



Dimensionamiento de un vehículo híbrido con baterías de tracción y pila de combustible para aplicación aeroportuaria

Enrique Alcalá Fazio¹, José María López Martínez¹, Nuria Flores Holgado¹, Jaime Álvarez Sánchez¹, Gabriele Segale¹, Irene Ramos García¹, Jorge Urosa Rubio¹.

¹ Instituto Universitario de Investigación del Automóvil Francisco Aparicio Izquierdo, Universidad Politécnica de Madrid, enrique.alcala@upm.es, josemaria.lopez@upm.es, nuria.fholgado@upm.es, jaime.alvarezs@upm.es, g.segale@upm.es, dispima2.insia@upm.es, dispima1.insia@upm.es

El presente trabajo aborda la extensión de autonomía, mediante H2 comprimido y pila de combustible, de un vehículo señalero, probablemente más conocido por su nombre en inglés "follow me". La estrategia de reducción de emisiones en un 55% para 2030 afecta a todos los sectores económicos y, en este caso, a la gestión aeroportuaria. La estrategia asume para el sector aéreo un 55% de aumento del uso de los combustibles verdes, como el Hidrogeno, en toda la actividad, incluida la aeroportuaria. Los vehículos señaleros son un caso muy particular de la flota de vehículos de los aeropuertos. La función principal, casi única de estos vehículos, es la de dirigir las aeronaves en sus movimientos dentro de las instalaciones del aeropuerto. Se trata de un uso que presenta características muy particulares debidas a su función y precisando de una disponibilidad garantizada. Para asegurar la operatividad de los vehículos se necesita que la energía embarcada permita todos los servicios demandados durante las jornadas. La explotación de los aeropuertos implica que los vehículos señaleros experimentan franjas horarias con ciclos de uso con gran potencia media combinados con ciclos mucho menos exigentes energéticamente. Esta variabilidad hace de las baterías, como única fuente de energía, un sistema ineficiente volumétrica y másicamente.

Para resolver las particularidades de estos vehículos descritas se ha realizado un estudio de dimensionamiento y gestión energética que ha consistido en: primero la medición de los ciclos de trabajo $V=f(t)$ de vehículos señaleros en el aeropuerto de Barajas, segundo dimensionamiento y optimización mediante modelos de simulación de dinámica longitudinal de los sistemas de almacenamiento (baterías y H2), tercero el diseño del sistema de alta tensión del vehículo con la selección de componentes, cuarto la disposición física en el vehículo mediante software 3D, quinto el prototipado del vehículo sobre una plataforma IVECO Masif para finalizar con la realización de pruebas de validación.

La metodología seguida por el equipo investigador permite la extrapolación a otras tipologías de vehículos cuyas características particulares de funcionalidad hagan que las configuraciones habituales se alejen del óptimo. En el presente trabajo se muestran los resultados del dimensionamiento y selección de componentes.

1. Introducción

El Plan de acción climática de AENA 2021-2030 tiene previsto tener 0 emisiones netas en 2030 en su actividad en tierra. Una de las acciones para lograrlo es la utilización de un 100% de vehículos sostenibles, que está planificada para el año 2026, y con un reparto del 26% de vehículos eléctricos y 74% de vehículos con combustible sostenible. El presente trabajo se enmarca en este objetivo de los aeropuertos españoles y persigue ayudar a AENA a alcanzar su meta mediante una iniciativa dentro del proyecto “GREENH2-CM, posicionamiento estratégico de la Comunidad de Madrid en el ámbito de la I+D+i sobre hidrógeno verde y pilas de combustible”. Para ello, y para que AENA pueda prepararse para un futuro con vehículos de autonomía extendida mediante sistemas alimentados con H₂ verde, se propone la aplicación de un sistema de propulsor híbrido eléctrico/pila de combustible en un vehículo de su flota de Equipos de Apoyo en Tierra (EAT). El vehículo seleccionado para esta experiencia piloto ha sido un vehículo señalero (*Follow-me or Marshaller en su acepción en inglés*).

En esta tipología de EAT su perfil de uso está muy condicionado por sus funciones: guiar a los pilotos de las aeronaves, comprobar pistas o desplazar personal. En consecuencia, la variedad de las misiones de los vehículos señaleros provocan un perfil variado, con un reparto variable de periodos breves con funcionamiento a alta carga, seguidos de largos periodos, también de duración variable, a baja carga, al ralentí o con el motor apagado. El resultado de esta variabilidad de uso es que la autonomía diaria requerida tiene un intervalo de valores comprendido entre unas pocas decenas de kilómetros y varias centenas. Como resultado de estos condicionantes se decidió que la configuración de vehículo óptima, que permitiera tener cero emisiones en la fase de uso, es un vehículo eléctrico enchufable, de esta manera cubriría la mayor parte de los usos y de los días, al que se le aumentara su autonomía mediante una hibridación en paralelo con una pila de combustible e H₂ embarcado. Esta conclusión es avalada por diferentes estudios realizados para comparar las arquitecturas de los vehículos equipados con pila de combustible PC [1]. Así, por una parte, los principales argumentos que fundamentan la eficiencia de los Vehículos Eléctricos con Pila de Combustible (FCEVs) se basan en que: considerando una eficiencia estándar del 60% en la producción, transmisión y suministro de hidrógeno, con un rendimiento de la PC entre el 40 y el 60% [2] y una eficiencia del depósito a la rueda del 80%, sin considerar el rendimiento de la pila, la eficiencia total del pozo a la rueda para todo el ciclo de vida se sitúa en el entorno del 27%. Teniendo en cuenta las diferentes tipologías de cadenas cinemáticas, los FCEV tienen la mayor eficiencia total en el tramo de tracción, junto con los BEV, mientras que los vehículos de combustión interna convencionales (ICEV) tienen una eficiencia de sólo el 14% [3]. Por lo tanto, el uso de estos vehículos puede mejorar significativamente la eficiencia global del vehículo considerando un análisis del pozo a la rueda.

Una ventaja parecida se observa cuando el Análisis de Ciclo de Vida se centra en las emisiones de gases de efecto invernadero, tanto globales como locales. En un FCEV las emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI) son nulas durante su utilización, mientras que para un ICEV hasta el 80% de las emisiones totales de GEI del pozo a la rueda. En cualquier caso, incluso en los casos menos eficientes de producción de hidrógeno, es decir, cuando la energía procede de la combustión de gas natural, carbón o energía de la red[3], las emisiones de GEI de la fuente a la rueda siguen registrando una reducción de entre el 6% y el 23%, en comparación con los vehículos de combustión interna [4], [5].

Una vez decidida la arquitectura fundamental, el estudio se centra en la definición de los componentes y, evidentemente, en este caso la Pila de Combustible es el fundamental. Dentro de las diferentes tecnologías de pila de combustible se seleccionó la de tipo PEM (membrana de intercambio de protones) que es, por el momento, la más ampliamente utilizada en el sector [6]. Este tipo de PC es el más eficaz, debido a su baja temperatura de funcionamiento, el más silencioso, el que proporciona la capacidad de arranque más rápida y el que cuenta con la mayor densidad de potencia.

Finalmente, para poder definir correctamente el vehículo y alcanzar la eficiencia objetivo, es precisa una definición de componentes muy detallada y el consiguiente acierto en la selección de los componentes disponibles en el mercado. Una parte fundamental de este trabajo se centra en definir la arquitectura del vehículo, dimensionando de forma óptima los componentes principales del sistema: Pila de combustible, Batería, Motor eléctrico, Convertidor mono-direccional DC/DC de la pila, Convertidor bidireccional DC/DC de la batería, Cargador (OBC), controlador electrónico programable (ECU) y depósitos de almacenamiento de H₂.

2. Metodología

2.1. Definición de requerimientos mediante ciclos de trabajo de los vehículos señaleros

Para la definición de los ciclos de trabajo se instrumentó un vehículo señalero modelo Ford Ranger Diesel Euro 6. El registro de datos se realizó durante 216 misiones (ver Figura 1) cumplimentadas a lo largo de 49 días, desde el 16 de septiembre al 03 de noviembre de 2022, y utilizando dos sensores colocados en el interior del vehículo:

- GPS-to-CAN con sensor inercial 3D y UDR: módulo GPS que produce datos de posición GNSS e inerciales 3D (IMU) (a través de un giroscopio y un acelerómetro) y los emite a través de tramas de bus CAN configurables.
- Registrador de datos de bus CAN (SD + RTC): módulo que registra datos CAN con marca de tiempo en una memoria extraíble (tarjeta SD). La frecuencia de adquisición de datos fue de 10 Hz.



Figura 1: Huellas GPS del vehículo “señalero” en el aeropuerto Adolfo Suárez Madrid-Barajas

Los datos producidos por los distintos ciclos de conducción del vehículo durante los días de observación se analizaron mediante dos aproximaciones diferentes, con el fin de obtener los valores necesarios para definir los requisitos iniciales del sistema y de sus componentes.

- Análisis basado en ciclo de conducción individual: este tipo de análisis se planteó para obtener una indicación local de las demandas del vehículo desde el momento de su utilización hasta el final del ciclo de conducción (es decir, encendido - apagado). Este tipo de análisis ha sido especialmente útil para obtener datos de rendimiento y valores máximos de las prestaciones, como la velocidad, la aceleración, el par, la potencia y la variación de altitud.
- Análisis basado en toda la jornada operativa: un dimensionamiento basado únicamente en ciclos de conducción individuales sería insuficiente, ya que éstos no tienen en cuenta la utilización global del vehículo. Una jornada completa de operaciones se compone, por término medio, de 6 misiones, desarrolladas a lo largo del mismo día a intervalos irregulares dictados por las necesidades del aeropuerto. Este tipo de análisis es útil para dar una indicación global de las exigencias a las que se ve sometido el vehículo a lo largo de un día típico, especialmente en lo que respecta a los valores energéticos, el consumo, los tiempos movimiento parado y las distancias recorridas.

Con los dos análisis se definieron unos requerimientos individuales para los componentes y se definieron las características óptimas necesarias. Estos valores son los que se utilizaron para la definición de los componentes en los modelos de simulación.

2.2. Simulación del sistema propulsor

Una vez definidos los requerimientos individuales, es posible evaluar las prestaciones del vehículo a través de la simulación del comportamiento en dinámica longitudinal de un vehículo. En primer lugar, se utilizaron las propiedades de motores eléctricos en el mercado, fundamentalmente sus curvas características de potencia y par. Estos modelos de motor se aplicaron a un modelo simplificado de vehículo, caracterizado en el dódigo de simulación @AVL Cruise™ M. Las simulaciones consistieron en una prueba de aceleración y pendiente y en la reproducción de misiones de conducción seleccionadas de los datos de los reales analizados en la parte de análisis de datos.

Como en la mayoría de los vehículos eléctricos a baterías el prototipo FCEV se equipará con una transmisión de una sola velocidad. Como el vehículo de partida, el IVECO Masif cuenta con una transmisión ZF 6S400 overdrive de 6 velocidades se decidió fijar una de las 6 relaciones. Las marchas 4ª a 6ª requieren demasiado par para un motor capaz de entregar una potencia máxima de 100 a 120 kW, por lo que los análisis se centraron en determinar la mejor relación entre las 3 marchas inferiores (1ª a 3ª).

Para la prueba de aceleración, el modelo de cadena cinemática se sometió al ciclo implementado que presenta los valores de alta velocidad y aceleración más realistas. Esto significa una aceleración de 0 a 115 km/h en 25 segundos, alcanzando valores máximos de 2 m/s².

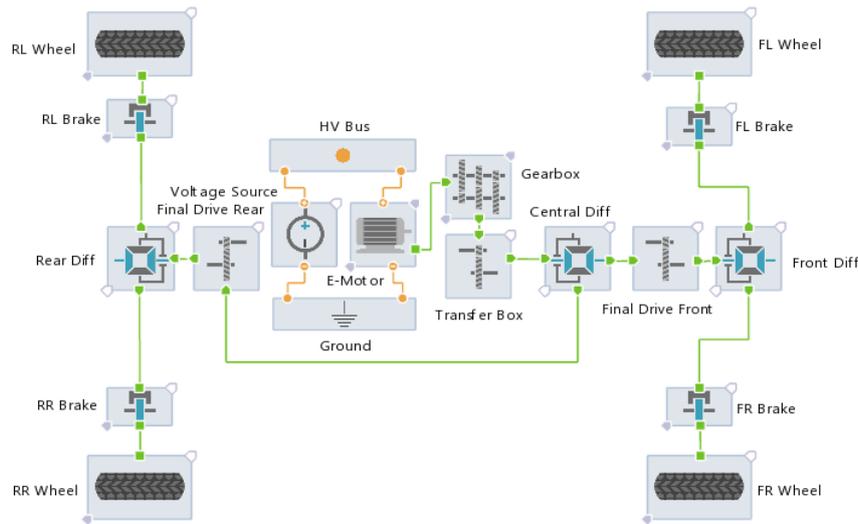


Figura 2: Modelo de vehículo simplificado con motor eléctrico y fuente de tensión

3. Resultados y discusión

3.1. Requisitos derivados de los análisis de ciclos de trabajo de los vehículos señaleros

A partir de los cálculos procesados en el tratamiento de los datos de cada uno de los ficheros de las misiones, se ha podido obtener una serie de valores que dan una indicación cualitativa de las necesidades del vehículo. La tabla 1 muestra estos valores, presentando el mínimo, la mediana, la media y el máximo. Todos estos valores serán han sido considerados y comparados con los datos de la ficha técnica del vehículo. Tabla 1:

Tabla 1: Resumen de los valores representativos de los requisitos de los ciclos de conducción del vehículo

Parámetro	Mínimo	Mediana	Media	Máximo
Tiempo total [min]	4.97	72.72	80.08	248.75
Tiempo en movimiento [min]	0.00		34.92	124.90
Tiempo en movimiento [%]	0.00	51.20	43.79	-
Tiempo al ralentí [min]	0.03		44.81	177.21
Tiempo al ralentí [%]	0.51	48.81	56.2	-
Distancia [km]	1.10	14.09	17.55	68.17
Variación de altitud [m]	2.70	20.35	22.63	71.09
Velocidad máxima del vehículo [km/h]	37.00	79.00	79.24	134.00
Velocidad media del vehículo [km/h]	8.12	14.64	18.99	53.14
Velocidad media del vehículo en movimiento [km/h]	2.11	30.87	32.84	67.38
r.p.m. máximas del motor	86.59		2869.59	3947.70
Aceleración máxima [m/s ²]	0.03		3.07	9.70
Aceleración máxima [g]	0.00		0.31	0.99
Par motor máximo [Nm]	126.00		397.87	429.20
Par motor medio [Nm]	28.36		62.3	168.41
Potencia máxima [kW]	3.18	106.34	106.93	172.14
Potencia media [kW]	2.38	7.23	9.72	35.24
Potencia media de movimiento [kW]	5.58	11.76	12.9	39.10
Energía media [kWh]	0.42	7.72	6.64	26.94
Energía media de movimiento [kWh]	0.38	5.26	6.59	24.35
Consumo de combustible [l/h]	0.20		1.78	5.89
Consumo de combustible [km/l]	0.04		9.89	15.62
Consumo total de combustible [l]	4.43		1.81	5.58
Consumo de energía [kWh/km]	0.30		0.53	1.68
Consumo de energía de movimiento [kWh/km]	0.27		0.39	0.72

Los valores de velocidad máxima muestran que en muchas misiones de conducción el vehículo alcanza velocidades elevadas, demostrando una tendencia a moverse rápidamente, con cierta urgencia, cuando tiene que llegar a la zona operativa. Sin embargo, no ocurre a menudo, la velocidad máxima fue del 16,6% por encima de 100 km/h y sólo el 4,6% por encima de 120 km/h. La velocidad media, en cambio, es baja, obviamente dictada por el elevado tiempo de ralentí en el que la velocidad es nula. De hecho, era interesante disponer de datos sobre

la velocidad media en movimiento, es decir, excluyendo del cálculo el funcionamiento estacionario, para comprender realmente a qué velocidad tiende a moverse el vehículo la mayor parte del tiempo por las pistas. Dado que el límite de velocidad en las pistas es de 30 km/h, es lógico que la velocidad media en movimiento también sea baja y corresponda a este valor, mientras que aumenta especialmente en misiones de conducción muy cortas o fuera de la pista. En cuanto a las aceleraciones, los valores máximos de aceleración encontrados, aunque en pocos casos, son muy elevados, de hecho aceleraciones de más de 10 m/s^2 se consideran imposibles para estos EATs con un motor de 125 kW. Estos valores excesivos se deben a imprecisiones en los datos del GPS por satélite.

La variabilidad de la altitud, y su factibilidad, se comprobó mediante la planimetría del aeropuerto, contrastando que los valores obtenidos se encontraban dentro del rango de los valores posibles (Figura 3).

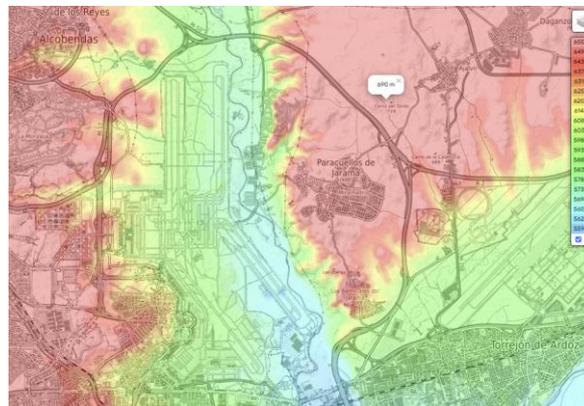


Figura 3: Planimetría aeropuerto Madrid-Barajas Adolfo Suarez.

Hablando de prestaciones puras de la cadena cinemática, los valores de par motor son coherentes con los dictados por la ficha técnica del vehículo, que hablan de un máximo de 420 Nm. En cuanto a los valores de potencia, se esboza un perfil de 170 kW como potencia máxima y 40 kW como potencia continua, aunque esta última podría suponerse incluso inferior, con una media de 12,9 kW. Esta elevada diferencia viene dictada por el hecho de que la mayor parte del tiempo la velocidad media del vehículo es baja, generando poca potencia para su desplazamiento. Como prueba de coherencia, la Figura 4 muestra que los valores medios de potencia de movimiento son siempre superiores a los valores medios y su distribución está correlacionada (Figura 5), presentando la misma tendencia. Su diferencia aumenta en la medida en que el tiempo en movimiento dentro del ciclo de conducción es elevado. Hablando de energía media, se obtiene una demanda de 7 kWh como media para las misiones de conducción, con valores máximos que alcanzan casi los 30 kWh. En cuanto a la distancia y el tiempo, serán más útiles los valores de todo un día. El gráfico de la Figura 5 muestra lo contrario con respecto a la potencia: los valores medios de energía son siempre superiores a los valores medios de movimiento, mientras que su distribución sigue estando correlacionada (Figura 6). La razón es que, como la energía se calcula en función del tiempo y el tiempo de movimiento es inferior al total, la energía resultante será inferior. Su diferencia aumenta en la medida en que el tiempo de ralentí dentro del ciclo de conducción es elevado, a diferencia de la potencia.

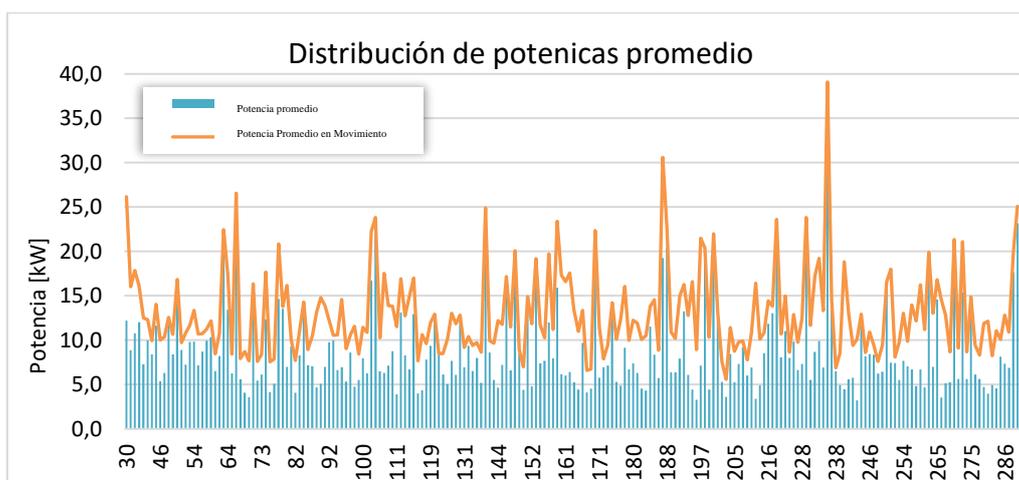


Figura 4: Potencia media de los ciclos de conducción y comparación con la potencia media del movimiento.

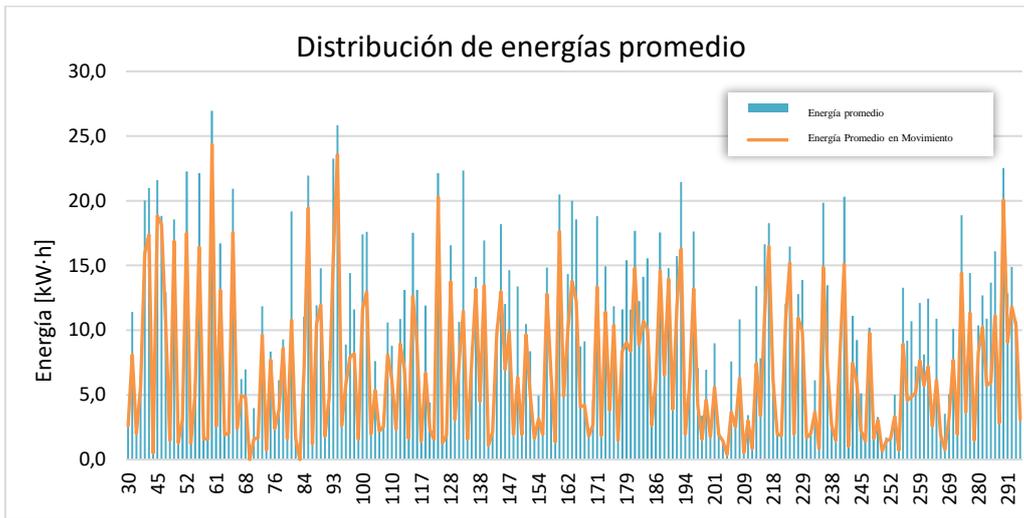


Figura 5: Energía media de los ciclos de conducción y comparación con la energía media del movimiento.

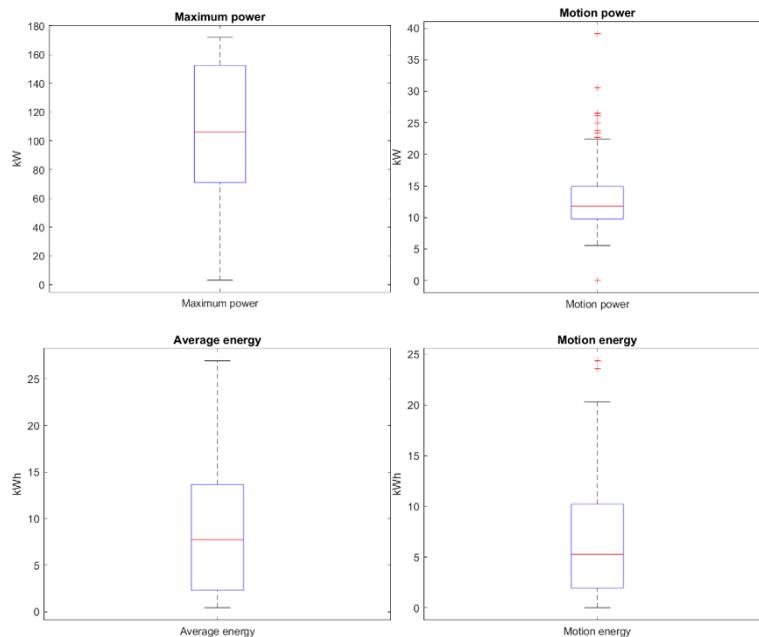


Figura 6: Representación de los datos de los ciclos de conducción completos del Ford Ranger «Follow me» de las cantidades de potencia y energía.

Sumando los datos de cada uno de los ficheros considerados en el tratamiento de datos organizado en los mismos días, fue posible obtener los mismos valores anteriores para dar una indicación cualitativa de las necesidades del vehículo, pero con una visión por encima de todo un día operativo. La Tabla 2 muestra los valores de los parámetros representativos, presentando el mínimo, la media y el máximo. Las 216 misiones de conducción incluidas en el cálculo final, se registraron durante 32 días operativos, variando su número diario entre sólo dos misiones de conducción hasta un máximo 10. Todos estos valores serán nuevamente discutidos y eventualmente comparados con los datos de la ficha técnica del vehículo, con el fin de explicar las consideraciones que pueden llevar, mostrando también algunos gráficos cuando sea necesario.

Tabla 2: Resumen de todos los valores representativos de los requisitos de las jornadas operativas del vehículo

Dato	Mínimo	Media	Máximo
Tiempo total [h]	0.74	8.93	15.12
Tiempo en movimiento [%]	24.48	44.97	86.49
Tiempo de inactividad [%]	13.52	55.02	75.52
Distancia [km]	15.92	117.38	256.31
Energía promedio [kWh]	9.16	59.18	107.40
Energía promedio en movimiento [kWh]	7.63	44.28	87.04
Consumo de combustible [l/h]	0.87	1.46	3.67
Consumo total de combustible [l]	1.84	12.13	22.84
Consumo de energía [kWh/km]	0.40	0.53	0.76
Consumo de energía en movimiento [kWh/km]	0.31	0.39	0.55

En conclusión, queriendo crear un resumen general de los resultados obtenidos a través del análisis de los datos disponibles del vehículo señalero, tanto en lo que se refiere a un único ciclo de conducción como a todo un día operativo, se crea la Tabla 3.

Tabla 3: Resumen de las características reales del vehículo señalero y evaluación con respecto a las necesidades

Característica	Evaluación
Tiempo de utilización	Tiempo medio de funcionamiento elevado, gran variabilidad y uso predominante (55%) al ralentí
Distancia recorrida	Distancias recorridas elevadas, con gran variabilidad en función de las necesidades
Variación de altitud	Utilización del vehículo en trayectos casi llanos con pendientes muy limitadas
Velocidad máxima del vehículo	Velocidad moderadamente alta (100 km/h) alcanzada en 1/6 de la misión de conducción, mientras que los picos (> 120 km/h) sólo son inferiores al 5
Velocidad media del vehículo	Velocidad media baja (30 km/h), casi similar a la esperada en uso urbano
Potencia máxima necesaria	Valores de potencia elevados (150 kW) alcanzados en 1/3 de los casos
Potencia media necesaria	Baja potencia media para el movimiento del vehículo, cercana a 20 kW con picos de 40 kW
Energía media necesaria	Elevada cantidad de energía requerida cada día (media de 60 kWh), equivalente a toda la capacidad de una batería de VE estándar
Consumo de combustible	Elevado consumo de combustible, superior al que tendría el vehículo en un uso urbano
Consumo de energía	Elevado consumo de energía, superior al que tendría un VE normal, incluso en los peores casos de demanda energética

3.2. Simulación para el dimensionamiento de los componentes del tren de potencia

Para probar el modelo longitudinal del vehículo con distintos motores eléctricos en diferentes misiones de conducción, hay que encontrar perfiles capaces de recrear las condiciones reales entre los disponibles a partir del análisis de datos. Para ello, se han identificado cuatro misiones de conducción representativas, que se muestran a continuación.

- Ciclo de conducción nº32: posee la mayoría de los valores medios de la Tabla 1, es decir, los valores medios entre todas las misiones de conducción analizadas. Se trata de un ciclo de 77 minutos, con una velocidad máxima de 109 km/h, una potencia máxima de 120 kW, una relación entre el tiempo de ralentí y el tiempo de movimiento del 55-45% y un consumo medio de combustible y energía. Se trata de probar el vehículo en un ciclo lo más estándar posible.

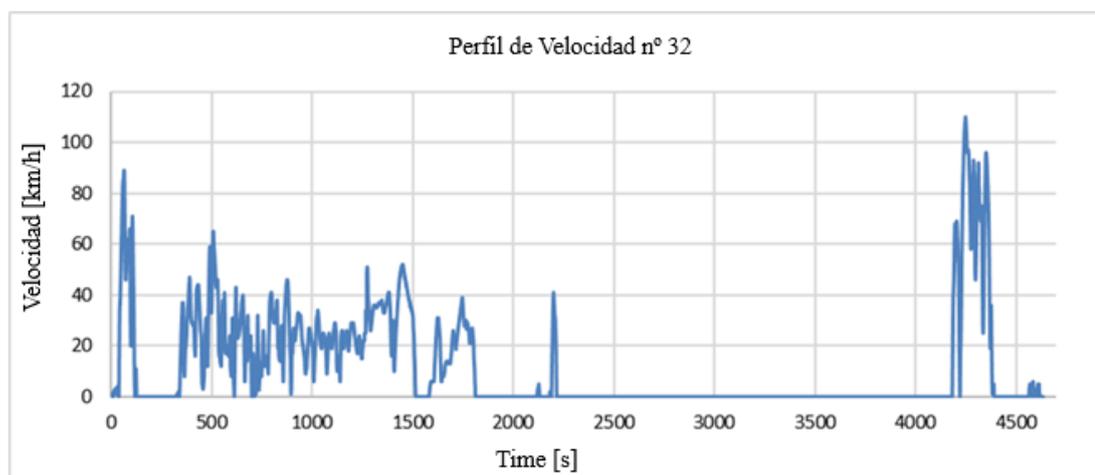


Figura 7: Perfil de velocidad ciclo 32

- Ciclo de conducción nº144: se trata de un ciclo con características bastante medias pero caracterizado por un tiempo de movimiento elevado (88%). Por lo tanto, representa un ciclo con una demanda energética elevada, una potencia media elevada y una energía media (5,62 kWh). Se trata de probar el vehículo en un ciclo con una elevada presencia de movimiento.
- Ciclo de conducción nº187: representa el mismo patrón que la nº32, pero es más larga, con un tiempo total de 120 minutos, y con velocidades más altas, con un máximo de 120 km/h. En consecuencia, aunque se mantiene un ciclo estándar, los consumos de energía y combustible necesarios son mayores. De lo que

se trata es de probar el vehículo en un ciclo estándar pero más exigente en cuanto a requisitos de rendimiento.

- Ciclo de conducción nº241: se trata de un ciclo muy largo, uno de los más largos de los analizados, con una duración total de 241 minutos, por tanto con una demanda energética elevada (8,58 kWh). En cuanto a las demás características, son todas más o menos medias, con una velocidad máxima ligeramente inferior a 100 km/h y una potencia máxima en torno a los 120 kW. Se trata de probar el vehículo en un ciclo que es largo de completar.

Este vehículo, dados los requisitos, los elementos que lo compondrán y la potencia limitada de la FC, será un vehículo eléctrico de pila de combustible con extensor de autonomía enchufable (P-ReFCEV). Por tanto, la pila de combustible no se utiliza principalmente para propulsar directamente las ruedas del vehículo, sino que sirve sobre todo como generador de energía para la batería. La idea de estos vehículos es utilizar la energía eléctrica de la batería la mayor parte del tiempo y, a continuación, sólo utilizar el motor de hidrógeno cuando la batería se aproxime a un nivel inferior de carga, para ampliar la autonomía del vehículo.

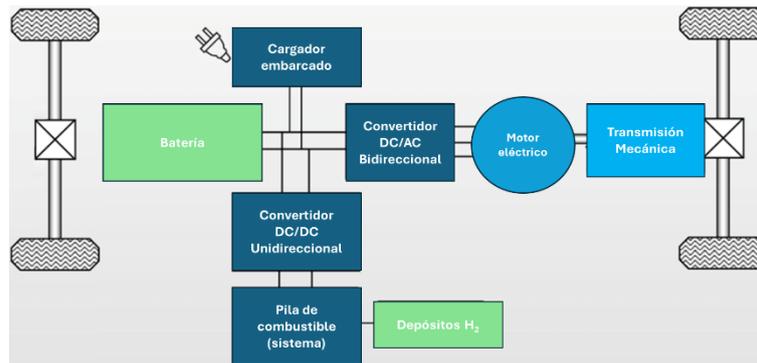


Figura 8: Diagrama representativo de la arquitectura P-ReFCEV con sus elementos principales

A partir de los resultados obtenidos, fue posible realizar un análisis de mercado y establecer contactos con los proveedores de los distintos componentes necesarios. Teniendo en cuenta la disponibilidad, los plazos de envío de los pedidos, los costes relacionados con los envíos y las aduanas y, sobre todo, los límites presupuestarios que había que respetar para cada componente, se llegó a varios compromisos. Al final, los componentes definidos para la compra final, que se instalarán en el interior de la nueva cadena cinemática, seguirán siendo suficientes para alcanzar las prestaciones definidas en las primeras fases de la actividad, al menos teóricamente.

Tabla 4: Componentes seleccionados

Componente	Selección	Características técnicas
Batería de alto voltaje	Leclanché INT-39 Energy LV	Voltaje nominal del paquete: 330 VDC Capacidad nominal del paquete: 120 Ah Energía nominal: 40 kWh Corriente máxima de descarga/carga: 250 A Pico de contacto: 500 Nm Par continuo: 275 Nm
Electric motor	Cascadia HVH250	Potencia máxima: 210 kW (@700 VDC) Potencia continua: 75 kW Velocidad máxima: 12000 rpm
Inversor de corriente CC/CA	Cascadia CM200-DX	Voltaje de funcionamiento: 50-480 VDC Corriente EM máxima continua: 300 A Potencia máxima de salida: 225 kW Disparo de sobretensión de CC: 500 VDC
DC/DC boost converter	Horizon VL DC-DC converter	Voltaje de entrada: 35 – 120 V Tensión de salida: 200 – 400 V Potencia nominal: 4 – 30 kW Eficiencia: 98%
Fuel Cell system	Horizon VL15kW	Número de celdas: 115 Potencia nominal: 15 kW Voltaje de salida: 90 VDC
Hydrogen tank	Air Liquide Alphagaz 1	Temperatura de funcionamiento: 60 – 70 °C Presión de servicio: 1 bar Presión de servicio: 200 bar Tamaño del volumen: 1,8 – 2,8 – 10 m ²

4. Conclusiones

Se ha dimensionado un vehículo señalero, optimizando las prestaciones de cada uno de los componentes del sistema de tracción mediante un proceso de tratamiento estadístico y simulación en AVL Cruise de ciclos de circulación reales medidos.

El vehículo cuenta con un motor de una potencia media elevada, pero necesaria para las operaciones de urgencia. Una batería que va a proporcionar autonomía suficiente gran parte de los días y en muchos aeropuertos en los que la explotación no sea intensiva. Siendo la configuración del vehículo la de un eléctrico enchufable que puede cargarse en carga lenta en el periodo de no explotación del aeropuerto.

Un sistema de extensión de autonomía mediante H2 comprimido y pila de combustible que garantiza que se puedan realizar todas las misiones necesarias en un día de elevado número de misiones y con algunas de gran intensidad de demanda de energía.

El trabajo desarrollado se trata, por tanto, de un diseño optimizado y a medida de la aplicación

5. Agradecimientos

Los trabajos aquí reflejados han podido ser realizados gracias al proyecto GREENH2CM | I+D+i del hidrógeno verde y las pilas de combustible titulado “POSICIONAMIENTO ESTRATÉGICO DE LA COMUNIDAD DE MADRID EN I+D+I DEL HIDRÓGENO VERDE Y LAS PILAS DE COMBUSTIBLE” y dentro de la Línea de Actuación 7: Usos de hidrógeno en el transporte pesado, sector aéreo y marítimo. El Proyecto GreenH2-CM ha sido financiado en la convocatoria de Planes Complementarios de I+D+I con las comunidades autónomas, por la Comunidad de Madrid, el Estado a través del Plan de Recuperación, Transformación y Resiliencia y la Unión Europea a través de los fondos NextGeneration EU.

6. Referencias

- [1] J. Bauman and M. Kazerani, "A Comparative Study of Fuel-Cell–Battery, Fuel-Cell–Ultracapacitor, and Fuel-Cell–Battery–Ultracapacitor Vehicles," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 57, (2), pp. 760, 2008. . DOI: 10.1109/tvt.2007.906379.
- [2] M. M. Hussain and I. Dincer, "Life cycle assessment of hydrogen fuel cell and gasoline vehicles," in Anonymous 2010, . DOI: 10.1016/b978-0-444-53565-8.00011-7.
- [3] L. Ren, S. Zhou and X. Ou, "Life-cycle energy consumption and greenhouse-gas emissions of hydrogen supply chains for fuel-cell vehicles in China," *Energy*, vol. 209, 2020. . DOI: 10.1016/j.energy.2020.118482.
- [4] W. G. Colella, M. Z. Jacobson and D. M. Golden, "Switching to a U.S. hydrogen fuel cell vehicle fleet: The resultant change in emissions, energy use, and greenhouse gases," *Journal of Power Sources*, vol. 150, pp. 150, 2005. . DOI: 10.1016/j.jpowsour.2005.05.092.
- [5] X. Liu *et al*, "Comparison of well-to-wheels energy use and emissions of a hydrogen fuel cell electric vehicle relative to a conventional gasoline-powered internal combustion engine vehicle," *International Journal of Hydrogen Energy*, vol. 45, (1), pp. 972, 2019. . DOI: 10.1016/j.ijhydene.2019.10.192.
- [6] M. Secanell *et al*, "PEM Fuel Cells, Modeling," *Encyclopedia of Sustainability Science and Technology*, pp. 1, 2017. . DOI: 10.1007/978-1-4939-2493-6_1019-1.