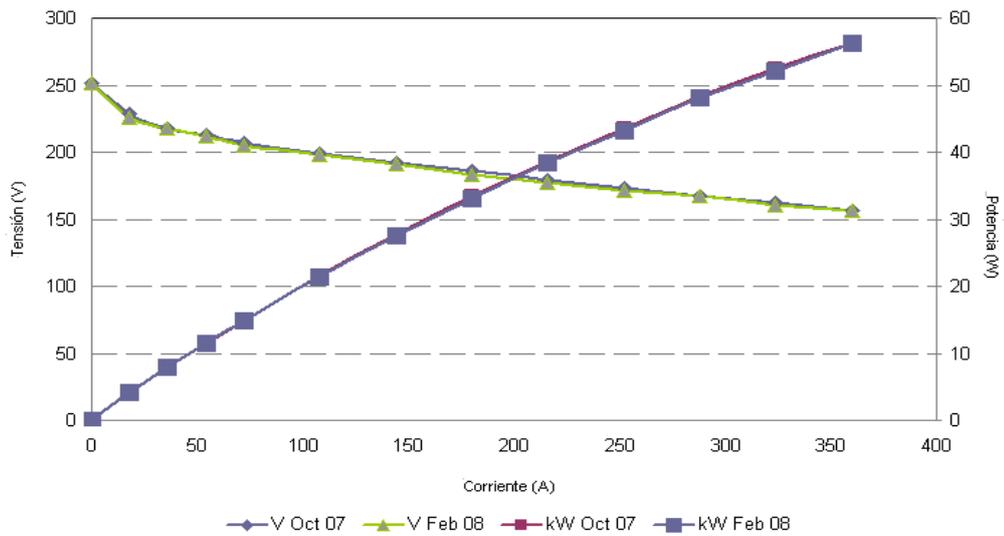
Las ecuaciones que modelan estas relaciones son las siguientes:

$$i_{\text{st}}(t) = \frac{P_{\text{pila}}(t)}{v_{\text{st}}(t-1)} \quad (17)$$

$$h(t) = m_{H2} \cdot n \cdot \frac{i_{\text{st}}(t)}{2 \cdot F} \quad (18)$$

$$v_{\text{st}}(t) = f(i_{\text{st}}) \quad (19)$$

donde  $i_{\text{st}}$  es la intensidad demandada a la pila,  $v_{\text{st}}$  es el voltaje suministrado por la pila,  $m_{H2}$  es la masa molar del hidrógeno en kg,  $n$  es el número de células,  $F$  es la constante de Faraday, y la función  $f$  es la curva de polarización que se presenta en la figura 4.12.



**Figura 4.12: Curva de polarización experimental de la pila de combustible**

Adicionalmente, en este proyecto se ha estimado el rendimiento de la pila para cada valor de potencia demandada a ésta. Esta relación es muy interesante porque permite conocer el rendimiento con el que se opera en función de la potencia que se le demanda a la pila. De esta manera, el caudal consumido de hidrógeno será en realidad el calculado previamente pero aumentado con el valor del rendimiento de la pila en ese momento:

$$h'(t) = \frac{h(t)}{\eta_{pila}} \quad (20)$$

donde  $h'(t)$  es el caudal de hidrógeno consumido definitivo,  $h(t)$  es el caudal de hidrógeno sin tener en cuenta la eficiencia de la pila, y  $\eta_{pila}$  es la eficiencia de la pila en ese momento.

La curva que relaciona el rendimiento de la pila con la potencia que se le demanda se presenta en la figura 4.13. Esta curva se ha obtenido a partir de datos experimentales de la pila de combustible que relacionaban rendimiento e intensidad. Como a su vez se conoce la curva de polarización, que relaciona intensidad y tensión, y la potencia es tensión multiplicada por intensidad, interpolando resultados se llega a la siguiente gráfica (estos cálculos están desarrollados en el archivo 'calculo\_rendimiento.m').

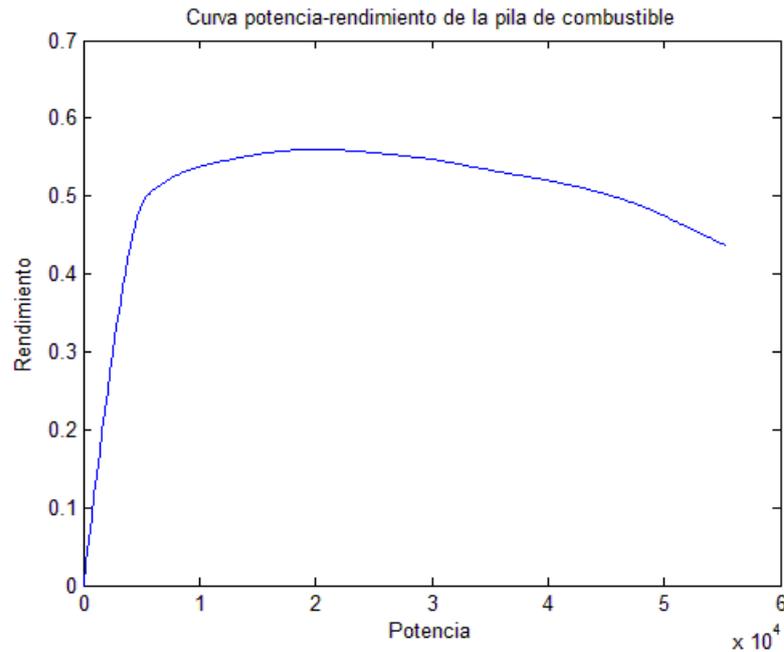


Figura 4.13: Curva potencia-rendimiento de la pila de combustible

#### 4.4.7. Depósito de hidrógeno

El modelo del depósito de hidrógeno proporciona la cantidad de combustible restante, a partir del caudal de hidrógeno que se está consumiendo en cada instante. La ecuación que modela el depósito es la siguiente:

$$m(t) = m_0 - \int_0^t h'(s) \cdot ds \quad (21)$$

donde  $m(t)$  es la cantidad de hidrógeno que queda en el depósito en el instante  $t$ , medida en kg;  $m_0$  es la cantidad de hidrógeno que hay al inicio de la conducción, también medida en kg; y  $h'(t)$  es el caudal de hidrógeno que se está consumiendo en el instante  $t$  (calculado como se dice en el apartado 4.3.6).

#### 4.4.8. Baterías

Las baterías se han modelado según las siguientes ecuaciones, que son particulares para el caso en el que las baterías sean de ion-litio. La entrada al modelo es la potencia que se le demanda en cada instante a las baterías, y la salida es el estado de carga (SOC) y el voltaje de las baterías, aunque como variable interna de éste bloque también está la intensidad, la cual es una variable de bastante interés para las baterías.

$$i(t) = \frac{P_{\text{baterías}}}{v(t-1) \cdot \dot{n}_{\text{baterías}}} \quad (22)$$

$$E(i(t), T(t), t) = v(i(t), T(t), t) - R_{\text{int}} \cdot i(t) \quad (23)$$

$$v(i(t), T(t), t) = \sum_{k=0}^n c_k \cdot (1 - \text{SOC}(i(t), T(t), t))^k + \Delta E(T) \quad (24)$$

$$\text{SOC}(i(t), T(t), t) = \text{SOC}_0 - \frac{1}{Q_r} \cdot \int_0^t \alpha(i(t)) \cdot \beta(T(t)) \cdot i(t) dt \quad (25)$$

donde  $E(i(t), T(t), t)$  es el potencial de equilibrio en voltios,  $R_{\text{int}}$  es la resistencia interna,  $v(i(t), T(t), t)$  es la tensión de las baterías,  $i(t)$  es la intensidad demandada a las baterías que va a ser positiva en el caso en que las baterías estén descargándose (es decir dando potencia al sistema) o por el contrario negativa en el caso de que las baterías se estén cargando. Los valores  $c_k$  son los coeficientes del polinomio que ajusta la curva de descarga para una intensidad de descarga constante.  $E(T)$  es un coeficiente que compensa las variaciones del potencial de equilibrio debido a la variación de la temperatura. El valor  $\alpha(i(t))$  es el coeficiente que compensa las variaciones de las curvas de descarga respecto de la referencia que se ha tomado cuando varía la intensidad. El valor  $\beta(T(t))$  compensa las variaciones en la curva de descarga respecto de la de referencia cuando varía la temperatura.  $Q_r$  es la capacidad en Ah.  $\text{SOC}(i(t), T(t), t)$  es el estado de carga de las baterías. Por último,  $n_{\text{baterías}}$  es el número de baterías conectadas en serie.

En la figura 4.14 se muestra la curva de referencia y el polinomio que ha sido ajustado para poder obtener los coeficientes de las ecuaciones. La curva de descarga es suministrada por el fabricante, junto con todas las especificaciones de las baterías que se presentaron anteriormente.

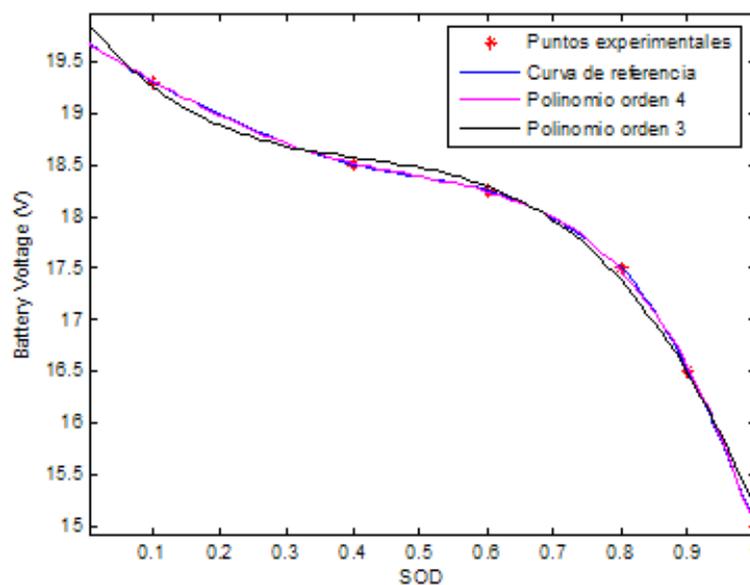


Figura 4.14: Curva de descarga de referencia para una intensidad de 70<sup>a</sup>

Las ecuaciones térmicas de la batería también han sido necesarias:

$$m \cdot c_p \cdot \frac{dT(t)}{dt} = i(t)^2 \cdot R_1 + \frac{1}{R_2} \cdot (v(t) + E(i(t), T(t), t) + i(t) \cdot R_1)^2 - h_c \cdot A \cdot (T(t) - T_a) \quad (26)$$

donde  $m$  es la masa de la batería,  $c_p$  es el calor específico,  $R_1$  y  $R_2$  son las componentes de la  $T_{int}$ ,  $h_c$  es el coeficiente del calor intercambiado,  $A$  es el área de intercambio lateral de la batería, y  $T_a$  es la temperatura ambiente.

Las constantes  $\alpha$ ,  $\beta$  y  $\Delta E$  pueden calcularse a partir de las curvas de descarga que suministra el fabricante. Estos coeficientes están tabulados: dependiendo de la intensidad, en el caso de  $\alpha$ ; y dependiendo de la temperatura, en el resto de los casos.

Las ecuaciones que modelan las pérdidas internas de las baterías se han obviado para simplificar el modelo.

#### 4.4.9. Resistencias de frenado (sistema de disipación de potencia)

Este dispositivo simplemente toma la potencia que se ha recuperado en la frenada regenerativa y que las baterías no pueden almacenar, y la disipa. Este modelo se dedica a calcular la energía que ha sido desperdiciada al final de la simulación, usando la siguiente ecuación:

$$E_{disipada} = \int_0^t P_{resistencias} (s) \cdot ds \quad (27)$$

## 4.5. Herramienta de simulación en Matlab/Simulink

En esta sección se explica brevemente el uso de los modelos en Matlab – Simulink. Básicamente se comentan las posibles modificaciones necesarias para las simulaciones del vehículo que se trata en este proyecto, sin llegar a profundizar en todo lo que tengan dentro (dentro se generan más variables internas y se llaman a diversas funciones para producir las salidas deseadas), es decir, considerando estos modelos como una herramienta para simular los controladores que se desarrollan en este proyecto.

En cualquier caso, la ejecución de las simulaciones y el uso de los modelos en Simulink será explicado paso a paso en el anexo: “manual de usuario”.

### 4.5.1. Bloque vehículo – transmisión – motor – sistema acondicionamiento

Tal y como se ha explicado previamente, se ha englobado todo el funcionamiento del vehículo, desde las ruedas, hasta el sistema de acondicionamiento de potencia, pasando por la transmisión y el motor, en un solo bloque. En otras palabras, dentro de este bloque están los modelos del vehículo, de la transmisión, del motor y del sistema de acondicionamiento de potencia. Las entradas son el ciclo de conducción (valores de la velocidad en cada instante de tiempo) y la inclinación del terreno, y la salida es la potencia demandada a la entrada del sistema de acondicionamiento de potencia.

El bloque en simulink tiene la siguiente apariencia:

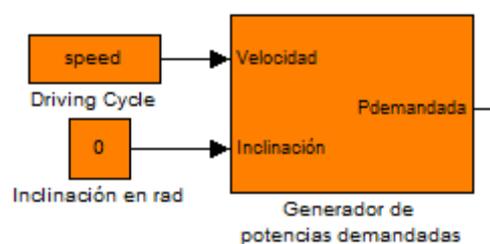


Figura 4.15: Modelo en Simulink del vehículo – transmisión – motor – sistema acondicionamiento de potencia

	Señal	Descripción
Entradas	Velocidad	Valores en km/h de la velocidad del vehículo en cada instante
	Inclinación	Valor en rad de la inclinación del terreno (por defecto 0)
Salidas	Pdemandada	Potencia demandada por los convertidores de potencia para que la potencia que llegue al motor sea la suficiente para satisfacer la demanda del conductor

Como puede apreciarse en la figura 4.15, este bloque toma como entradas la velocidad en cada instante, proporcionada por un ciclo de conducción (vector de velocidades en km/h a seguir por el vehículo), y la inclinación (en radianes) del terreno, que se toma como cero por defecto. Así, la salida es la potencia a satisfacer (en caso de ser positiva) por las fuentes de potencia del vehículo, que son la pila de combustible y las baterías, o bien la potencia a entregar (en caso de ser negativa) en la frenada regenerativa a las baterías o a disipar en el sistema de disipación de potencia, según convenga el controlador supervisor.

#### 4.5.2. Bloque baterías

Las baterías se han modelado de forma que como entrada llega la potencia que el controlador supervisor le ordena en cada instante, siendo ésta potencia positiva cuando se le demanda potencia a las baterías (éstas se descargan) o negativa cuando se entrega potencia a las baterías (éstas se cargan). Y como salidas el modelo proporciona la tensión de las baterías, así como el estado de carga de las baterías (SOC) en tanto por uno (cuando SOC=1 significa que las baterías están totalmente cargadas, y cuando SOC=0 que están totalmente descargadas).

A continuación puede verse una imagen del modelo:

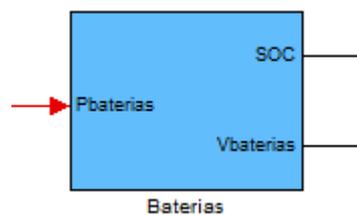


Figura 4.16: Modelo en Simulink las baterías

	Señal	Descripción
Entradas	Pbaterias	Potencia ordenada por el controlador supervisor
Salidas	SOC	Estado de carga de las baterías
	Vbaterias	Tensión en las baterías

El modelo tiene una máscara de forma que al hacer doble click sobre él aparece la siguiente ventana, en la que puede modificarse el estado de carga inicial para la simulación.

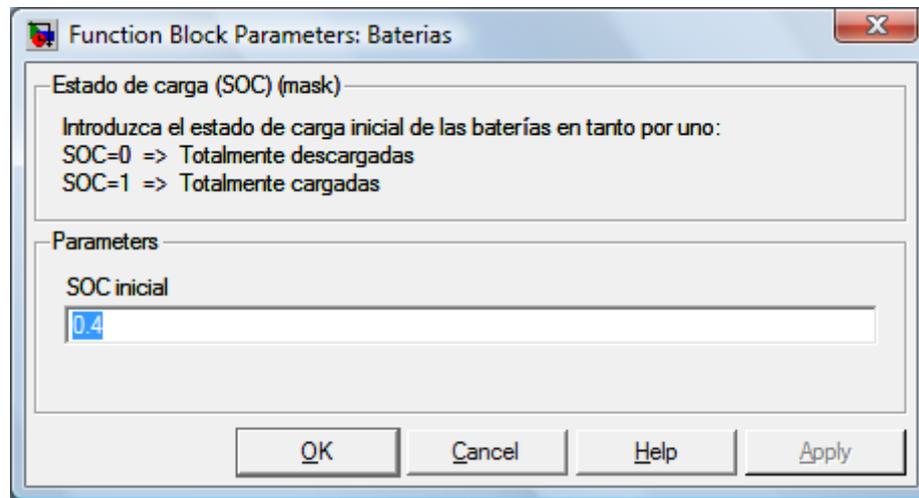


Figura 4.17: Ajuste de parámetros del modelo de las baterías

### 4.5.3. Bloque pila de combustible

La función del modelo de la pila de combustible es obtener el caudal de hidrógeno que es necesario para proporcionar la potencia que el controlador supervisor le ha asignado. Esta potencia que el controlador supervisor le asigna en cada instante es la única entrada de este bloque

A continuación puede verse una imagen del modelo:

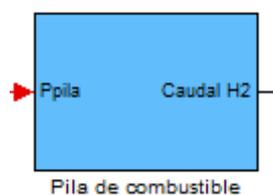


Figura 4.18: Modelo en simulink de la pila de combustible

	Señal	Descripción
Entradas	Ppila	Potencia ordenada por el controlador supervisor
Salidas	Caudal H2	Caudal de hidrógeno que se está consumiendo en kg/s

Adicionalmente, cabe comentar que se ha modificado la función a la que se llama en este modelo ('curvapolarizacion1.m') para que se contemple la eficiencia de la pila en el consumo de combustible, tal y como se ha explicado anteriormente.

#### 4.5.4. Bloque depósitos de hidrógeno

La función del modelo del depósito de hidrógeno es contabilizar la cantidad de combustible restante (salida del bloque), a partir del caudal de hidrógeno que se va consumiendo en cada instante (entrada del bloque).

A continuación puede verse una imagen del modelo:

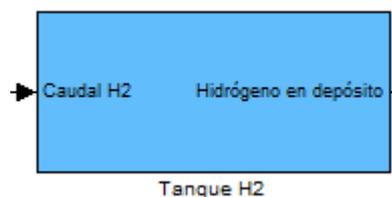


Figura 4.19: Modelo en simulink del tanque de hidrógeno

	Señal	Descripción
Entradas	Caudal H2	Caudal de hidrógeno que se está consumiendo en kg/s
Salidas	Hidrógeno en depósito	Cantidad de hidrógeno en kg restante en el depósito

El modelo tiene una máscara de forma que al hacer doble click sobre él aparece la siguiente ventana, en la que puede modificarse la cantidad de hidrógeno que hay inicialmente en la simulación.

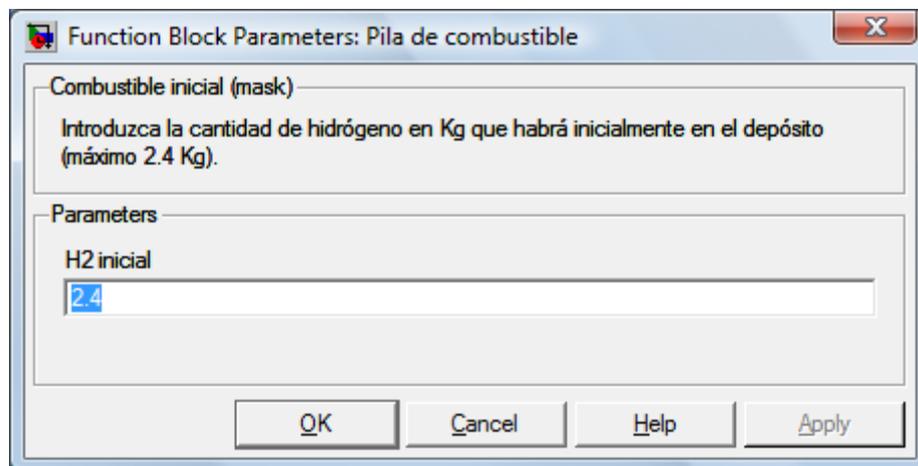


Figura 4.20: Ajuste de parámetros del modelo de la pila de combustible

#### 4.5.5. Bloque sistema de disipación de potencia

Este modelo simplemente toma como entrada la potencia que el controlador supervisor decide disipar, y muestra como salida la cantidad de energía disipada acumulada durante la simulación.

A continuación puede verse una imagen del modelo:

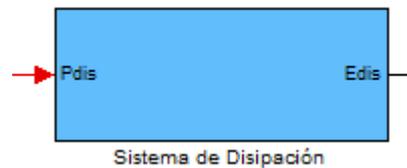


Figura 4.21: Modelo en simulink del sistema de disipación de potencia

	Señal	Descripción
Entradas	Pdis	Potencia ordenada por el controlador supervisor
Salidas	Edis	Cantidad de energía disipada durante la simulación

#### 4.5.6. Bloque control supervisor

El bloque del controlador supervisor diferirá dependiendo del algoritmo de control que se esté simulando. De cualquier modo, éste bloque se encarga de llamar a una función a la cual se le pasa como parámetros una serie de entradas, y proporciona los valores de potencias asignadas en cada instante a cada elemento de potencia del vehículo (pila de combustible, baterías y sistema de disipación de potencia).

A continuación puede verse una imagen del bloque en el caso del algoritmo ECMS (figura 4.22a), y en el caso del algoritmo MPC (figura 4.22b).



Figura 4.22a: Bloque en simulink del controlador supervisor para ECMS

	Señal	Descripción
Entradas	Pdc_bus	Potencia demandada por los convertidores de potencia
	SOC	Estado de carga de las baterías
	Vbaterias	Tensión de las baterías
	mH2	Cantidad de H2 en kg restante en el depósito
Salidas	Pbaterias	Potencia de referencia para las baterías
	Ppila	Potencia de referencia para la pila de combustible
	Pdis	Potencia de referencia para el sistema disipador de potencia
	Pno entregada	Potencia que no se pudo satisfacer

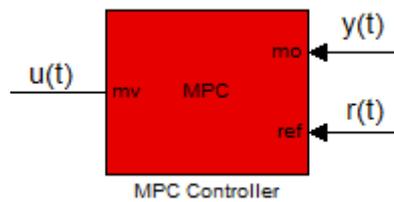


Figura 4.22b: Bloque en simulink del controlador supervisor para MPC

	Señal	Descripción
Entradas	mo: y(t)	Salidas del sistema a controlar: Potencia entregada al motor eléctrico y estado de carga de las baterías.
	ref: r(t)	Referencias: Potencia demandada por los convertidores de potencia y SOC de referencia (0,5 por defecto).
Salidas	mv: u(t)	Entradas del sistema a controlar: Potencias de referencia para la pila de combustible, baterías y sistema disipador de potencia.

Como puede verse son muy similares, siendo las entradas la potencia demandada por los convertidores de potencia (ver apartado 4.4.1.), el estado de carga de las baterías, la tensión en las baterías y la cantidad de hidrógeno restante en el tanque (serían las salidas del sistema a controlar y(t)); y la salida proporciona las potencias de referencia para las baterías, pila y sistema de disipación de potencia, así como la potencia que no ha sido posible satisfacer en cada instante.

De todas formas el contenido y la funcionalidad de este bloque se explicarán en detalle más tarde cuando se introduzcan los diferentes algoritmos de control utilizados.

#### 4.5.7. Conjunto del modelo

El modelo en conjunto con el que se harán las simulaciones se mostrará más adelante, junto con cada algoritmo de simulación, ya que difieren según el algoritmo utilizado.

Así mismo se explicará cómo utilizarlos para las simulaciones en el anexo “Manual de usuario”.