



## **SIMBIKE ELECTRIC, una herramienta para la simulación de motocicletas de competición eléctricas**

### **SIMBIKE ELECTRIC, a tool for the simulation of electric racing motorcycles**

A. Noriega González<sup>1</sup>, A. Navarro Rodríguez<sup>2</sup>, P. García Fernández<sup>2</sup>, R. Georgious<sup>2</sup>, J.M. Guerrero<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Universidad de Oviedo

Dpto. de Construcción e Ingeniería de Fabricación  
Campus de Viesques, C/Pedro Puig Adam, Edf. Departamental Oeste, 33203 Gijón, España

<sup>2</sup>Universidad de Oviedo

Dpto. de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Comunicaciones y de Sistemas  
Campus de Viesques, C/Pedro Puig Adam, Edf. Departamental Oeste, 33203 Gijón, España

*(Recibido 9 de febrero de 2024, para publicación 13 de mayo de 2024)*

**Resumen** – Las motocicletas eléctricas de competición son vehículos que se caracterizan por desarrollar unas elevadas aceleraciones, tener un peso elevado y una autonomía pequeña. Durante su diseño, se busca obtener una integración de la batería y el grupo motopropulsor en el chasis de la motocicleta de manera que esta pueda realizar su función de una manera óptima, desde el punto de vista del rendimiento. Este proceso de diseño se ve simplificado porque las condiciones de operación de la motocicleta en un circuito son repetibles y porque es relativamente sencillo realizar una simulación de la motocicleta en dichas condiciones incluyendo un modelo térmico y un modelo eléctrico simplificados, además del modelo simplificado de la dinámica vehicular y del piloto, dando lugar a una simulación multifísica simplificada. Para llevar a cabo esta tarea, se ha desarrollado la herramienta SIMBIKE ELECTRIC, la cual permite estimar las prestaciones globales (aceleración, velocidad máxima, tiempo por vuelta), el consumo de energía, la regeneración alcanzable y el calor que se genera en los distintos componentes eléctricos y que hay que evacuar con los sistemas de refrigeración. Esta herramienta permite simular distintos diseños de motocicleta, así como ajustar diversos parámetros de puesta a punto de la misma (por ejemplo, la curva de par del motor, el desarrollo escogido para la transmisión, la posición del centro de masas, ..., etc.) y distintas trazadas en el circuito de manera sencilla. La simulación obtenida es robusta y muy eficiente, trabajando por debajo de tiempo real y facilitando su uso en un proceso de obtención de la configuración óptima tanto para el diseño como para la puesta a punto de la motocicleta. La herramienta desarrollada se ha validado comparando las prestaciones calculadas con las obtenidas por la motocicleta eléctrica del equipo de la Universidad de Oviedo en las pruebas dinámicas de la competición Motostudent Electric celebrada en 2021 en el circuito de Motorland Aragón.

**Palabras clave** – Simulación, prestaciones, motocicleta eléctrica, competición.

**Abstract** – Electric racing motorcycles are vehicles characterized by high acceleration, high weight and low autonomy. During their design, the aim is to integrate the battery and the powertrain into the motorcycle chassis in such a way that the motorcycle can perform its function optimally from a performance point of view. This design process is simplified because the operating conditions of the motorcycle in a circuit are repeatable and because it is relatively easy to perform a simulation of the motorcycle in such conditions including a simplified thermal model and a simplified electrical model, in addition to the simplified model of the vehicle and rider dynamics, resulting in a simplified multiphysics simulation. To carry out this task, the SIMBIKE ELECTRIC tool has been developed, which allows estimating the overall performance (acceleration, maximum speed, lap time), the energy consumption, the achievable regeneration and the heat generated in the different electrical components and to be evacuated by the cooling systems. This tool allows to simulate different motorcycle designs as well as to adjust different motorcycle tuning parameters (for example, the engine torque curve, the chain transmission ratio, the position of the center of mass, ..., etc.) and different track layouts in a simple way. The simulation obtained is robust and very efficient, working below real time and facilitating its use in a process of obtaining the

optimal configuration for both the design and the tuning of the motorcycle. The developed tool has been validated by comparing the calculated performances with those obtained by the electric motorcycle of the University of Oviedo team in the dynamic tests of the Motostudent Electric competition held in 2021 at the Motorland Aragon circuit.

**Keywords** – Simulation, Performance, Electric Motorcycle, Racing.

## 1. INTRODUCCIÓN

Las motocicletas son vehículos con características propias, muy diferentes a las de los vehículos con tres o más ruedas, como los automóviles. Los vehículos con 3 o más ruedas raramente alcanzan inclinaciones laterales significativas mientras que las motocicletas sí pueden conseguir grandes inclinaciones laterales y las utilizan como medio principal para girar [1]. Esto hace que su dinámica en curva sea completamente diferente a la del resto de los vehículos.

El pequeño tamaño de las motocicletas en comparación con los vehículos de tres o más ruedas hace que el volumen disponible para albergar el grupo motriz y el almacén de energía sea muy limitado. El conductor de una motocicleta se sitúa habitualmente a horcajadas sobre la misma y esto tiene dos consecuencias principales. La primera es que la forma externa de la motocicleta cumple una función ergonómica, lo que añade limitaciones a las formas y volúmenes que puede tener la misma. La segunda consecuencia es que el conductor tiene la posibilidad de moverse significativamente respecto a la motocicleta, ver Fig. 1, lo que sumado a que tiene una masa del mismo orden de magnitud que la de la motocicleta, hace que su posición y sus movimientos influyan significativamente en la dinámica de la motocicleta. Esta posibilidad hace que la forma en la que las motocicletas deben conducirse pueda requerir cierto esfuerzo físico por parte del conductor, lo que sumado a la inexistencia de ayudas que reduzcan ese esfuerzo como las que existen en otros automóviles (por ejemplo, la dirección asistida) hace que la masa del vehículo deba minimizarse lo más posible con objeto de reducir las fuerzas de inercia que debe vencer dicho conductor. Además, la posición del centro de masas y la distribución de las mismas son críticas para el comportamiento de la motocicleta.



Fig. 1. Conductor significativamente desplazado durante el trazado de una curva.

Los requisitos enunciados en el párrafo anterior (un volumen reducido, una masa reducida y centrada y unos momentos de inercia reducidos en los ejes de cabeceo, balanceo y guiñada) se vuelven más críticos cuando se trata de motocicletas eléctricas ya que la batería es un elemento muy pesado y voluminoso, con una forma muy difícil de adaptar a la ergonomía necesaria en una motocicleta y, además, conseguir una distribución de masas adecuada. El caso extremo son las motocicletas eléctricas de competición donde la masa y el volumen deben llevarse al mínimo a la vez que las prestaciones de la batería y su refrigeración deben aumentarse lo más posible.

En el caso específico de una motocicleta eléctrica de competición, la decisión sobre la capacidad y potencia necesarias en la batería define en gran medida la volumetría y la masa de la misma, afectando de manera decisiva a las prestaciones del vehículo. Y las características de la batería, junto con las del motor eléctrico y las del convertidor, así como las características del circuito y el tipo de conducción a practicar,

definen la autonomía alcanzable por la motocicleta y las características del sistema de refrigeración que debe incorporar.

El disponer de los datos comentados es de especial relevancia para realizar el diseño óptimo de una motocicleta eléctrica de competición. Para ello, se debe disponer de una herramienta que permita la simulación robusta y eficiente de un modelo multi-física de la motocicleta (dinámica vehicular, flujos de calor, descarga de la batería, comportamiento del motor, ...) que, además, sea paramétrico, así como de un modelo de piloto y de las características del circuito y la trazada para las que se quiere optimizar el diseño [2, 3]. Para dar respuesta a esta necesidad, se ha desarrollado la herramienta de simulación SIMBIKE ELECTRIC que se va a describir en este artículo.

El modelado multi-física para esta herramienta ha de realizarse bajo dos premisas: simplicidad y eficiencia, con el objetivo de conseguir una simulación robusta y rápida a utilizar en el proceso iterativo de búsqueda de un diseño óptimo. La exactitud que proporcionan modelos ya conocidos y muy detallados de neumáticos, motor, batería, refrigeración, ... [4] va normalmente acompañada de modelos muy complejos y costosos de simular, que, además, dependen de muchos parámetros, los cuales, en un estado inicial de diseño, no se conocen. Dado que el objetivo final del proceso de diseño es saber discriminar, de manera cualitativa, cual es el mejor diseño dentro un conjunto de posibilidades, una simulación de gran precisión no es necesaria en esta fase del proceso de obtención del diseño óptimo pero sí debe ir acompañada de una validación experimental posterior, que, en este caso, se ha hecho aprovechando la construcción de un prototipo de motocicleta eléctrica diseñada utilizando esta herramienta y que participó en la VI Edición de la competición internacional Motostudent, cuya fase final se celebró en el circuito de Motorland Aragón en Julio de 2021.

En este artículo se describirá como se realiza el modelado multi-física y la simulación asociada para una motocicleta de competición eléctrica y se comentará la validación de la herramienta generada en base a los resultados medidos en pruebas reales.

## 2. ESPECIFICACIONES DE MOTOCICLETA, PILOTO Y CIRCUITO

Para desarrollar el modelo simplificado del conjunto de la motocicleta y el piloto se considerarán conocidos los siguientes datos:

### 2.1. Motor eléctrico

Se conocerá el momento de inercia de su rotor, su tensión nominal  $V_{nom}$ , su par nominal  $T_{nom}$ , su potencia nominal  $P_{nom}$ , su velocidad de rotación máxima  $\omega_{max}$  y su eficiencia media aproximada  $\rho_{motor}$ . En la simulación y en la motocicleta real podrá limitarse el par máximo alcanzable mediante un control de la intensidad que circula por sus bobinados. La curva de par motor se considerará que responde a la expresión (1) y el efecto que tiene la tensión de alimentación  $V_{batería}$  sobre dicha curva está modelado por las expresiones (2).

$$T_{motor}(\omega_{motor}) = \begin{cases} \text{si } \omega_{motor} < \omega_{base\_norm} \rightarrow T_{motor} \\ \text{si } \omega_{base\_norm} \leq \omega_{motor} \rightarrow T_{motor} \cdot \frac{\omega_{base\_norm}}{\omega_{motor}} \end{cases} \quad (1)$$

$$\omega_{base\_norm} = \frac{V_{batería}}{V_{nom}} \cdot \omega_{base} \quad , \quad \omega_{base} = \frac{P_{nom}}{T_{nom}} \quad (2)$$

### 2.2. Convertidor

Se conocerá su eficiencia media aproximada  $\rho_{convertidor}$ .

### 2.3. Batería

Se conocerá su capacidad real  $C_{batería}$  (considerando que debe mantener un 20% de su capacidad bruta

cuando se considere descargada), su voltaje mínimo  $V_{bateria-min}$  y máximo  $V_{bateria-max}$  y su rendimiento medio aproximado  $\rho_{bateria}$ .

## 2.4. Transmisión

Se conocerá la relación de transmisión  $i_{transmisión}$  (que se considera constante) y su rendimiento aproximado  $\rho_{transmisión}$ .

## 2.5. Resistencias al avance

Se considera conocida la resistencia a la rodadura de los neumáticos  $f_{rodadura}$  (igual para el delantero y el trasero), el coeficiente de penetración  $C_x$ , la superficie frontal  $S$  y la densidad de aire  $\rho_{aire}$ .

## 2.6. Dimensiones

Se considerará conocida la distancia entre ejes  $d_{ejes}$ , la distancia entre el CDG y el primer eje  $l_1$  y la altura del CDG  $h_{CDG}$  (ver Fig. 3).

## 2.7. Pesos

Se considerará conocida la masa de la motocicleta en estado de marcha  $m_{moto}$  y la masa del piloto completamente equipado  $m_{piloto}$ .

## 2.8. Neumáticos

Se considerará conocido el radio efectivo del neumático trasero  $r_{tras}$  y el coeficiente de adherencia longitudinal  $\mu$ , el cual se considera constante e igual para los neumáticos delantero y trasero.

## 2.9. Circuito

Se conocerá la trazada por la que se recorre el circuito (ver Fig. 2) obtenida mediante un sistema de adquisición de datos instalado en la motocicleta de competición así como el plano de altimetría de la cuerda del circuito, por sectores.



Fig. 2. Trazada obtenida mediante posicionamiento GPS en el circuito de Motorland Aragón.

## 3. MODELADO SIMPLIFICADO DE LA DINÁMICA VEHICULAR, LOS FLUJOS DE CALOR Y EL VOLTAJE DE LA BATERÍA

### 3.1. Dinámica vehicular

Siguiendo la idea de [5], para modelar la dinámica de la motocicleta de manera simplificada se ha dividido la trazada en dos tipos de sectores: curvas y rectas, aplicando una estrategia diferente para cada sector. En

cada sector se conocerá la longitud a recorrer  $l$ , la pendiente  $\theta$  y el radio  $R$  (si es una curva). Tanto la pendiente como el radio se consideran constantes en un sector.

Para los dos tipos de sectores se va a despreciar el movimiento de cabeceo de la motocicleta debido a las suspensiones y a la flexibilidad de los neumáticos y se considerará que el piloto se mantiene estático encima de la moto de tal manera que pueda considerarse que el movimiento de la motocicleta tiene un solo grado de libertad, en la dirección de avance de la misma y es tangente a la trayectoria que describe. Es decir, se trata de un grado de libertad intrínseco a la trayectoria.

Para un sector tipo curva, se van a suponer lo siguiente:

- El coeficiente de adherencia lateral del neumático es constante y viene definido por un factor  $\delta$  que multiplica al coeficiente de adherencia longitudinal del neumático. Este factor es diferente en cada curva y su valor se define en base a la velocidad observada en el paso por esa curva de motocicletas similares.

Y el modelo de piloto impondrá la siguiente condición:

- La velocidad de paso por curva  $v$  es constante.

La relación entre los dos valores viene dada por la expresión (3), donde  $g$  es la aceleración de la gravedad y que permite calcular la velocidad de paso por curva llevando al límite la adherencia:

$$v \approx \sqrt{R \cdot g \cdot \delta \cdot \mu} \quad (3)$$

Con esta velocidad y suponiendo conocido el radio efectivo de la rueda trasera y la relación de transmisión, puede calcularse la velocidad de rotación del motor con la expresión (4):

$$\omega_{motor} = \frac{v}{r_{tras}} \cdot i_{transmisión} \quad (4)$$

Dado que la velocidad es constante, la motocicleta solo debe vencer las resistencias al avance con las expresiones (5) a (8), cuyo valor puede calcularse con los datos conocidos:

$$F_{curva} = -F_{rodadura} - F_{aerodinámica} - F_{pendiente} \quad (5)$$

siendo

$$F_{rodadura} = -f_{rodadura} \cdot (m_{moto} + m_{piloto}) \cdot g \quad (6)$$

$$F_{aerodinámica} = -\frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot C_x \cdot S \cdot v^2 \quad (7)$$

$$F_{pendiente} = -(m_{moto} + m_{piloto}) \cdot g \cdot \sin\theta \quad (8)$$

pudiendo calcularse el par necesario en el motor para vencer esas resistencias al avance con la expresión (9):

$$T_{motor\_necesario} = \frac{F_{curva} \cdot r_{tras}}{i_{transmisión} \cdot \rho_{transmisión}} \quad (9)$$

También puede calcularse el par máximo que podría proporcionar el motor a la velocidad de rotación calculada con la expresión (1) y que será constante en todo el sector tipo curva.

Si  $T_{motor\_necesario} \leq T_{motor}$  el motor permitirá tomar la curva a la máxima velocidad calculada. Sin embargo, si  $T_{motor} < T_{motor\_necesario}$  habrá que recalcular la velocidad a la que se puede tomar la curva con el par disponible con la expresión (10), que deriva de la (5):

$$v_{real} = \sqrt{\frac{2 \cdot (F_{real\_curva} + F_{rodadura} + F_{pendiente})}{\rho_{aire} \cdot C_x \cdot S}} \quad (10)$$

siendo

$$F_{real\_curva} = \frac{T_{motor} \cdot i_{transmisión} \cdot \rho_{transmisión}}{r_{tras}} \quad (11)$$

Para un sector tipo recta, se va a suponer lo siguiente:

- El sector no tiene inclinación significativa hacia ninguno de los dos lados (peralte) por lo que la motocicleta se moverá aproximadamente en el plano vertical, con los neumáticos apoyándose en la parte central.

Y el modelo de piloto impondrá las siguientes condiciones:

- La motocicleta inicia la recta con la velocidad a la que ha trazado la curva anterior y acelerará al límite de lo que permita el motor, los neumáticos y la estabilidad longitudinal (evitando que la rueda delantera se despegue del suelo) para seguir teniendo capacidad de dirección.
- La aceleración se mantendrá hasta el punto de frenada (o hasta que el motor llegue a su velocidad de rotación máxima). El punto de frenada estará situado dentro del sector tipo recta y a partir de él, la motocicleta realizará una frenada al límite de la estabilidad, es decir, con la rueda trasera a punto de levantarse de suelo dado que es la condición de frenado más restrictiva en una motocicleta.
- Tras realizar la zona de aceleración y la de frenada, la motocicleta tiene que haber recorrido toda la longitud del sector y circular a la velocidad requerida para trazar la siguiente curva (o a una velocidad inferior en caso de que no sea necesario frenar dentro del sector tipo recta).
- Como consecuencia de esto, la simulación siempre debe comenzar y terminar con un sector tipo curva. En el caso de que desee la detención absoluta, bastaría con poner un sector tipo curva con un radio igual a cero.

Teniendo en cuenta las condiciones enunciadas, se considera la reducción dinámica de la motocicleta y el piloto a una masa puntual que realiza un movimiento longitudinal por un plano (inclinado o no) como la mostrada en la Fig. 3 y se plantea la ecuación diferencial del movimiento [6] mostrada en (12). Todas las fuerzas actuantes sobre la motocicleta se descomponen en sus componentes cartesianas y se representan en sentido positivo, pudiendo luego indicar su sentido, si se conoce o haciendo que este sea dependiente de otros parámetros, mediante la introducción de signos en sus expresiones, como se ve en las expresiones (6) a (8). Este tipo de esquematización es muy utilizada en simulación de dinámica multicuerpo ya que permite una formulación sencilla y directa de las ecuaciones de la dinámica, sobre todo cuando las fuerzas y aceleraciones actuantes pueden cambiar de sentido durante la simulación. Un ejemplo muy sencillo de esto se puede ver en los tramos con pendiente negativa (bajadas) donde la resistencia al avance debida a la pendiente que se muestra en la expresión (8) pasa a tener un valor global positivo y genera una aceleración hacia adelante en el vehículo (aceleración positiva).

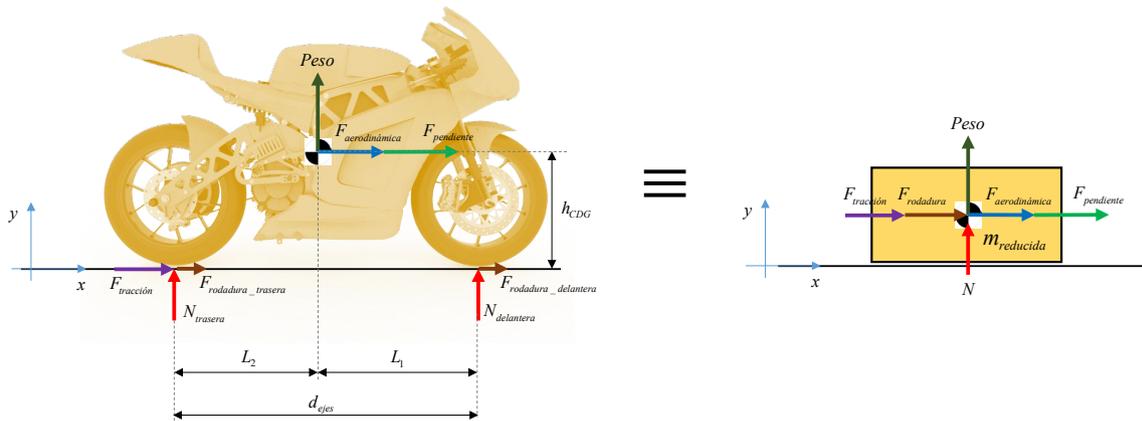


Fig. 3. Modelado de la dinámica reducida en un sector tipo recta.

$$F_{reducida} = m_{reducida} \cdot a + \frac{1}{2} \cdot \frac{dm_{reducida}}{dx} \cdot v^2 \quad (12)$$

Donde la masa reducida se calcula igualando energías cinéticas del sistema original (motocicleta+piloto) y el sistema reducido, que es una masa puntual equivalente situada en la posición del CDG del sistema original. Teniendo en cuenta que la masa reducida es constante, y considerando a todas las fuerzas

longitudinales aplicadas sobre el CDG, la expresión (12) se convierte en la expresión (13) pudiendo calcularse las resistencias al avance con las expresiones (6) a (8).

$$F_{tracción} + F_{rodadura} + F_{aerodinámica} + F_{pendiente} = m_{reducida} \cdot a \quad (13)$$

La expresión (13) debe integrarse respecto al tiempo para lo que se consideran conocidas, en cada instante, la posición  $x$  y la velocidad  $v$  y se calculará la aceleración  $a$ .

En la zona de aceleración, se puede calcular la velocidad de rotación del motor con la expresión (4) y a partir de ella, el par máximo proporcionado por el motor para esa velocidad de rotación y el voltaje al que se alimenta el motor con la expresión (1). Con este valor, se puede calcular el par que suministraría el motor a la rueda con la expresión (14), la fuerza de tracción que se generaría, suponiendo una situación de no deslizamiento del neumático, con la expresión (15) y la máxima aceleración que permitiría el motor con la expresión (16).

$$T_{rueda} = T_{motor} \cdot i_{transmisión} \cdot \rho_{transmisión} \quad (14)$$

$$F_{rueda\_motor} = \frac{T_{rueda}}{r_{tras}} \quad (15)$$

$$a_{motor} = \frac{F_{rueda\_motor} + F_{rodadura} + F_{aerodinámica} + F_{pendiente}}{m_{reducida}} \quad (16)$$

En paralelo, se puede calcular la máxima fuerza de tracción que se conseguiría llevando al límite la adherencia del neumático trasero [7] con la expresión (17) y la máxima aceleración que permitiría la adherencia con la expresión (18).

$$F_{rueda\_adherencia} = \frac{\mu \cdot (m_{moto} + m_{piloto}) \cdot g \cdot (l_1 - h_{CDG} \cdot f_{rodadura})}{d_{ejes} - \mu \cdot h_{CDG}} \quad (17)$$

$$a_{adherencia} = \frac{F_{rueda\_adherencia} + F_{rodadura} + F_{aerodinámica} + F_{pendiente}}{m_{reducida}} \quad (18)$$

Finalmente, se puede calcular la aceleración que generaría un despegue de la rueda delantera (caballito) con la expresión (19).

$$a_{caballito} = \frac{(m_{moto} + m_{piloto}) \cdot g \cdot \frac{(d_{ejes} - l_1)}{h_{CDG}} + F_{aerodinámica} + F_{pendiente}}{m_{moto} + m_{piloto}} \quad (19)$$

De las tres aceleraciones calculadas, se escogerá la mínima aceleración de las tres  $a_{min}$  y se implementará un límite adicional cuando el motor haya alcanzado su máxima velocidad operativa con la expresión (20).

$$a = \begin{cases} \text{si } \omega_{motor} < \omega_{max} \rightarrow a_{min} \\ \text{si } \omega_{max} \leq \omega_{motor} \rightarrow 0 \end{cases} \quad (20)$$

Con la aceleración calculada, se puede calcular la fuerza de tracción en la rueda, el par en la rueda y el par necesario en el motor (que será menor o igual al máximo posible para la velocidad de rotación), con las expresiones indicadas en (21).

$$\begin{aligned} F_{carga\_aceleración} &= m_{reducida} \cdot a - F_{rodadura} - F_{aerodinámica} - F_{pendiente} \\ T_{rueda\_aceleración} &= F_{carga\_aceleración} \cdot r_{tras} \\ T_{motor\_aceleración} &= \frac{T_{rueda\_aceleración}}{i_{cadena} \cdot \rho_{transmisión}} \end{aligned} \quad (21)$$

En la zona de frenada, el desarrollo sería similar. Sin embargo, el análisis es más sencillo, si cabe, dado que como una motocicleta es un vehículo con una distancia entre ejes pequeña y un CDG relativamente alto en comparación, la deceleración más limitante es casi siempre la asociada al levantamiento de la rueda trasera (la excepción es la frenada sobre una superficie deslizante, por ejemplo, asfalto mojado) tal y como se indica en [8]. Esta deceleración puede calcularse con la expresión (22) y se supondrá constante durante toda la frenada.

$$a_{frenada} = \frac{-(m_{moto} + m_{piloto}) \cdot g \cdot \frac{L_1}{h_{CDG}} + F_{aerodinámica} + F_{pendiente}}{m_{moto} + m_{piloto}} \quad (22)$$

Se considerará que el límite de la operación de frenado es la detención completa de la motocicleta con la expresión (23) y la fuerza de frenado que sería necesaria se puede calcular con una expresión similar a la (21).

$$a = \begin{cases} \text{si } 0 < v \rightarrow a_{frenada} \\ \text{si } v \leq 0 \rightarrow 0 \end{cases} \quad (23)$$

Como se comentó anteriormente, la fuerza de frenado se reparte entre los frenos delantero y trasero, que se accionan de manera independiente, y el freno regenerativo que aplica el motor que actúa sobre la rueda trasera a través de la transmisión. El reparto de la fuerza de frenado entre los 3 sistemas independientes es realizado por el piloto a través de la maneta derecha (freno delantero), el pedal derecho (freno trasero) y el mando del freno regenerativo en el puño izquierdo y puede cambiar en función de sus gustos. Por esta razón, es necesario plantear una hipótesis basada en la observación de las acciones del pilotaje reales y en la dinámica de frenado de la moto. En particular, sobre el hecho de que la condición límite que se observa en muchas ocasiones es el levantamiento de la rueda trasera y la pequeña aportación que realiza el freno trasero para muchos pilotos [1]. En base a lo anterior, se va a suponer que el esfuerzo de frenada estará aplicado en su mayor parte sobre la rueda delantera ( $k$  %), estando el resto aplicado en la rueda trasera a través del freno motor ( $100-k$  %). El esfuerzo de frenada del freno trasero quedará para acciones puntuales y para situaciones de emergencia que no serán consideradas en una conducción “normal” (aportación del 0%). Teniendo en cuenta esto, se puede calcular el par de frenado que debe aplicar el motor con las expresiones (24).

$$\begin{aligned} F \frac{100 - k}{100} &= F_{frenado\_tras} \\ T_{frenado\_tras} &= F_{frenado\_tras} \cdot r_{tras} \\ T_{motor\_frenado} &= \rho_{transmisión} \cdot \frac{T_{frenado\_tras}}{i_{transmisión}} \end{aligned} \quad (24)$$

El par de frenado que puede ejercer el motor está limitado por el par máximo que puede absorber dicho motor actuando como generador y el máximo voltaje y/o intensidad que admite la batería durante la carga.

Para obtener el punto óptimo de frenada, se va a asumir que este punto está dentro del sector recta, es decir, se conoce el intervalo donde se encuentra. Podría ocurrir que una curva deba de tomarse a menor velocidad de la que permite su radio porque previamente hay una recta demasiado corta como para alcanzar la velocidad necesaria. Esta situación debe contemplarse haciendo que la velocidad de paso por curva sea la velocidad al final de la recta anterior y que la velocidad inicial de una recta sea la velocidad del paso por la curva anterior.

Teniendo en cuenta las condiciones indicadas para el sector tipo recta, se utilizará una variante mejorada del algoritmo de bisección que permite calcular raíces de una función de una variable en un intervalo conocido (el sector tipo recta) llamado algoritmo Illinois [9]. La función de la que hay que obtener la raíz será la indicada en la expresión (25), donde  $v_{final\_deseada}$  es la velocidad a la que se toma la siguiente curva y  $v_{final}$  es la velocidad al final de la recta tras frenar en el punto de frenado  $x_{frenado}$ .

$$error = error(x_{frenado}) = v_{final\_deseada} - v_{final}(x_{frenado}) \quad (25)$$

La velocidad al final de la recta se obtiene simulando la dinámica en la recta con un punto de frenado indicado. El algoritmo Illinois va probando distintos puntos de frenado hasta que encuentra aquel que consigue una solución cuyo error está suficientemente cerca de cero y supone un incremento de distancia del punto de frenado por debajo de una tolerancia establecida. También tiene un límite máximo de evaluaciones de función para evitar que el coste computacional se dispare.

### 3.2. Flujos de calor

La potencia eléctrica del motor, teniendo en cuenta que trabaja como motor en las aceleraciones y como generador en las frenadas, se puede calcular a partir de la potencia mecánica con la expresión (26).

$$\dot{W}_{elect\_motor} = \begin{cases} \text{si } 0 \leq T_{motor\_aceleración/frenado} \rightarrow T_{motor\_aceleración/frenado} \cdot \omega_{motor} / \rho_{motor} \\ \text{si } T_{motor\_aceleración/frenado} < 0 \rightarrow T_{motor\_aceleración/frenado} \cdot \omega_{motor} \cdot \rho_{motor} \end{cases} \quad (26)$$

Y el flujo de calor a evacuar del motor se calcula con la expresión (27).

$$\dot{Q}_{motor} = |\dot{W}_{elect\_motor}| \cdot (1 - \rho_{motor}) \quad (27)$$

La potencia eléctrica del convertidor se puede calcular a partir de la potencia eléctrica del motor con la expresión (28).

$$\dot{W}_{convertidor} = \begin{cases} \text{si } 0 \leq T_{motor\_aceleración/frenado} \rightarrow \dot{W}_{elect-motor} / \rho_{convertidor} \\ \text{si } T_{motor\_aceleración/frenado} < 0 \rightarrow \dot{W}_{elect-motor} \cdot \rho_{convertidor} \end{cases} \quad (28)$$

Y el flujo de calor a evacuar del convertidor se calcula con la expresión (29).

$$\dot{Q}_{convertidor} = |\dot{W}_{convertidor}| \cdot (1 - \rho_{convertidor}) \quad (29)$$

Finalmente, la potencia eléctrica de la batería se puede calcular con la expresión (30).

$$\dot{W}_{bateria} = \begin{cases} \text{si } 0 \leq T_{motor\_aceleración/frenado} \rightarrow \dot{W}_{convertidor} / \rho_{bateria} \\ \text{si } T_{motor\_aceleración/frenado} < 0 \rightarrow \dot{W}_{convertidor} \cdot \rho_{bateria} \end{cases} \quad (30)$$

Y el flujo de calor a evacuar de la batería se calcula con la expresión (31).

$$\dot{Q}_{bateria} = |\dot{W}_{bateria}| \cdot (1 - \rho_{bateria}) \quad (31)$$

### 3.3. Voltaje de la batería

El voltaje de la batería se va a considerar como proporcional a la energía útil almacenada en la batería como se muestra en la Fig. 4.

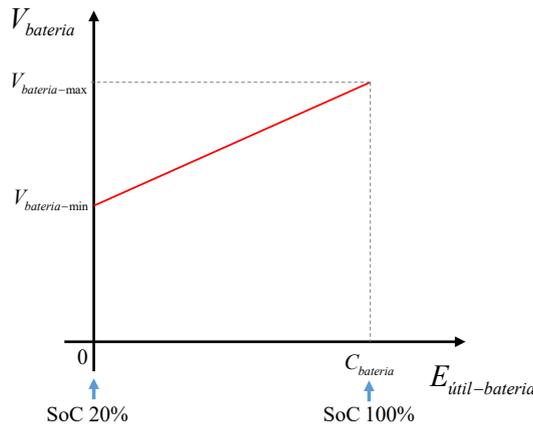


Fig. 4. Variación del voltaje de la batería con la energía útil almacenada.

Cuando se va reduciendo la energía almacenada, el voltaje va decayendo conforme a la expresión (32).

$$\dot{V}_{bateria} = -\frac{V_{bateria\_max} - V_{bateria\_min}}{C_{bateria}} \cdot \dot{W}_{bateria} \quad (32)$$

### 3.4. Integración

Dado que la ecuación diferencial a manejar en los sectores tipo recta no presenta discontinuidades, se ha utilizado un integrador Runge-Kutta explícito de segundo orden, ver [10], porque tiene un coste muy bajo y una precisión aceptable. Se ha implementado una variante del mismo donde la integración continúa siempre y cuando la velocidad de la motocicleta sea positiva y no se haya llegado al final del sector tipo recta. Las tres variables independientes que hay que integrar son la posición  $x$ , la velocidad  $v$  y el voltaje de la batería  $V_{bateria}$ .

## 4. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

El modelo explicado en el apartado 3 se ha programado en Matlab 2023 para simular una carrera realizada en el circuito de Motorland Aragón en condiciones similares a las que se dan en la competición Motostudent Electric: carrera a seis vueltas, ambas sobre el trazado utilizado en MotoGP y vuelta de honor realizada sobre el trazado corto.

Las especificaciones de la motocicleta a simular son las del prototipo desarrollado por el equipo Motostudent de la Universidad de Oviedo para la VI Edición de la competición Motostudent. El motor tiene limitado su par máximo por control al valor nominal (22 N·m) en las vueltas de calentamiento y de honor para simular un ritmo más bajo y se le permite llegar a un par máximo de 50 N·m durante las vueltas de carrera. La batería comienza la simulación al máximo de su voltaje/carga permitidos (88V y 4 kWh).

La simulación de la carrera completa se ha llevado a cabo con un paso de integración/simulación de 0,01 s, en una computadora con un procesador Intel Core i5 11500 con CPU a 2,7 GHz, 16 Gb de RAM y sistema operativo Windows 10 Pro y ha requerido 51,06 s.

Los resultados de la simulación de la carrera se pueden ver en la Tabla 1.

Tabla 1. Resultados de la simulación de la carrera.

Resultado	Carrera	Vuelta rápida	Vuelta de honor
Tiempo total empleado (s)	1017,52	166,51	176,45
Distancia total recorrida (m)	30042,3	4941,5	4379,8
Velocidad máxima alcanzada (km/h)	156,3	156,3	125,7
Aceleración máxima (m/s <sup>2</sup> )	2,61	2,42	0,88
Deceleración máxima (m/s <sup>2</sup> )	11,07	11,07	10,62
Energía consumida (kWh)	3,201	0,522	0,268
Energía regenerada (kWh)	0,336	0,054	0,024

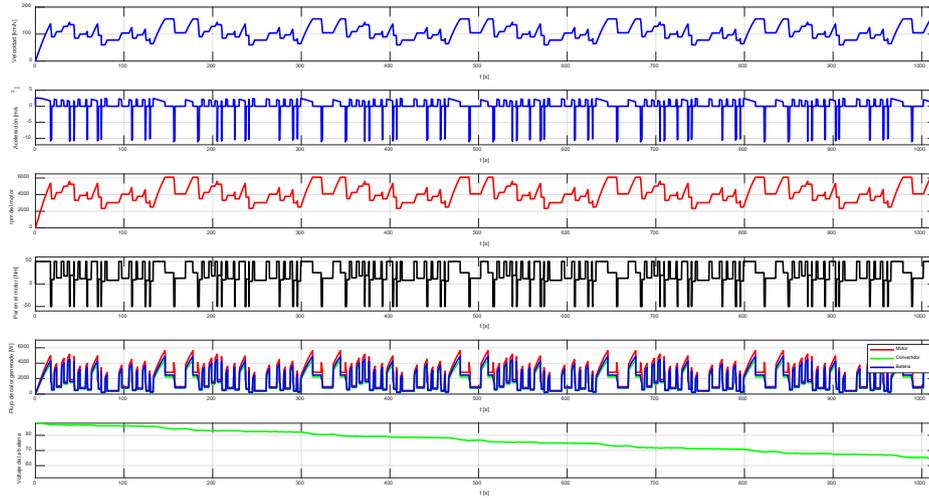


Fig. 5. Evolución de la velocidad y aceleración de la motocicleta, velocidad y par en el motor, flujos de calor y voltaje de la batería durante la simulación de la carrera.

En base a observaciones del comportamiento real de los pilotos en carrera, se considera que el paso por la recta de meta final se hace a ritmo de carrera y se contabiliza toda esa recta dentro de la carrera para tener en cuenta el consumo real. Esto se refleja en el hecho de que la distancia de carrera no es exactamente seis veces la distancia recorrida en una vuelta si no que se le añaden los 393,7 m que hay desde la línea de meta hasta el final de recta, tal y como se muestra en la Tabla 1. Cabe reseñar que la vuelta rápida es la segunda vuelta de la carrera.

Los resultados de interés de la simulación se pueden ver en la Fig. 5. Se puede observar que el desarrollo está bien ajustado a las posibilidades del motor dado que es capaz de llegar al régimen máximo operativo del sistema (6100 rpm). También se aprecia que el dimensionamiento de la batería en cuanto a energía es correcto, dado que consume prácticamente toda la energía disponible, quedando un pequeño remanente para realizar la vuelta de honor.

## 5. VALIDACIÓN CON DATOS EXPERIMENTALES

La validación de resultados ha sido parcial debido a problemas de fiabilidad del prototipo que le impidieron participar en la carrera citada. Por lo tanto, el consumo de energía total, la regeneración y el empeoramiento de las prestaciones con las vueltas por la bajada del voltaje no se han podido validar. Sin embargo, sí se pudieron realizar los entrenamientos libres y cronometrados por lo que se dispone de datos en tandas de tres vueltas (vuelta de lanzamiento, vuelta lanzada y vuelta de retorno al box) que han permitido comparar parte de las prestaciones obtenidas de la simulación con las obtenidas por el prototipo real. Estas tandas se realizaron con la mitad de la capacidad de la batería aunque las prestaciones de la motocicleta se mantuvieron intactas.

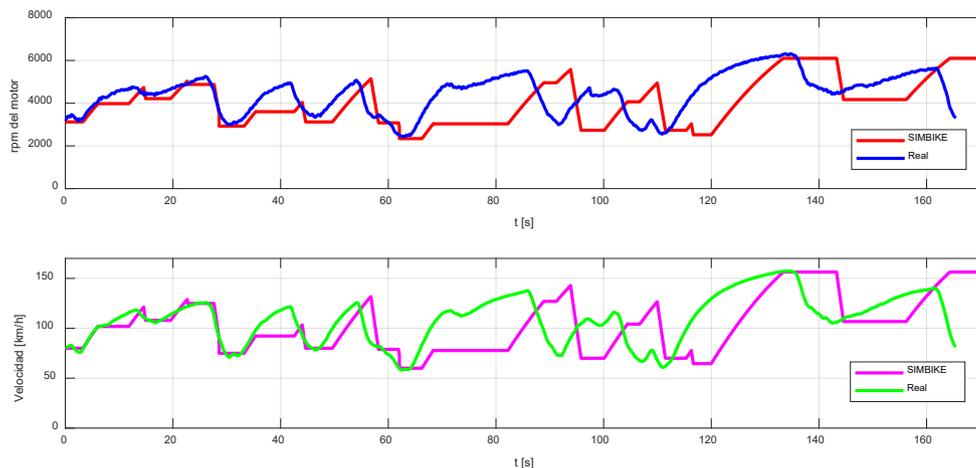


Fig. 6. Comparación de resultados sobre una vuelta lanzada.

En la Fig. 6 se puede observar la velocidad del prototipo en una vuelta lanzada en comparación con la medida por el sistema de adquisición de datos AIM Solo 2 DL instalado en el prototipo. Se puede observar que, al inicio de la vuelta (curvas 1 a 4), los resultados muestran una secuencia de aceleraciones y frenadas sensiblemente similar a la obtenida en la realidad. Esto también ocurre en la recta después de la curva 7 y durante la frenada y el trazado de las curvas 8 y 9 (el denominado Sacacorchos, sobre el instante 60 s) para, a partir de ahí, entrar en una zona de curvas de radio muy amplio y con mucho peralte (entre el instante 65 y 90 s) en las cuales, la secuencia de aceleraciones y frenadas obtenida en la simulación difiere sustancialmente de los resultados reales. La razón de esto es que esas zonas están definidas como curvas en la simulación, pero, en la realidad, el piloto las traza como rectas en las cuales puede acelerar y frenar. Entre los segundos 100 y 145 (curvas 13 a 15 y toda la recta trasera del circuito), la secuencia de aceleraciones y frenadas obtenida en la simulación es similar a la de la realidad, arrastrando un desfase proveniente de los sectores indicados anteriormente. Este desfase acumulado se traduce en 9 segundos de diferencia al final de la vuelta ya que la vuelta real se realizó en 2:42 min mientras que la vuelta simulada se realiza en 2:51 min. El desfase temporal entre simulación y realidad no permite una valoración cuantitativa del error en cada instante, excepto en los puntos máximos y mínimos locales de la velocidad, que coinciden con el paso por los ápices de las curvas y por el punto de las rectas donde se consigue la velocidad máxima y que son fácilmente identificables en las gráficas de resultados. Teniendo en cuenta esto, se puede observar, por ejemplo, que, en las curvas lentas de radio constante (curvas 9 y 15), las velocidades predichas por la simulación tienen unos errores del 3,3% y del 0,9%, respectivamente y en la recta trasera del circuito, la velocidad máxima predicha por la simulación tiene un error del 0,6% respecto a la medida experimentalmente.

## 6. CONCLUSIONES

A la vista de los resultados obtenidos, el objetivo de obtener una herramienta simple, robusta y eficiente para simular motocicletas eléctricas en una situación altamente repetible (repetición de vueltas a un circuito extrayendo las máximas prestaciones) se ha cumplido en gran medida dado que SIMBIKE es capaz de simular una carrera de unos 17 min de duración en 51 s, prediciendo con bastante precisión ciertas prestaciones como la velocidad de paso por los ápices de las curvas y la velocidad máxima alcanzable en los tramos de recta, utilizando para ello muy pocos datos del vehículo a simular. Estas prestaciones son puntuables para las pruebas de la competición Motostudent por lo que esta herramienta simplifica en gran medida la búsqueda del diseño óptimo inicial de una motocicleta destinada a participar en esta competición.

Los puntos de mejora para futuras versiones de esta herramienta son tres. En primer lugar, el modelado y simulación de las curvas, especialmente, de aquellas donde el peralte es muy significativo y ayuda a trazarlas de manera parecida a una recta, con una zona de aceleración y una de frenada. El peralte es un

dato que habitualmente no viene recogido en los planos de un circuito porque, hasta cierto punto, depende de la trazada realizada por lo que su estimación es un reto pendiente para futuros trabajos. En segundo lugar, se observa que el piloto aplica una frenada regresiva en las frenadas desde alta velocidad y esta característica también debería ser incorporada al modelo de piloto. Finalmente, se ha comprobado que los resultados de la simulación son muy sensibles a la trazada por lo que la discretización de la misma es un punto evidente de mejora.

## REFERENCIAS

- [1] Foale, T., *Motocicletas. Comportamiento dinámico y diseño de chasis. El arte y la ciencia*, Tony Foale Designs, España (2003)
- [2] Blissett, J., Degano, M., Gimeno-Fabra, M., Wheeler, P., “Design of electrical system for racing electric motorcycles”, 2016 International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles & International Transportation Electrification Conference (ESARS-ITEC), 1-5, Toulouse, France (2016)
- [3] Dal Bianco, N., Lot, R., Matthys, K., “Lap time simulation and design optimisation of a brushed DC electric motorcycle for the Isle of Man TT Zero Challenge”, *Vehicle System Dynamics*, **56**(1), 27-54 (2018)
- [4] Flanagan, L., “High-powered electric motorcycle integrated performance studies”, PhD thesis, University of Nottingham (2022)
- [5] Cossalter, V., Da Lio, M., Lot, R., Fabbri, L., Simulation and performance evaluation of race motorcycle dynamics based on parts of real circuit. Power Two Wheels International Conference, 14-15, Pisa, Italia (1998)
- [6] Eksbergian, R., “Dynamical analysis of machines”, *Journal of the Franklin Institute*, 209-4, 503-531 (1930)
- [7] Luque, P., Alvarez, D., Vera, C., *Ingeniería del automóvil. Sistemas y comportamiento dinámico*, Ed. Paraninfo, Madrid, España (2004)
- [8] Massaro, M., Lovato, S., “The optimal trajectory of road vehicles on straights” 2022 IEEE 61st Conference on Decision and Control (CDC), 1168-1173, Cancun, Mexico (2022)
- [9] McNamee, J.M., Pan, V.Y., “Chapter 7 - Bisection and Interpolation Methods”, *Studies in Computational Mathematics*, 16, 1-138 (2013)
- [10] Süli, E., Mayers, D.F., *An Introduction to Numerical Analysis*, Cambridge University Press (2003)