



# Mejora de modelo simplificado para la simulación de motocicletas de competición eléctricas

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

<sup>1</sup> Departamento de Construcción e Ingeniería de Fabricación, Universidad de Oviedo, noriegaalvaro@uniovi.es

<sup>2</sup> Departamento de Ingeniería Eléctrica, Electrónica, de Comunicaciones y de Sistemas, Universidad de Oviedo, georgiousramy@uniovi.es, navarroangel@uniovi.es, garciafpablo@uniovi.es, guerrero@uniovi.es

---

*En un trabajo anterior, los autores presentaron la herramienta SIMBIKE ELECTRIC, la cual permitía estimar las prestaciones globales, el consumo energético y los flujos de calor generados por los componentes eléctricos de una moto de competición eléctrica rodando en un circuito de velocidad. Esta herramienta utilizaba modelos muy simplificados tanto de la parte eléctrica y térmica como de la dinámica vehicular y estaba destinada a analizar de manera aproximada distintas configuraciones de geometría y puesta a punto básica de la motocicleta con el objetivo de optimizar su diseño y su uso.*

*Durante la validación experimental de la herramienta se apreciaron una serie de aspectos susceptibles de mejora como son el modelo de piloto utilizado, la trazada realizada, la existencia de peralte lateral en algunas curvas o la bajada de ciertas prestaciones conforme desciende el voltaje de la batería. En base a lo anterior, se ha desarrollado una nueva versión de la herramienta SIMBIKE ELECTRIC que incorpora cambios en la discretización de la trazada en sectores, incorporando distintos tipos de curvas, en la dinámica vehicular y el modelo de piloto a utilizar en los sectores tipo curva y en el modelo eléctrico para conseguir un ajuste mejor a los resultados experimentales.*

*Esta nueva versión se ha validado comparando los resultados de la simulación con los obtenidos por la motocicleta eléctrica del equipo de la Universidad de Oviedo en las pruebas dinámicas de la competición Motostudent Electric en el circuito de Motorland Aragón.*

---

## 1. Introducción

En [1] se presentó la herramienta SIMBIKE ELECTRIC para la simulación de una motocicleta eléctrica en un circuito de velocidad. Dicha herramienta utilizaba un modelo simplificado de la dinámica longitudinal de la motocicleta, de su batería y su tren de potencia, así como de la trazada que realiza en el circuito y del comportamiento del piloto. Dicho modelo se validó parcialmente con los datos recogidos del prototipo de moto eléctrica con el que la Universidad de Oviedo participó en la fase final de la VI edición de la competición internacional Motostudent, celebrada en 2021.

El análisis detallado de los resultados obtenidos por la simulación y su comparación con el comportamiento real observado han puesto de manifiesto las siguientes debilidades:

- La simulación es sensible a la trazada en planta. La trazada real se obtiene mediante un sistema de posicionamiento GPS incluido en el sistema de adquisición de datos de la motocicleta. Esta trazada representa buena parte de la información del circuito y del comportamiento del piloto en el mismo. Para poder desarrollar un modelo simplificado que pueda simularse de manera eficiente, la trazada se discretiza en sectores [2] con unos pocos parámetros constantes que caracterizan a cada sector, introduciendo un error respecto al comportamiento real observado.
- El modelo simplificado de paso por curva no es capaz de reflejar la complejidad del comportamiento real en este tipo de sector ya que se ha comprobado que hay distintos tipos de curvas y, además, el piloto cambia su forma de trazar de unas a otras. Como parte positiva, se ha observado que el piloto aporta repetibilidad en su comportamiento vuelta a vuelta siempre y cuando ruede solo y no tenga que cambiar su trazada al adelantar o ser adelantado o intentar proteger su posición.
- El modelo simplificado de piloto no considera que el piloto cambia su postura y posición sobre la moto de un sector a otro (no se coloca igual en el trazado de una curva que en una recta) e incluso dentro de un sector (en una recta, es distinta la posición en la zona de aceleración y en la de frenada). De hecho, considera la situación más eficiente a nivel de consumo que es que el piloto siempre está posicionado para tener la menor resistencia aerodinámica.

Además, teniendo en cuenta que el diseño general y la geometría de la motocicleta eléctrica con la que la Universidad de Oviedo participa en la competición Motostudent no han cambiado significativamente de una edición a otra y que el circuito y el piloto son los mismos, puede tomarse el comportamiento observado sobre motocicletas anteriores como referencia para desarrollar un modelo simplificado de paso por curva que genere menores errores que el propuesto en [1].

En este trabajo se propondrá una mejora del modelo simplificado de la herramienta SIMBIKE ELECTRIC que intente solventar las debilidades indicadas anteriormente y se aplicará a la motocicleta de competición eléctrica desarrollado por la Universidad de Oviedo para la VII edición de la competición Motostudent. Finalmente, se realizará su validación con el comportamiento observado durante la carrera de la fase final de dicha competición.

## 2. Datos conocidos para el modelo

Los datos conocidos de la motocicleta serán los que se indican en [1], introduciendo los siguientes cambios y modificaciones:

Motor eléctrico: se conocerá el momento de inercia de su rotor, su tensión nominal  $V_{max}$ , su par máximo  $T_{max}$ , su potencia máxima  $P_{max}$ , su velocidad de rotación máxima  $\omega_{max}$  y su eficiencia media aproximada  $\rho_{motor}$ . El par motor se mantiene constante mientras la velocidad de rotación del motor esté por debajo de la velocidad base normalizada y luego desciende manteniendo la potencia constante. El par y la velocidad base dependen del voltaje de la batería como se indica en [1]. Además, con el objetivo de alcanzar la distancia de carrera con la energía disponible en la batería, el par máximo admisible en el motor irá descendiendo proporcionalmente con el voltaje de la batería, haciendo que las prestaciones disminuyan de manera similar según la expresión (1):

$$T_{límite} = \left( \frac{T_{max} - T_{min}}{V_{max} - V_{min}} \right) \cdot (V_{batería} - V_{min}) + T_{min} \quad (1)$$

Batería: se considerará completamente descargada cuando le quede un 5% de su capacidad total.

Transmisión: está compuesta por dos etapas (engranajes de dentado recto y cadena) y se considerará que tiene una relación de transmisión  $i_{transmisión}$  constante y que su rendimiento aproximado  $\rho_{transmisión}$  también es constante. La relación de transmisión de la etapa por cadena se ha seleccionado para maximizar la capacidad de aceleración sin restringir significativamente la velocidad máxima alcanzable aunque esta deba alcanzarse con el motor girando a unas 6000 rpm, muy por encima de su velocidad base, en una zona subóptima en cuanto a eficiencia energética del motor y del convertidor.

Resistencias al avance: se considera conocido el coeficiente de penetración  $C_x$  y la superficie frontal  $S_{frontal}$  en tres situaciones diferentes: paso por curva, posición de velocidad máxima y en frenada.

En cuanto al modelo de circuito y de piloto, se considerará que la trazada de una vuelta se ha discretizado en sectores y que todas las vueltas se realizan por la misma trazada. En cada sector se conocerá la longitud del mismo ( $l_{sector}$ ) y su pendiente  $\theta$ . Adicionalmente, en función del tipo de sector, se conocerán datos adicionales que se explicarán más adelante.

### 3. Modelo simplificado para la simulación

#### 3.1. Reducción de la dinámica longitudinal

El modelo simplificado está basado en el propuesto en [1] pero se ha reformulado para realizar una integración del modelo de dinámica longitudinal en todos los sectores (en [1] solo se hacía en las rectas). Dicho modelo propone aproximar el movimiento longitudinal del centro de masas de la motocicleta a lo largo de la trazada al de una masa puntual equivalente sometida a una fuerza equivalente a todas las que actúan sobre la motocicleta original.

El cálculo de la masa equivalente (o reducida) se realiza igualando energías cinéticas y considerando la masa de la motocicleta y del piloto así como los momentos de inercia de las ruedas, del rotor del motor eléctrico y de la transmisión, dando lugar a la expresión (2), que toma un valor constante. Esta expresión es similar a la expresión de Cole mostrada en [3] pero con distintos coeficientes, al estar aplicada a una motocicleta.

$$m_{equivalente} = \left( 1,09096 + 0,0108 \cdot i_{transmisión}^2 \right) \cdot \left( m_{moto} + m_{piloto} \right) \quad (2)$$

En cuanto a la fuerza equivalente, se puede calcular como la suma de todas las fuerzas longitudinales que están aplicadas al conjunto motocicleta/piloto. Hay que recordar que en este modelo se desprecia el efecto de cabeceo de la motocicleta y, por eso, no se tiene en cuenta la altura a la que están aplicadas algunas de las fuerzas longitudinales, como la resistencia a la rodadura o la resistencia aerodinámica.

Una vez se dispone de la masa y la fuerza equivalentes, se puede aplicar la ecuación de Eksergian [4] y teniendo en cuenta que la masa equivalente es constante, dicha ecuación queda como se muestra en la expresión (3):

$$F_{tracción\_frenado} + F_{rodadura} + F_{aerodinámica} + F_{pendiente} = m_{equivalente} \cdot a \quad (3)$$

Siendo

$$F_{rodadura} = -f_{rodadura} \cdot \left( m_{moto} + m_{piloto} \right) \cdot g \cdot \cos \theta \quad (4)$$

$$F_{aerodinámica} = -\frac{1}{2} \cdot \rho_{aire} \cdot C_x \cdot S_{frontal} \cdot v^2 \quad (5)$$

$$F_{pendiente} = -\left( m_{moto} + m_{piloto} \right) \cdot g \cdot \sin \theta \quad (6)$$

La  $F_{pendiente}$  no puede calificarse como resistencia al avance en un sentido estricto ya que depende de si la pendiente es positiva (en este caso actúa como resistencia) o negativa (en este caso actúa como fuerza que impulsa a la motocicleta).

Si suponemos conocidas la posición y la velocidad de la motocicleta en un determinado instante, se puede integrar dos veces en el tiempo la aceleración obtenida de la expresión (3) para obtener el movimiento longitudinal de la motocicleta. Por sencillez operativa, se recurrirá a una duplicación de variables para convertir la ecuación diferencial de orden dos (3) en un sistema de dos ecuaciones diferenciales de orden uno como el mostrado en la expresión (7), el cual se puede integrar fácilmente mediante un método numérico.

$$\dot{\vec{s}} = \begin{bmatrix} v \\ a \end{bmatrix} = f(t, \vec{s}) = f\left(t, \begin{bmatrix} x \\ v \end{bmatrix}\right) \quad (7)$$

Dado que el problema tratado no tiene una naturaleza con discontinuidades (de manera natural, la posición y la velocidad de un sólido son continuas), se puede utilizar un integrador explícito de paso simple como el Runge-Kutta explícito de segundo orden [5].

Este integrador se implementa con una serie de modificaciones para adaptarlo a la naturaleza del problema. Para evitar que la integración genere un movimiento longitudinal hacia atrás (que sería irreal), cuando se detecte que la velocidad es negativa, se considerará cero de cara a su integración. Y la integración se llevará a cabo con un doble criterio de parada: que se haya llegado al final de un sector (cuya longitud es conocida) o que la velocidad sea nula.

### 3.2. Dinámica longitudinal en los sectores tipo 1 y 2 – Transición progresiva entre aceleraciones/deceleraciones intensas

Este tipo de dinámica es el que se observa en un sector situado entre dos tramos rectos en los que se produce una transición progresiva de aceleración a deceleración intensa o viceversa. Puede ser una curva o el punto de frenada en una recta. En este tipo de sector, se conocerán los siguientes datos provenientes de la altimetría del circuito y de la adquisición de datos realizada sobre la motocicleta simulada en el circuito en cuestión y en condiciones de carrera:

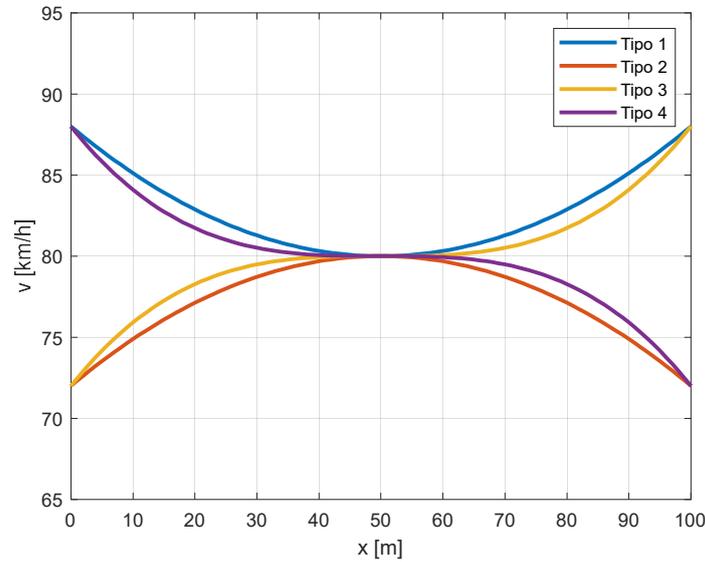
Longitud del arco de la curva ( $l_{sector}$ )

Pendiente ( $\theta$ )

Velocidad longitudinal en el punto de transición ( $v_{change}$ )

Parámetro C que caracteriza la variación de velocidad entre el inicio del sector y el punto de transición

Se supondrá que, en estos dos tipos de sectores, la velocidad sigue una expresión polinómica de grado 2 en función del espacio recorrido como la que se muestra en la Figura 1, estando situado el extremo local en la mitad de la longitud del sector. Si ese extremo es un mínimo de velocidad, se tratará de una curva mientras que si es un máximo, se tratará de un punto de frenada. La velocidad al inicio y al final del sector es la misma.



**Figura 1:** Ejemplo de variación de la velocidad en los sectores tipo 1 a 4.

La expresión de la velocidad en función del espacio recorrido será la indicada en la expresión (8):

$$v = a_1 \cdot x^2 + a_2 \cdot x + a_3 = g(t, x) \quad (8)$$

A partir de (8), se puede calcular en cada posición y velocidad, la aceleración longitudinal que está sufriendo la motocicleta, obteniendo la expresión (9):

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = (2 \cdot a_1 \cdot x + a_2) \cdot v \quad (9)$$

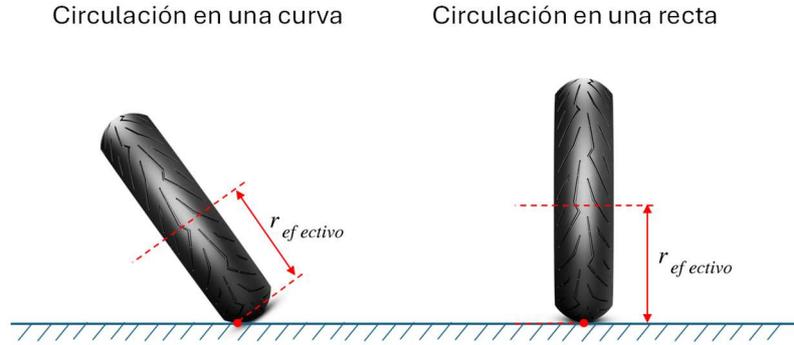
Para obtener el valor de las constantes de la expresión (8) hay que resolver el sistema de ecuaciones (10):

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ \frac{l_{sector}^2}{4} & \frac{l_{sector}}{2} & 1 \\ l_{sector}^2 & l_{sector} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 \pm \frac{C}{100}\right) \cdot v_{change} \\ v_{change} \\ \left(1 \pm \frac{C}{100}\right) \cdot v_{change} \end{bmatrix} \quad (10)$$

El parámetro C se establecerá en el rango  $[-100, +100]$  y podrá ser distinto en cada sector. Determina el aumento/descenso porcentual de velocidad que se produce hasta el punto de transición. La velocidad en el punto de transición y el parámetro C deben escogerse de manera que las velocidades en los extremos del sector sean coherentes con las alcanzadas en los sectores contiguos. Si C es positivo, se trata de una curva. Si C es negativo, se trata de un punto de frenada, como se muestra en la Figura 1.

Con (8) y (9) se puede llevar a cabo la integración de (7) hasta que se alcance o supere la longitud del sector. De esta integración, se podrá obtener, interpolando, la velocidad final y el tiempo que se tarda en recorrer el sector.

A partir de estos datos, en cada instante, se puede calcular de manera aproximada la velocidad de rotación de la rueda trasera. Como el radio efectivo de la rueda es variable con la inclinación, como se muestra en la Figura 2, el cálculo de la velocidad de rotación deberá ser aproximado con la expresión (11):



**Figura 2:** Ejemplo de variación de la velocidad en los sectores tipo 1 a 4.

$$\omega_{rueda} \simeq \frac{v}{r_{rueda\_trasera}} \quad (11)$$

Y conocida la velocidad de rotación de la rueda trasera y la relación de reducción de la transmisión total, se puede calcular la velocidad de rotación del motor con la expresión (12):

$$\omega_{motor} = \omega_{rueda} \cdot i_{transmisión} \quad (12)$$

Utilizando la ecuación de Eksergian se puede calcular la fuerza de tracción-frenado necesaria en cada instante de manera aproximada, con la expresión (13) y el par necesario en el motor con la expresión (14):

$$F_{tracción\_frenado} = m_{equivalente} \cdot a - F_{rodadura} - F_{aerodinámica} - F_{pendiente} \quad (13)$$

$$T_{motor} = \begin{cases} \text{si } 0 \leq a \rightarrow \frac{F_{tracción\_frenado} \cdot r_{rueda\_trasera}}{i_{transmisión} \cdot \rho_{transmisión}} \\ \text{si } a < 0 \rightarrow \frac{F_{tracción\_frenado} \cdot r_{rueda\_trasera} \cdot \rho_{transmisión}}{i_{transmisión}} \end{cases} \quad (14)$$

El valor de  $C_x \cdot S_{frontal}$  que se aplica dependerá de si C es positiva (caso de un paso por curva) o C es negativa (caso de un punto de frenada).

### 3.3. Dinámica longitudinal en los sectores tipo 3 y 4 – Transición entre dos curvas

Este tipo de dinámica es el que se observa en un sector de transición entre dos curvas contiguas. Se conocerán los mismos datos que para los sectores tipo 1 y 2.

Se supondrá que, en estos dos tipos de sectores, la velocidad sigue una expresión polinómica de grado 3 en función del espacio recorrido, estando situado un extremo de la aceleración en la mitad de la longitud del sector (implica un punto de silla en la velocidad). La expresión de la velocidad en función del espacio recorrido será la indicada en la expresión (15):

$$v = a_1 \cdot x^3 + a_2 \cdot x^2 + a_3 \cdot x + a_4 = g(t, x) \quad (15)$$

A partir de (15), se puede calcular en cada posición y velocidad, la aceleración longitudinal que está sufriendo la motocicleta, obteniendo la expresión (16):

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{dv}{dx} \cdot \frac{dx}{dt} = (3 \cdot a_1 \cdot x^2 + 2 \cdot a_2 \cdot x + a_3) \cdot v \quad (16)$$

Para obtener el valor de las constantes de la expresión (15) hay que resolver el sistema de ecuaciones (17):

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 \\ \frac{l_{sector}^3}{8} & \frac{l_{sector}^2}{4} & \frac{l_{sector}}{2} & 1 \\ 3 \cdot \frac{l_{sector}^2}{4} & 2 \cdot \frac{l_{sector}}{2} & 1 & 0 \\ l_{sector}^3 & l_{sector}^2 & l_{sector} & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} a_1 \\ a_2 \\ a_3 \\ a_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \left(1 \pm \frac{C}{100}\right) \cdot v_{change} \\ v_{change} \\ 0 \\ \left(1 \pm \frac{C}{100}\right) \cdot v_{change} \end{bmatrix} \quad (17)$$

El parámetro C se establecerá en el rango [-100,+100] y podrá ser distinto en cada sector. Determina el aumento/descenso porcentual de velocidad que se produce hasta el punto de transición. La velocidad en el punto de transición y el parámetro C deben generar unas velocidades en los extremos del sector que sean coherentes con las alcanzadas en los sectores contiguos. En el caso de un sector tipo 3, se trataría de dos curvas enlazadas en aceleración y en tipo 4, se trata de dos curvas enlazadas durante una deceleración.

Con (15) y (16) se puede llevar a cabo la integración de (7) hasta que se alcance o supere la longitud del sector. De esta integración, se podrá obtener, interpolando, la velocidad final y el tiempo que se tarda en recorrer el sector.

A partir de aquí, la dinámica es similar a la de los sectores tipo 1 y 2.

### 3.4. Dinámica longitudinal en el sector tipo 5 – Aceleración y frenada brusca en una recta

Este tipo de dinámica es el que se observa en un sector asimilable a una recta donde se genera una fase de aceleración intensa seguida de una fase de frenada intensa, con un cambio brusco entre ambas fases. En este tipo de sector se conocerán los siguientes datos:

Longitud del arco de la curva ( $l_{sector}$ )

Pendiente ( $\theta$ )

Se supone que en este tipo de sector la moto ya se mueve en un plano aproximadamente perpendicular al asfalto, con los neumáticos apoyando en su parte central y disponiendo entonces de su máxima adherencia. Esto puede ser aplicable tanto a un sector recto sin peralte lateral como en un sector curvo con peralte lateral suficiente para que la motocicleta pueda circular inclinada respecto a la vertical pero aproximadamente perpendicular al asfalto.

Se supone que la motocicleta inicia el sector a la velocidad final del sector previo y acelera al límite de lo que permite el motor y los neumáticos. En este proceso, dispondrá de un sistema anticaballito que evita que se levante la rueda delantera del suelo, para seguir disponiendo de dirección. Cuando la motocicleta llega al punto óptimo de frenada, frenará al límite de lo que permite la estabilidad, es decir, con la rueda trasera a punto de levantarse del suelo, ya que se ha comprobado que esta es la condición más restrictiva en la práctica [6].

Tras realizar estas dos fases (aceleración y frenada), la moto tiene que haber recorrido todo el sector y circular a la velocidad requerida al inicio del siguiente sector.

Los detalles de la formulación de ambas fases y de la obtención del punto óptimo de frenada se explican en [1].

### 3.5. Flujos de calor y voltaje de la batería

La estimación de los flujos de calor generados por los distintos componentes del tren de potencia es la explicada en [1]. En el caso del modelo de variación del voltaje con el estado de carga de la batería (SoC), es similar a presentado en [1] pero considerando que la energía mínima operativa de la batería es un 5% de su capacidad bruta.

## 4. Simulación y resultados

La metodología comentada se ha programado en Matlab R2024a para simular la carrera final de la categoría eléctrica de la VII edición de Motostudent. Esta carrera consiste en realizar seis vueltas al circuito de Motorland Aragón. Previamente se ha de realizar una vuelta de calentamiento y tras la carrera se realiza una vuelta de honor por el trazado corto. Para tener en cuenta este consumo energético, la carrera se iniciará con 7,1 kWh y 120 V en la batería y se ajustará la limitación de par con el voltaje (entre 120 y 60 N·m) para que se disponga de, al menos, un 5% de batería final para la vuelta de honor. El resto de las características de la motocicleta y sus componentes son las correspondientes al prototipo diseñado y fabricado por la Universidad de Oviedo para participar en dicha competición y no se detallarán en este trabajo por una cuestión de protección de conocimiento que es usado en una competición.

La definición del circuito empieza con un sector tipo 1 con velocidad cero en la parrilla de salida. La finalización de la carrera se hace con un sector tipo 5 y un sector tipo 1 con velocidad cero tras la primera curva del circuito.

El paso temporal utilizado para la simulación es de 0,01 s. La computadora utilizada dispone de un procesador Intel Core i5 11500 con CPU a 2.7 GHz, 16 Gb de RAM y sistema operativo Windows 10 Pro. La simulación requiere 67,76 s para llevar a cabo la simulación de aproximadamente 17 min de carrera, por lo que funciona un orden de magnitud por debajo del tiempo real.

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

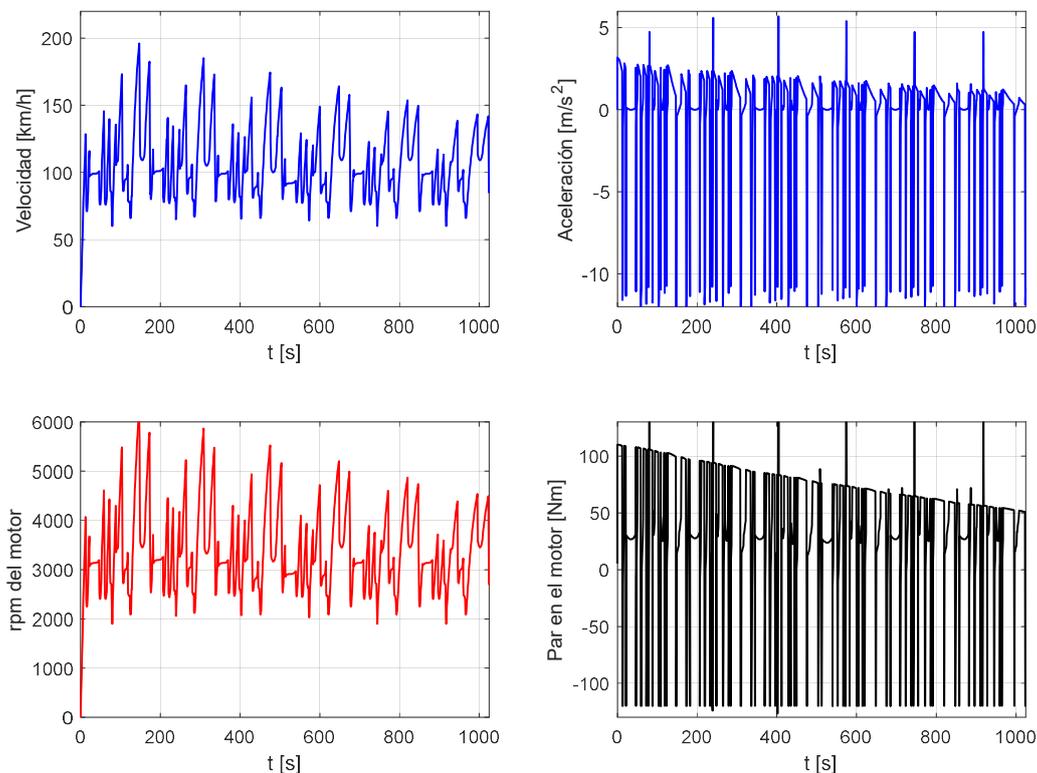
**Tabla 1:** Resultados de la simulación de la carrera final.

Concepto	Vuelta 1	Vuelta 2	Vuelta 3	Vuelta 4	Vuelta 5	Vuelta 6	Carrera
Tiempo [s]	174,86	162,69	167,84	171,05	172,37	175,66	1024,5
Veloc. Máx. [km/h]	196,09	185,24	174,4	164,32	153,79	143,30	196,09
Decremento energía batería [kWh]	1,3487	1,1513	1,0507	0,9635	0,9031	0,8304	6,2476
Voltaje inicial batería [V]	120,0	112,3	105,8	99,8	94,4	89,2	120
Voltaje final batería [V]	112,3	105,8	99,8	94,4	89,2	84,5	84,5

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 añade la distancia que hay desde la línea de meta hasta el final de recta.

En la Tabla 1 se puede observar que la vuelta rápida es la segunda vuelta de la carrera porque se hace lanzada y porque la batería tiene un SoC elevado. Esto es coherente con los resultados de cronometraje observados en otros equipos que participan en la competición.

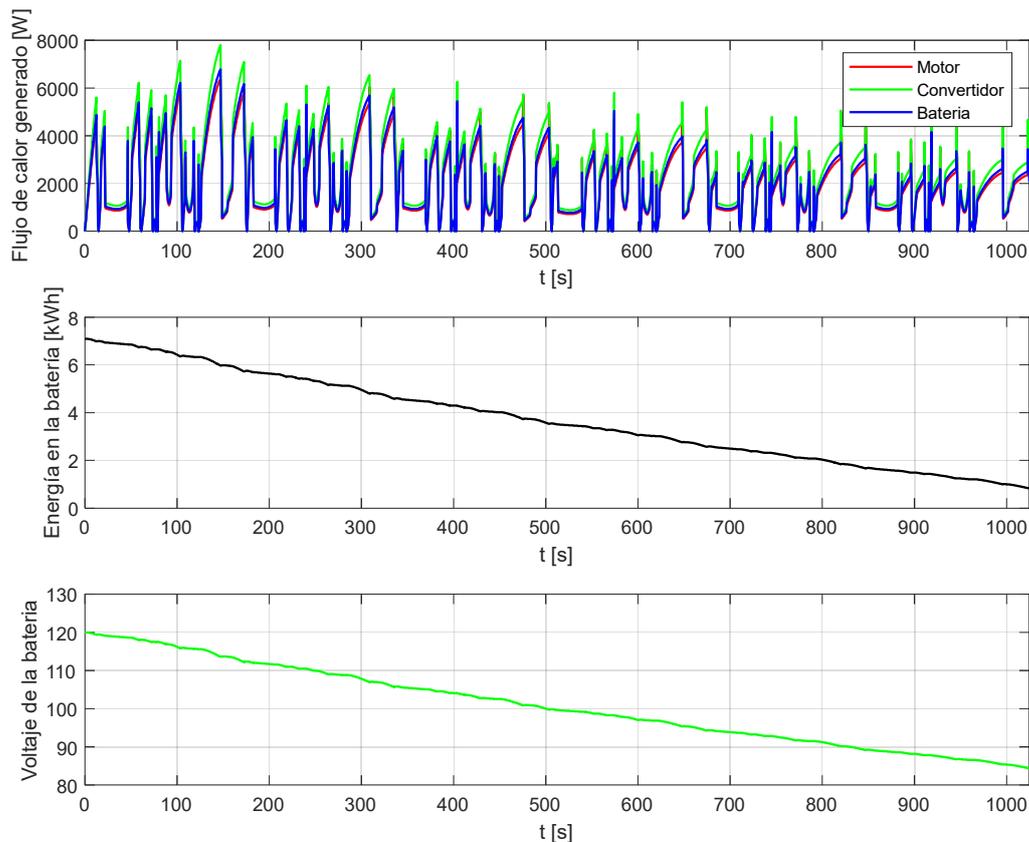
En la Figura 3 se puede observar la evolución de la velocidad y la aceleración de la motocicleta así como la velocidad de giro y el par en el motor eléctrico. Se puede observar que el desarrollo de la transmisión por cadena es corto con el objetivo de maximizar la aceleración a la salida de las curvas a costa de hacer trabajar el motor por encima de su velocidad base (4200 rpm a 100 V y con los valores nominales) en las rectas, situación en la que el motor y el convertidor son menos eficientes, lo que aumenta el consumo de energía por vuelta. La velocidad máxima se alcanza en la primera vuelta y se consigue con el motor girando a 6000 rpm.



**Figura 3:** Velocidad y aceleración de la motocicleta y velocidad de giro y par en el motor durante la simulación de la carrera.

En la Figura 4 se muestran los flujos de calor de los principales elementos del tren de potencia (batería, convertidor y motor) y los momentos en los que ocurren dichos flujos, lo cual permite dimensionar correctamente el sistema

de refrigeración de cada uno de estos elementos. Se observa que el dimensionamiento de la batería es correcto ya que conserva energía suficiente para realizar una vuelta más al circuito largo (no el de la vuelta de honor) al ritmo de la sexta vuelta, es decir, tiene capacidad sobrada para realizar la carrera al ritmo mostrado. Finalmente, el voltaje de la batería se mantiene entre los límites operativos que admiten las celdas (entre 126 V y 84 V).



**Figura 4:** Flujos de calor en los elementos del tren de potencia, SoC y voltaje de la batería durante la simulación de la carrera.

## 5. Validación con datos experimentales

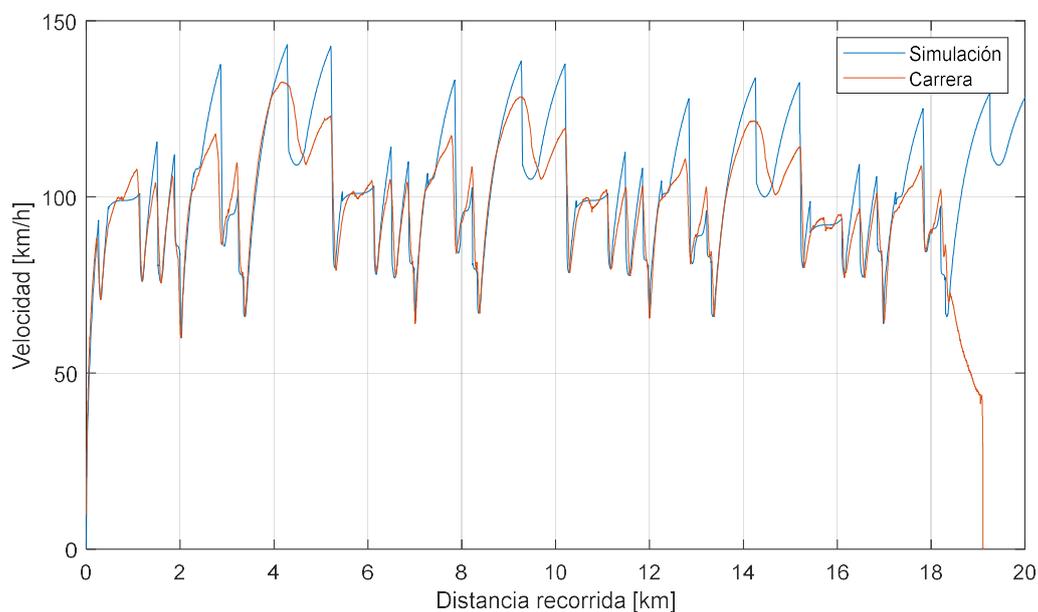
La validación del modelo se planificó para ser realizada sobre la motocicleta, construida por la Universidad de Oviedo para participar en la VII edición de la competición Motostudent, disponiendo esta de sus prestaciones máximas. En dicha motocicleta se había instalado un sistema de adquisición de datos AIM Solo 2 DL para tomar datos durante las distintas pruebas de la competición. Los días previos a la competición final, durante un chequeo rutinario, se dañó el convertidor de dicha motocicleta. Como no se disponía de un repuesto para dicho componente, se tuvo que adaptar sobre la marcha un convertidor con menores prestaciones (un 65% de la potencia y un 63% del par del convertidor original). El sistema de refrigeración del nuevo convertidor tampoco funcionaba de manera óptima de manera que, para conseguir un funcionamiento estable, se tuvo que ajustar para proporcionar una potencia máxima de 12 kW y un par máximo de 60 N·m.

Durante pruebas en el circuito se descubrió un problema de alineación entre los engranajes de la etapa primaria de la transmisión lo que hizo que su rendimiento bajara a aproximadamente un 80%. Además, esa desalineación generó una sobrecarga en el eje del motor, generando una rotura por fatiga de dicho eje al trabajar con una carga en punta mucho mayor de la recomendada por el fabricante del motor. Dicha rotura se produjo durante la cuarta vuelta de la carrera final por lo que solo se dispone de tres vueltas completas para comparar con los resultados de la simulación ajustados a la realidad comentada.

Se ha ajustado el modelo para que refleje los cambios indicados en el convertidor y en la transmisión.

En la Figura 5 se puede observar la comparación de los resultados de la simulación de la motocicleta con las prestaciones limitadas y los datos reales obtenidos durante las 3 primeras vueltas de la carrera. A nivel cualitativo, la simulación muestra un ajuste razonable en los sectores tipo curva. Las discrepancias más significativas aparecen en las zonas donde se realizan aceleraciones intensas durante un tiempo prolongado. Concretamente, en la zona de la curva 11 (entre los 2 y los 2,8 km, es virtualmente una recta) y en el sector del circuito compuesto por la recta

larga, las dos curvas enlazadas en subida y la recta de meta (entre los 3,3 y los 5,2 km). En estos sectores se aprecia como la aceleración simulada es más intensa que la real. Esto es debido a que el convertidor es el componente que marca el límite inferior de las prestaciones del tren de potencia, tanto por par, como por potencia, como por temperatura soportada. En la recta más larga, el convertidor está entregando su potencia máxima durante más de 20 segundos, lo que genera un flujo de calor, observable en la Figura 4, que se plasma en un aumento de temperatura, el cual desencadena una secuencia de control que genera una disminución progresiva de las prestaciones para autoproteger el convertidor (derating por temperatura). Este fenómeno se puede observar al final de la recta larga (4,1 km), donde no hay un cambio brusco de la velocidad, como sería esperable, sino que hay una reducción progresiva de la aceleración hasta que la velocidad se queda estancada. A partir de ese punto hay una reducción de la velocidad durante el trazado de las dos curvas enlazadas (4,6 km) pero menos intensa que una frenada. Se ha consultado con el piloto e indica que en esa zona él no reduce la carga de acelerador. Esto se ha confirmado con el dato de la consigna de par recogido por el sistema de adquisición de datos, que se mantiene constante en ese sector. Esa disminución de velocidad es debida a que al motor se le está exigiendo la potencia máxima y que la velocidad a la que está girando está por encima de la velocidad base, en la zona de potencia constante. Como el paso por esas curvas se realiza con la motocicleta muy inclinada, el radio efectivo de la rueda trasera se reduce significativamente (aproximadamente un 9% a 50° de inclinación respecto a la vertical). Entonces, para intentar mantener la velocidad de la motocicleta hasta el ápice de la trazada de las dos curvas enlazadas en subida, la rueda trasera y, como consecuencia, el motor, debe girar más rápido, lo que se traduce en una reducción del par disponible en la rueda trasera. Esta reducción produce una situación inestable que acaba desembocando en una situación de equilibrio a menor velocidad a pesar de que el piloto no reduce la carga de acelerador.



**Figura 5:** Comparación del resultado de la simulación y los datos de la carrera.

En la recta de meta (entre los 4,6 y los 5,2 km), la aceleración también es menos intensa de la esperada. En este caso también se debe al derating por temperatura, pero ocurre por debajo de la velocidad base, en la zona de par constante. Por esa razón, la moto sigue acelerando hasta el punto de frenada, en el que hay un cambio brusco a deceleración.

En los sectores posteriores a la curva de final de recta, la velocidad es baja y los sistemas de refrigeración son capaces de reducir la temperatura, recuperando la capacidad de aceleración original en cada vuelta.

Finalmente, también puede observarse que existe una bajada de prestaciones en las rectas con el paso de las vueltas conforme se va reduciendo la energía almacenada en la batería, y, como consecuencia, el voltaje de esta. Este fenómeno está bien capturado por el modelo aunque con el desfase debido el derating por temperatura explicado anteriormente.

**Tabla 2:** Comparativa de tiempos por vuelta.

Concepto	Vuelta 1	Vuelta 2	Vuelta 3
Simulación	174,86	162,69	167,84
Carrera	185,56	178,55	184,02
Error relativo (%)	-5,7	-8,9	-8,8

A nivel cuantitativo, se puede tomar el tiempo por vuelta como indicador de calidad del modelo y calcular el error relativo entre la simulación y la realidad. Los resultados pueden verse en la Tabla 2 y puede observarse que la simulación genera tiempos con un sesgo negativo (tarda menos en completar una vuelta en la simulación que en la realidad). La segunda y tercera vueltas, con el ritmo ya estabilizado, tienen errores relativos de, aproximadamente, un 9%, que además se mantiene constante.

Para estimar el ajuste de la simulación a la realidad y poder comparar esta versión del SIMBIKE ELECTRIC con la anterior, se puede calcular el error cuadrático medio en la segunda vuelta de la simulación con relación a la realidad y compararlo con ese mismo error calculado con la anterior versión y los datos de [1]. En la versión anterior, ese error cuadrático medio toma un valor de 827,9 mientras que, en la versión presentada en este trabajo, ese error es de 315,4.

## 6. Conclusiones

La herramienta SIMBIKE ELECTRIC se diseñó para poder simular de manera robusta y muy eficiente la dinámica multi-física de una motocicleta de competición eléctrica en un circuito de velocidad, con el objetivo de poder tomar decisiones rápidas sobre su diseño y configuración general cuando todavía no se dispone de un modelo detallado de la misma. En su primera versión ya se consiguió una alta eficiencia, siendo capaz de simular en un tiempo un orden de magnitud por debajo del tiempo real, pero se comprobó que el modelo simplificado no se ajustaba al comportamiento observado en la realidad en algunos sectores del circuito. En la versión de la herramienta presentada en este trabajo se ha mejorado la exactitud manteniendo sus características de simplicidad, robustez y eficiencia. La mejora ha sido muy clara en los sectores tipo curva mientras que en las rectas el error no ha descendido tanto respecto a la versión anterior de la herramienta. Esto se debe principalmente a la existencia de fenómenos, como el derating por temperatura, que no estaban contemplados en el modelo simplificado y que fueron causados por el cambio de convertidor en las pruebas reales.

Se han detectado tres puntos de mejora muy claros para futuras versiones de esta herramienta. El primero es la mejora del modelado eléctrico, térmico y de control del convertidor y la batería y su integración con el modelo dinámico, el cual ya parece estar suficientemente desarrollado. El segundo punto de mejora es la sensorización de los sistemas de refrigeración, para disponer de las temperaturas en distintos componentes, así como a la entrada y salida del agua de refrigeración de los mismos, para poder estimar el rendimiento de cada sistema de refrigeración. El tercer punto de mejora es el incremento de tests en circuito, en distintas condiciones de carrera, para disponer de más datos para validar la herramienta y estimar su exactitud y fiabilidad. Finalmente, también se podría considerar la dependencia del coeficiente de resistencia a la rodadura con la velocidad como se indica en [7].

## 7. Referencias

- [1] Noriega González A., Navarro Rodríguez A., García Fernández P., Georgious R., Guerrero J.M., “SIMBIKE ELECTRIC, una herramienta para la simulación de motocicletas de competición eléctricas”, *Revista Iberoamericana de Ingeniería Mecánica* **Vol 28, N° 2**, 3-15 (2024)
- [2] 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)
- [3] Luque, P., Alvarez, D., Vera, C., “*Ingeniería del automóvil. Sistemas y comportamiento dinámico*”, Ed. Paraninfo, Madrid, España (2004)
- [4] Eksergian, R., “Dynamical analysis of machines”, *Journal of the Franklin Institute* **209-4**, 503-531 (1930)
- [5] Süli, E., Mayers, David F., “*An Introduction to Numerical Analysis*”, Cambridge University Press, (2003)
- [6] Foale, T., “*Motocicletas. Comportamiento dinámico y diseño de chasis. El arte y la ciencia*”, Tony Foale Designs, España (2003)
- [7] Alcázar M., Pérez J., Carabias E., Cabrera J.A., Castillo J.J., Estimación de la resistencia a la rodadura en neumáticos mediante banco de ensayos de tracción-compresión. *XXIII Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica*, Jaén, España (2021)