



## Sobre el uso de simuladores de bajo coste para docencia en asignaturas de dinámica de vehículos

Igor Fernández de Bustos<sup>1</sup>, Iñigo Escanciano<sup>2</sup>, Haritz Uriarte<sup>2</sup>, Gaizka Gómez Escudero<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Ingeniería Mecánica, Universidad del País Vasco, [impfedei@ehu.es](mailto:impfedei@ehu.es), [gaizka.gomez@ehu.eus](mailto:gaizka.gomez@ehu.eus)

<sup>2</sup> Departamento de Expresión Gráfica y Proyectos, Universidad del País Vasco, [inigo.escanciano@ehu.eus](mailto:inigo.escanciano@ehu.eus), [haritz.uriarte@ehu.eus](mailto:haritz.uriarte@ehu.eus)

---

*En esta propuesta se desarrollan algunas ideas sobre el uso de simuladores de vehículos como herramienta para la docencia de asignaturas de dinámica de vehículos. El coste reducido de estas herramientas y la sorprendente cantidad de información que manejan a día de hoy permite aprovechar este tipo de software como recurso docente de gran interés.*

*En la industria del videojuego, existen dos tipos de productos relacionados con los vehículos. Los videojuegos, en los que se prima el entretenimiento por sí mismo, y los simuladores, que, manteniendo un interés lúdico, dan una gran importancia a la fidelidad de la simulación de los fenómenos mecánicos. De hecho, gran cantidad de los desarrolladores de este tipo de programas son ingenieros que aplican sus conocimientos de ingeniería de vehículos para llevar a término los algoritmos que representan el núcleo de estos programas. Así, es relativamente fácil encontrar simuladores en los que se modelizan con gran lujo de detalle el contacto rueda-firme (incluyendo los efectos térmicos), la entrega de potencia del motor, la cinemática de las suspensiones, la aerodinámica, y un larguísimo etcétera. Adicionalmente, es posible encontrar simuladores que dan datos de telemetría (en tiempo real y diferido) en formatos legibles por software de uso común en competición, y no simples imitaciones. Además, en simuladores de cierto éxito y antigüedad, aparece el fenómeno “modding” en el que una comunidad de usuarios (muchas veces con conocimientos y titulaciones de ingeniería) estudian los formatos de datos empleados por el software, a veces sorprendentemente simples, para poder añadir prestaciones a estos softwares.*

*Todos estos aspectos hacen de los simuladores comerciales una herramienta de gran interés para el estudio de la dinámica de vehículos. No sólo es posible aprovechar la simulación para que los alumnos, con un coste sorprendentemente reducido, puedan comprobar efectos tan avanzados como la diferencia de temperaturas en un neumático en función de la presión y los parámetros geométricos de la suspensión, ajustes en la caja de cambios, ..., sino que además se puede emplear la telemetría para realizar cálculos como la obtención de coeficientes aerodinámicos y otros.*

*En este trabajo se presentará un caso particular de aplicación, actualmente en fase de adaptación, en la Escuela de Ingeniería de Bilbao. Para ello se discutirá sobre la infraestructura necesaria, las características del software elegido y las razones de su selección, distintas demostraciones prácticas planteadas con los alumnos, información interesante que se puede extraer del software y otros aspectos.*

---

## 1. Introducción

La asignatura de dinámica de vehículos es una de las asignaturas que más atrae a los alumnos a los grados y másteres de Ingeniería Mecánica. La gran repercusión de competiciones automovilísticas y motociclísticas de todo tipo hace que los contenidos de esta asignatura sean muy populares entre el alumnado. Sin embargo, es una asignatura que presenta un problema considerable, que es el enorme coste económico que puede suponer intentar dar un enfoque práctico a la misma que a la vez mantenga el atractivo. Efectivamente, el alto coste de sistemas de telemetría, la necesidad de un circuito cerrado y otros condicionantes de seguridad hacen que poder hacer que los alumnos experimenten los fenómenos relacionados con la dinámica de vehículos en un entorno real sea algo que la mayoría de las universidades no pueden afrontar. Esto lleva a que la muchas veces la parte práctica de estas asignaturas se pueda limitar a el visionado de maquetas de componentes de vehículos y sus componentes, lo que es muy didáctico, pero poco atractivo para el alumnado. En la asignatura de automóviles que se imparte en la Escuela de Ingeniería de Bilbao, se ha hecho un esfuerzo para intentar paliar este problema mediante el uso de simuladores de bajo coste.

En la industria del videojuego, existen dos tipos de productos relacionados con los vehículos. Los videojuegos, en los que se prima el entretenimiento por sí mismo, y los simuladores, que, manteniendo un interés lúdico, dan una gran importancia a la fidelidad de la simulación de los fenómenos mecánicos. En los primeros aspectos visuales como la velocidad de marcos en renderizado o aspectos de entretenimiento como que la complejidad del vehículo no sea excesiva priman sobre la fidelidad de la simulación. Por otro lado, en los simuladores puros se sacrifica jugabilidad por realismo en la simulación. De hecho, gran cantidad de los desarrolladores de este tipo de programas son ingenieros que aplican sus conocimientos de ingeniería de vehículos para llevar a término los algoritmos que representan el núcleo de estos programas, que suelen estar fuertemente basados en dinámica de sólidos. Así, es relativamente fácil encontrar simuladores en los que se modelizan con gran lujo de detalle el contacto rueda-firme (incluyendo los efectos térmicos), la entrega de potencia del motor, la cinemática de las suspensiones, la aerodinámica, y un larguísimo etcétera. Adicionalmente, es posible encontrar simuladores que dan datos de telemetría (en tiempo real y diferido) en formatos legibles por software de uso común en competición, y no simples imitaciones. Dentro de este último tipo de simuladores, se pueden distinguir dos tipos: los que emplean empresas para ajuste de sus vehículos. Un caso claro aparece en los equipos de fórmula 1 donde el simulador es, hoy en día, una pieza clave para su competitividad, y los dedicados al público en general. Estos últimos muchas veces son incluso más complejos técnicamente hablando que los de las empresas, pero carecen de datos de la calidad de los que pueden conseguir las empresas de automoción. Sin embargo, la calidad de estos simuladores no es para nada desdeñable. Además, en este tipo de simuladores, cuando son de cierto éxito y antigüedad, aparece el fenómeno “modding” en el que una comunidad de usuarios (muchas veces con conocimientos y titulaciones de ingeniería) estudian los formatos de datos empleados por el software, a veces sorprendentemente simples, para poder añadir prestaciones a estos softwares.

Todos estos aspectos hacen de este tipo de simuladores comerciales una herramienta de gran interés para el estudio y docencia de la dinámica de vehículos. Por un lado, es posible aprovechar la simulación para que los alumnos, con un coste sorprendentemente reducido, puedan comprobar efectos tan avanzados como la diferencia de temperaturas en un neumático en función de la presión y los parámetros geométricos de la suspensión, ajustes en la caja de cambios, deriva,... Pero también emplear la telemetría para realizar cálculos como la obtención de coeficientes aerodinámicos y otros.

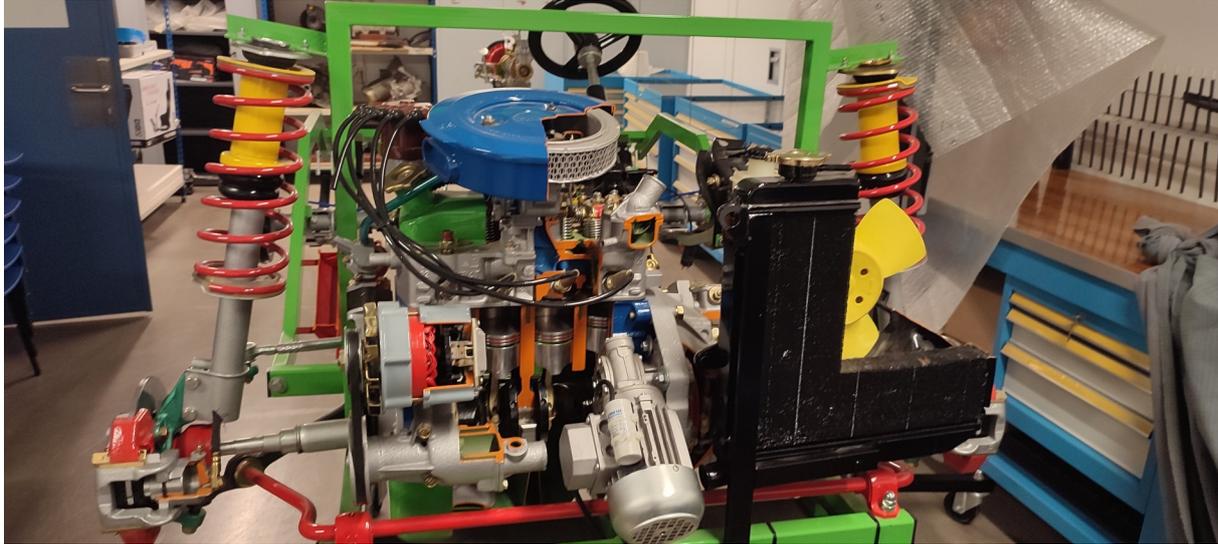
La idea de emplear este tipo de simuladores en docencia no es nueva, aunque en la mayoría de los casos se circunscribe a aplicaciones de enseñanza a conductores. Sin embargo, se pueden encontrar referencias a proyectos en los que se aplican tanto a enseñanza de conductores y ingenieros de vehículos ([1]) y, muy poco frecuentemente, exclusivamente a docencia en ingeniería de vehículos ([2]). Una aplicación interesante se realizó en la Universidad politécnica de Madrid, que desarrolló su propio software de simulación para emplearlo como apoyo en tareas de formación (SIMDIVE).

En este documento se pretende mostrar un ejemplo de aplicación de este tipo de tecnología a la docencia de la asignatura de automóviles impartida en la Escuela de Ingeniería de Bilbao. Para ello se explicará la situación de partida que llevó a este desarrollo. Posteriormente se comentará el montaje que se ha desarrollado con un coste muy reducido, incluyendo el razonamiento que llevó a esa disposición particular, después se comentaran algunos de los muchos fenómenos que se pueden demostrar a los alumnos con el sistema, se harán unos comentarios preliminares sobre la percepción por parte del alumnado del proyecto (obviamente son poco concluyentes ya que ha sido un primer año con un grupo reducido de alumnos) y se sacarán algunas conclusiones e ideas de cara al futuro.

## 2. La asignatura de automóviles en la Escuela de Ingeniería de Bilbao

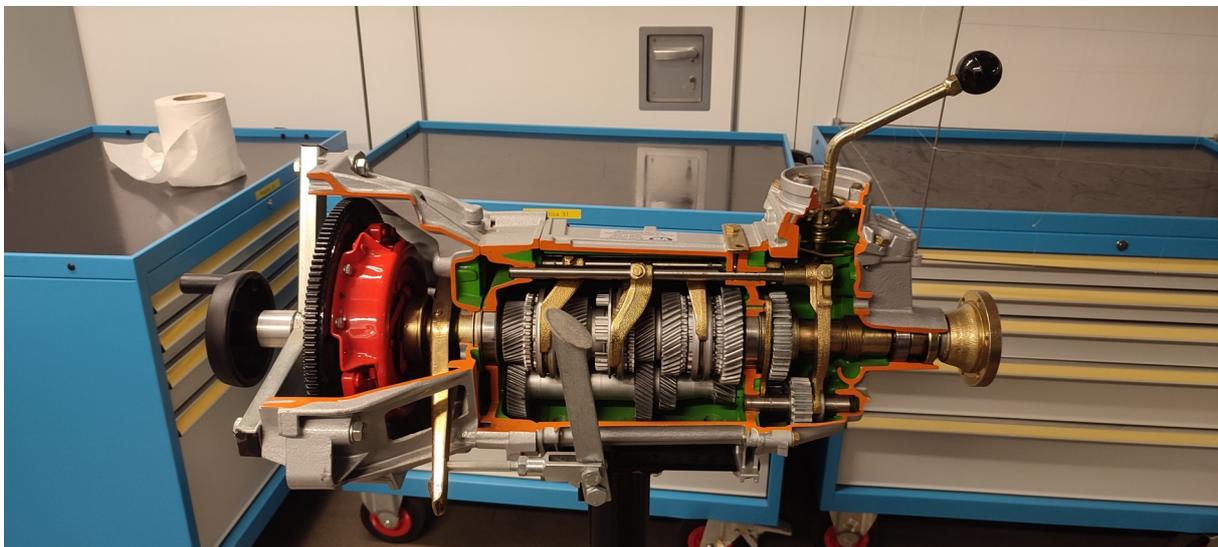
La asignatura de automóviles en la Escuela de Ingeniería de Bilbao está actualmente compartida en dos másteres. El primero de ellos es el Máster de Ingeniería Industrial y en este Máster se incluye en la optatividad de la

especialidad de Ingeniería Mecánica. Es una asignatura de 2º de Máster. El otro Máster es el de Ingeniería Mecánica, en la que es una asignatura también optativa. Es una asignatura con bastante antigüedad, ya existía también en los planes de estudios anteriores. Hasta ahora, la asignatura se daba con un formato bastante tradicional, lo que no se indica aquí en sentido negativo. De hecho, el profesorado de la asignatura había conseguido una cantidad de medios bastante considerable para impartir la asignatura, tales como maquetas de demostración de componentes y subsistemas de vehículos y había desarrollado apuntes y otro soporte docente de elevada calidad. Este material se pretende seguir empleando, y lo que se presenta en este documento es un complemento adicional.



**Figura 1:** Maqueta de vehículo diseccionado

El cambio más fundamental que se planteó para esta asignatura radica en el hecho de que se pretendía incidir más en la dinámica de vehículos y menos en los componentes y subsistemas del mismo, que pasaban a ser comentados como condicionantes en la dinámica del vehículo. Es aquí donde reside el gran interés de emplear un simulador para trabajar estos conceptos.



**Figura 2:** Maqueta de caja de cambios incluyendo embrague

Sin embargo, evidentemente el comportamiento de estos subsistemas tiene una influencia decisiva en el comportamiento dinámico del vehículo, y es por ello por lo que este material sigue teniendo una importancia fundamental en la estructuración de la asignatura.

### 3. Alternativas posibles

Obviamente existen alternativas que pueden servir como apoyo a la docencia en este tipo de asignaturas. Una idea interesante es el uso de maquetas en las que se puede observar fenómenos como el undesteering o el understeering e incluso prototipos a radio control. En caso de disponer de suficientes medios se podría plantear incluso el disponer de un vehículo real instrumentado, aunque obviamente esto implica también la necesidad de

un espacio suficientemente grande como para poder hacer las demostraciones con él. Otra opción es la adquisición de un montaje completo. Se pueden encontrar simuladores en el mercado completos por precios cercanos a los 3000 euros. El problema es que estos suelen estar orientados al ocio y por ello incluyen pocas posibilidades de modificación y obtención de datos de telemetría. Esto implicaría que habría que dedicar un coste adicional a readaptarlos a esta aplicación.

## 4. Montaje a nivel de hardware y software

Uno de los condicionantes fundamentales de este proyecto era el coste. La mayoría de los montajes de simuladores de vehículos en universidades están orientados a la investigación, lo que lleva a requisitos técnicos muy importantes y, por lo tanto, a costes muy elevados. Sin embargo, el objetivo del sistema que se deseaba llevar a cabo no implicaba un gasto tan elevado. Para llevar a cabo la selección de los componentes se hizo un estudio aproximado de las posibilidades, incluyendo los aspectos relativos al software y al hardware. Comenzaremos por los factores de interés a la hora de elegir el software.

### 4.1. A nivel de software (simulador)

Los requisitos básicos a nivel de software son los siguientes:

- Tiene que ser un software de simulación, no debiéndose primar la jugabilidad
- Tiene que ser de un coste razonable
- Tiene que tener cierta capacidad de acceso a datos y modificación

En base a estas consideraciones, se plantearon los siguientes alternativas:

- Project Cars 2
- GTR2
- rFactor 2
- iRacing
- Asseto Corsa

En la tabla siguiente se resumen costes y otros aspectos importantes de cada candidato:

**Tabla 1:** Aspectos a considerar en cada software y adecuación

Software	Project Cars 2	GTR2	rFactor 2	iRacing	Asseto Corsa
Coste	15 Euros	7,80 Euros	28,99	14,99/mes	19,99
Fiabilidad estimada en simulación	Media/Alta	Alta	Alta	Muy Alta	Alta
Telemetría	Posible con SRT, 9,99 euros adicionales. Buena	Con Motec. Excelente	Con Motec, Un poco complicada, Excelente	Con ATLAS. Excelente, requiere licencia	Posible con SRT, 9,99 euros adicionales. Buena
Modificación/ Obtención de parámetros más allá de setups	Buena	Muy buena	Buena	Imposible	Muy buena

De estas alternativas, iRacing presenta el problema de ser un software de suscripción. Esto presenta dos inconvenientes. El primero es que hace depender de una conexión de red el funcionamiento del software, y no parece razonable hacer depender la docencia de la estabilidad de una conexión de red (aunque actualmente es extremadamente difícil que esto cause un problema). El segundo es que hay que gestionar los pagos de esta suscripción, lo cual en una universidad es una carga burocrática adicional nada deseable. Por otro lado, la posibilidad de acceder a datos y modificar en iRacing es inexistente. Esta última razón es la que nos hizo descartarlo desde el principio.

El Project Cars 2 es gráficamente una maravilla. Sin embargo, no está considerado como un software de simulación puro (aunque dependiendo de la revisión la fidelidad mejora mucho). Junto al hecho de que no permite extraer telemetría a un programa convencional, es la razón por la que se desechó.

El Asseto Corsa está considerado como uno de los mejores simuladores del mercado, y tiene gran capacidad de modificación, lo que hace que sea una opción bastante interesante. En este caso es la falta de capacidad de sacar datos de telemetría a un software de telemetría convencional la razón por la que se decide prescindir de él. Algo similar sucede con rFactor 2.

Es este motivo (la telemetría) por la que se decide optar por GTR2. El GTR2 es un software muy antiguo, pero se hizo en la época en la que Motec permitía alimentar su software de telemetría (el i2) con datos de terceros, y esto es algo que aprovecharon los desarrolladores del GTR2 (Simbin) para poder alimentar al i2 con los datos de telemetría del propio simulador. Esto permite trabajar con el simulador en combinación con un software de telemetría profesional, lo que a su vez da un mayor realismo e interés. Adicionalmente, la antigüedad del software hace que este se pueda adquirir por un precio irrisorio, menos de 8 euros. Adicionalmente, se ha incluido la modificación GTR2 16th anniversary patch v16.0.16, creada por aficionados. Esta modificación mejora considerablemente el programa a nivel gráfico y de simulación, aparte de incluir soporte para realidad virtual. También se ha incluido el conocido como Power and Glory Mod, que permite emplear coches clásicos en el simulador, con modelización de neumáticos antiguos.

#### *4.2. A nivel de software de apoyo*

Aparte del simulador en sí mismo, y como ya se ha comentado, interesa también disponer de la telemetría. Los softwares de telemetría habituales (como Motec i2 o Aim RaceStudio) son de uso gratuito, y los beneficios se derivan de que sólo funcionan con los dispositivos de datalogging del mismo fabricante. Sin embargo, en sus inicios, Motec permitía el uso de su i2 con datos tomados del exterior. Junto con el hecho de que Simbin adquirió la licencia de Motec para el uso de i2 con GTR2, nos permite emplear este software para analizar el comportamiento del vehículo en la simulación. Es más, también permite que los alumnos se lleven la telemetría a su casa y la analicen.

Por otro lado, otro factor de interés es el poder extraer los datos del comportamiento del vehículo en tiempo real. Para ello se puede emplear el sistema SimHub. SimHub es un software que en su versión más simple es gratuito y se puede mejorar mediante la compra de una licencia y que permite ver, en tiempo real, los parámetros del comportamiento del vehículo extraídos de distintos simuladores (entre los cuales está el GTR2).

El coste de todo este software es cero, ya que es gratuito.

#### *4.3. A nivel de hardware*

Si bien se trata de minimizar los costes lo máximo posible, existen varios componentes en la simulación que no son prescindibles. Lo más básico es el conjunto volante-pedales. Existen distintas gamas que se pueden emplear en simulación. Por un lado están los “juguetes”, que no dejan de ser un potenciómetro accionado por un dispositivo mecánico, y, a partir de ahí, se puede llegar al otro extremo, que son los volantes de simulación de gran calidad (y coste), como el Ascher-Racing McLaren Artura Ultimate (de precio superior a 1500 euros). Aquí los requisitos estaban bastante claros. Se requería un conjunto que tuviese un sistema de realimentación de fuerza, pero de gama media. Para ello se tenía un presupuesto aproximado de unos 400 euros. Con esto se optó por un Thrustmaster T300RS GT, aunque había otras alternativas como los Logitech G923 a precio similar. Adicionalmente, se introdujo un asiento de simulación de coste bajo (Playseat Evolution).

Respecto al monitor, y con el objetivo de mantener el presupuesto limitado, se optó por una pantalla de televisión antigua de la que se disponía en el propio departamento. En realidad la idea original era emplear realidad virtual pero, por suerte, se consideró tener un monitor por si acaso la realidad virtual daba problemas. Como gafas de realidad virtual también se optó por gama media (unas Meta Quest 3s). La idea de emplear unas gafas de realidad virtual es que, por un lado, mejora mucho la simulación, dado que proporciona al usuario sensación de velocidad. Por otro lado, es siempre interesante desde el punto de vista de imagen, que desgraciadamente empieza a ser demasiado importante.

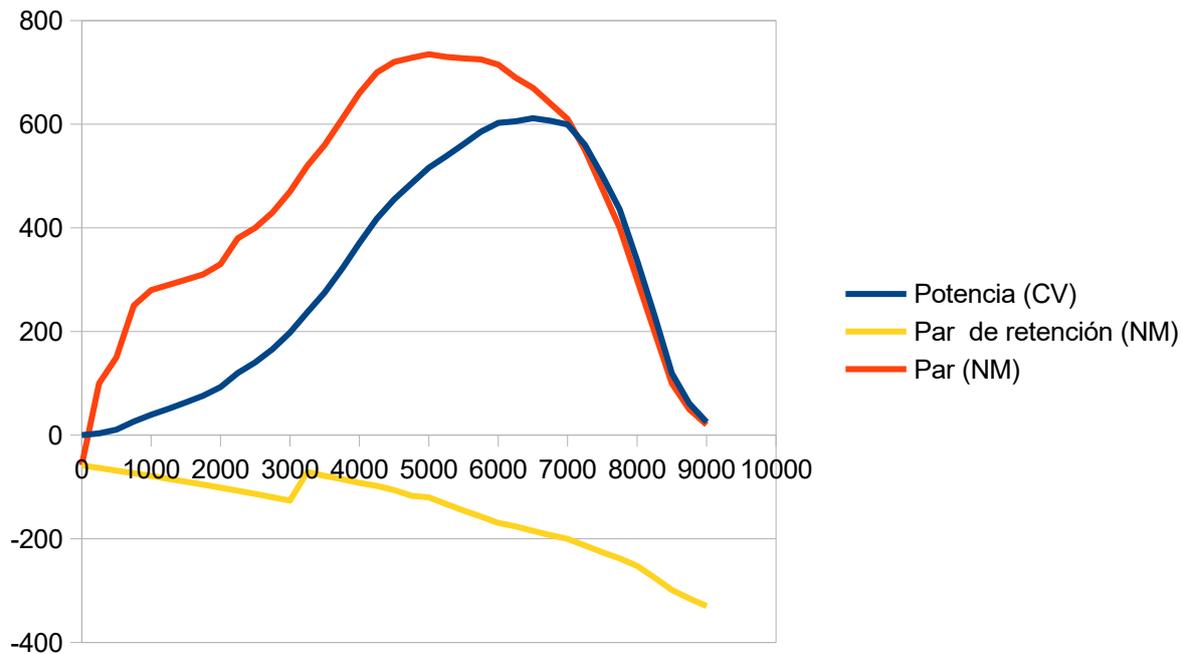
Por último, el empleo del GTR2 permitió el empleo de un portátil de gama media como ordenador para correr la simulación. Ya solo faltaba un sistema de red que pudiera establecer las conexiones pertinentes entre ordenador y gafas de realidad virtual, para lo que se empleó un punto de acceso AX1500 con un coste de menos de 30 euros.



**Figura 3:** El simulador en una de sus primeras pruebas

Con todo esto, el coste total del simulador, incluyendo realidad virtual, no excede de los 2500 euros, incluyendo el coste que representaría comprar elementos de los que ya se disponía y que se han aprovechado. A cambio, se tiene un montaje muy extensible con unas prestaciones sorprendentes:

- Telemetría en diferido: Empleando directamente Motec i2, que es un software que se emplea en competición. Si bien es una versión antigua, tiene prestaciones similares a las modernas. Adicionalmente, es fácil bajarse plantillas de análisis de datos que incluyen cálculos como el sobreviraje y subviraje.
- Telemetría en tiempo real: empleando SimHub, que es un software muy configurable con el que es fácil, por ejemplo, visualizar no solo cosas básicas como revoluciones por minuto o velocidad, sino también cosas tan avanzadas como la temperatura de los neumáticos, y todo esto en tiempo real.
- Gran cantidad de vehículos, circuitos y posibilidad de simularlos en distintas condiciones meteorológicas.
- Datos. Este es, probablemente el aspecto más importante. Casi todos los datos del software se configuran mediante archivos de texto, muchos de los cuales son sorprendentemente sencillos de interpretar. No solo eso, también se pueden modificar, permitiendo cambiar las condiciones de comportamiento de los vehículos. Con esto incluso se puede afrontar tareas de diseño con los alumnos. Hasta ahora se han podido obtener y modificar, entre otros:
  - Desarrollos de las cajas de cambios. Lo que permite plantear a los alumnos la tarea de optimizar el set de cambios de un vehículo para distintas condiciones.
  - Curvas de par motor y retención del mismo. Esta información se puede emplear para, por ejemplo, enseñar a los alumnos a obtener datos mediante telemetría. Un ejemplo se verá más adelante.
  - Curvas características de los neumáticos. En el caso de los simuladores se suelen emplear tablas de datos que dan los coeficientes de rozamiento en función del ángulo de deriva o de la relación de deriva. Estas tablas están, para los distintos neumáticos, tabuladas en modo texto. Si bien seguramente no son datos con una muy alta precisión, si son más que suficientes para trabajar con ellos a nivel docente.



**Figura 4:** Curva de potencia y pares de un Ferrari F575 extraídas de los datos tabulados en los archivos de configuración

Un detalle que muestra el esfuerzo que en su día se dedicó al desarrollo del simulador se puede ver en la curva de potencia y par del Ferrari F575. Se puede observar un salto en el par de retención. El salto existe realmente, y es debido a que el F575 tiene dos conductos de admisión distintos para bajas y altas revoluciones.

## 5. Algunos ejemplos de fenómenos fácilmente demostrables con el sistema

En realidad, una de las cosas que más ha sorprendido en este proyecto es que, cada vez que se intentaba aplicar el sistema a un problema nuevo, se descubría que las posibilidades son mucho mayores de lo que inicialmente se esperaba. Se van a plantear un par de ejemplos de aplicación muy simples y a la vez interesantes.

### 5.1. Cálculo de coeficiente aerodinámico

La primera aplicación que se planteó fue el cálculo del coeficiente aerodinámico de arrastre mediante una prueba en circuito. Esta es una prueba de coste bajo que se suele hacer en circuito en vehículos reales [3,4].

La idea es hacer que el vehículo alcance la velocidad máxima que es capaz de desarrollar. Si se dispone de la curva de potencia y par del vehículo, y la pendiente del circuito en ese punto, los cálculos son muy sencillos dado que la aceleración del vehículo es nula. Habitualmente en estas condiciones la resistencia a la rodadura es despreciable, y se tiene:

$$\frac{1}{2} \rho U^2 A C_d + Mg \operatorname{sen}(\theta) = \frac{P}{V} \quad (1)$$

Siendo:

$\rho$  la densidad del aire a la temperatura de la prueba.

$U$  la velocidad del aire respecto del vehículo.

$A C_d$  el producto de la sección del vehículo multiplicada por el coeficiente aerodinámico. Es el objetivo del cálculo.

$M$  la masa del vehículo.

$g$  la aceleración de la gravedad.

$\theta$  la pendiente del firme.

$P$  la potencia del vehículo en el momento de velocidad máxima.

$V$  la velocidad del vehículo en el momento de velocidad máxima ( $U = U_0 - V$ ), siendo  $U_0$  la velocidad el aire.

Para poder hacer esta prueba en el simulador, era recomendable tener un circuito con una recta muy larga y, a ser posible, sin pendiente. Por ello se eligió el circuito de Valencia. Adicionalmente, interesaba un vehículo con unas prestaciones limitadas, por lo que se eligió el Abarth 1000, un vehículo clásico que afortunadamente está disponible en el simulador gracias a modificaciones realizadas por usuarios.

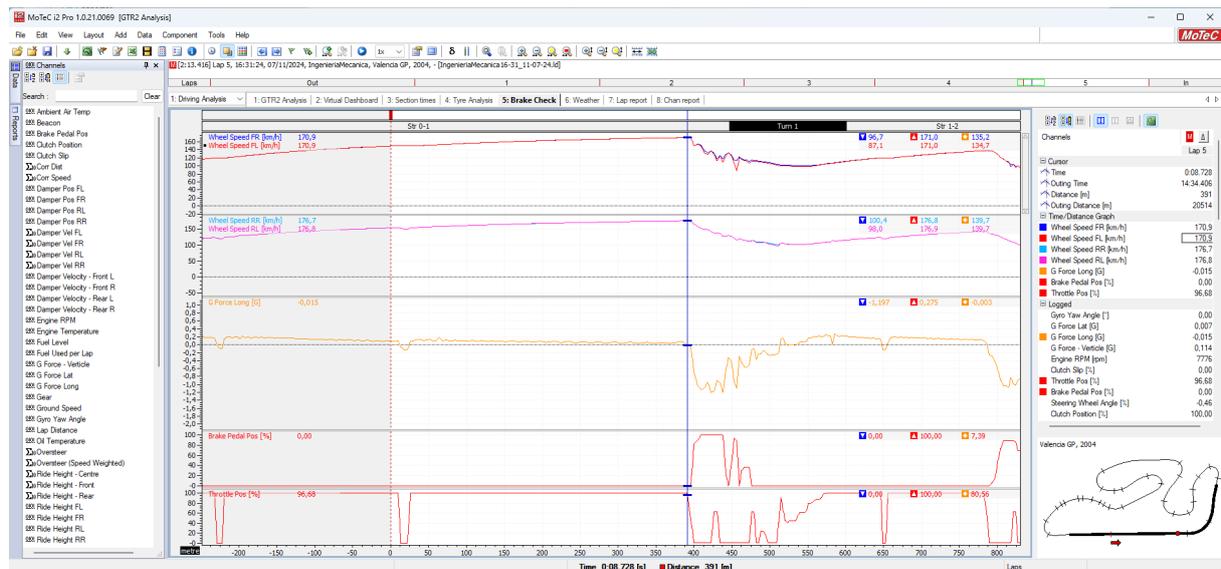


Figura 5: Telemetría de la prueba realizada por los alumnos.

En la telemetría se puede observar como la velocidad máxima es de 170 km/h. Un detalle interesante para mostrar a los alumnos es que si se observa la velocidad medida en las ruedas traseras, esta es de 176 km/h. La diferencia es debida a que las ruedas traseras son las de tracción. Nuevamente, se ve que la calidad de la simulación es considerable.

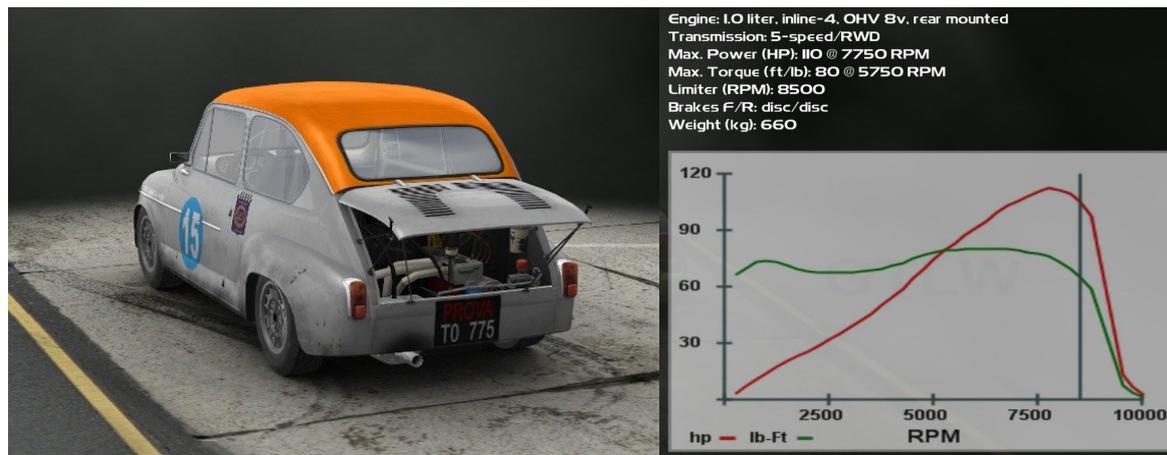


Figura 6: Abarth 1000 y especificaciones según el simulador

Con todo esto, los alumnos pueden llevarse a casa la telemetría de la sesión y hacer los cálculos.

### 5.2. Influencia de la transferencia de masas en el sobreviraje y subviraje

En este caso se desea que los alumnos observen como la transferencia de pesos afecta al sobreviraje y subviraje. Nuevamente se ha elegido el circuito de Valencia para este ejemplo, entre otras cosas porque se quería que los alumnos ya lo conocieran de la sesión anterior. En este caso el coche elegido es un Lotus Elan. Nótese que se opta siempre por vehículos con carácter deportivo, pero con prestaciones limitadas. La razón es sencilla. Se quiere que participen la mayor cantidad posible de alumnos, y si se elige un coche con excesivas prestaciones, resulta difícil hacer que todos los alumnos sean capaces de controlarlo a un nivel razonable.



Figura 7: Lotus Elan simulado en el circuito Ricardo Tormo de Valencia.

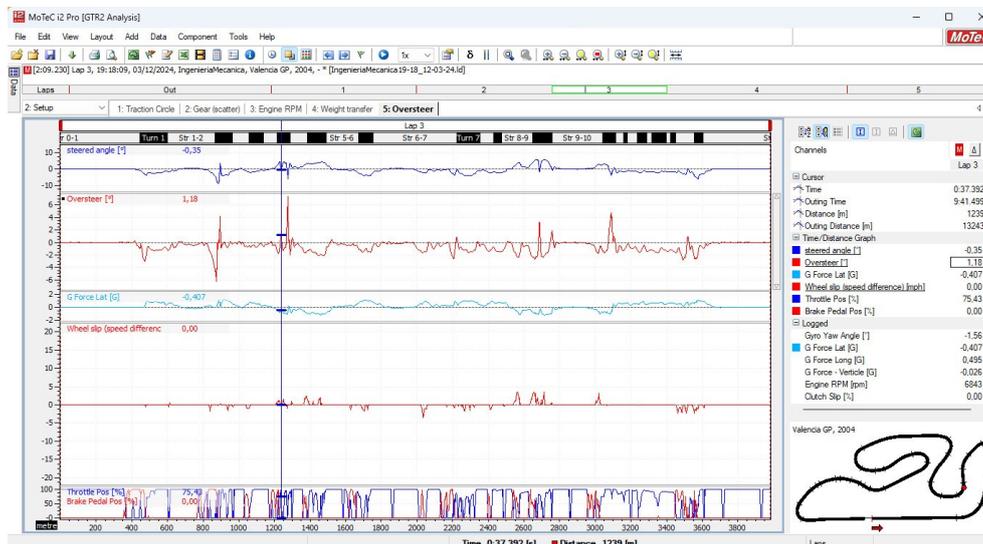


Figura 8: Análisis del sobreviraje y subviraje

En este caso, no se planteó que los alumnos hicieran ningún cálculo, dado que el interés residía en que vieran el efecto no sólo en el comportamiento del vehículo, sino también en la telemetría.

## 6. Aceptación por parte del alumnado

Con los datos actualmente disponibles, resulta bastante complicado hacer un análisis realista del interés que ha suscitado el proyecto en los alumnos. Esto es debido fundamentalmente a que el número de alumnos en la asignatura el primer año ha sido muy reducido. Esto ha sido causado por el hecho de que es una asignatura que se imparte en el Máster de Ingeniería Industrial y el Máster de Ingeniería Mecánica, pero un cambio en el calendario del Máster de Ingeniería Industrial ha hecho que este año únicamente se haya impartido en Ingeniería Mecánica.

En cualquier caso, se consiguió que prácticamente todos los alumnos probaran el sistema. Un hecho inesperado ha sido el que ninguno de los alumnos quisieron probarlo con la realidad virtual. Tras hablarlo con algún alumno resultó que era debido a que les provocaba vergüenza que sus compañeros les vieran con las gafas puestas. Sin embargo, este es un problema menor, ya que en el fondo el empleo de realidad virtual en este caso realmente tiene más un interés aparente que técnico. Por otro lado, pruebas realizadas por algún docente han llevado a que en algunos casos los usuarios se mareaban con su uso.

Tras consultar con los alumnos, la opinión general es que el sistema les gustó mucho. Esto era predecible, pero siempre suscita la duda de si lo que les gustó es andar con el simulador, el hecho de que la clase es más llevadera o que realmente aprendieron algo. Para hacer una comprobación, en el examen se plantearon varias preguntas relativas a fenómenos que se describían en las prácticas con el simulador. Estas preguntas se resolvieron con éxito en más de un 80% de los casos, lo que parece indicar que, efectivamente, el sistema ayuda a fijar conceptos en el alumnado.

Analizando prueba por prueba, la simulación de la obtención de coeficientes aerodinámicos resultó bastante entretenida para los alumnos, ya que requería conseguir que el coche consiguiera la velocidad máxima en la recta, para lo que había que salir de la última curva del circuito lo más rápido posible. Esto hizo bastante entretenida la clase, ya que algunos de los alumnos tenían dificultad para conseguirlo. La parte de los cálculos la hicieron fuera de clase, para lo que se les facilitó la telemetría de las pruebas realizadas.

Respecto al efecto de la transferencia de pesos en sobreviraje y subviraje, sí que dió la impresión (que también se constató en el examen) de que la mayoría de los alumnos entendieron el fenómeno de forma correcta.

## 7. Conclusiones y líneas futuras

El uso de simuladores de bajo coste es un complemento sorprendentemente eficaz para complementar cualquier asignatura que incluya contenidos de dinámica de vehículos. Estos simuladores de origen comercial incluyen simulaciones extremadamente detalladas que permiten que el alumno visualice el comportamiento de un vehículo en distintas condiciones. Además, permite realizar cambios no sólo en los ajustes típicos que se pueden realizar en un vehículo de competición, sino también en factores de diseño como el reparto de masas o geometría de las suspensiones. Esto ahorra, por un lado, el enorme coste que puede suponer acudir con los alumnos a un circuito de pruebas y, por el otro, el tiempo necesario para realizar los cambios deseados para poder ver su influencia en el vehículo. Evidentemente, se paga el precio de que no es una experiencia real para los alumnos, pero se puede plantear conseguir lo mejor de ambos mundos combinando una visita a circuito con varias sesiones de simulador.

El simulador permite que los alumnos visualicen de forma considerablemente fiel fenómenos como el sobreviraje y subviraje, la influencia de los cambios en la aceleración, el comportamiento de distintos tipos de neumáticos, el cálculo experimental de parámetros como el coeficiente de fricción aerodinámica y muchos más. De momento se han desarrollado 2 casos particulares que, además, se han probado con éxito con los alumnos.

El coste del simulador implementado por los profesores es un coste perfectamente asumible para una asignatura de este tipo, y permite además hacer mejoras a largo plazo. El primer año de aplicación del simulador, si bien no permite hacer un estudio serio de la influencia del sistema en la formación de los alumnos, si permite ser bastante optimista respecto a la aceptación por parte del alumnado.

Un aspecto preocupante es el que algunos alumnos presentan cierta reticencia a que sus compañeros vean como manejan el simulador. Si bien esto no ha representado un gran problema en este curso, es un aspecto a vigilar e intentar paliar. El problema es que hacer prácticas individualizadas es imposible. Quizá una solución de compromiso resida en la división en pequeños grupos de unos 10 alumnos.

En los exámenes de la asignatura se incluyeron algunas preguntas a las que se daban respuesta en las prácticas. El resultado en estas preguntas fue notablemente mejor que en las demás, aunque el tamaño no estadísticamente relevante de muestra hace que este análisis no sea concluyente.

En cuanto a líneas futuras, es fundamental hacer un estudio de la efectividad de la herramienta. Para ello se quiere plantear el desarrollo de un sistema de tests que permita evaluar el impacto del sistema en el aprendizaje de los alumnos. Obviamente, esto implicaría la realización de los tests en unos grupos después de la teoría y antes de la práctica y en otros a posteriori, con lo que será necesario varios años para poder obtener resultados representativos. Otro aspecto importante es extender el número de prácticas para incluir, por ejemplo, ajustes de setup, cambios en la geometría de las suspensiones, fenómenos como el bump steering...

## 8. Agradecimientos

Los autores quieren agradecer al departamento de ingeniería mecánica en general y al máster en ingeniería mecánica en particular por el apoyo económico a este proyecto. También quiere agradecer a todos los aficionados a los simuladores que han trabajado en las modificaciones del software por su trabajo desinteresado.

## 9. Referencias

- [1] Hulme, K.F.; Schiferle, M.; Lim, R.S.A.; Estes, A.; Schmid, M. Incorporation of Modeling, Simulation, and Game-Based Learning in Engineering Dynamics Education towards Improving Vehicle Design and Driver Safety. *Safety*, 7, 30 (2021). <https://doi.org/10.3390/safety7020030>

- 
- [2] Sawyers, M. W.; Mousseau, C. W.; Gillespie, T.D. Using simulation to learn about vehicle dynamics. *International Journal of Vehicle Design* 29 (1/2) (2002) <https://doi.org/10.1504/IJVD.2002.002004>  
[DOI:10.1504/IJVD.2002.002004](https://doi.org/10.1504/IJVD.2002.002004)
- [3] Cossalter, V. *Motorcycle Dynamics*, 2<sup>nd</sup> Edition. Ed. Lulu. 2006
- [4] Gillespie, T.D. *Fundamentals of Vehicle Dynamics*. SAE International, 1992