

REPRODUCCIÓN CONTROLADA DEL PILOTO EN LABORATORIO Y ANÁLISIS COMPARATIVO DEL RENDIMIENTO

HIMOV

Corredor Tecnológico
Transfronterizo de Movilidad
con Hidrógeno Renovable

Interreg



Cofinanciado por
la Unión Europea
Cofinanciado pela
União Europeia

España – Portugal



INSTITUTO
ENERXÉTICO
DE GALICIA



Tabla de contenido

Índice de tablas.....	5
1. Presentación del vehículo	6
2. Banco de ensayos y configuración	8
Banco de rodillos	8
Configuración.....	14
3. Instrumentación y adquisición de datos	20
Instrumentación del banco de ensayos	20
Instrumentación del vehículo	21
Parámetros de hidrógeno y presión del tanque.....	28
Parámetros de pila de combustible (FC Stack)	28
Parámetros del sistema de refrigeración	28
Parámetros eléctricos e inversores	29
Parámetros de motor eléctrico y compresor	29
Parámetros de conducción y vehículo	29
Otros parámetros auxiliares.....	29
4. Diseño de experimentos	30
Ensayo de Repetibilidad.....	31
Ensayo WOT (Wide Open Throttle).....	31
Ensayo a Cargas Parciales	31
Ensayo de Reproducción de Condiciones Reales	32
Ciclo WLTP	32
5. Ensayos, análisis y resultados	33
WOT.....	33
Ensayos	34
Repetibilidad de los ensayos.....	36
Resultados	37
Cargas parciales	38
Carga parcial baja.....	38
Carga parcial media	39
Carga parcial alta	41
Reproducción de condiciones reales	43
WLTP.....	46
Resultados principales del ciclo WLTP.....	48
Comportamiento dinámico durante el ciclo	48
Análisis energético del sistema FC + batería	49

Consumo y eficiencia del hidrógeno	50
Funcionamiento de la pila de combustible (FC)	51
Gestión térmica	51
Rendimiento energético de la pila de combustible.....	52
Caracterización de la cadena de tracción	53
Drag	54
Modos de funcionamiento	57
6. Conclusiones.....	61

Índice de figuras

Figura 1. Partes del Toyota Mirai.....	6
Figura 2. Banco de rodillos.....	8
Figura 3. Configuración general del banco de ensayos	10
Figura 4. Menú del Setup del banco de ensayos.....	10
Figura 5. Menú de configuración del banco de ensayos	11
Figura 6. Tipos de test en el banco de ensayos.....	11
Figura 7. Estado de las condiciones atmosféricas	12
Figura 8. Entrada del vehículo al tren de rodillos.....	15
Figura 9. Configuración del banco	15
Figura 10. Vehículo testándose en el banco.....	15
Figura 11. Parámetros del vehículo en banco	16
Figura 12. Cálculos en el banco.....	16
Figura 13. Configuración de condiciones atmosféricas	17
Figura 14. Operando en el banco.....	17
Figura 15. Lecturas del vehículo.....	18
Figura 16. Operando en el vehículo	18
Figura 17. Par motor vs velocidad del motor	19
Figura 18. Curvas de par y potencia.....	19
Figura 19. Ventilador frontal	20
Figura 20. Curvas par y potencia con la batería cargada.....	34
Figura 21. Curvas par y potencia con la batería descargada	35
Figura 22. Primera lanzada	35
Figura 23. Tercera lanzada	35
Figura 24. Voltaje (rojo), potencia (rosa), pedal (verde)	36
Figura 25. Voltaje (azul), potencia (rosa), pedal (verde)	36
Figura 26. Corriente (azul), potencia (rosa), pedal (verde)	36
Figura 27. Diferencia de par máximo en cada lanzada.....	37
Figura 28. Potencia FC (rosa), potencia batería (azul).....	39
Figura 29. Potencia FC (rosa), consumo instantáneo (morado)	39
Figura 30. Curva de polarización a cargas medias.....	39
Figura 31. Consumo instantáneo y acumulado, cargas bajas (verdes) y cargas medias (rojo)	40
Figura 32. Potencia batería, cargas medias (verde) y cargas bajas (rojo)	40
Figura 33. SOC batería a cargas medias	40
Figura 34. Voltaje FC arriba y potencia FC abajo, cargas bajas (rojo) y cargas medias (verde).....	40
Figura 35. Potencia FC (rosa), potencia batería (azul).....	41
Figura 36. Consumo instantáneo, cargas bajas (azul), cargas medias (rojo), cargas altas (verde)	41
Figura 37. Potencia FC (rosa), temperatura FC (verde)	41
Figura 38. Eficiencia vs corriente a cargas altas	42
Figura 39. Características de la resistencia a la rodadura y la resistencia aerodinámica de un vehículo	43
Figura 40. WLTP frente a NEDC.....	46
Figura 41. Ciclo WLTP en la configuración del banco	47
Figura 42. Potencia FC (azul), energía consumida FC (rojo)	48
Figura 43. Velocidad durante el WLTP.....	48
Figura 44. Aceleración durante el WLTP	49
Figura 45. Potencia en el eje.....	49
Figura 46. Potencia FC (rosa), potencia batería (azul).....	49

Figura 47. Estado de carga de la batería (SOC)	50
Figura 48. Consumo instantáneo	50
Figura 49. Consumo acumulado	50
Figura 50. Potencia FC (rosa), voltaje FC (rojo), corriente FC (azul)	51
Figura 51. Curva de polarización.....	51
Figura 52. Temperatura en el WLTP	51
Figura 53. Termostato en el WLTP.....	52
Figura 54. Velocidad de la bomba de agua en el WLTP.....	52
Figura 55. Eficiencia durante el ciclo.....	52
Figura 56. Arquitectura del Toyota Mirai I (información facilitada por fabricante)	54
Figura 57. Fuerza total	55
Figura 58. Par total.....	56
Figura 59. Potencia total	56
Figura 60. Funcionamiento del sistema pila / Batería (Arranque) (I)	57
Figura 61. Funcionamiento del sistema pila / Batería (Arranque) (II).....	57
Figura 62. Funcionamiento del sistema pila / Batería (Aceleración) (I).....	58
Figura 63. Funcionamiento del sistema pila / Batería (Aceleración) (II).....	58
Figura 64. Funcionamiento del sistema pila / Batería (Velocidad de crucero) (I).....	59
Figura 65. Funcionamiento del sistema pila / Batería (Velocidad de crucero) (II).....	59
Figura 66. Funcionamiento del sistema pila / Batería (Regeneración) (I).....	60
Figura 67. Funcionamiento del sistema pila / Batería (Regeneración) (II).....	60

Índice de tablas

Tabla 1. Ficha técnica Toyota Mirai I	7
Tabla 2. Datos del banco de rodillos	8
Tabla 3. Variables que se pueden leer desde el puerto OBD II.....	21
Tabla 4. Valores pila de combustible	37
Tabla 5. Valores batería de tracción	38
Tabla 6. Consumos de los auxiliares de la pila de combustible	38
Tabla 7. Resumen ensayos a cargas parciales	42
Tabla 8. Variables que se pueden leer desde el puerto OBD II.....	48
Tabla 9. Eficiencia por fases del ciclo	52
Tabla 10. Parámetros Road Load.....	55

1. Presentación del vehículo

El Toyota Mirai I es un vehículo de hidrógeno de pila de combustible (Fuel Cell Electric Vehicle, FCEV) que combina una pila de combustible con un motor eléctrico y una batería auxiliar de baja capacidad. Su tren motriz eléctrico cuenta con un motor síncrono de imanes permanentes que entrega aproximadamente 113 kW (154 CV) y ofrece un par elevado desde bajas revoluciones, lo que permite aceleraciones inmediatas. La batería de níquel metal-hidruro, con capacidad reducida de alrededor de 1,6 kWh, se utiliza para almacenar energía recuperada en frenadas regenerativas y proporcionar asistencia en picos de demanda. La electrónica de control gestiona la transición entre la energía de la pila y la batería, garantizando suavidad y eficiencia en la entrega de potencia.

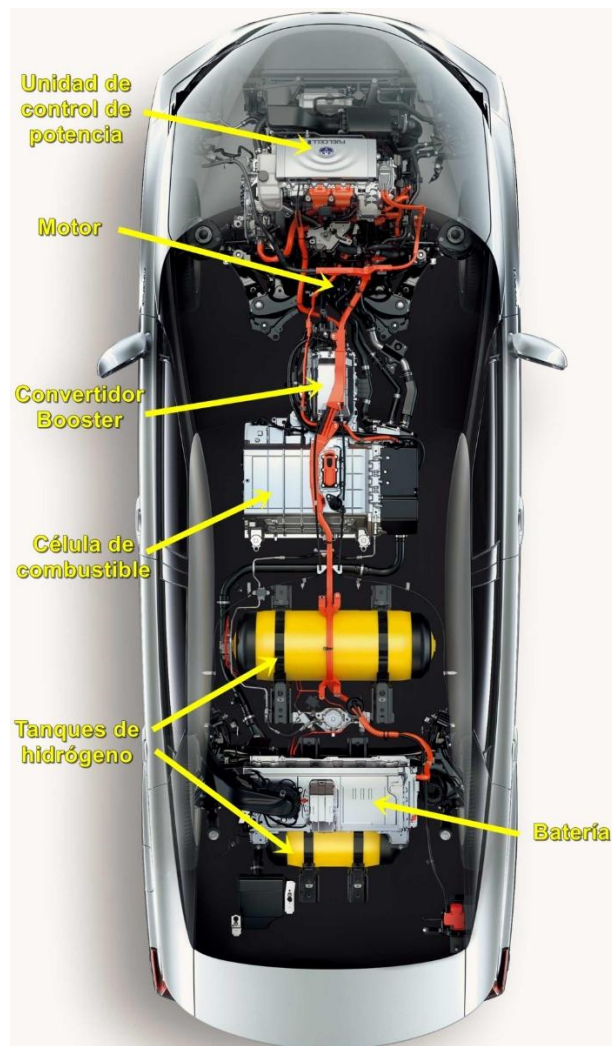


Figura 1. Partes del Toyota Mirai

La pila de combustible del Mirai I es del tipo PEMFC (membrana de polímero) y tiene una potencia nominal cercana a 114 kW. Su funcionamiento depende de los depósitos de hidrógeno de alta presión, mientras que el sistema de gestión controla el flujo de hidrógeno y oxígeno, la temperatura del stack y la respuesta ante demandas rápidas de potencia. Los depósitos de hidrógeno son de fibra de carbono y operan a 700 bar, con una capacidad total de 4,6 kg. Su

ubicación bajo el piso y en la parte trasera del vehículo permite optimizar la distribución de pesos y mantener un buen espacio interior.

En cuanto a la plataforma y el chasis, el Mirai I se apoya en una base de tracción delantera similar a la de sedanes medianos de lujo de Toyota. La suspensión es independiente en las cuatro ruedas, con configuración MacPherson adelante y multibrazo atrás, lo que proporciona un equilibrio entre confort y estabilidad. El peso total del vehículo ronda los 1.850 kg, debido principalmente a los depósitos de hidrógeno y la pila de combustible.

Los sistemas auxiliares incluyen un complejo sistema de gestión térmica, con circuitos independientes para la pila de combustible, el motor eléctrico y la batería, permitiendo disipar el calor generado en condiciones de alta demanda. Una bomba de refrigerante y un radiador específico mantienen la temperatura óptima del sistema. La electrónica de control, que incluye la unidad de control de la pila y la unidad de control del motor eléctrico, coordina la entrega de energía, la recuperación de frenada y la transición entre batería y pila de combustible.

Por último, en lo tocante a seguridad se puede decir que la carrocería está reforzada y los depósitos de hidrógeno cuentan con protecciones específicas. Además, el vehículo incorpora sensores de fugas, sistemas de ventilación y válvulas de seguridad que permiten operar de forma segura a 700 bar, asegurando la integridad del vehículo y de sus ocupantes en todo momento.

Tabla 1. Ficha técnica Toyota Mirai I

Prestaciones y consumos homologados	
Velocidad máxima	178 km/h
Aceleración 0-100 km/h	9,6 s
Consumo NEDC	
Extraurbano	0,8 kg/100 km
Urbano	0,69 kg/100 km
Medio	0,76 kg/100 km
Dimensiones, peso, capacidades	
Tipo de Carrocería	Turismo
Longitud	4.890 mm
Anchura	1.815 mm
Altura	1.535 mm
Batalla	2.780 mm
Vía delantera	1.535 mm
Vía trasera	1.545 mm
Coefficiente Cx	0.29
Peso	1.850 kg
Depósito de combustible	4,6 kg
Motor eléctrico	
Potencia máxima	154 CV / 113 Kw
Par máximo	335 Nm
Tensión nominal	650 V
Batería	
Tipo	Níquel metal-hidruro
Capacidad	1,59 kWh

2. Banco de ensayos y configuración

Banco de rodillos

El banco de pruebas que se utilizó para los ensayos fue el DynoRace 4WD DF4, un dinamómetro diseñado para vehículos de tracción total que permite simular de manera precisa las condiciones de conducción reales. Este tipo de banco, basado en un sistema inercial, permite medir la potencia y el par entregados por el tren motriz con alta fidelidad, registrando la respuesta del vehículo en distintas condiciones de carga y velocidad. La elección de un dinamómetro inercial se justifica por su capacidad para replicar de manera directa la aceleración y la inercia del vehículo sobre la carretera, garantizando así que los datos obtenidos sean representativos de su comportamiento en pista.

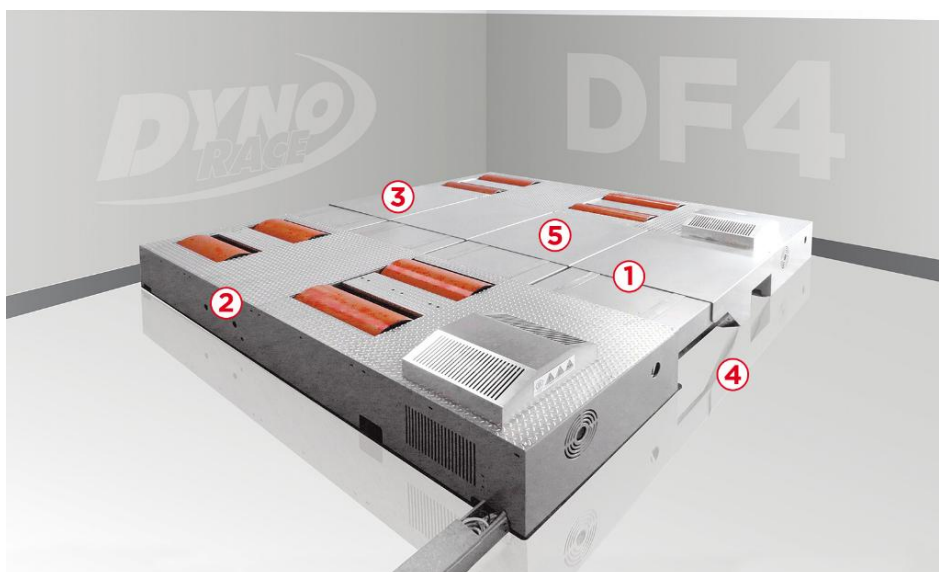


Figura 2. Banco de rodillos

1. Freno de corrientes parásitas
2. Rodillo moleteado para mejorar la tracción
3. Sistema Lift % lock para el posicionamiento fácil del vehículo
4. Motor eléctrico para ajuste de distancia entre ejes
5. Placas de acero para un fácil deslizamiento

Tabla 2. Datos del banco de rodillos

DATOS TÉCNICOS	DF4IS (inercial)	DF4S (frenado)
DATOS DIMENSIONALES		
Medidas de la bancada (mm)	3190x4120x400	3190x4120x400
Ancho de los rodillos (mm)	650	650
Distancia entre los rodillos (mm)	550	550
Diámetro de los rodillos (mm)	318	318
Ancho de vía (mm)	850-2100	850-2100
Paso (mm)	2000-3040	2000-3040
Elevación y bloqueo	neumático	neumático
Peso (kg)	2700	2300

CARACTERÍSTICAS		
Velocidad máxima (km/h)	300	300
Potencia en la rueda (kW)	400	400
Par teórico en la rueda (kgm)	-	160
Fuerza de tracción (kN)	-	15
Revoluciones máximas (rpm)	5000	5000
Capacidad por eje (kg)	2500	2500
Dimensiones de la rueda (pulgadas)	13-23	13-23
Conexión de los ejes	//	//
GESTIÓN Y DATOS		
Medida de las revoluciones del rodillo (rpm)	6.000 (codificador)	6.000 (codificador)
Medida de fuerza (N)	-	5000 strain gauge
Gestión del freno (vcc)	-	192V / PWM 12 bits
Temperatura del gas de escape (K)	1000	1000
Temperatura del aceite del motor (°C) / H2O (°C)	0 - 150	0 - 150
Sonda de presión turbo (bar)	-1,00 + 3,00	-1,00 + 3,00

Los valores se miden y se integran mediante los datos detectados por una estación barométrica integrada y en aplicación de las siguientes normativas: DIN 70020, EGW 80/1269, ISO 1585, SAE J1349, JIS D1001.

- **DIN 70020:** Normativa alemana que establece los métodos para la medición de potencia y par en motores y vehículos, incluyendo correcciones por condiciones ambientales y fricción interna.
- **EGW 80/1269 (Directiva europea):** Define los procedimientos de ensayo y las condiciones de medida para la homologación de vehículos de motor, asegurando la validez de los resultados de potencia y emisiones.
- **ISO 1585:** Estándar internacional que describe la metodología para la medición de la potencia máxima de vehículos de motor en bancos de rodillos, incluyendo la corrección a condiciones de referencia de presión, temperatura y humedad
- **SAE J1349:** Norma de la Society of Automotive Engineers para la determinación de la potencia neta del motor a las ruedas, considerando pérdidas de transmisión y auxiliares.
- **JIS D1001:** Norma japonesa que define procedimientos de ensayo de motores y vehículos para la medición de par y potencia efectiva, así como la corrección de datos a condiciones estándar.

El banco cuenta con una interfaz de control en la que introducir los parámetros del ensayo, y ajustar la configuración del banco. Entre las configuraciones destacan el ajuste de la célula de carga y la selección del tipo de ensayo.

Setup del banco

Configuración general

Lengua en uso: Espanol

Regulación press. ambiente: mbar 0 Confirma

Proximity: ---

Tipo de banco: DF4FSHLS

☒ medidas específicas neumáticos
☐ Células autoajuste

Uso:
Oras: 0.0 0:00:00
Ejecuciones: 0 0:00:00

Puerta de comunicación:
Disponible: COM3 COM7

Control del freno: Auto detect Com: 4

Adquisición: Auto detect Com: 3

Configuración general Datos identificativos para impresión Ajuste celda anteri ◀ ▶

OK

Figura 3. Configuración general del banco de ensayos

Setup del banco

Ajuste celda anterior

Valor de ajuste corriente: 30/12/1899

Tensión de la celda: 0.00000000 V

Carga de la celda: 0.00 Kg

Costante del freno: 0.320 m

Calibración:
☒ Usa características del la celda
☐ Continúa con ajuste manual

Activa proceso

1) Aplicar la barra sin peso + plato y confirmar -> Confirma

2) Aplicar el peso calibrado y confirmar -> Confirma

3) Quitar la barra y el peso y despues confirmar -> Confirma

Memorizar ajustes

Datos identificativos para impresión Ajuste celda anterior Ajuste celda posteri ◀ ▶

OK

Figura 4. Menú del Setup del banco de ensayos

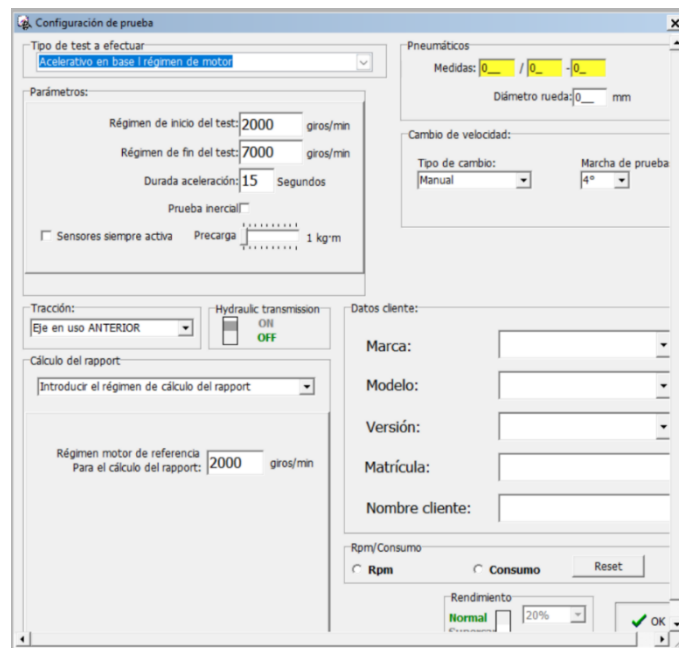


Figura 5. Menú de configuración del banco de ensayos

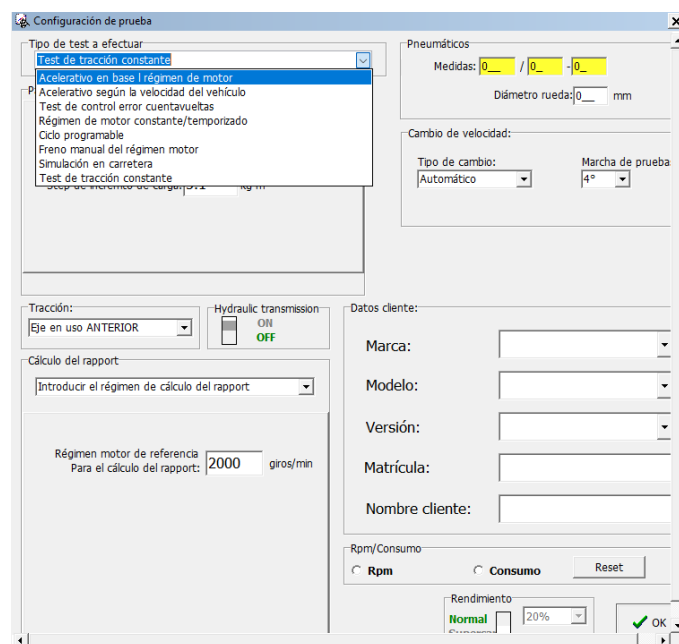


Figura 6. Tipos de test en el banco de ensayos

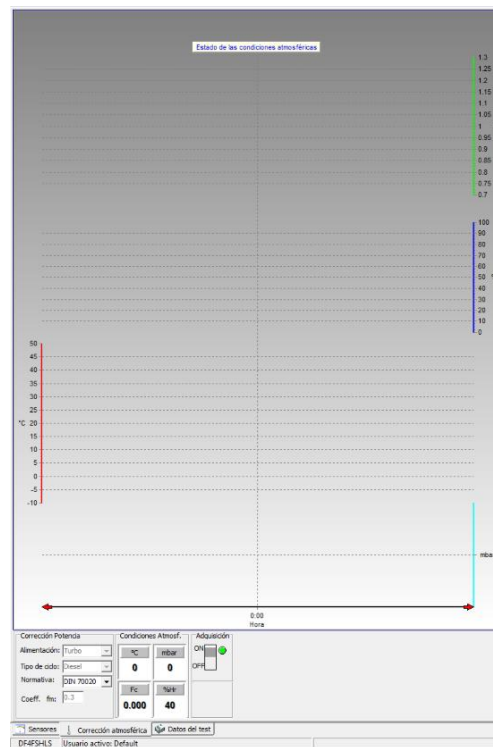


Figura 7. Estado de las condiciones atmosféricas

Los modos de ensayos son:

- **Acelerativo en base al régimen motor:** El vehículo se acelera controlando directamente el régimen del motor (rpm), independientemente de la velocidad real de las ruedas.
- **Acelerativo según la velocidad del vehículo:** El vehículo se acelera siguiendo un perfil de velocidad objetivo, medido a la salida de los rodillos.
- **Test de control error cuentavueltas:** Se registra la diferencia entre el régimen real del motor y la consigna establecida, evaluando la precisión del control de rpm.
- **Régimen de motor constante/temporizado:** El motor de mantiene a un régimen fijo durante un tiempo determinado o siguiendo una secuencia temporal programada.
- **Ciclo programable:** Se ejecutan perfiles de velocidad preprogramados, incluyendo ciclos normalizados o perfiles de conducción específicos.
- **Freno manual del régimen motor:** Se aplica un freno activo sobre el motor, manteniendo o reduciendo el régimen según la intervención del operador.
- **Simulación en carretera:** Se reproducen en el banco las resistencias de rodadura, aerodinámica y pendientes equivalentes a condiciones de carretera.
- **Test de tracción constante:** Se aplica un régimen de tracción constante mediante los rodillos, manteniendo la potencia o el par aplicado al vehículo.

Proceso de medición del banco

El Toyota Mirai es un vehículo eléctrico con una pila de combustible (FCEV) que utiliza un motor síncrono de imanes permanentes acoplado a una relación de transmisión fija puesto que no tiene marchas, lo cual simplifica significativamente la interpretación del par medido en el rodillo, ya que no intervienen cambios de marca ni variaciones en la reducción total durante el ensayo.

Aun así, como sucede en cualquier banco de rodillos, el par no se obtiene directamente del eje del motor, sino que se calcula a partir de las magnitudes medidas en el rodillo de ensayo (aceleración o fuerza de reacción). Después, se estima el par motor considerando las pérdidas mecánicas presentes en neumáticos, rodamientos y tren de transmisión del vehículo.

En el caso de un vehículo FCEV como el Toyota Mirai, el motor eléctrico entrega un par casi inmediato y continuo, lo que implica que la curva de par medida en el banco es muy sensible a la precisión de los sensores de velocidad del rodillo y del sistema de carga.

La potencia en cualquier punto de ensayo se obtiene mediante la expresión de la potencia.

Momento de inercia del rodillo

El rodillo del banco presenta un momento de inercia calibrado I , determinado experimentalmente y considerado como dato de entrada para todos los cálculos. Para un cilindro macizo ideal, la expresión teórica sería;

$$I = \frac{1}{2}mr^2$$

Sin embargo, el valor real que se emplea incluye correcciones por elementos adicionales como ejes, soportes, masas concéntricas y acoplamientos presentes en la máquina.

Cálculo de la aceleración angular

El banco registra la evolución temporal de la velocidad angular del rodillo $\omega(t)$. A partir de estos datos se obtiene la aceleración:

$$\alpha = \frac{d\omega}{dt}$$

El software del banco aplica filtros para eliminar el ruido y obtener una derivada fiable, lo cuales es especialmente necesario en el caso de vehículos eléctricos como el Mirai, donde el par puede variar de manera muy rápida.

Obtención del par en rueda.

Con I y α , el par transmitido por el vehículo al rodillo se calcula directamente mediante la ecuación fundamental:

$$M_{rueda} = I \cdot \alpha$$

Este valor representa el par efectivo que el Toyota Mirai transmite al suelo a través de sus neumáticos. En los vehículos eléctricos este valor es elevado a bajas velocidades debido al par instantáneo característico del motor síncrono.

Conversión del par en rueda a par motor.

Dado que el Mirai cuenta con una única relación de transmisión fija, la relación entre el par del motor y el par a las ruedas es constante durante todo el ensayo:

$$M_{motor} = M_{rueda} \cdot R$$

donde R es la reducción total del conjunto transmisión-diferencial.

Sin embargo, este cálculo debe corregirse para considerar las pérdidas mecánicas del sistema. Estas pérdidas se determinan a través de una prueba de desaceleración, en la que el vehículo se deja rodar libremente sin aportar par motor, permitiendo cuantificar:

- Resistencia de rodamientos
- Pérdidas viscosas en la transmisión y el diferencial
- Deformación del neumático
- Pérdidas por aireación interna del conjunto

El par motor corregido queda entonces expresado como:

$$M_{motor,real} = M_{rueda} / R + M_{pérdidas}$$

En el caso del Mirai, estas pérdidas serán menores que sistema térmicos debido a la ausencia de embrague, lubricación o engranajes múltiples.

Configuración

La configuración de un dinamómetro de chasis (dyno chasis) para reproducir condiciones reales de conducción requiere ajustar cuidadosamente los parámetros que representan las fuerzas resistentes al avance del vehículo. El objetivo es lograr que, al operar sobre el banco, el vehículo experimente un esfuerzo equivalente al que tendría en carretera, permitiendo así una evaluación precisa del rendimiento energético, al respuesta dinámica y el comportamiento del sistema de propulsión.

Para los ensayos del ciclo WLTP donde debemos reproducir las condiciones reales de circulación, se introducen en el sistema los coeficientes de carga característicos que definen la relación entre la velocidad del vehículo y la fuerza total que debe vencer para desplazarse.

El banco dinamométrico utiliza estos coeficientes para ajustar el par resistivo aplicado a los rodillos, de forma que el vehículo perciba una carga equivalente a la de un desplazamiento real. Además, se puede introducir un factor de pendiente que simule la componente gravitatoria en subidas o bajadas, permitiendo reproducir escenarios con diferentes grados de inclinación. De este modo, se logra una representación fiel de las condiciones de rodadura, aerodinámica y topográficas que afectan al consumo energético y al comportamiento del vehículo en carretera.

Una vez configurado, el sistema permite realizar ensayos controlados en los que se evalúan parámetros como la potencia y el par a distintas velocidades, eficiencia de la pila de combustible, consumo de hidrógeno, respuesta del tren motriz y rendimiento global del sistema. La gran ventaja del uso del dyno chasis es que posibilita repetir las pruebas en condiciones estables y seguras, eliminando la influencia de variables externas como el viento, la temperatura o el estado del firme, a la vez que ofrece una correlación directa con las condiciones reales de conducción.

Para comenzar el proceso de ensayo en banco de rodillos, el vehículo se coloca cuidadosamente sobre el dinamómetro, asegurando que las ruedas motrices queden perfectamente alineadas con los rodillos. Esta operación requiere precisión, ya que una alineación incorrecta puede generar errores de medida o incluso daños mecánicos. Para ajustar la posición, se desplazan los ejes hacia adelante o hacia atrás hasta adaptarse a la batalla del vehículo, garantizando una posición estable y centrada.



Figura 8. Entrada del vehículo al tren de rodillos



Figura 9. Configuración del banco

Una vez posicionado correctamente, el vehículo se sujeta firmemente mediante cintas de seguridad ancladas al chasis, verificando que no haya holguras, interferencias o elementos sueltos que puedan comprometer la seguridad durante el ensayo. Además, se conecta un ventilador frontal de gran caudal, cuya función es reproducir el flujo de aire que el vehículo recibiría en condiciones reales de circulación. Este flujo es esencial para la refrigeración de los radiadores y del sistema de admisión, evitando sobrecalentamientos y garantizando condiciones térmicas equivalentes a las de conducción en carretera.



Figura 10. Vehículo testándose en el banco

Antes de iniciar las pruebas, se realiza una verificación completa de los niveles de fluidos y presiones, comprobando que el sistema de refrigeración, el circuito de hidrógeno y los componentes eléctricos se encuentren en estado óptimo. Posteriormente, se conectan los sistemas de adquisición de datos, que registran en tiempo real parámetros críticos como la velocidad de las ruedas, el par motor, la potencia entregada, los voltajes y corrientes de la pila de combustible, las temperaturas de los distintos subsistemas y la presión del hidrógeno. También se incluyen sensores ambientales para medir temperatura exterior, humedad relativa y presión atmosférica, garantizando que los resultados puedan ser corregidos según las condiciones del entorno.

Con el vehículo encendido, se desactiva el control de tracción para evitar interferencias en las mediciones y se selecciona el modo *Power*, que permite operar con la máxima potencia disponible del sistema híbrido. En la configuración del banco, se selecciona el modo de tracción delantera, ya que el Toyota Mirai cuenta con un único motor eléctrico en el eje delantero. Se definen dos

tipos principales de ensayo: curva de potencia, que permite obtener el rendimiento máximo del vehículo, y ciclo de carretera, que simula condiciones de conducción real. Los parámetros se almacenan en el software del banco bajo la configuración de motores de gasolina, adaptada para este tipo de vehículo eléctrico de pila de combustible.

Se procede a la configuración del banco de rodillos:

- Tracción delantera porque el coche solo lleva un motor en el eje delantero
- Elección del tipo de ensayo: curva de potencia, o simulación de carretera
- El tipo de motor. Los parámetros del ensayo se almacenaron en la configuración de Gasolina.



Figura 11. Parámetros del vehículo en banco

Posteriormente, se aplica un par de freno inicial, que representa la resistencia al avance del vehículo en condiciones reales. Este par compensa factores como la masa, la fricción de los neumáticos o la pendiente del terreno, permitiendo un arranque controlado y estable durante la medición de la aceleración:

- Simula la resistencia al avance real (masa del coche, pendiente, rozamiento).
- Permite un arranque controlado (evita que el coche "salte" al inicio).



Figura 12. Cálculos en el banco

A continuación, se configuran las condiciones atmosféricas dentro del software del banco, introduciendo los valores de temperatura, presión y humedad ambiental, necesarios para las correcciones de potencia según las normas internacionales de ensayo.



Figura 13. Configuración de condiciones atmosféricas

Antes de realizar los ensayos definitivos, se efectúa una prueba en vacío, con el fin de verificar el correcto funcionamiento del sistema, la calibración de los sensores y la ausencia de vibraciones o ruidos anómalos. Superada esta comprobación, se procede a ejecutar las lanzadas de potencia y los ciclos de conducción estandarizados, como el WLTP, registrando todos los parámetros en tiempo real.



Figura 14. Operando en el banco

Durante las pruebas, se lleva a cabo una monitorización continua de los valores críticos, como la presión de hidrógeno, la temperatura del stack, el caudal de aire, los voltajes y corrientes del sistema o posibles errores en los controladores. En caso de que alguno de estos parámetros exceda los límites de seguridad establecidos, la prueba se detiene de forma inmediata para realizar una inspección técnica del vehículo, revisando conexiones, válvulas y sensores.



Figura 15. Lecturas del vehículo

Una vez completados los ensayos, se realiza una desaceleración progresiva del vehículo hasta su parada total, se guardan todos los datos obtenidos para su posterior análisis y se efectúa una inspección visual post-prueba, en la que se revisan posibles daños o anomalías en los sistemas. Finalmente, se retiran las cinchas de sujeción y se da por concluida la sesión de ensayo.



Figura 16. Operando en el vehículo

En cuanto a las medidas de seguridad, las pruebas se realizan con la puerta de la cabina abierta para evitar la acumulación de hidrógeno en caso de fuga, y se mantiene un extintor de emergencia accesible en todo momento. Además, el personal técnico utiliza equipos de protección adecuados, asegurando un entorno de ensayo seguro y controlado.

En los ensayos en el banco de rodillos realizamos varios tipos de ensayos. Los primeros son varias lanzadas a diferentes cargas hasta llegar a la carga máxima donde obtenemos las curvas de par u potencia del motor eléctrico.

A modo de ejemplo se pueden ver las curvas de par y potencia en uno de los ensayos a máxima carga. También se pueden ver las condiciones atmosféricas de temperatura y presión a las que se han hecho los ensayos y la temperatura del sistema.

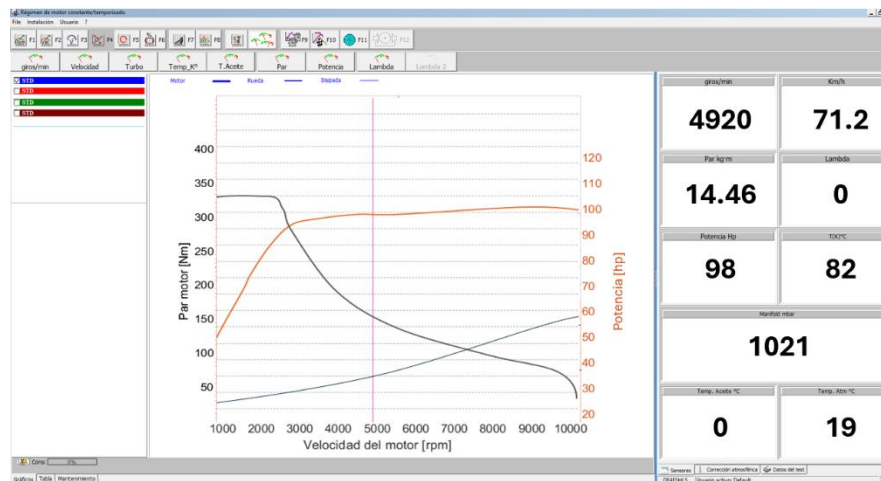


Figura 17. Par motor vs velocidad del motor

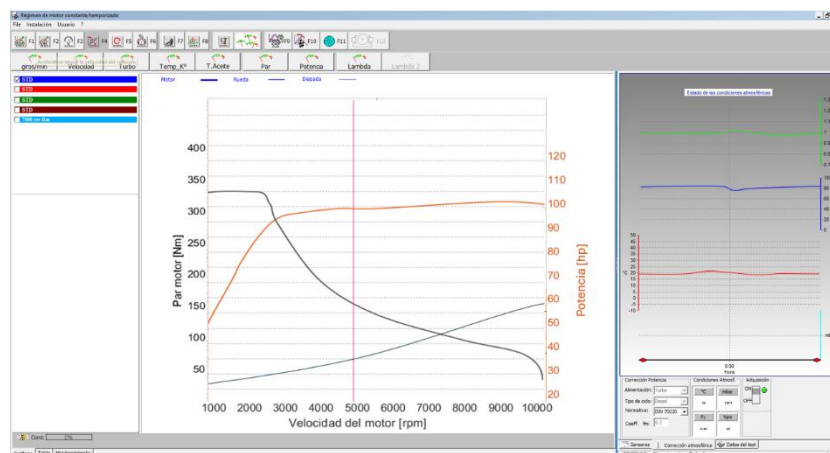


Figura 18. Curvas de par y potencia

3. Instrumentación y adquisición de datos

Instrumentación del banco de ensayos

El banco de rodillos cuenta con una instrumentación propia que complementa la del vehículo a ensayar. Esta instrumentación está compuesta por los siguientes dispositivos de medición y control:

- **Estación meteorológica:** permite medir y registrar las condiciones ambientales durante los ensayos. Los principales parámetros son: temperatura ($^{\circ}\text{C}$), presión atmosférica (mbar) y humedad relativa (%). Estas variables se utilizan para corregir la potencia y el par medidos según las normas DIN 70020, ISO 1585 y SAE J1349, asegurando que los resultados se puedan comparar con condiciones de referencia estándar.
- **Ventilador frontal:** El ventilador situado contra la parte frontal del vehículo se encarga de evitar un aumento excesivo de la temperatura del aire aspirado, el cual podría comportar mediciones incorrectas de la potencia del vehículo. El ventilador va conectado a un variador que asocia la velocidad del aire a la del vehículo que estamos probando en función de la velocidad de este, sólo así es posible simular las condiciones reales de funcionamiento de la pila. Del ventilador se registran los datos de potencia (W), caudal (m^3/s) y temperatura de aire de salida ($^{\circ}\text{C}$), lo que permite programarlo con perfiles constantes o variables, reproduciendo condiciones de circulación real.

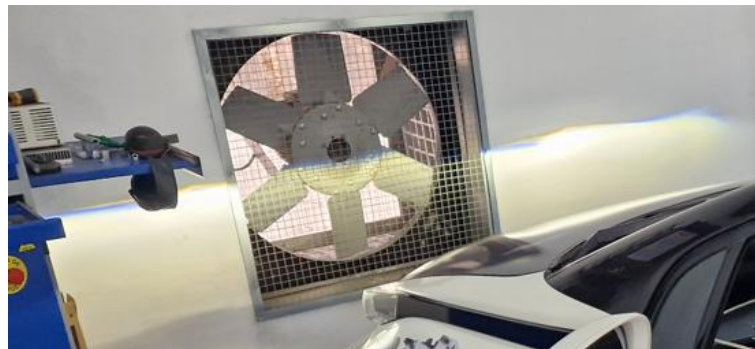


Figura 19. Ventilador frontal

- **Sonda de temperatura de escape:** Medición de la temperatura del agua que sale por el conducto de escape. Esta medición nos sirve para analizar el comportamiento térmico del sistema, sabiendo la temperatura a la que se expulsa el agua.
- **Sensores y adquisición de datos en el banco:** Medición de los parámetros relacionados con los rodillos: velocidad de los rodillos, par transmitido al rodillo, potencia en los rodillos. Los sensores se calibran periódicamente para cumplir las tolerancias definidas en las normas DIN 70020 y SAE J1349, que garantizan la fiabilidad de los datos.

Instrumentación del vehículo

Los datos del vehículo se obtienen a partir de su puerto OBD II que nos permite registrar las variables de los sensores del vehículo. Estos datos se sincronizan temporalmente con los obtenidos del banco como pueden ser la velocidad, distancia, par y potencia para el posterior análisis de datos. Estas variables son las siguientes:

Tabla 3. Variables que se pueden leer desde el puerto OBD II

Module	Channels	Source	Units
FC	Alta Presión del Sistema de Relleno de Hidrógeno	H2	psi
FC	Carga Anormal del Invertidor de la Bomba de Agua FC	Cooling	-
FC	Corriente FC	FC	A
FC	Densidad del Detector de Hidrógeno Lateral del Tanque	H2	%
FC	El Voltaje del Monitor de Célula Excede el Límite Superior	Control	-
FC	Entrada Anormal del Invertidor de la Boma de Hidrógeno	Control	-
FC	Estado de Carga Baja de la Batería del Vehículo Eléctrico	Control	-
FC	Ángulo de Inclinación del Vehículo (Dirección Horizontal)	Dynamic	°
FC	Carga Anomal del Invertidor de la Bomba de Hidrógeno	Control	-
FC	Densidad del Detector de de Hidrógeno Lateral de Cuarto del Motor	FC	%
FC	Distancia Total Recorrida	Dynamic	mile
FC	Entrada Anormal del Invertidor de la Bomba de Agua FC	Control	-
FC	Espera del Invertidor de la Bomba de Hidrógeno	Control	-
FC	Estado de la Válvula de Cierre del Tanque 1	H2	-
FC	Estado de la Válvula de Cierre del Tanque 2	H2	-
FC	Estado de Proceso de Reforma Conductiva Electrónicamente del Refrigerante de Pila de Refrigerante del Ventilador	Control	-
FC	Grado de Acelerador	Dynamic	%
FC	Hidrógeno Restante (Sistema de Relleno de Hidrógeno)	H2	%
FC	Interruptor de Enclavamiento de Tapa de Combustible	Control	-
FC	Inversión de Voltaje de Monitor de Célula	Control	-
FC	Límite de Salida del Invertidor de la Bomba de Agua FC	Control	-
FC	Estado de Permiso de Conducción del Invertidor de la Bomba de Agua de Refrigerante del Ventilador	Control	-
FC	Frecuencia de Salida del Sensor de Flujo de Aire de Masa	Control	kHz
FC	Hidrógeno Restante	H2	%
FC	Interruptor Abierto de Tapa de Combustible	Control	-
FC	Interruptor Encendido	Control	-

FC	Lámpara de Precaución del Vehículo Eléctrico	Electrical	-
FC	Límite de Salida del Invertidor de la Bomba de Hidrógeno	Control	-
FC	Mal Funcionamiento AD del Monitor de Célula	Control	-
FC	Mal Funcionamiento de EEPROM del Monitor de Célula	Control	-
FC	Mal Funcionamiento de Parada del Invertidor de la Bomba de Agua FC	Control	-
FC	Mal Funcionamiento de RAM del Monitor de Célula	Control	-
FC	Mal Funcionamiento del Invertidor de la Bomba de Agua FC	Control	-
FC	Memoria de Alta Presión del Sistema de Relleno de Hidrógeno	Control	psi
FC	Mal Funcionamiento de Circuito de Multiplicación y División del Monitor de Célula	Control	-
FC	Mal Funcionamiento de Offset del Monitor de Célula	Control	-
FC	Mal Funcionamiento de Parada del Invertidor de la Bomba de Hidrógeno	Control	-
FC	Mal Funcionamiento de ROM del Monitor de Célula	Control	-
FC	Mal Funcionamiento del Invertidor de la Bomba de Hidrógeno	Control	-
FC	Modo de Baja Temperatura	FC	-
FC	Modo de Baja Temperatura del Invertidor de la Bomba de Hidrógeno	H2	-
FC	Modo de Generación de Potencia de Pila de Refrigerante del Ventilador	FC	-
FC	Modo FC	FC	-
FC	Nivel Bajo de Vacío de Hidrógeno	H2	-
FC	No. De Canal de Célula de Voltaje Promedio Mínimo de Célula de Pila de Refrigerante del Ventilador	Control	ch
FC	Operación Intermitente FC	FC	-
FC	Pausa del Invertidor de la Bomba de Hidrógeno	Control	-
FC	Modo EV	Electrical	-
FC	Modo de Sueño del Monitor de Célula	FC	-
FC	Modo Inspección	Control	-
FC	No. de Canal de Célula de Voltaje Promedio Mínimo de Célula de Pila de Refrigerante del Ventilador	Control	ch
FC	Número de Inyección del Inyector de Hidrógeno	H2	-
FC	Pausa del Invertidor de la Bomba de Agua FC	Control	-
FC	Permiso de Conducción del Invertidor de la Bomba de Agua de Refrigerante del Ventilador	Control	-
FC	Permiso de Conducción del Invertidor de la bomba de Hidrógeno	Control	-
FC	Posición de la Válvula de Desviación de Aire de Objetivo	FC	%
FC	Posición de la Válvula Rotativa del Radiador de Objetivo	Cooling	%

FC	Potencia de Consumo de la Bomba de Agua de Refrigerante del Ventilador	Cooling	W
FC	Potencia de Consumo del Compresor de Aire	FC	W
FC	Presión Barométrica	FC	psi
FC	Posición de Cambio de Sensor de Cambio	Dynamic	P
FC	Posición de la válvula de Regulación de Presión de Aire de Objetivo	FC	%
FC	Posición de la Válvula Rotativa del Radiador Estimada	Cooling	%
FC	Potencia de Consumo de la Bomba de Hidrógeno	H2	W
FC	Preparado	Control	-
FC	Presión de Aire de la Pila FC (Entrada de la Pila FC)	FC	psi
FC	Presión de Aire de la Pila FC objetivo (Entrada de la Pila FC)	FC	psi
FC	Presión de Hidrogeno de Rango Bajo	H2	psi
FC	Presión de Hidrógeno de Rango Medio	H2	psi
FC	Relé Principal de Refrigerante del Ventilador	Cooling	-
FC	Revolución de la Bomba de Agua de Refrigerante del Ventilador	Cooling	rpm
FC	Revolución de la Bomba de Hidrógeno	H2	psi
FC	Presión de Hidrógeno de Rango Alto	H2	psi
FC	Presión de Hidrógeno de Rango Bajo de Objetivo	H2	psi
FC	Relé de la Fuente de Alimentación de la Válvula de Cierre del Tanque	H2	-
FC	Resistencia Interna de Pila de Refrigerante del Ventilador	FC	ohm
FC	Revolución de la Bomba de Agua de Refrigerante del Ventilador de Objetivo	Cooling	rpm
FC	Revolución de la Bomba de Hidrógeno de Objetivo	H2	rpm
FC	Revolución del Compresor de Aire	FC	rpm
FC	Señal de Despierto del Sistema del Vehículo Eléctrico	Electrical	-
FC	Solicitud de Conducción de la Válvula de Cierre del Tanque 2	H2	-
FC	Solicitud de Conducción del Ventilador de Radiador 1	Cooling	-
FC	Solicitud de Inyección del Inyector de Hidrógeno 1	FC	-
FC	Solicitud de Inyección del Inyector de Hidrógeno 3	FC	-
FC	Revolución del Compresor de Aire de Objetivo	FC	rpm
FC	Solicitud de Conducción de la válvula de Cierre del Tanque 1	H2	-
FC	Solicitud de Conducción de la Válvula de Drenaje de Escape	FC	-
FC	Solicitud de Conducción del Ventilador de Radiador 2	Cooling	-
FC	Solicitud de Inyección del Inyector de Hidrógeno 2	H2	-
FC	Temperatura Aire de Admisión	FC	°F
FC	Temperatura de Aire de la Pila FC (Entrada de la Pila FC)	FC	°F
FC	Temperatura de Refrigerante de la Pila FC de Objetivo (Salida de la Pila FC)	Cooling	°F

FC	Temperatura del Invertidor del Compresor de Aire	Electrical	°F
FC	Temperatura del Motor del Compresor de Aire	FC	°F
FC	Temperatura del Tanque 2 Almacenada de Inmediato Después de Relleno de Hidrógeno	H2	°F
FC	Valor Alisado de Presión Barométrica	FC	psi
FC	Temperatura de Refrigerante de la Pila FC (Salida de la Pila FC)	Cooling	°F
FC	Temperatura de Refrigerante de la Pila de Refrigerante del Ventilador (Salida del Radiador)	Cooling	°F
FC	Temperatura del Motor de la Bomba de Hidrógeno	H2	°F
FC	Temperatura del Tanque 1 Almacenada de Inmediato Después de Relleno Hidrógeno	H2	°F
FC	Tensión Batería	Electrical	V
FC	Valor Alisado de Presión de Aire de la Pila FC (Entrada de la Pila FC)	FC	psi
FC	Valor Aliado de Presión de Hidrógeno Rango-Alto	H2	psi
FC	Valor Alisado de Presión de Hidrógeno de Rango-Medio	H2	psi
FC	Valor Alisado de Temperatura de Aire de la Pila FC (Entrada de la Pila FC)	FC	°F
FC	Valor Alisado de Temperatura de Refrigerante de la Pila FC (Salida del Radiador)	Cooling	°F
FC	Valor Alisado de Temperatura del Tanque de Hidrógeno 1	H2	°F
FC	Valor Alisado de Presión de Hidrógeno de Rango-Bajo	H2	psi
FC	Valor Alisado de Temperatura de Aire de Admisión	FC	°F
FC	Valor Alisado de Temperatura de Refrigerante de la Pila FC (Salida de la Pila FC)	Cooling	°F
FC	Valor Alisado de Temperatura del Motor de la Bomba de Hidrógeno	H2	°F
FC	Valor Alisado de Temperatura del Tanque de Hidrógeno 2	H2	°F
FC	Valor de Flujo de Aire de Masa	FC	NL/min
FC	Velocidad del vehículo	Dynamic	mph
FC	Voltaje de Detector de Hidrógeno Lateral de Cuarto del Motor	Control	V
FC	Voltaje de Drive de Piezas Relacionadas FC	Control	V
FC	Voltaje de Fase A de la Válvula de Regulación de Presión de Aire	Control	V
FC	Voltaje de Fase B de la Válvula de Regulación de Presión de Aire	Control	V
FC	Voltaje de la Válvula de Cierre del Tanque 2	Control	V
FC	Valor de Flujo de Aire de Masa de Objetivo	FC	NL/min
FC	Voltaje de Bloque del Monitor de Célula	Control	-
FC	Voltaje de Detector de Hidrógeno Lateral de Tanque	Control	V
FC	Voltaje de Fase A de la Válvula de Desviación de Aire	Control	V
FC	Voltaje de Fase B de la Válvula de Desviación de Aire	Control	V

FC	Voltaje de la Válvula de Cierre del Tanque 1	Control	V
FC	Voltaje de Potencia del Monitor de Célula Bajo	Control	-
FC	Voltaje de Solicitud de Conducción del Ventilador de Radiador 1	Control	V
FC	Voltaje del Sensor de Alta Presión del Sistema de Relleno de Hidrógeno	Control	V
FC	Voltaje del Sensor de Presión de Aire de la Pila FC (Entrada de la Pila FC)	Control	V
FC	Voltaje del Sensor de Presión de Hidrógeno de Rango Bajo	Control	V
FC	Voltaje del Sensor de Temperatura de Aire de Pila FC (Entrada de Pila FC)	Control	V
FC	Voltaje del Sensor de Temperatura de Refrigerante de Pila de Refrigerante del Ventilador (Salida del Radiador)	Control	V
FC	Voltaje de Conducción del Ventilador de Radiador 2	Control	V
FC	Voltaje del Sensor de Presión Barométrica	Control	V
FC	Voltaje del Sensor de Presión de Hidrógeno de Rango Alto	Control	V
FC	Voltaje del Sensor de Presión de Hidrógeno de Rango Medio	Control	V
FC	Voltaje del Sensor de Temperatura de Refrigerante de Pila de Refrigerante del Motor (Salida de Pila de Refrigerante del Ventilador)	Control	V
FC	Voltaje del Sensor de Temperatura del Motor de la Bomba de Hidrógeno	Control	V
FC	Voltaje del Sensor de Temperatura del Tanque de Hidrógeno 1	Control	V
FC	Voltaje FC antes de Impulso	FC	V
FC	Voltaje Mínimo de Célula de Pila de Refrigerante del Ventilador	Control	V
FC	Voltaje Total de Refrigerante del Ventilador	Control	V
FC	Voltaje del Sensor de Temperatura del Tanque de Hidrógeno 2	Control	V
FC	Voltaje Interno de la ECU	Control	V
FC	Voltaje Mínimo Promedio de Célula de Pila de Refrigerante del Ventilador	Control	V
EV	-5 Valor AD de Voltaje	Control	V
EV	Control del Convertidor FC	Control	-
EV	Corriente del Reactor de Fase V	Electrical	A
EV	Corriente del Reactor de Fase X	Electrical	A
EV	Corriente FC de Objetivo	FC	A
EV	Estado A Prueba de Fallos	Control	-
EV	Estado A Prueba de Fallos de Fase V	Control	-
EV	5 Valor AD de Voltaje	Control	V
EV	Corriente del Reactor de Fase U	Electrical	A
EV	Corriente del Reactor de Fase W	Electrical	A
EV	Corriente FC	FC	A
EV	Distancia Total Recorrida	Dynamic	mile
EV	Estado A Prueba de Fallos de Fase U	Control	-

EV	Estado A Prueba de Fallos de Fase W	Control	-
EV	Estado A Prueba de Fallos de Fase X	Control	-
EV	Estado de Corriente del Reactor de Fase U	Control	-
EV	Estado de Corriente del Reactor de Fase V	Control	-
EV	Estado de Corriente del Reactor de Fase W	Control	-
EV	Estado de Corriente del Reactor de Fase X	Control	-
EV	Estado de Señal FLVL-RG	Control	-
EV	Estado de Voltaje FC	Control	-
EV	Estado de Corriente FC	Control	-
EV	Estado de Voltaje del Convertidor FC	Control	-
EV	Grado de Estimación de Temperatura del Reactor	FC	°F
EV	Juicio de Bajo Voltaje FVL (Convertidor FC Antes de Voltaje de Impulso)	Control	-
EV	Juicio de Fallo de IPM de Fase V (Sobre Corriente)	Control	-
EV	Juicio de Fallo de IPM de Fase X (Sobre Corriente)	Control	-
EV	Juicio de Señal de Fallo de IPM de Fase V (Sobrecalentamiento)	Control	-
EV	Juicio de Señal de Fallo de IPM de Fase X (Sobrecalentamiento)	Control	-
EV	Juicio de Fallo de IPM de Fase U (Sobre Corriente)	Control	-
EV	Juicio de Fallo de IPM de Fase W (Sobre Corriente)	Control	-
EV	Juicio de Señal de Fallo de IPM de Fase U (Sobrecalentamiento)	Control	-
EV	Juicio de Señal de Fallo de IPM de Fase W (Sobrecalentamiento)	Control	-
EV	Juicio de Sobre Voltaje FVH (Voltaje Impulsado del Convertidor FC)	Control	-
EV	Modo Inspección	Control	-
EV	Petición de Cierre del Convertidor FC de Fase X	Control	-
EV	Potencia de Salida FC de Objetivo	FC	kW
EV	Relación de Operación de Petición IGBT de Fase W	Electrical	%
EV	Petición de Cierre del Convertidor FC de Fase W	Control	-
EV	Potencia de Salida FC	FC	kW
EV	Relación de Operación de Petición IGBT de Fase V	Electrical	%
EV	Relación de Operación de Solicitud IGBT de Fase U	Electrical	%
EV	Relación de Operación de Solicitud IGBT de Fase X	Electrical	%
EV	Relé FC (+)	Electrical	-
EV	Señal de Encendido	Control	-
EV	Señal de Fallo de IPM de Fase V	Control	-
EV	Señal de Fallo de IPM de Fase X	Control	-
EV	Relé FC (-)	Electrical	-
EV	Señal de Bajo Voltaje IPM FVL (Convertidor FC Antes de Voltaje de Impulso)	Control	-
EV	Señal de Fallo de IPM de Fase U	Control	-
EV	Señal de Fallo de IPM de Fase W	Control	-
EV	Señal de Sobre Voltaje de IPM FVH (Voltaje Impulsado del Convertidor FC)	Control	-
EV	Solicitud de Cierre del Convertidor FC de Fase U	Control	-
EV	Solicitud de Cierre del Invertidor	Control	-
EV	Temperatura del Reactor	FC	°F

EV	Temperatura Estimada de Agua del Convertidor FC de Fase V	Cooling	°F
EV	Solicitud de Cierre del Convertidor FC de Fase U	Control	-
EV	Temperatura de Agua Estimada del Convertidor C (U/V/W/X Total)	Cooling	°F
EV	Temperatura Estimada de Agua del Convertidor FC de Fase U	Cooling	°F
EV	Temperatura Estimada de Agua del Convertidor FC de Fase W	Cooling	°F
EV	Temperatura Estimada de Agua del Convertidor FC de Fase X	Cooling	°F
EV	Temperatura Estimada de Elemento de Fase V	Cooling	°F
EV	Temperatura Estimada de Elemento de Fase X	Cooling	°F
EV	Temperatura IGBT de Fase U	Cooling	°F
EV	Temperatura IGBT de Fase W	Cooling	°F
EV	Temperatura Estimada de Elemento de Fase U	Cooling	°F
EV	Temperatura Estimada de Elemento de Fase W	Cooling	°F
EV	Temperatura Estimada del Condensador	Cooling	°F
EV	Temperatura IGBT de Fase V	Cooling	°F
EV	Temperatura IGBT de Fase X	Cooling	°F
EV	Tensión batería	Electrical	V
EV	Valor AD de Corriente del Reactor de Fase U	Electrical	V
EV	Valor AD de Corriente del Reactor de Fase W	Electrical	V
EV	Valor AD de Temperatura del Reactor de Fase V	Electrical	V
EV	Total Corriente del Reactor	Electrical	A
EV	Valor AD de Corriente del Reactor de Fase V	Electrical	V
EV	Valor AD de Corriente del Reactor de Fase X	Electrical	V
EV	Valor AD de Temperatura IGBT de Fase U	Electrical	V
EV	Valor AD de Temperatura IGBT de Fase V	Electrical	V
EV	Valor AD de Temperatura IGBT de Fase X	Electrical	V
EV	Valor AD del Relé FC (-)	Electrical	V
EV	Valor Alisado de Voltaje FC	FC	V
EV	Voltaje de Salida del Convertidor FC	Electrical	V
EV	Valor AD de Temperatura IGBT de Fase W	Electrical	V
EV	Valor AD de Voltaje de 26V	Electrical	V
EV	Valor AD del Relé FC (+)	Electrical	V
EV	Valor Relativo de Impedancia del Aire Acondicionado	Electrical	s
EV	Voltaje FC antes de Impulso	FC	V
EV	Voltaje FC después de Impulso	FC	V
EV	Voltaje FC de Objetivo	FC	V

Todos estos parámetros se pueden subdividir en sistemas del vehículo que garantizan el correcto funcionamiento tanto de la pila de combustible como de los demás sistemas.

Parámetros de hidrógeno y presión del tanque

Estos parámetros monitorean la cantidad, presión y densidad del hidrógeno almacenado y suministrado a la pila de combustible. Incluyen:

- Alta Presión del Sistema de Relleno de Hidrógeno y Memoria de Alta Presión: controlan la presión en el sistema durante la carga y operación.
- Hidrógeno Restante: indica el nivel de hidrógeno disponible en los tanques.
- Presión de Hidrógeno de Rango Bajo, Medio y Alto: supervisa la presión en distintos puntos del sistema para mantener un suministro estable.
- Densidad del Detector de Hidrógeno Lateral del Tanque: detecta posibles fugas de hidrógeno o concentración anormal en el entorno.
- Estado y Solicitud de Conducción de la Válvula de Cierre del Tanque: controla la apertura y cierre de los tanques para el flujo seguro de hidrógeno.

Parámetros de pila de combustible (FC Stack)

Estos datos reflejan el rendimiento eléctrico y las condiciones internas de la pila:

- Corriente FC y Voltaje FC: representan la energía eléctrica generada.
- Voltaje de Monitor de Célula, Voltaje Mínimo de Célula, Voltaje Total de Refrigerante del Ventilador: monitorean la salud de las celdas individuales de la pila.
- Temperatura de Aire de la Pila FC (Entrada) y Temperatura de Refrigerante (Salida): controlan la temperatura de operación para evitar sobrecalentamiento.
- Presión de Aire de la Pila FC: indica el suministro de oxígeno desde el compresor de aire.
- Potencia de Salida FC y Potencia de Salida FC de Objetivo: muestran la potencia eléctrica generada y la deseada según la demanda del vehículo.
- Modo FC, Operación Intermitente FC y Juicio de Bajo Voltaje FVL: informan sobre el estado operativo y limitaciones de la pila.

Parámetros del sistema de refrigeración

- Monitorean bombas, ventiladores y temperatura de los fluidos de la pila y componentes eléctricos:
- Carga Anormal del Inversor de la Bomba de Agua FC, Potencia de Consumo de la Bomba de Agua de Refrigerante del Ventilador, Revolución de la Bomba: supervisan la operación de las bombas de refrigerante.
- Temperatura del Inversor del Compresor de Aire, Temperatura del Motor de la Bomba de Hidrógeno: aseguran que los sistemas de enfriamiento mantengan las temperaturas operativas seguras.
- Temperatura Estimada de Agua del Convertidor FC de Fase X/U/V/W, Temperatura IGBT de Fase: monitorean los semiconductores y los circuitos de potencia para evitar sobrecalentamiento.

Parámetros eléctricos e inversores

Relacionados con la conversión de energía, control de motores y protecciones:

- Voltaje del Convertidor FC, Voltaje FC antes/después de impulso, Control del Convertidor FC: muestran la conversión de energía de la pila y la regulación de potencia.
- Corriente del Reactor de Fase U/V/W/X y Valor AD de Corriente del Reactor: indican la corriente en cada fase de los inversores que alimentan motores eléctricos o bombas.
- Juicio de fallo de IPM y Señal de fallo IPM de fase: detectan sobrecorrientes o sobrecalentamiento en los módulos de potencia.
- Voltaje Interno de la ECU, Tensión Batería: supervisan la alimentación de los sistemas de control y la batería de alto voltaje.

Parámetros de motor eléctrico y compresor

Miden el desempeño de los motores de tracción y auxiliares:

- Revolución del Compresor de Aire, Revolución de la Bomba de Hidrógeno, Revolución de la Bomba de Agua: indican la velocidad de los componentes eléctricos accionados por inversores.
- Potencia de Consumo del Compresor de Aire y Potencia de Consumo de la Bomba de Hidrógeno: reflejan la energía requerida para el funcionamiento de sistemas auxiliares.

Parámetros de conducción y vehículo

Relacionados con la dinámica y el estado general del vehículo:

- Velocidad del vehículo, Distancia Total Recorrida: información básica de operación y kilometraje del ensayo.
- Grado de Acelerador, Ángulo de Inclinación del Vehículo (Horizontal): indican las condiciones de manejo y pendientes.
- Modo EV, Estado de Carga Baja de la Batería del Vehículo Eléctrico, Señal de Encendido, Lámpara de Precaución del Vehículo Eléctrico: reflejan el estado de operación del tren motriz eléctrico y alertas.

Otros parámetros auxiliares

Incluyen sensores de temperatura, presión, flujo y seguridad:

- Presión Barométrica, Temperatura Aire de Admisión, Valor de Flujo de Aire de Masa: ayudan a calcular la densidad del aire y el rendimiento del motor.
- Interruptor de Enclavamiento de Tapa de Combustible, Interruptor Abierto/Encendido: protecciones de seguridad.
- Número de Inyección del Inyector de Hidrógeno, Solicitud de Inyección: controlan la dosificación del combustible en la pila.
- Voltajes de válvulas y sensores: reflejan el estado y operación de los actuadores y sensores críticos del sistema.

4. Diseño de experimentos

El Diseño de experimentos (DoE, Design of Experiments) es una metodología sistemática utilizada para planificar, ejecutar y analizar ensayos experimentales de manera que se obtenga la máxima cantidad de información con el menor número posible de pruebas.

En el ámbito de la ingeniería, el DoE permite:

- Evaluar la influencia de múltiples factores (velocidad, carga de la batería) sobre las variables de respuesta (potencia, consumo, eficiencia).
- Estructura los ensayos de forma ordenada y reproducible
- Optimizar los recursos experimentales y minimizar la variabilidad
- Comparar condiciones normativas y de operación real.

En este estudio, el DoE se aplica a la caracterización de la cadena de tracción híbrida del Toyota Mirai, vehículo eléctrico de pila de combustible, mediante ensayos en el banco de rodillos. El objetivo es analizar el comportamiento energético, la eficiencia y la interacción entre los subsistemas del tren motriz (pila, batería, motor eléctrico y auxiliares) bajo distintas condiciones de carga y demanda de potencia.

Con el diseño de experimentos se busca:

- Determinar las curvas de par y potencia bajo diferentes condiciones
- Analizar la respuesta eléctrica del sistema (tensiones e intensidades)
- Evaluar el consumo y comportamiento de los reactivos (hidrógeno y aire)
- Calcular la eficiencia global y parcial del sistema de propulsión
- Estudiar la repetibilidad e incertidumbre de las mediciones
- Comparar el rendimiento bajo condiciones normativas (WLTP)

El diseño de experimentos se estructura en cuatro bloques de ensayos, cada uno orientado a evaluar distintos aspectos del comportamiento del sistema. Cada bloque incluye tres fases: test, postproceso y análisis de resultados. A estos bloques, además de las variables registradas en cada ensayo, las condiciones de prueba y los datos previstos para el postprocesado, se han definido los siguientes elementos para estructurar el diseño experimental:

Factores y niveles:

- **Velocidades del rodillo:** 30, 60, 90 y 120 km/h
- **Carga resistiva equivalente:** baja, media y alta
- **Modo ventilación frontal:** estándar, intensivo
- **Preacondicionamiento del vehículo:** procedimiento único (se verifica que el SOC esté en rango operativo y sin alarmas activas).

Tipos de ensayos:

- **Ensayos estáticos (STR):** condiciones constantes de velocidad o régimen motor para evaluar la estabilidad y eficiencia.
- **Ensayos transitorios (NTR):** variaciones dinámicas de velocidad y carga para analizar la respuesta del tren motriz.

Procedimientos y aceptación de los datos:

- **Estabilización:**
 - **Estáticos:** ventana mínima de 60 s con variación de potencia <2%.

- **Transitorios:** perfiles definidos y sincronización temporal de señales, con muestreo ≥ 10 Hz.
- **Replicación práctica:** al menos 2 repeticiones por punto de operación para estimar la variabilidad.

Ensayo de Repetibilidad

- **Objetivo:** Aunque los resultados de este ensayo no los utilizaremos para caracterizar el sistema de propulsión nos sirve para comprobar la consistencia y estabilidad de los resultados experimentales bajo condiciones idénticas.
- **Condiciones de ensayo:**
 - Posición del pedal de acelerador = 100 %
 - Repetición de al menos tres ciclos consecutivos en condiciones constantes
- **Postproceso y análisis:**
 - Cálculo de la variabilidad en par, potencia y consumo
 - Análisis de propagación de errores instrumentales
 - Determinación del coeficiente de variación y de la incertidumbre global

Ensayo WOT (Wide Open Throttle)

- **Objetivo:** Evaluar el comportamiento del sistema de propulsión a máxima demanda de potencia, considerando distintos estados de carga de la batería.
- **Condiciones de ensayo:**
 - Batería cargada y descargada
 - Ensayo estático (velocidad constante) y dinámico (aceleración completa)
- **Variable registradas:**
 - Par y potencia en función de las rpm
 - Tensión y corriente en pila y batería
 - Caudales de aire e hidrógeno
 - Consumo de auxiliares
- **Postproceso y análisis:**
 - Curvas de par-rpm y potencia-rpm
 - Evaluación de la eficiencia
 - Comparativa entre condiciones de SOC y tipo de ensayo

Ensayo a Cargas Parciales

- **Objetivo:** Analizar el comportamiento del sistema de propulsión bajo distintas demandas de potencia
- **Condiciones de ensayo:**
 - Pedal del acelerador = 25, 50, 75, 100 %
 - Ensayos realizados a velocidades estabilizadas
- **Variable registradas:**
 - Par y potencia
 - Tensión y corriente en pila y batería
 - Caudales de aire e hidrógeno
 - Consumo de auxiliares
- **Postproceso y análisis:**
 - Curvas de eficiencia en función de la carga
 - Identificación de la zona de máxima eficiencia del sistema
 - Comparativa entre niveles de carga

Ensayo de Reproducción de Condiciones Reales

- **Objetivo:** Evaluar el comportamiento del vehículo bajo condiciones dinámicas representativas de conducción real, complementando al ciclo WLTP
- **Metodología:**
 - Reproducción de un perfil de conducción real en banco de rodillos mediante control de velocidad y par equivalentes
 - Simulación de pendientes y resistencias aerodinámicas para replicar condiciones reales
- **Variable registradas:**
 - Par y potencia
 - Tensión y corriente en pila y batería
 - Caudales de aire e hidrógeno
 - Temperaturas
 - Consumo de auxiliares
- **Postproceso y análisis:**
 - Comparativa de resultados frente al ciclo WLTP (eficiencia, consumo, autonomía)
 - Análisis de respuesta transitoria del sistema y de su gestión térmica
 - Identificación de situaciones de operación críticas o ineficientes (aceleraciones, pendientes, etc.)

Ciclo WLTP

- **Objetivo:** Reproducir el ciclo de homologación WLTP para evaluar el rendimiento y el consumo del vehículo en condiciones normalizadas.
- **Condiciones de ensayo:**
 - Reproducción completa del perfil de velocidad WLTP
 - Registro continuo de parámetros eléctricos, mecánicos y de reactivos
- **Postproceso y análisis:**
 - Evolución temporal de par, potencia, tensión, corriente y caudales de reactivos
 - Balance energético total: energía química del H_2 -> energía útil en las ruedas
 - Cálculo del consumo específico de H_2 (kg/100 km)
 - Comparativa con los valores de homologación

5. Ensayos, análisis y resultados

La selección del ciclo de conducción para los ensayos en banco se realizó atendiendo tanto a la necesidad de evaluar las prestaciones máximas del vehículo como a la verificación de su comportamiento en condiciones de conducción estándar. Para ello, se definieron varios tipos de pruebas: WOT (Wide Open Throttle), WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure) y ensayos a cargas parciales.

La preparación de los ensayos en el banco incluyó una serie de pasos fundamentales para garantizar la seguridad y la fiabilidad de los datos. Se verificó el estado general del vehículo y se procedió a su fijación al dinamómetro mediante sistemas de amarre específicos. Paralelamente, se configuró el software del banco para registrar los parámetros de interés durante los ensayos, y se instalaron elementos auxiliares como tubos de drenaje para el agua expulsada por el escape y ventiladores para la refrigeración, asegurando así la correcta disipación de calor y la estabilidad de las condiciones de prueba. Cada uno de estos pasos fue imprescindible para asegurar que los ensayos proporcionaran resultados consistentes y comparables entre las diferentes condiciones de medición.



WOT

Las pruebas WOT (Wide Open Throttle) en vehículos de pila de combustible como el Toyota Mirai consisten en acelerar el vehículo con apertura total del acelerador para llevar el sistema de propulsión a condiciones de demanda máxima de potencia eléctrica. En estos vehículos, esta condición no solo exige la entrega máxima del motor eléctrico, sino también la coordinación entre la pila de combustible, el sistema de baterías y la electrónica de potencia, lo que convierte estas pruebas en una herramienta clave para evaluar el comportamiento integral del tren motriz.

Realizar ensayos WOT en un entorno de laboratorio controlado, ya sea en un banco de rodillos o mediante dinamómetro, permite medir con precisión parámetros como la capacidad de respuesta de la pila, la capacidad de suministro de corriente, el apoyo del sistema de baterías, la gestión térmica y la estabilidad del sistema bajo cargas elevadas. Al eliminar influencias externas como la temperatura ambiente variable, viento, estado del pavimento o variabilidad del conductor, se obtiene una mayor repetibilidad y confiabilidad en los resultados.

Este ciclo se justifica por su sencillez de ejecución y por su elevado valor comparativo. Ofrece la posibilidad de correlacionar los resultados del banco con los obtenidos en pruebas reales de pista, verificando que el comportamiento del tren motriz en condiciones controladas coincide con el observado en escenarios de aceleración máxima. En el caso de los FCEV, esta comparación también permite analizar la consistencia de la entrega de potencia entre la pila y la batería, así como detectar posibles limitaciones asociadas al sistema de humidificación, la gestión del calor o el estado de carga del buffer energético.

En conjunto, las pruebas WOT constituyen un indicador claro del rendimiento del vehículo bajo demanda máxima de potencia eléctrica, y resultan esenciales para la calibración, validación y optimización de los sistemas de propulsión de pila de combustible. Estas pruebas permiten garantizar que vehículos como el Mirai cumplen con los niveles de potencia, respuesta y eficiencia esperados en condiciones de exigencia extrema.

Ensayos

Al realizar este ciclo WOT con la batería de tracción cargada y descargada, apreciamos diferencias significativas en el par y potencia máximos alcanzados. Con la batería cargada se consigue un mayor pico de par, 353,75 Nm, sobrepasando el par que se indica en la ficha técnica, 335 Nm, y también se consigue un mayor pico de potencia, 100 kW.

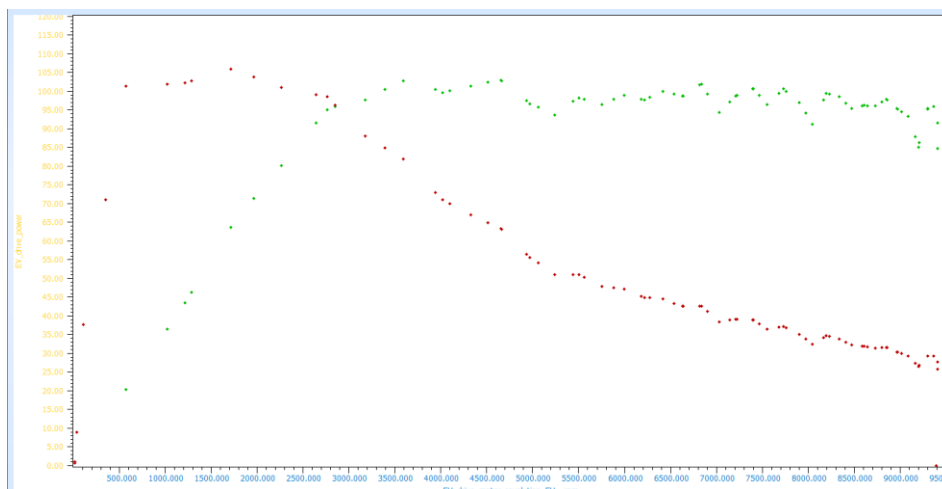


Figura 20. Curvas par y potencia con la batería cargada

Con la batería descargada la potencia al motor eléctrico sólo la proporciona la pila de combustible, por lo que el pico de par conseguido se reduce hasta los 320 Nm y la potencia máxima conseguida, hasta los 87 kW.

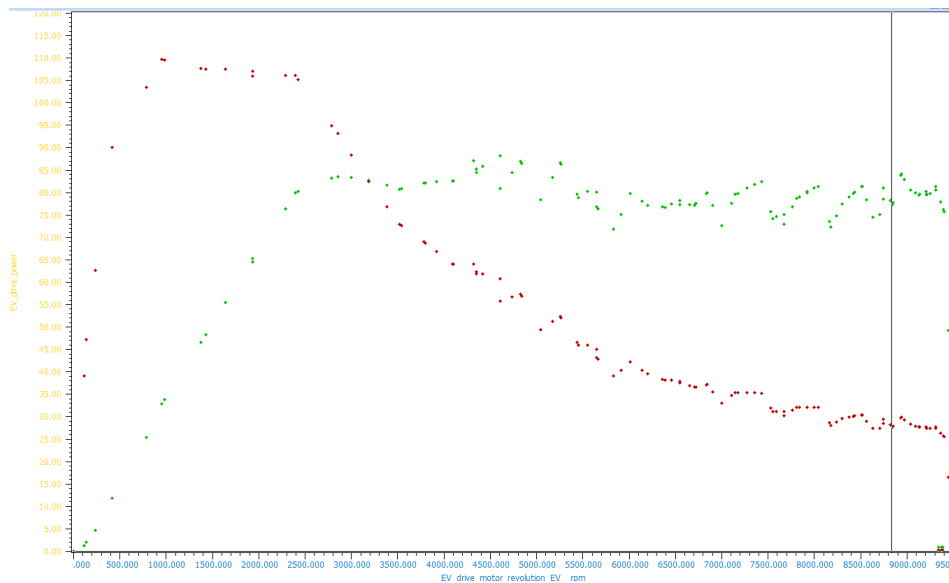


Figura 21. Curvas par y potencia con la batería descargada

En cuanto a la pila de combustible, la potencia máxima alcanzada en este ensayo fue un pico de 114 kW para luego establecerse a 108 kW a máxima demanda de pedal.

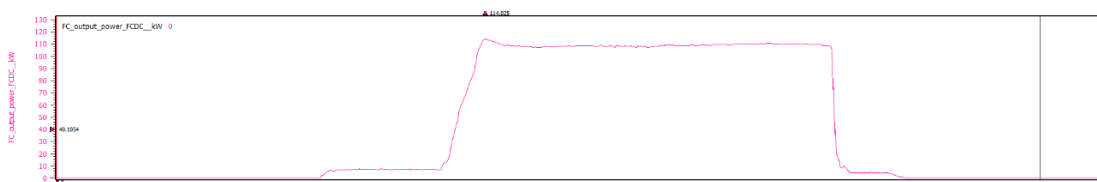


Figura 22. Primera lanzada

En otras lanzadas posteriores, la potencia alcanzada en pico fue ligeramente inferior, resultando en 113,5 kW.

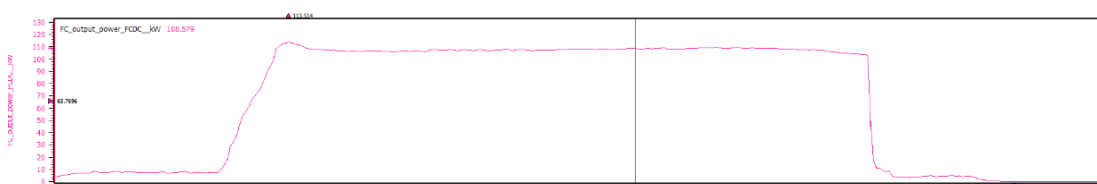


Figura 23. Tercera lanzada

En este tipo de ensayo, también podemos evaluar los valores máximos de voltaje y corriente entre los que varían la pila de combustible y la batería de tracción.

El voltaje total de la pila de combustible varía entre los 244 V y los 340 V. El mínimo voltaje se da a máxima potencia de la pila porque es cuando más pérdidas tenemos y el máximo se da cuando la pila está a mínima potencia.

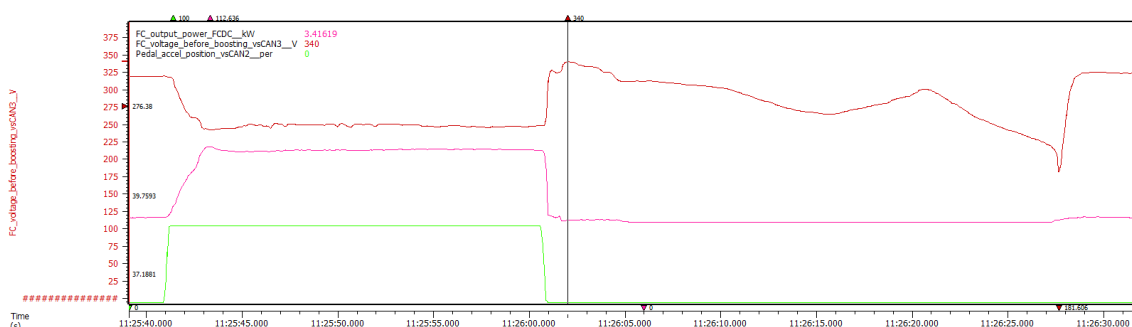


Figura 24. Voltaje (rojo), potencia (rosa), pedal (verde)

Esto es el resultado de la disposición en serie de las 370 celdas que tiene el stack del Toyota Mirai. Si dividimos el voltaje entre el número de celdas tenemos el rango de voltaje individual de cada celda.

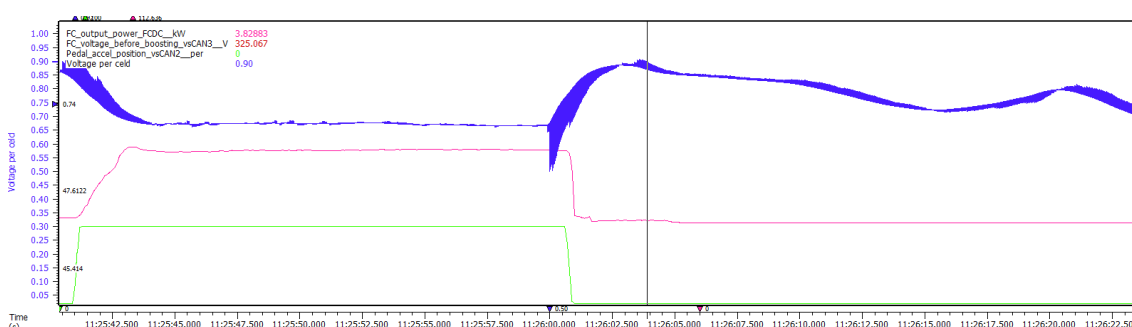


Figura 25. Voltaje (azul), potencia (rosa), pedal (verde)

En cuanto a la corriente, esta varía entre 0 A y 466 A, no habiendo diferencias entre la total y la individual en cada celda porque por la disposición en serie, la corriente es la misma en todas las celdas.

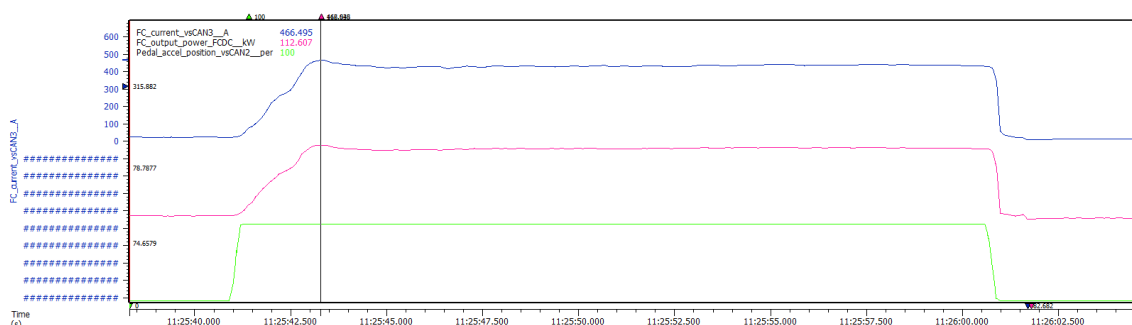


Figura 26. Corriente (azul), potencia (rosa), pedal (verde)

Repetibilidad de los ensayos

Para garantizar la validez de los resultados obtenidos en los ensayos WOT del Toyota Mirai, se evaluó la repetibilidad mediante la repetición de las pruebas bajo condiciones controladas e idénticas. Todas estas lanzadas se realizaron con el TPS (Throttle Pedal Sensor) al 100%, con el fin de verificar la reproducibilidad del comportamiento del vehículo a plena demanda de potencia.

Se efectuaron 7 lanzadas consecutivas, manteniendo entre ellas un tiempo de estabilización adecuado para asegurar que las condiciones del vehículo y del banco fueran equivalentes en cada lanzada. Las condiciones ambientales las registra el propio banco para efectuar correcciones automáticas según la normas (ISO 1585), y debidamente calibrado según sus protocolos de mantenimiento.

Dado que el rendimiento del vehículo de pila de combustible puede variar según su estado térmico, se monitorizaron también los parámetros relevantes del sistema: temperatura del stack, temperatura el refrigerante o temperatura de los convertidores.

Para evaluar la repetibilidad se analizaron las curvas obtenidas de cada lanzada, comparando los valores de par máximo registrados. A partir de estos datos se calculó la desviación relativa respecto a la media, equivalente al coeficiente de variación, con el fin de cuantificar la consistencia de las mediciones y la fiabilidad del procedimiento.

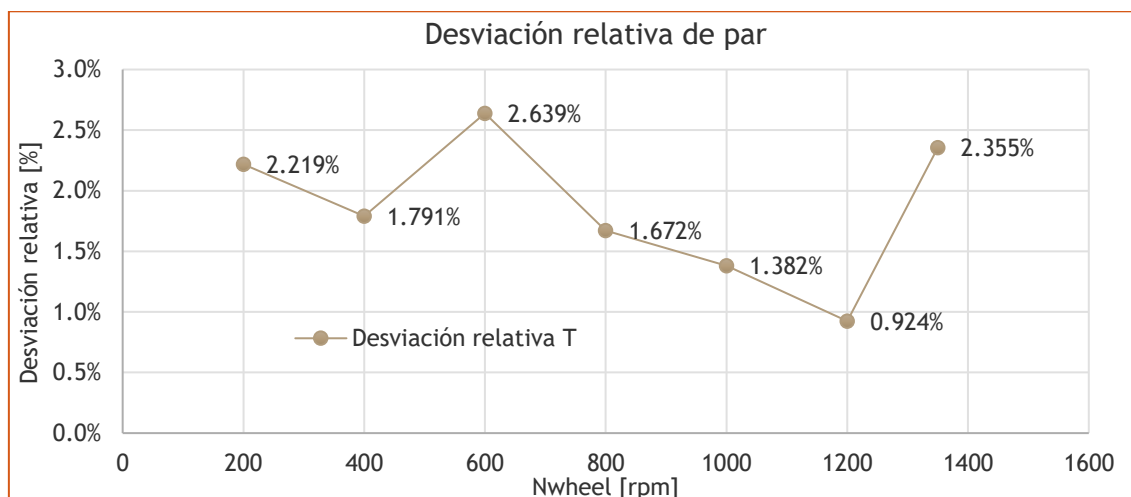


Figura 27. Diferencia de par máximo en cada lanzada

La mayor desviación obtenida fue del 2,639 %, lo cual se considera un valor bajo y evidencia una buena repetibilidad del ensayo, validando así la robustez de los resultados presentados.

Resultados

Los ensayos WOT nos han permitido obtener los rangos mínimos y máximos de trabajo de los diferentes sistemas que integran la generación de energía para el motor eléctrico. Estos son la pila de combustible, la batería de tracción, y los auxiliares de la pila de combustible.

Pila de combustible

La pila de combustible constituye el principal generador de energía del sistema. A partir de los ensayos realizados, se determinaron los siguientes valores característicos de su funcionamiento:

Tabla 4. Valores pila de combustible

Parámetro	Unidad	Valor medido
Voltaje mínimo	V	250
Voltaje máximo	V	341
Número de celdas	-	370
Voltaje mínimo por celda	V	0,67
Voltaje máximo por celda	V	0,92
Corriente máxima	A	460
Potencia máxima	kW	113

Estos valores permiten determinar el rango operativo de la pila y su comportamiento ante las distintas demandas de potencia solicitadas durante los ciclos de prueba.

Batería de tracción

La batería de alta tensión actúa como sistema de apoyo a la pila de combustible, proporcionando energía adicional en fases de aceleración y absorbiendo energía durante la frenada regenerativa. Los resultados obtenidos son los siguientes:

Tabla 5. Valores batería de tracción

Parámetro	Unidad	Valor medido
Voltaje mínimo	V	248
Voltaje máximo	V	294
Corriente máxima	A	110
Potencia máxima	kW	34
Rango del estado de carga (SOC)	%	39-62

Durante las pruebas se observó la estabilidad del SOC dentro del rango operativo establecido por el sistema de gestión de energía (BMS), sin cargas y descargas elevadas para mejorar la vida útil de la batería.

Consumo de los auxiliares

El funcionamiento de los sistemas auxiliares representa una fracción no despreciable del consumo total. En la siguiente tabla se muestran los consumos máximos medidos durante los ensayos:

Tabla 6. Consumos de los auxiliares de la pila de combustible

Auxiliar	Parámetro	Unidad	Valor medido
Compresor de aire	Consumo máximo	kW	14,40
Bomba de agua	Consumo máximo	kW	1,160
Bomba de hidrógeno	Consumo máximo	kW	0,51

Cargas parciales

Los ensayos a cargas parciales nos permiten analizar el comportamiento del vehículo a lo largo de un amplio rango de condiciones de operación, desde bajas demanda de potencia hasta regímenes intermedios de funcionamiento. Este tipo de pruebas nos proporcionan información detallada sobre la respuesta del sistema de propulsión del Mirai ante diferentes niveles de carga y la evolución de los parámetros clave como el par, potencia y el consumo. Además, facilitan la identificación de posibles limitaciones en el rendimiento bajo condiciones de uso cotidiano, complementando así los ensayos a plena carga y el ciclo WLTP, asegurando una caracterización completa del vehículo.

Carga parcial baja

En condiciones de carga baja, el vehículo opera con unos requisitos de energía reducidos. La intervención de la batería de alto voltaje es moderada, que estabiliza la entrega de potencia de la pila de combustible, permitiendo así mantener la velocidad con un consumo reducido de hidrógeno al trabajar en zonas más eficientes.

Si analizamos la potencia de la pila y de la batería frente al tiempo, vemos que es la pila quien suministra la mayor parte de la energía, con pequeños aportes de la batería en momentos puntuales donde cambia la carga.

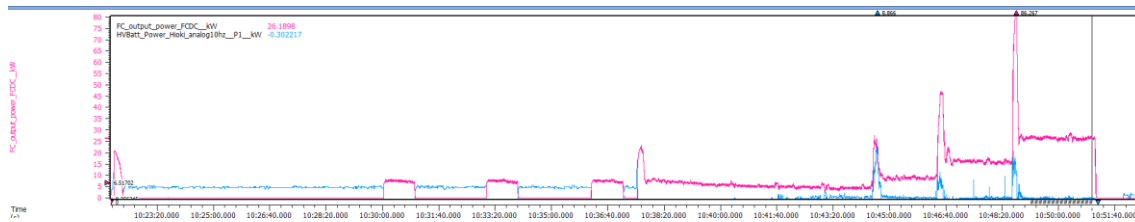


Figura 28. Potencia FC (rosa), potencia batería (azul)

En cuanto al consumo de hidrógeno instantáneo, podemos ver como en las zonas donde la demanda la entrega de potencia de la pila de combustible es constante, el consumo también lo es, presentando una zona plana en el gráfico.

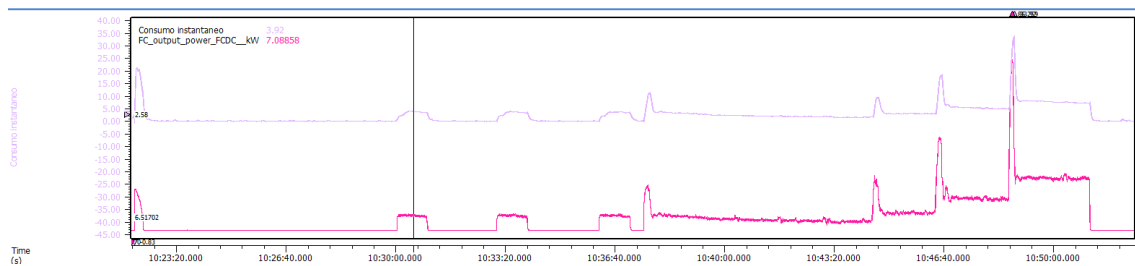


Figura 29. Potencia FC (rosa), consumo instantáneo (morado)

Por otro lado en la curva de polarización, vemos que la mayor cantidad de datos se concentran a bajas corriente y mayores voltajes, lo que indica que la pila está trabajando en regiones más eficientes.

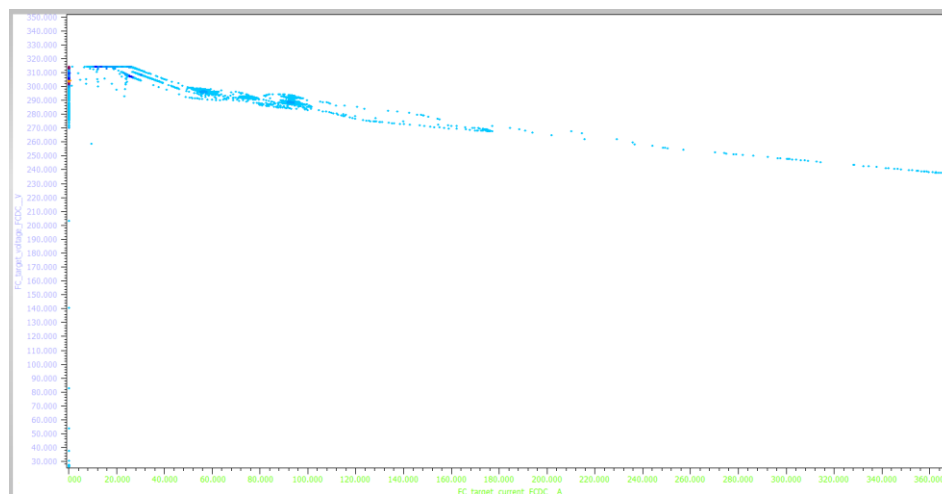


Figura 30. Curva de polarización a cargas medias

Carga parcial media

Con el aumento de carga, la demanda energética crece de manera significativa. La pila incrementa la potencia para suplir este requerimiento, y la batería puede realizar pequeñas intervenciones para compensar pequeños retrasos en la respuesta de la FC. El consumo de hidrógeno también experimenta un aumento proporcional.

Podemos ver como a cargas medias ya tenemos una entrega de potencia de la pila de combustible continua, es decir no hay momentos donde no la entregue. Esto hace aumentar el consumo notablemente, siendo el instantáneo en todo momento mayor mientras que el acumulado se tiene una pendiente mucho mayor.

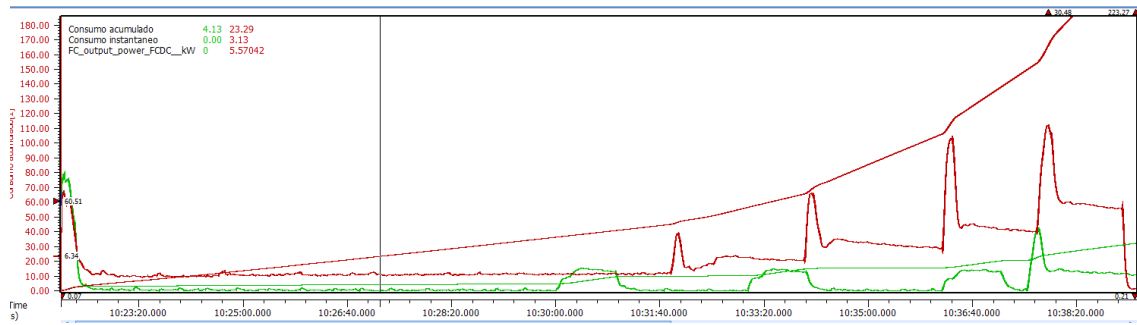


Figura 31. Consumo instantáneo y acumulado, cargas bajas (verdes) y cargas medias (rojo)

Por parte de la batería tenemos unos mayores picos de potencia, hasta los 11 kW, mientras que en las zonas de demanda constante, la pila de combustible asume un mayor papel en suministrar la energía.

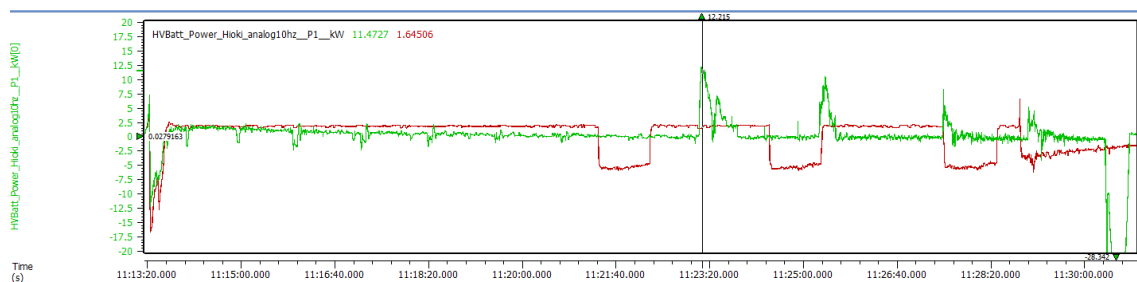


Figura 32. Potencia batería, cargas medias (verde) y cargas bajas (rojo)

En cargas medias, el SOC tiene una mayor variación debido a los ajustes del sistema entre la energía de la batería y de la pila de combustible.

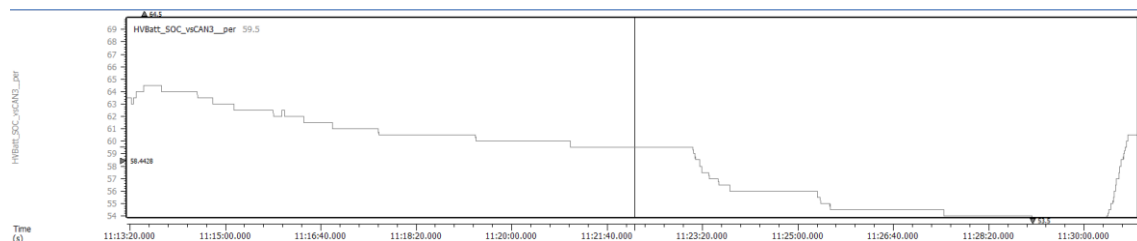


Figura 33. SOC batería a cargas medias

En cuanto al voltaje, vemos que tenemos unos menores valores comparado con los ensayos a cargas bajas debido a que cómo le estamos demandando más potencia a la pila, aumentan las pérdidas de voltaje haciendo que disminuya este.

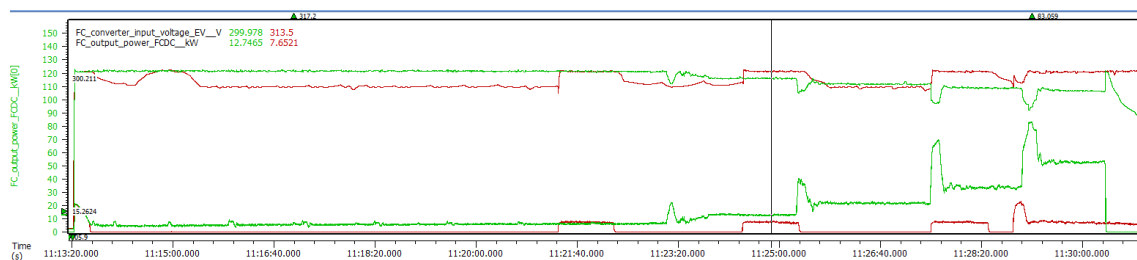


Figura 34. Voltaje FC arriba y potencia FC abajo, cargas bajas (rojo) y cargas medias (verde)

Carga parcial alta

Cuando el vehículo opera en un régimen más exigente, cerca de su máxima carga, la batería funciona para cubrir picos de demanda o estabilizar la respuesta del sistema, pero la mayor parte de la energía proviene de la pila de combustible.

En esta gráfica podemos ver cómo la potencia de la pila y de la batería operan cerca de sus valores máximos, alcanzando la pila 107 kW y la batería 12 kW, quedándose lejos de sus 35 kW máximos. Por otro lado cómo trabajamos a cargas cerca de las máximas, tenemos más oscilaciones en la entrega de potencia por parte de la batería y de la pila de combustible.

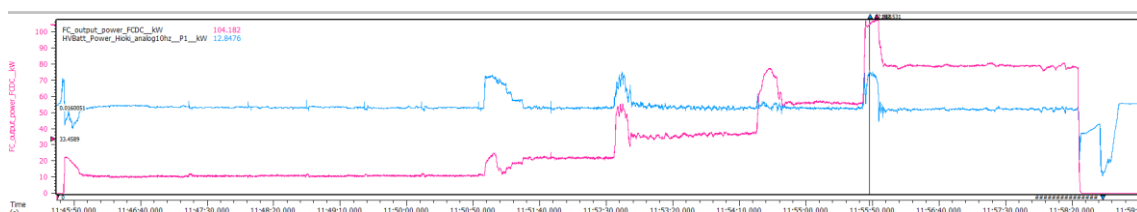


Figura 35. Potencia FC (rosa), potencia batería (azul)

El consumo instantáneo de la pila es bastante mayor en los ensayos a altas cargas, ya que tenemos una demanda de potencia continuada y con picos muy elevado de potencia para la pila de combustible. El mayor valor que se alcanza es de 34,86 g/100 km de H₂.

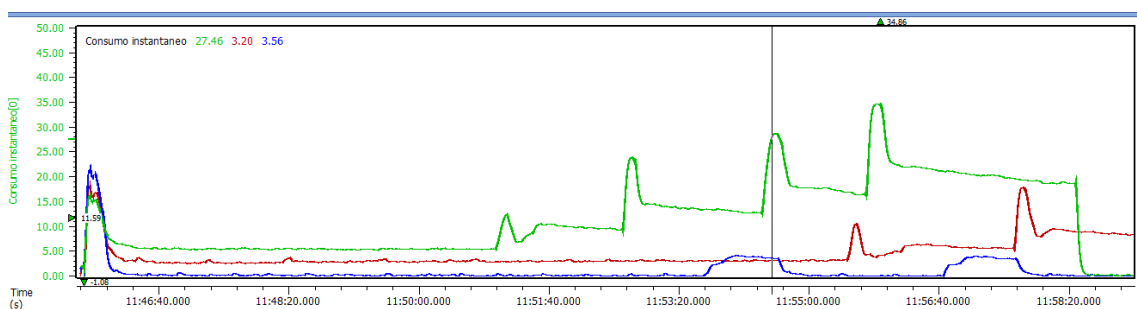


Figura 36. Consumo instantáneo, cargas bajas (azul), cargas medias (rojo), cargas altas (verde)

Podemos ver cómo con una alta demanda de potencia el sistema de refrigeración de la pila tiene que disipar una mayor cantidad de calor el cual va haciendo aumentar la temperatura con el tiempo, llegando hasta un máximo de 72°C.

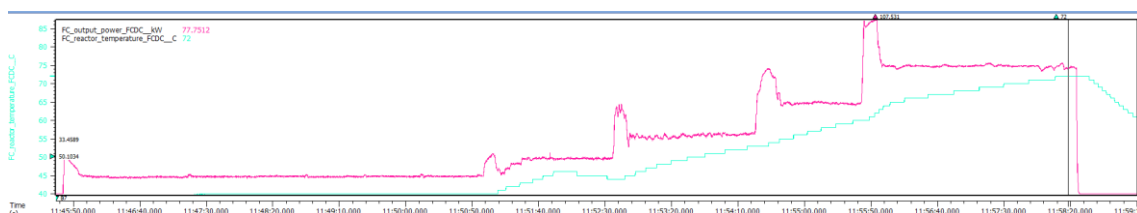


Figura 37. Potencia FC (rosa), temperatura FC (verde)

A medida que se aumenta la carga, la eficiencia de la pila de combustible disminuye, llegando a una mínima eficiencia en este ensayos de 0,42.

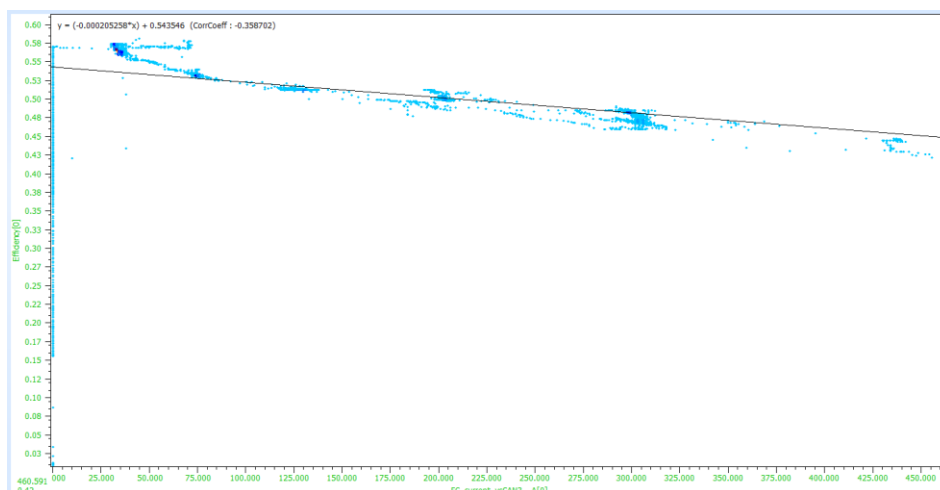


Figura 38. Eficiencia vs corriente a cargas altas

Como conclusiones de los datos obtenidos de los ensayos a cargas parciales, podemos concluir que:

- A cargas bajas, la operación de la pila opera de una forma estable ante una demanda constante y el consumo de hidrógeno es mínimo.
- A cargas medias, se incrementan notablemente la potencia solicitada a la pila y el consumo, con una eficiencia decente
- A cargas altas, al sistema se le solicitan unos requisitos exigentes, con una actividad térmica elevada y una caída de la eficiencia.

Tabla 7. Resumen ensayos a cargas parciales

Carga	Potencia en rueda (kW)	Consumo instantáneo máximo de H ₂ (g/100km)	Eficiencia mínima (%)
Bajas	5,28	3,97	0,57
Medias	39,60	17,86	0,49
Altas	88,67	34,76	0,42

Reproducción de condiciones reales

Uno de los principales objetivos al utilizar un banco de potencia es reproducir con la mayor fidelidad posible las condiciones reales a las que un vehículo está sometido durante su funcionamiento habitual. Para lograr esta simulación precisa, es necesario introducir en la configuración del banco una serie de coeficientes de cara que permite modelar las resistencias aerodinámicas, de rodadura y otras pérdidas mecánicas que se presentan en condiciones reales de circulación.

Estos coeficientes, también conocidos como coeficientes de carga o resistencia total al avance (*road load*), se determinan generalmente mediante ensayos en carretera o mediante datos proporcionados por el fabricante. Entre los más comunes se encuentran:

- **Coeficiente de resistencia aerodinámica (CdA):** Representa la resistencia que ofrece el aire al avance del vehículo. Depende del diseño aerodinámico y la superficie frontal del vehículo.
- **Coeficiente de resistencia a la rodadura:** Modela la fricción entre los neumáticos y la superficie de la carretera. Puede variar con la presión de los neumáticos, el tipo de pavimento y la temperatura.
- **Pérdidas por inercia y fricción mecánica:** Incluyen pérdidas internas en la transmisión, rodamientos y otros componentes móviles del sistema motriz.

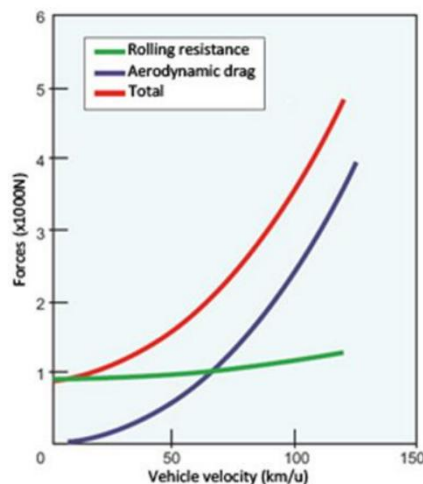


Figura 39. Características de la resistencia a la rodadura y la resistencia aerodinámica de un vehículo

El banco de potencia utiliza estos coeficientes para calcular la carga dinámica equivalente que el vehículo enfrentaría en condiciones reales. Así, el sistema de frenado del banco aplica una fuerza de resistencia proporcional a la velocidad del vehículo, replicando con precisión el comportamiento dinámico en carretera. Esta configuración permite obtener resultados más representativos en pruebas como el consumo de combustible o la respuesta del tren de tracción, facilitando una evolución más fiable del rendimiento del vehículo en condiciones reales de uso.

La fuerza total de resistencia al avance se calcula generalmente mediante la siguiente fórmula empírica:

$$F_{res} = A + B \cdot v + C \cdot v^2$$

Estos coeficientes (A , B y C) se obtienen mediante ensayos de frenado por inercia (*coastdown*), en lo que se deja rodar el vehículo desde una velocidad alta hasta detenerse, registrando la desaceleración para calcular las resistencias reales.

Los coeficientes de rodadura (A , B , C) utilizados para simular las condiciones reales de conducción y los ciclos estandarizados (como el WLTP o UDDS) del Toyota Mirai de primera generación (2016) son los siguientes, según los ensayos en dinamómetro:

- Coeficiente A (fuerza constante): 143,8 N
- Coeficiente B (dependiente de la velocidad): 1,990 N/(m/s)
- Coeficiente C (dependiente del cuadrado de la velocidad): 0,4072 N/(m/s)²
- Peso equivalente de ensayo: 1928 kg

Una vez determinados estos coeficientes se programan en el banco de potencia, que simula la carga real aplicando una fuerza equivalente a la que el vehículo experimentaría en carretera. Para garantizar que la simulación sea dinámica y coherente con la velocidad real del vehículo durante el ensayo, el banco calcula en tiempo real la potencia de frenado necesaria con la siguiente fórmula:

$$P_{tracción} = F_{res} \cdot v = (A + B \cdot v + C \cdot v^2) v$$

lo que se traduce en:

$$P_{tracción} = Av + Bv^2 + Cv^3$$

Esta expresión muestra que la potencia demandada al tren motriz crece de forma no lineal, siendo la resistencia aerodinámica (término Cv^3) la dominante a velocidades altas. A bajas velocidades, las resistencias mecánicas y de rodadura (términos A y Bv) son las más significativas.

Estos cálculos en términos de potencia permiten comprobar que el aumento de velocidad genera un incremento exponencial en la potencia necesaria, principalmente debido a la influencia del coeficiente C , vinculado al diseño aerodinámico del vehículo.

En condiciones reales, además de las resistencias al avance, el vehículo debe superar la fuerza gravitatoria debida a la pendiente del terreno y la fuerza inercial asociada a la aceleración o deceleración. La expresión completa de las fuerzas que actúan sobre el vehículo se puede escribir como:

$$F_{total} = F_{res} + F_{pendiente} + F_{aceleración}$$

Donde $F_{pendiente}$ la fuerza que debe vencer el vehículo para subir una inclinación y $F_{aceleración}$ la representación de la fuerza necesaria para cambiar la velocidad, tal que:

$$F_{pendiente} = mgsin(\theta)$$

Siendo m la masa del vehículo, g la aceleración de la gravedad (9.81 m/s²) y θ el ángulo de la pendiente.

$$F_{aceleración} = ma$$

Siendo a es la aceleración del vehículo (m/s²).

De tal forma que la potencia total requerida se obtiene de esta forma:

$$P_{total} = (A + Bv + Cv^2 + mgsin(\theta) + ma) \cdot v$$

Esta ecuación se utiliza para modelar tanto los tramos de aceleración como las pendientes de carretera en ciclos como el WLTP, reproduciendo el comportamiento energético real del vehículo.

Gracias a esta configuración, el banco puede replicar pruebas como ciclos de conducción como el WLTP o condiciones específicas que le asignemos, asegurando que los resultados obtenidos reflejen el comportamiento del vehículo en el mundo real, no solo en condiciones ideales de laboratorio.

Es necesario señalar que la reproducción de las condiciones reales en el banco de ensayos presenta ciertas limitaciones inherentes al entorno controlado de laboratorio. En particular, no se consideraron factores ambientales como el viento lateral o la lluvia, los cuales pueden influir en la aerodinámica y en el comportamiento general del vehículo. Del mismo modo, no se simulaban irregularidades del firme ni variaciones bruscas en la adherencia del pavimento. Sin embargo, dado que el circuito utilizado para las pruebas presenta una superficie en excelentes condiciones, estos factores se consideran despreciables para el propósito de este estudio.

Por último, es posible calcular el consumo energético del hidrógeno bajo diferentes condiciones, integrando la potencia requerida a lo largo del tiempo:

$$E_{total} = \int_0^{t_{ciclo}} P_{total}(t) dt$$

Por lo que, por distancia recorrida, este consumo es:

$$e = \frac{E_{total}}{d_{recorrida}} \left[\frac{Wh}{km} \right]$$

y, en el caso de los vehículos de hidrógeno, puede relacionarse con la masa de hidrógeno consumida mediante la eficiencia de la pila de combustible (η_{FC}):

$$\dot{m}_{H_2} = \frac{P_{total}}{\eta_{FC} \cdot LHV_{H_2}}$$

donde $LHV_{H_2} = 120 \text{ MJ/Kg}$, el poder calorífico inferior del hidrógeno.

Así, el cálculo permite estimar cuánta energía química del hidrógeno se convierte en energía mecánica útil y comparar la eficiencia global del sistema bajo diferentes condiciones.

WLTP

Se eligió el WLTP específicamente porque sustituye al ciclo NEDC, que es el utilizado en la ficha técnica del vehículo, ofreciendo así un parámetro más realista para la comparación de resultados y la validación del rendimiento en un escenario de uso cotidiano.

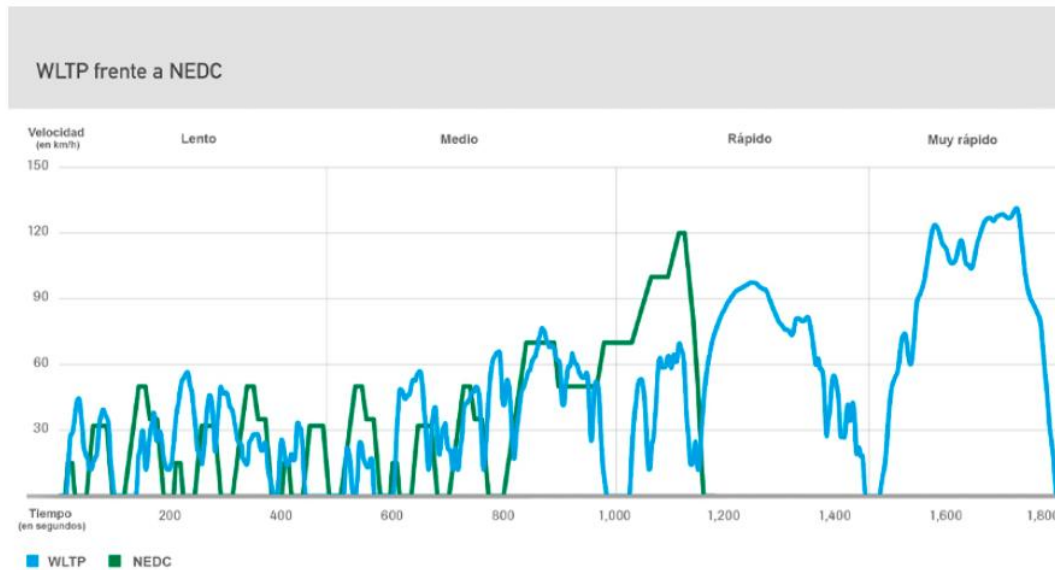


Figura 40. WLTP frente a NEDC

El ciclo WLTP es el procedimiento de ensayo estandarizado a nivel mundial utilizado para determinar, el consumo energético, las emisiones y la autonomía de vehículos ligeros, incluidos los vehículos eléctricos y los vehículos de pila de combustible como el Toyota Mirai de primera generación. Este ciclo se realiza en banco de rodillos y está diseñado para representar con mayor precisión las condiciones reales de conducción en comparación con el anterior ciclo de homologación, el NEDC.

Los objetivos de este ciclo son:

- Evaluar el consumo de combustible o energía en condiciones reproducibles
- Determinar las emisiones contaminantes y de CO₂.
- Establecer la autonomía en vehículos.
- Aportar consistencia entre laboratorios y mercados internacionales.

Para un vehículo de pila de combustible (FCEV), como el Mirai, el parámetro clave evaluado es el consumo de hidrógeno, las emisiones no son tan importantes ya que es vapor de agua.

El ciclo WLTP utilizado en Europa para la homologación de turismos es el WLTC Clase 3, que se divide en cuatro fases principales que representan distintos patrones de conducción:

- **Fase Low (baja velocidad):**
 - Velocidad media aproximada: ≈19 km/h
 - Similar a conducción urbana con frecuentes paradas y aceleraciones suaves.
 - Duración típica: ≈589 s
- **Fase Medium (media velocidad):**
 - Velocidad media aproximada: ≈39 km/h
 - Conducción suburbana, con mayor estabilidad en velocidad.
 - Duración típica: ≈433 s

- **Fase High (alta velocidad):**
 - Velocidad media aproximada: ≈ 56 km/h
 - Conducción en vías rápidas con aceleraciones más acusadas.
 - Duración típica: ≈ 455 s
- **Fase Extra-High (muy alta velocidad):**
 - Velocidad media aproximada: ≈ 94 km/h
 - Representa conducción en autopista con velocidades de hasta 130–135 km/h.
 - Duración típica: ≈ 323 s

También hay que tener en cuenta un par de consideraciones generales para los ensayos en el banco de rodillos:

- **Preparación del vehículo:**
 - Vehículo estabilizado térmicamente antes del ensayo
 - Neumáticos a presión de homologación
- **Ajustes específicos en el Mirai:**
 - Depósitos llenos para permitir completar el ciclo sin alcanzar bajos niveles de hidrógeno.
 - Sistemas auxiliares como la climatización y la calefacción apagados.
- **Ajustes en el banco:**
 - Se registra la masa del vehículo, la resistencia aerodinámica y la resistencia a la rodadura para reproducirlas en el banco mediante curvas de carretera (road-load). Se escogen los coeficientes anteriormente calculados en el apartado de *Reproducción de condiciones reales*.
 - Selección de la función *Ciclo programable*.
 - Introducción del perfil de velocidad a seguir en función del tiempo.

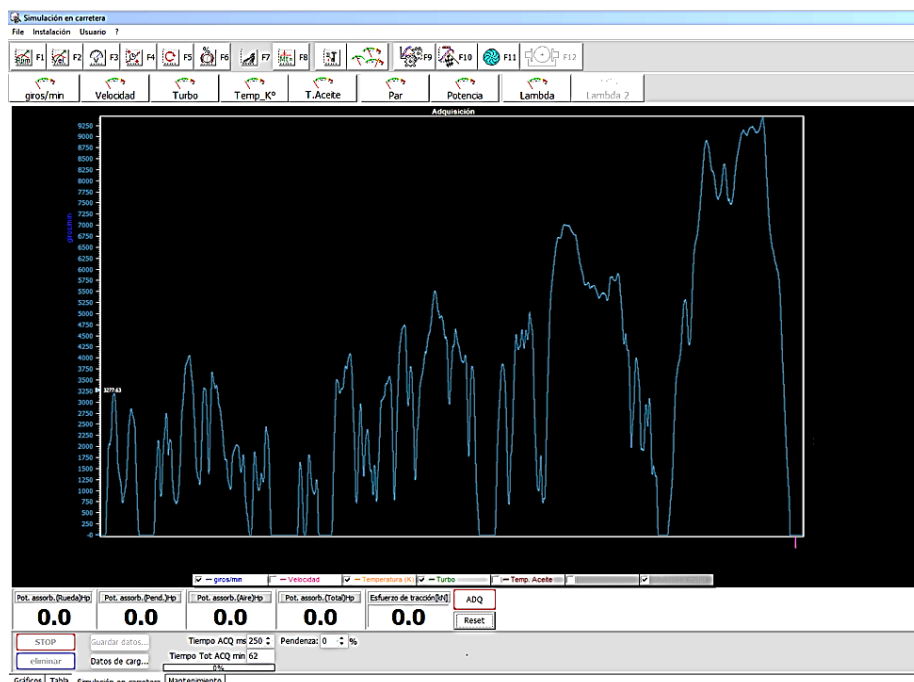


Figura 41. Ciclo WLTP en la configuración del banco

Resultados principales del ciclo WLTP

En la tabla se recogen los resultados globales obtenidos durante la ejecución del ciclo WLTP. Los valores presentados incluyen el consumo a los 100 km de hidrógeno, la potencia máxima alcanzada en cada fase y la potencia media de la pila en cada fase.

Tabla 8. Variables que se pueden leer desde el puerto OBD II

Ensayo	Potencia media [kW]	Potencia máxima [kW]	Consumo H ₂ [kg/100 km]
Lanzada de potencia	90	113	1,52
Fase Low WLTP	5,0	28,02	0,549
Fase Medium WLTP	7,0	30,30	0,596
Fase High WLTP	10,4	36,98	0,682
Fase Extra-High WLTP	20,6	62,37	1,104

La gráfica de energía acumulada o consumo acumulado en función de la distancia permite visualizar de forma clara la progresión del consumo a lo largo del ciclo. Esta gráfica es especialmente útil porque refleja muy bien el incremento de la pendiente a medida que se realizan fases más exigentes.

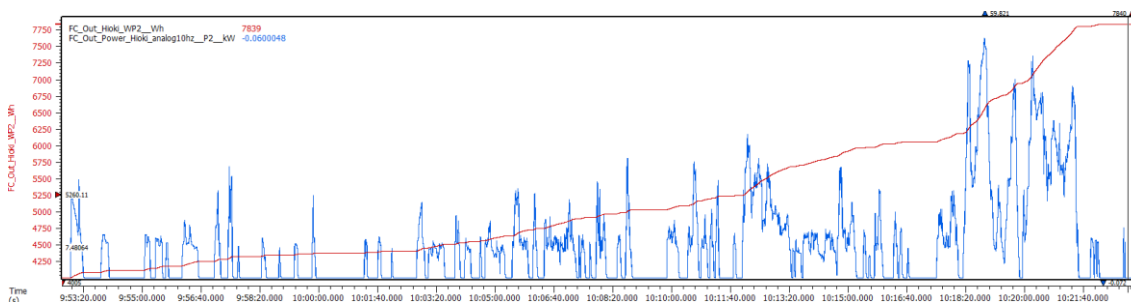


Figura 42. Potencia FC (azul), energía consumida FC (rojo)

En conjunto, estos resultados nos dan una visión global del rendimiento de la pila sin entrar en la interpretación de los fenómenos internos del sistema de pila de combustible.

Comportamiento dinámico durante el ciclo

El análisis del comportamiento dinámico se centra en cómo el vehículo reproduce el perfil temporal del ciclo WLTP. La gráfica de velocidad en función del tiempo nos permite verificar la realización de las cuatro fases del ciclo (Low, Medium, High y Extra High), cada una caracterizada por distintas demandas de aceleración, velocidad sostenida y frenadas.

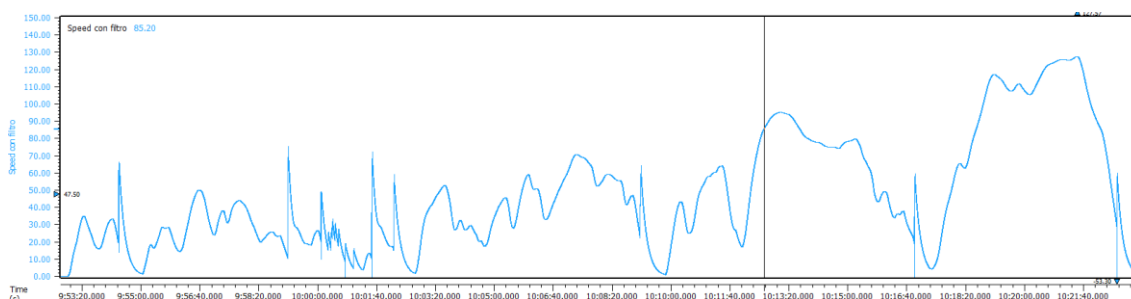


Figura 43. Velocidad durante el WLTP

Si también representamos la aceleración, podemos ver la sucesión de transitorios, aceleraciones y deceleraciones que experimenta el vehículo a lo largo del ciclo.

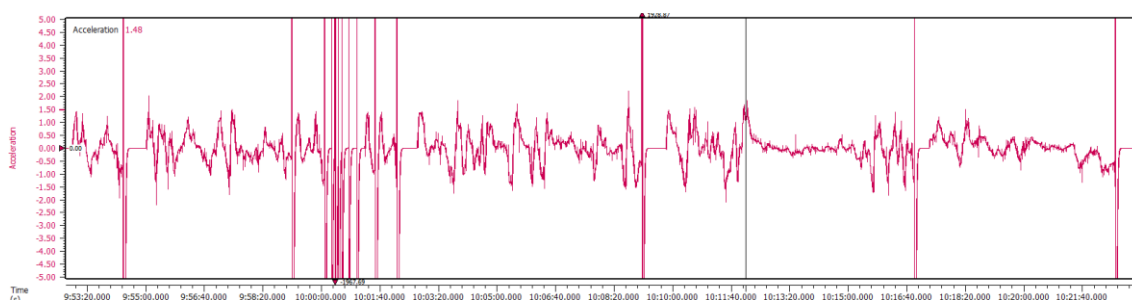


Figura 44. Aceleración durante el WLTP

Por otro lado, la gráfica de potencia en el eje nos permite identificar las zonas de mayor exigencia mecánica y los momentos de baja demanda, lo que nos da una visión clara de las demandas al motor eléctrico.

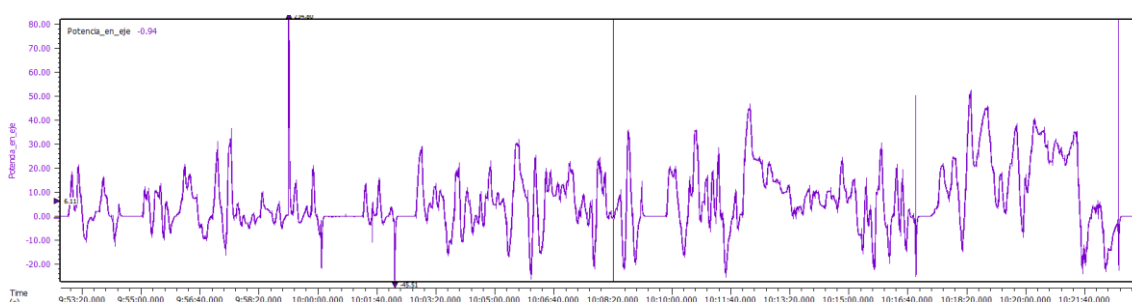


Figura 45. Potencia en el eje

Este apartado sirve para comprender qué tipo de solicitaciones dinámicas recibe el vehículo y actúa como base para interpretar, en apartados posteriores, cómo responde el sistema energético del Mirai ante dichas solicitaciones.

Análisis energético del sistema FC + batería

El Toyota Mirai cuenta con un sistema de propulsión basado en una pila de combustible que suministra energía al motor eléctrico, y a mayores una batería que actúa como buffer energético. La gráfica de potencia de la pila nos permite observar su nivel de aportación en cada instante. También se muestra cómo la batería contribuye durante aceleraciones bruscas, y cómo recupera energía durante las frenadas.

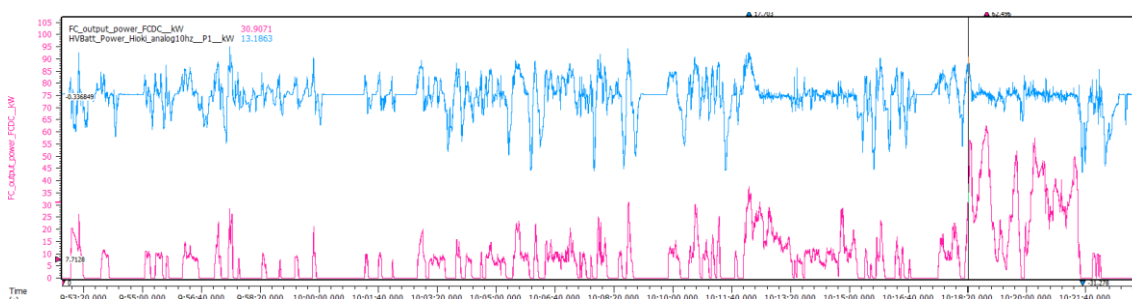


Figura 46. Potencia FC (rosa), potencia batería (azul)

Durante las cargas y descargas de la batería el SOC varía en función de la estrategia de gestión energética del vehículo, manteniendo el estado de carga dentro de un rango entre 64 y 59% para el ciclo analizado.

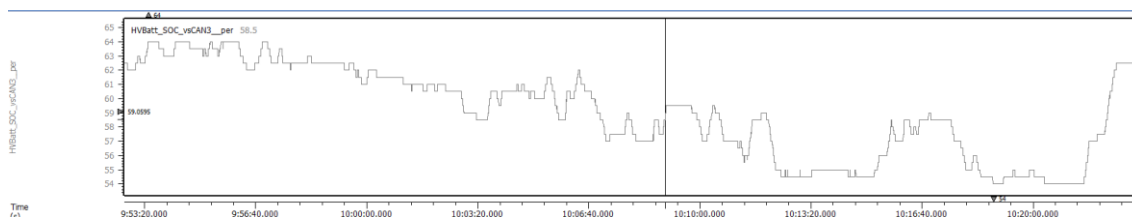


Figura 47. Estado de carga de la batería (SOC)

Como resumen podemos ver como la batería actúa como un amortiguador energético, reduciendo la variabilidad de la potencia demandada a la pila de combustible.

Consumo y eficiencia del hidrógeno

Este apartado puede complementarse con el cálculo de la eficiencia del uso del hidrógeno relacionando la energía química consumida con la energía mecánica efectivamente entregada al eje.

El consumo de hidrógeno puede analizarse tanto en términos instantáneos como acumulados. La gráfica de consumo instantáneo permite identificar los picos asociados a las fases de mayor demanda energética.

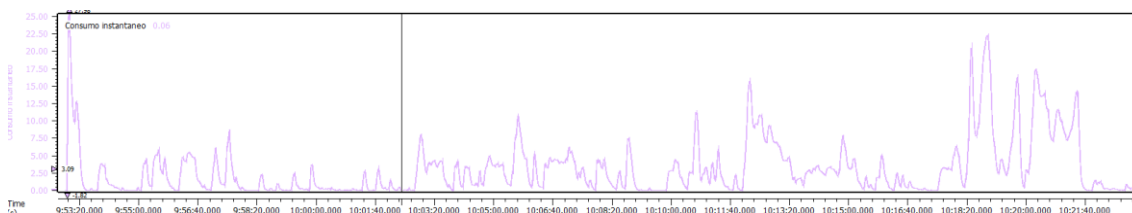


Figura 48. Consumo instantáneo

Por otro lado, la gráfica de consumo acumulado vs distancia ofrece una visión global del gasto energético durante el ciclo, permitiendo identificar qué fases contribuyen más al consumo total.

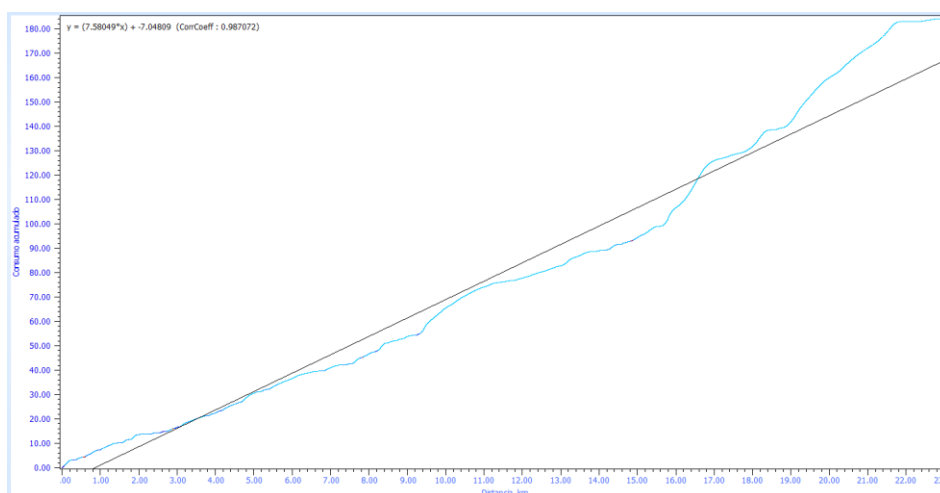


Figura 49. Consumo acumulado

La tabla de consumo por fases permite comparar la eficiencia del vehículo en distintos escenarios representados por el WLTP: conducción urbana, mixta, carretera y autopista

Funcionamiento de la pila de combustible (FC)

El comportamiento de la pila de combustible se ve reflejado en la evolución temporal de su potencia, voltaje y corriente. Estas gráficas muestran cómo la potencia de la pila varía entre 0 y 61 kW, el voltaje entre 291 y 317 V y la corriente entre los 26 y 234 A.

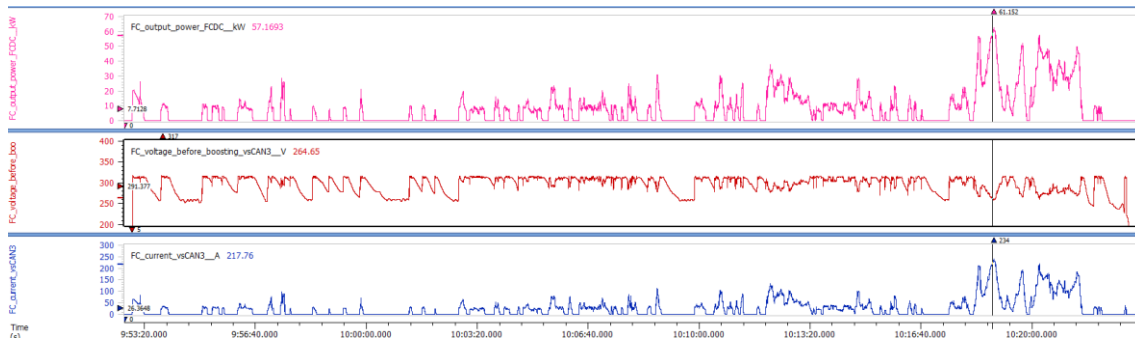


Figura 50. Potencia FC (rosa), voltaje FC (rojo), corriente FC (azul)

La curva de polarización nos permite identificar la zona de operación predominante de la pila, indicando si el sistema trabaja en zonas de baja corriente donde la eficiencia es mayor o cuando entra en zonas de menor eficiencia a altas demandas.

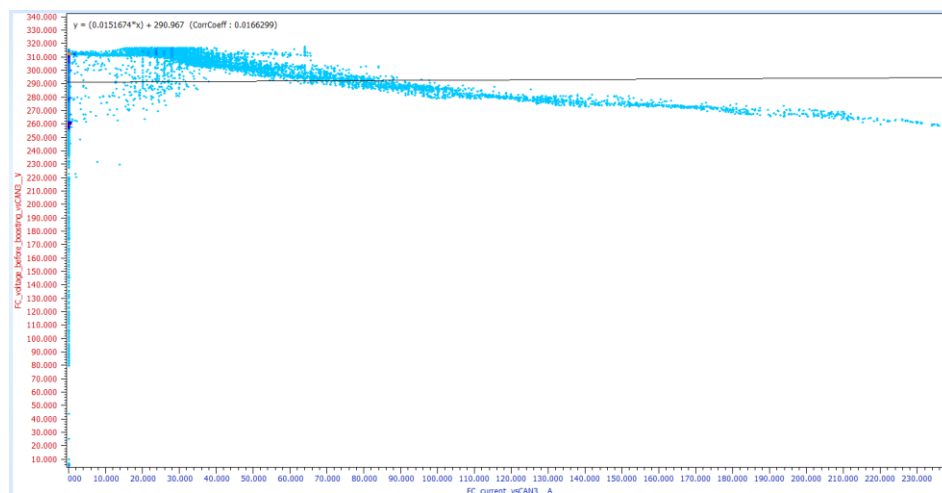


Figura 51. Curva de polarización

Vemos que la mayor cantidad de puntos se concentran a bajas corrientes por lo que el sistema trabaja más cerca de su zona eficiente.

Gestión térmica

La temperatura en el WLTP permanece estable en las zonas de baja y media velocidad, mientras que, en las zonas de alta y muy alta velocidad, la temperatura de la pila aumenta más rápidamente debido a la mayor cantidad de calor rechazado por el sistema.

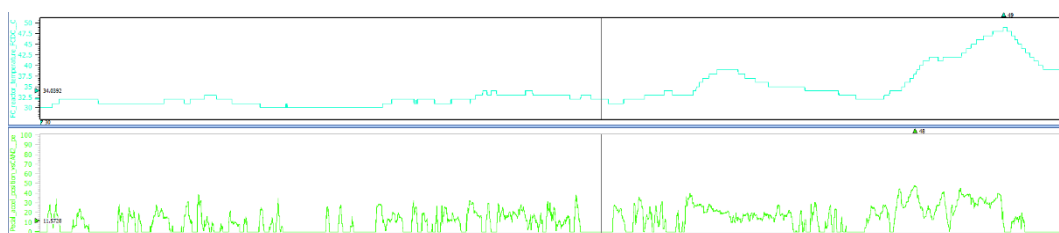


Figura 52. Temperatura en el WLTP

En cuanto a la gestión del termostato y la bomba de agua, en este caso el termostato tiene un gran protagonismo en la regulación del control de la temperatura.

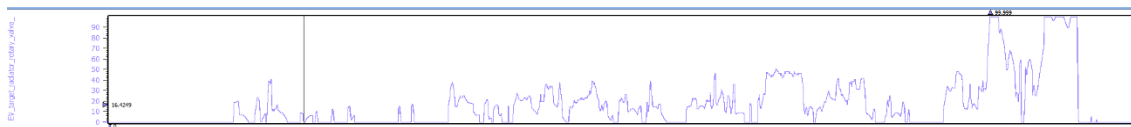


Figura 53. Termostato en el WLTP

Mientras que en el caso de la bomba de agua, tiene un mínimo funcionamiento durante casi todo el ciclo, excepto en las fases de muy alta velocidad, donde la carga térmica se incrementa y es necesario que mueva más caudal de refrigerante.



Figura 54. Velocidad de la bomba de agua en el WLTP

Rendimiento energético de la pila de combustible

La evolución de la eficiencia respecto al tiempo nos permite identificar en qué momentos del ciclo la pila opera en sus zonas de mayor rendimiento, estas zonas son en las fases de demanda moderada, y las zonas en las que disminuye son las fases de alta exigencia de potencia.

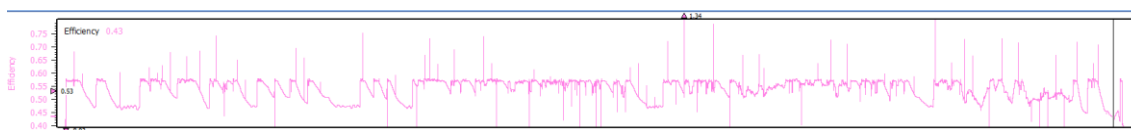


Figura 55. Eficiencia durante el ciclo

Por otro lado, si comparamos la eficiencia media por fases del ciclo, podemos relacionar el tipo de conducción con el comportamiento energético de la pila. Esto aporta una visión clara de cómo varía el rendimiento según las características dinámicas del WLTP, evidenciando que la eficiencia es mayor en fases de baja velocidad menor en fases de alta carga.

Sin embargo, cuando analizamos la eficiencia media por fase, vemos que la pila de combustible es más eficiente en zonas de alta demanda como autopista donde la pila puede trabajar más en un régimen estacionario, mientras que la batería absorbe esos cambios de carga.

Tabla 9. Eficiencia por fases del ciclo

Fase	Eficiencia media [%]
Fase baja WLTP	0,72
Fase media WLTP	0,69
Fase alta WLTP	0,66
Fase extra-alta WLTP	0,61

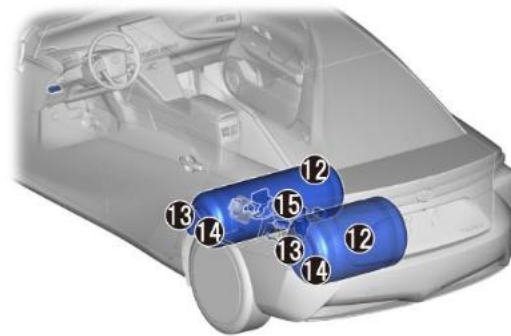
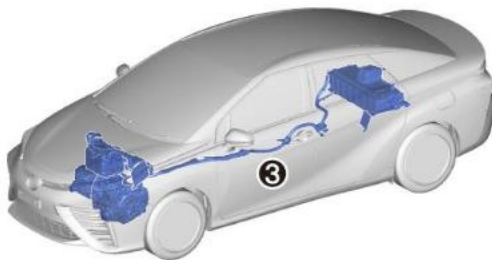
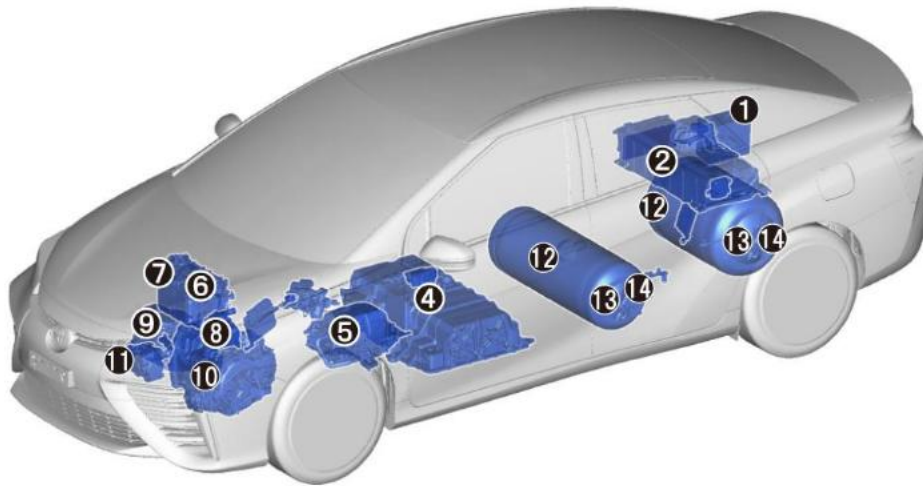
Este apartado proporciona así una caracterización energética de la pila de combustible del Toyota Mirai, mostrando cómo responde su rendimiento ante las solicitudes del ciclo y sirve para relacionar el análisis dinámico y el consumo de hidrógeno.

Caracterización de la cadena de tracción

El Toyota Mirai I, como vehículo de pila de combustible, integra un sistema complejo compuesto por múltiples elementos eléctricos, de almacenamiento y de control que trabajan de manera coordinada para generar, gestionar y suministrar energía al tren motriz. A continuación, se describen los principales componentes del sistema, detallando su función, ubicación y relación con otros subsistemas, lo que permite comprender cómo se produce y distribuye la energía eléctrica desde el hidrógeno almacenado hasta el motor de tracción.

- Batería auxiliar de 12 voltios ❶ Batería de plomo-ácido que suministra energía a los dispositivos de bajo voltaje.
- Batería EV ❷ Batería de níquel-metal hidruro (NiMH) de 244,8 voltios compuesta por 34 módulos de bajo voltaje (7,2 voltios) conectados en serie.
- Cable de alimentación ❸ El cable de color naranja es un conductor de alta tensión y alta corriente. Se utiliza principalmente entre la batería EV y el bloque de unión de entrada del inversor de pila de combustible, entre el inversor con conjunto de convertidor y el compresor de aire de pila de combustible con motor, y entre el inversor con conjunto de convertidor y el conjunto de convertidor de pila de combustible.
- Conjunto de pila de combustible (FC Stack Assembly) ❹ Genera energía eléctrica mediante una reacción química entre el hidrógeno del tanque y el oxígeno suministrado por el compresor de aire de pila de combustible con motor.
- Conjunto de convertidor de pila de combustible (FC Converter Assembly) ❺ Eleva el voltaje de la energía eléctrica generada en la pila de combustible hasta un máximo de DC 650 voltios. Según las solicitudes de la ECU de control EV, conecta y desconecta el relé principal de la pila de combustible y controla la potencia eléctrica para que coincida con el valor especificado en la solicitud de potencia eléctrica.
- Inversor con conjunto de convertidor (Inverter with Converter Assembly) ❻ Controla la potencia eléctrica suministrada al motor de tracción y al compresor de aire de pila de combustible con motor, en función del valor de salida solicitado por la ECU de control EV.
- Convertidor DC-DC ❼ Reduce el voltaje del sistema de alta tensión a aproximadamente 14 voltios DC y lo suministra a los componentes auxiliares y a la batería auxiliar de 12 voltios.
- Conjunto de bomba de agua de refrigeración de pila de combustible (FC Cooling Water Pump Assembly) ❽ Circula el refrigerante de la pila de combustible, que enfría tanto el conjunto de pila de combustible como el aire comprimido por el compresor de aire de pila de combustible con motor.
- Compresor de aire de pila de combustible con motor (FC Air Compressor with Motor Assembly) ❾ Sobrealimenta el aire que ha pasado por el filtro de aire y lo suministra a la pila de combustible. Es accionado por el inversor del inversor con conjunto de convertidor.
- Transmisión EV con motor (FCV Transaxle with Motor Assembly) ❿ Genera fuerza motriz utilizando la energía eléctrica de la pila de combustible y la energía de la batería EV, según las condiciones de conducción. También utiliza frenada regenerativa para generar electricidad durante la desaceleración.
- Compresor con motor ⓫ Compresor de motor eléctrico de CA trifásico de alta tensión.
- Tanque de hidrógeno ⓬ Tanque principalmente de plástico reforzado con fibra de carbono capaz de soportar altas presiones de 70 MPa (713,8 kgf/cm², 10.150 psi).
- Conjunto de válvula del tanque de hidrógeno ⓭ Instalado en cada tanque de hidrógeno; abre y cierra los canales de suministro de hidrógeno.

- Sensor de temperatura del tanque de hidrógeno ⑭ Detecta la temperatura del hidrógeno dentro del tanque y transmite la información a la ECU de control de combustible de hidrógeno.
- Conjunto regulador de suministro de hidrógeno ⑮ Instalado entre el tanque de hidrógeno y la pila de combustible, reduce la presión del hidrógeno del tanque a un rango entre 1,0 MPa y 1,5 MPa (10,2 a 15,3 kg/cm², 145 a 218 psi).



This illustration is for an LHD model

Figura 56. Arquitectura del Toyota Mirai I (información facilitada por fabricante)

Drag

Dentro de la caracterización de la cadena de tracción del Toyota Mirai, el término *drag* hace referencia a las resistencias externas que el sistema de propulsión debe vencer para desplazar el vehículo. Estas resistencias determinan la carga que el motor eléctrico debe entregar y, por tanto, condicionan tanto la potencia como el par requeridos durante los ensayos en banco de rodillos.

En este estudio, el drag se representa mediante los parámetros de rodadura los cuales son los asociados a la ecuación de pérdidas por fricción. Estos coeficientes (A_0 , B_0 y C_0), son caracterizados

bajo pruebas de coastdown, y los cuales se han explicado en el anterior apartado de *Reproducción de condiciones reales*, resultando en los siguientes valores:

Tabla 10. Parámetros Road Load

Coeficiente	Valor
A [N]	143,8
B [N/m/s]	1,990
C [N*s ² /m ²]	0,4072

Para visualizar la influencia del drag sobre la cadena de tracción, se incluyen las siguientes gráficas derivadas de los coeficientes:

- **Fuerza total:** Muestra cómo aumenta la carga total que el tren motriz debe vencer a medida que se incrementa la velocidad del vehículo. Esta curva refleja la combinación de la resistencia a la rodadura y la resistencia aerodinámica aplicada en el banco de rodillos.

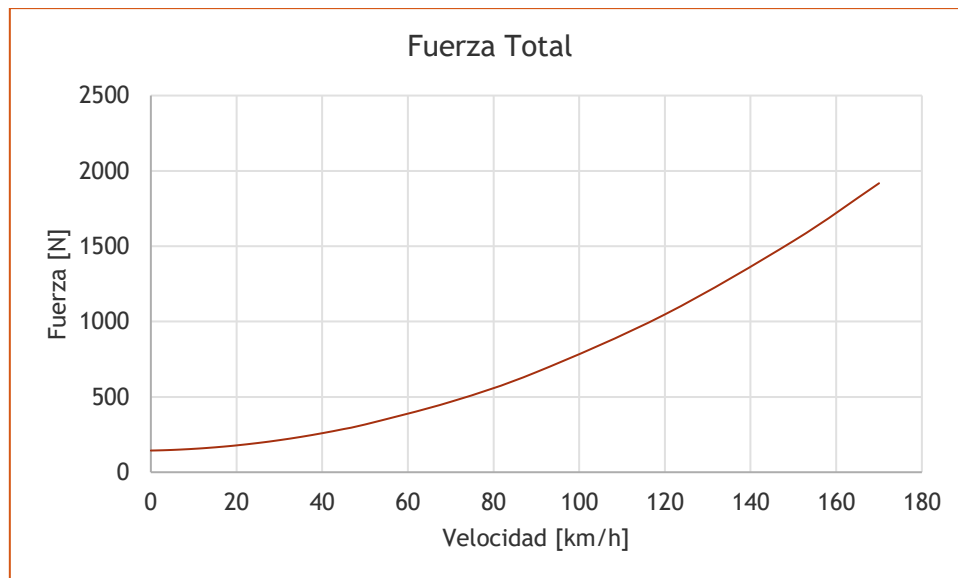
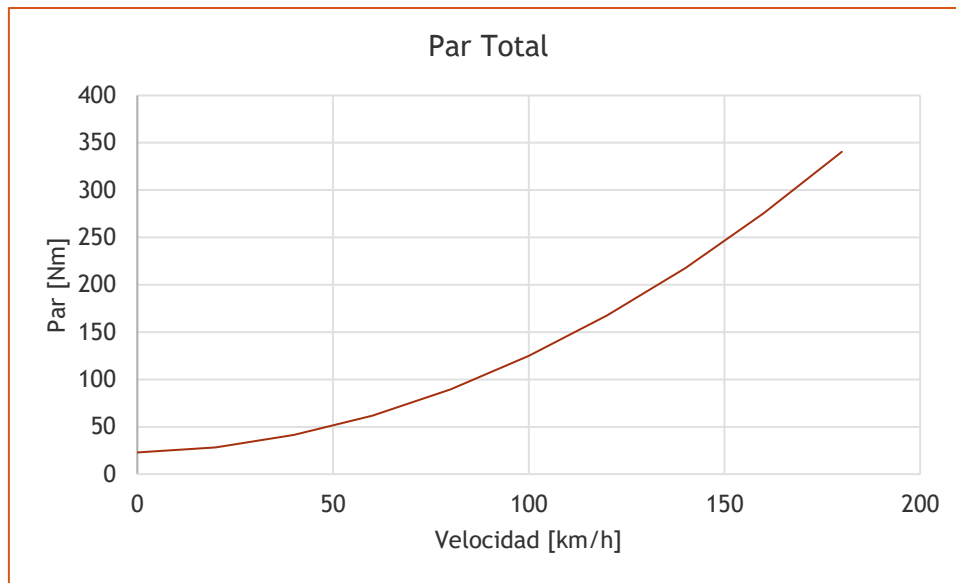
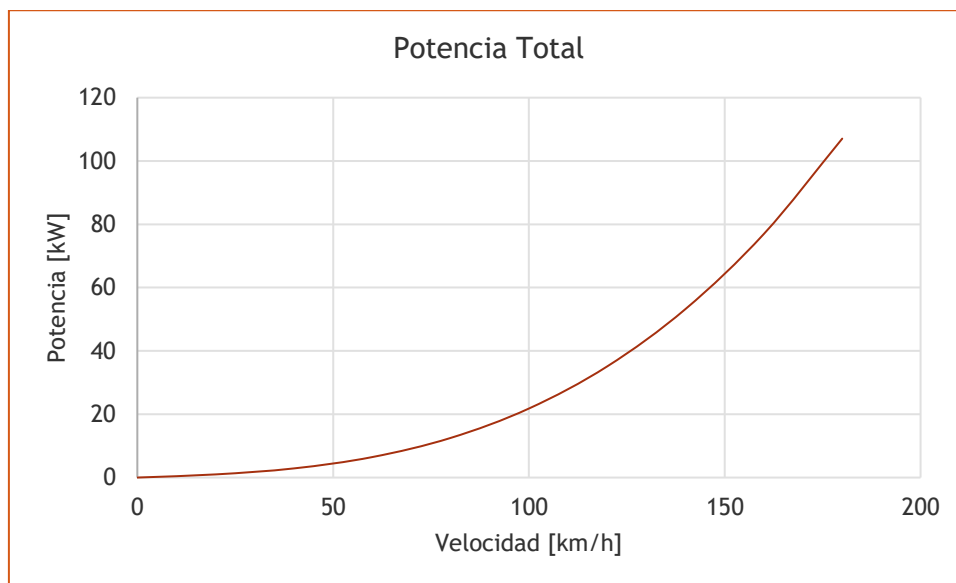


Figura 57. Fuerza total

- **Par requerido:** Transforma la fuerza total en par sobre los rodillos, permitiendo relacionar directamente la carga del motor eléctrico con la velocidad del vehículo.

*Figura 58. Par total*

- **Potencia requerida:** Derivada de la fórmula que relaciona fuerza y velocidad, lustra la demanda energética del sistema de propulsión y permite identificar los rangos de operación más exigentes del Mirai.

*Figura 59. Potencia total*

Estas representaciones permiten observar cómo la resistencia aerodinámica se vuelve dominante a altas velocidades mientras que la rodadura influye sobre todos a bajas y medias velocidades.

El drag no solo determina la carga mecánica sobre el motor eléctrico, sino que también condiciona el funcionamiento de otros componentes del sistema de propulsión incluyendo las pérdidas por fricción en la transmisión, el diferencial y los rodamientos del Mirai. La correcta representación del drag en los ensayos en banco es fundamental para obtener las curvas de par y potencia que reflejen de manera fiel el comportamiento del Mirai en la carretera.

Modos de funcionamiento

Arranque

Durante el arranque del vehículo, la batería de tracción provee de la energía necesaria para arrancar el sistema eléctrico y mover el vehículo inicialmente, ya que la pila de combustible tarda algunos segundos en alcanzar su potencia nominal. Una vez se enciende la pila, esta comienza a generar energía para recargar la batería y suministrar potencia al motor.

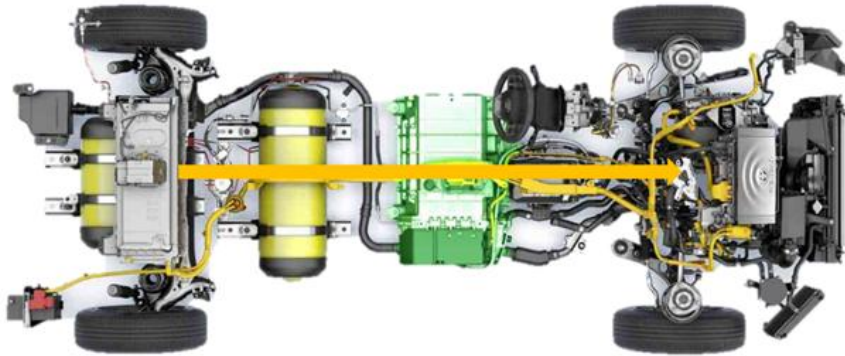


Figura 60. Funcionamiento del sistema pila / Batería (Arranque) (I)

Y durante el arranque podemos ver como la batería está dando alrededor de 7 kW a una demanda de pedal del 19% mientras que la pila todavía está apagada.



Figura 61. Funcionamiento del sistema pila / Batería (Arranque) (II)

Aceleración

En las fases de aceleración rápida o demanda energética puntual, la batería entrega potencia adicional para cubrir picos que la pila no puede suministrar instantáneamente. Esta estrategia permite que el motor eléctrico reciba potencia inmediata, mejorando la respuesta dinámica del vehículo. La pila mantiene un nivel estable, evitan picos de carga bruscos que afectan a su vida útil.



Figura 62. Funcionamiento del sistema pila / Batería (Aceleración) (I)

En el caso de la aceleración la batería y la pila de combustible proporcionan energía al mismo tiempo ante la demanda de pedal para impulsar al vehículo. En este caso el SOC de la batería baja.

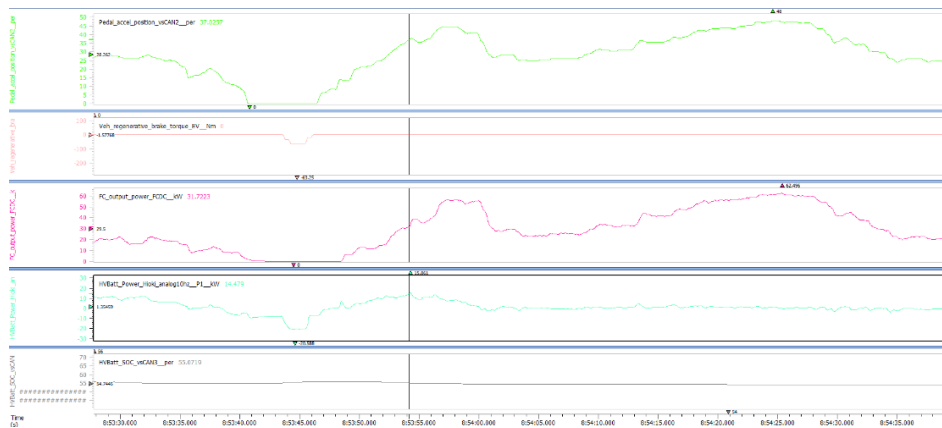


Figura 63. Funcionamiento del sistema pila / Batería (Aceleración) (II)

Velocidad de crucero

A velocidades y cargas constantes, la pila de combustible provee la energía principal para mover el vehículo. Mientras, la batería se recarga con la energía generada por la pila y con la energía regenerada en frenadas previas. Este modo maximiza la eficiencia energética y autonomía.



Figura 64. Funcionamiento del sistema pila / Batería (Velocidad de crucero) (I)

En el caso de circulación por autopista con demandas de acelerador más o menos constantes, la pila de combustible es la que proporciona la energía al motor eléctrico, mientras que la batería casi no proporciona energía. En ciertos casos donde la pila de combustible genera más energía de la necesaria, esta es absorbida por la batería aumentando su carga.



Figura 65. Funcionamiento del sistema pila / Batería (Velocidad de crucero) (II)

Regeneración

Durante las frenadas o desaceleraciones, el motor eléctrico actúa como generador y convierte la energía cinética en energía eléctrica. La energía se almacena en la batería, reduciendo el consumo de hidrógeno y aumentando la eficiencia global. La pila puede reducir o suspender su operación momentáneamente durante esta fase.

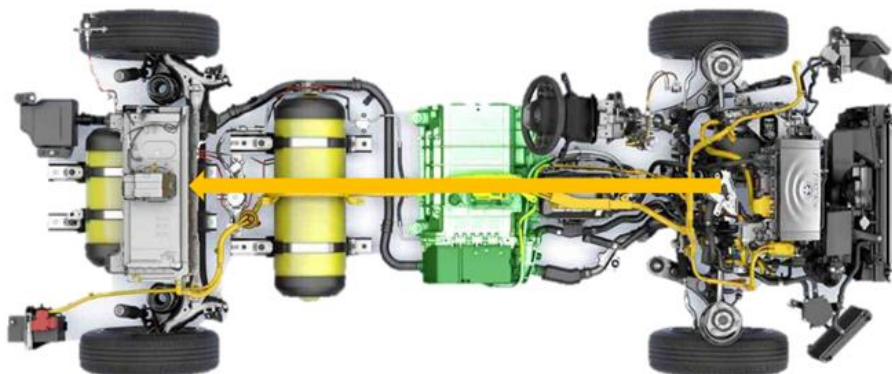


Figura 66. Funcionamiento del sistema pila / Batería (Regeneración) (I)

En este extracto de los datos obtenidos del WLTP se aprecia el funcionamiento del sistema durante la regeneración. Podemos ver cómo la demanda del acelerador es cero por eso la pila no está generando potencia en ese momento, la potencia de la batería es negativa porque el motor está regenerando y está enviando esa energía a la batería y el SOC aumenta.



Figura 67. Funcionamiento del sistema pila / Batería (Regeneración) (II)

6. Conclusiones

Los ensayos realizados en el banco de rodillos con el Toyota Mirai I han permitido caracterizar el comportamiento dinámico y energético de la propulsión del vehículo basado en pila de combustible. A partir de las pruebas de potencia máxima, cargas parciales y ciclo WLTP se obtuvieron los siguientes resultados:

- **Reproducibilidad y consistencia:** Los ensayos mostraron una buena repetibilidad en las curvas de par y potencia, confirmando la fiabilidad del banco y la instrumentación empleada.
- **Entrega de par y potencia:** El motor eléctrico proporciona un par elevado desde bajas velocidades, con una respuesta inmediata y estable. La potencia máxima medida se ajusta a los valores nominales del fabricante (≈ 113 kW).
- **Gestión energética híbrida:** Se verificó la correcta transición entre la pila de combustible y la batería auxiliar. En cargas medias y altas, la pila asume la mayor parte de la demanda, mientras que la batería contribuye en fases transitorias y regenerativas.
- **Consumo de hidrógeno y eficiencia:** El consumo específico de hidrógeno se mantuvo dentro de los rangos homologados, con una eficiencia global superior al 50 % en la mayoría de las condiciones. Se observó una ligera disminución de eficiencia en cargas altas, asociada al incremento de temperatura en el stack.
- **Comportamiento en ciclo WLTP:** Ante demandas como las de un ciclo WLTP de homologación, el vehículo reproduce sin problema las condiciones de circulación, mostrando un perfil de potencia y consumo acorde a los esperado y con una gestión térmica eficiente que se mantuvo estable durante todo el ciclo.

En conjunto, los resultados confirman que el Toyota Mirai de primera generación ofrece un rendimiento energético competitivo y seguro, con una gestión eficiente de la pila y de la batería de tracción. El uso del banco de rodillos permitió obtener datos representativos y que se pueden comparar con condiciones reales de conducción, lo que los hace muy útiles para futuros análisis comparativos sobre este tipo de tecnología.