

# MODELADO Y CARACTERIZACIÓN DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO UTILIZANDO MATLAB

LA UNIÓN EUROPEA HA ESTABLECIDO EL OBJETIVO 20/20/20 A TRAVÉS DE LA DIRECTIVA 2012/27/UE, QUE CONTEMPLA REDUCIR EN UN 20% LAS EMISIONES DE GASES DE EFECTO INVERNADERO, OBTENER EL 20% DE LA ENERGÍA DE FUENTES RENOVABLES Y AUMENTAR UN 20% LA EFICIENCIA ENERGÉTICA. UNA DE LAS ACCIONES RECOMENDADAS PARA COLABORAR CON EL CUMPLIMIENTO DE ESTE TRIPLE OBJETIVO SERÍA LA INTRODUCCIÓN PAULATINA EN EL PARQUE AUTOMOVILÍSTICO DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO, POR LOS MOTIVOS QUE SE EXPONEN A CONTINUACIÓN:

- Las emisiones equivalentes por km recorrido del vehículo eléctrico son menores que las de los vehículos convencionales.
- La electricidad obtenida de la red incluye paulatinamente una mayor aportación de las fuentes renovables.
- La eficiencia de los motores eléctricos es mayor que la de los motores de combustión interna.

Casi la mitad de la energía consumida a nivel mundial se extrae de los combustibles fósiles y suponen la fuente más utilizada en el transporte. El vehículo eléctrico permite reducir la dependencia de estos combustibles que en ocasiones se encuentran en zonas geopolíticas conflictivas y que sufren frecuentes variaciones en su precio de venta. Además, utilizar la electricidad en el sector del transporte permitiría aprovechar también recursos locales, como las fuentes de energías renovables, que se encuentran disponibles en todo el planeta.

Pero para lograr este objetivo aún hay camino por recorrer. La integración del vehículo eléctrico en el sistema energético actual se enfrenta a una serie de retos que hay que superar: informar y sensibilizar a los potenciales conductores sobre la capacidad y autonomía de este tipo de vehículos, mejorar la infraestructura asociada añadiendo paulatinamente puntos de recarga en toda España y sobre todo en las grandes ciudades como Madrid y Barcelona, y avanzar en la estandarización y normalización de los sistemas de gestión de la recarga y del pago.

El uso del vehículo eléctrico se asocia a menudo al concepto de ciudad inteligente. Uno de los objetivos de este concepto consiste en gestionar de manera conjunta las redes eléctricas inteligentes y la movilidad inteligente, para facilitar de esta forma un entorno urbano sostenible.

En este artículo se describe el desarrollo de un modelo de vehículo eléctrico realizado mediante el software Matlab y su validación a partir de un vehículo eléctrico operando en condiciones reales. Este modelo tiene la función de analizar el comportamiento del vehículo cuando realiza un trayecto, con el objetivo de avanzar en los retos mencionados anteriormente. Asimismo, se prevé que dicho modelo se integre en una plataforma de simulación de una microred completa desarrollada por técnicos del Departamento de Integración en Red de Energías Renovables de CENER, denominada CeMOS® y

# USING MATLAB TO MODEL AND CHARACTERISE AN ELECTRIC VEHICLE

THE EUROPEAN UNION'S DIRECTIVE 2012/27/EU HAS ESTABLISHED THE 20/20/20 TARGET THAT AIMS TO REDUCE GREENHOUSE GAS EMISSIONS BY 20%; OBTAIN 20% OF ENERGY FROM RENEWABLE SOURCES; AND INCREASE ENERGY EFFICIENCY BY 20%. ONE OF THE RECOMMENDED ACTIONS TO COLLABORATE IN ACHIEVING THIS TRIPLE OBJECTIVE WOULD BE THE GRADUAL INTRODUCTION OF THE ELECTRIC VEHICLE INTO THE AUTOMOTIVE STOCK, FOR THE REASONS SET OUT BELOW:

- Equivalent emissions per km travelled by an electric vehicle are lower than those of conventional vehicles.
- The electricity obtained from the grid gradually includes an increased contribution from renewable sources.
- Electric motors are more efficient than internal combustion engines.

Almost half the energy consumed worldwide comes from fossil fuels and these are the most widely-used source in transportation. The electric vehicle can reduce dependency on these fuels that are often located in areas of geopolitical conflict and that suffer from frequent sales price fluctuations. Moreover, the use of electricity in the transport sector would also make better use of local resources, such as sources of renewable energy that are available all over the globe.

But there is still a long way to go before this target is achieved. The integration of the electric vehicle into the current energy system is facing a series of challenges that must be overcome. These include: providing information and raising awareness among potential drivers regarding the capacity and range of this type of vehicles; improving their associated infrastructure by gradually adding charging points all over Spain, above all, in large cities such as Madrid and Barcelona, and making progress towards standardising and regulating charging and payment management systems.

The use of the electric vehicle is often associated with the concept of the smart city. One of the objectives of



que permite el análisis técnico y económico de sistemas de generación distribuida completos, basados fundamentalmente en energías renovables.

### Descripción del modelo

El modelo que plantea CENER consta de 3 bloques principales que simulan el proceso de tracción del vehículo. En dichos bloques, a partir de las entradas del modelo (velocidad del vehículo y perfil del trayecto) se obtiene como resultado la variación del estado de carga (SoC-state of charge) del pack de baterías, una vez conocido el SoC inicial y la capacidad del pack.

En el primer bloque se calculan los fenómenos relativos a la dinámica del vehículo y a la transmisión. Las fuerzas que se tienen en cuenta son: aceleración, rozamiento, gravitacional y resistencia aerodinámica. Por otro lado, la transmisión es la encargada de transmitir el par del motor a las ruedas y proporcionar la fuerza de tracción necesaria, que en cualquier caso debe ser superior a la suma de todas las anteriores para que el vehículo tenga una aceleración positiva.

En el segundo bloque se agrupan el motor eléctrico y el inversor. El motor es el que proporciona un par y una velocidad angular a la transmisión y el inversor es el encargado de alimentar el motor a partir de la corriente que obtiene del pack de baterías. El motor eléctrico trabaja también como freno regenerativo, lo que le permite recuperar energía durante las frenadas.

Por último, el tercer bloque describe el comportamiento de la batería, que es la responsable de proporcionar la corriente al inversor variando su estado de carga.

Adicionalmente se ha realizado una ampliación del modelo que simula la carga del vehículo cuando se conecta a un punto de recarga. Gracias a que se ha realizado esta acción, puede integrarse en la plataforma de simulación CeMOS® y servir como un elemento más en el diseño y gestión de las microrredes.

### Análisis de los resultados

El vehículo dispone de un sistema de geolocalización mediante GPS que a su vez transmite sus principales parámetros, como son: la tensión media de celda, el SoC del pack de baterías, la corriente de salida del pack de baterías y su temperatura, la posición del



Las simulaciones permiten complementar el trabajo de los ensayos | The simulations are a good complement to the testing activity

this concept comprises the integrated management of smart electrical grids and smart mobility, so as to help create a sustainable urban environment.

This article describes the development of an electric vehicle model carried out by using Matlab software and its validation based on an EV operating under real conditions. The function of this model is to analyse the behaviour of the vehicle when it does a trip, with the aim of making progress as regards the abovementioned challenges.

The model was also designed to be integrated into a simulation platform of a complete microgrid developed by technicians from the Renewable Energy Grid Integration Department at CENER, called CeMOS®, thereby resulting in a technical and economic analysis of complete distributed generation systems, essentially based on renewable energies.

### Description of the model

The model proposed by CENER consists of 3 main blocks that simulate the vehicle's traction process. In each block, based on the model input (vehicle speed and trip profile) the outcome obtained is the variation in the state of charge (SoC) of the battery pack, once the initial SoC and the capacity of the pack are known.

The first block calculates the phenomena relating to the vehicle's dynamics and transmission. The forces taken into account are: acceleration, friction, gravitational and aerodynamic resistance. The transmission is responsible for transmitting the torque of the motor to the wheels and providing the necessary traction force, which in any event has to be higher than the sum of all the above forces so that the vehicle has positive acceleration.

The second block groups together the electric motor and the inverter. The motor provides torque and an angular speed to the transmission and the inverter is responsible for powering the motor with the current obtained from the battery pack. The electric motor also works as a regenerative brake, allowing it to recover energy when braking.

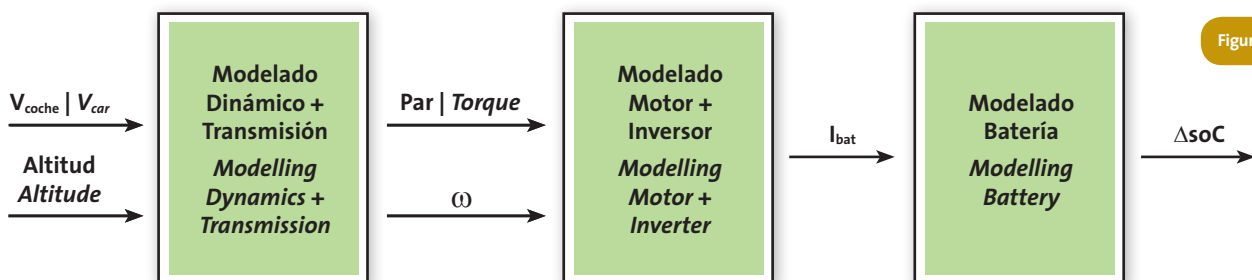


Figura 1 | Figure 1

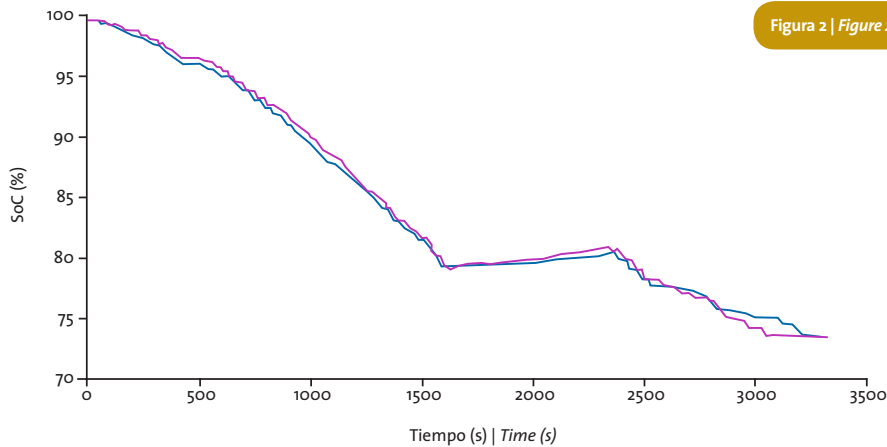


Figura 2 | Figure 2

Lastly, the third block describes the behaviour of the battery, which is responsible for providing current to the inverter, varying its state of charge.

In addition, an extension of the model was undertaken to simulate the vehicle charge when connected to a charging point. Thanks to this task having been carried out, the model can be integrated into the CeMOS® simulation platform and serves as one further element in the design and management of microgrids.

### Analysis of the results

vehículo, etc. Este sistema de adquisición tiene una frecuencia de muestreo de 5 segundos.

El modelo se ha validado con un vehículo eléctrico propiedad de CENER, para lo que se han realizado distintos trayectos que representan el uso cotidiano de un vehículo particular: montaña, interurbano y urbano. En la Figura 2 se muestra la variación del SoC (estado de carga) a lo largo del trayecto de montaña, donde la curva azul representa el proceso de descarga del pack de baterías en el caso real, mientras que la curva morada representa la simulación.

Como se puede observar en la Figura 2 la descarga real no dista mucho de la descarga simulada, con un error inferior al 1%. El recorrido comienza en una zona de subida pronunciada, seguida de un descenso en el que queda reflejada la aportación del freno regenerativo, dado que es capaz de recuperar parte de la energía proveniente de las frenadas.

A modo de resumen, en la siguiente tabla se recogen los datos calculados para los diferentes recorridos realizados:

The vehicle offers a GPS geolocation system that in turn transmits its main parameters, such as: the average battery voltage, the SoC of the battery pack, the output current from the battery pack and its temperature, the vehicle's position, etc. This acquisition system has 5-second sampling frequency.

The model has been validated with an electric vehicle owned by CENER, for which different trips were carried out representing the daily use of a private vehicle: mountain, interurban and urban. The Figure 2 shows the SoC variation along the mountain section, in which the blue curve represents the discharge process of the battery pack in the real situation, while the violet curve represents the simulation.

As the Figure 2 shows, the actual and simulated discharges are almost the same, with an error of less than 1%. The trip starts off in an area with a steep climb, followed by a descent that reflects the contribution made by the regenerative brake, given that it is capable of recovering part of the energy generated from braking.

To summarise, the table sets out the information calculated for different types of trips made.

Trayecto Trip	Montaña Mountain	Interurbano Interurban	Urbano Urban
Distancia (km)   Distance (km)	31,4   31.4	52,6   52.6	31,9   31.9
Velocidad media (km/h)   Average speed (km/h)	33,9   33.9	58,9   58.9	17,3   17.3
Variación del SoC (%)   SoC variation (%)	26,4   26.4	39,4   39.4	30,9   30.9
Error acumulado (%)   Accumulated error (%)	0,4   0.4	2,0   2.0	1,6   1.6
Energía regenerada (kWh)   Regenerated energy (kWh)	1,12   1.12	1,02   1.02	1,88   1.88
Consumo total (kWh)   Total consumption (kWh)	6,06   6.06	9,18   9.18	7,15   7.15
Consumo (kWh/100km)   Consumption (kWh/100 km)	19,3   19.3	17,5   17.5	22,4   22.4
Duración del trayecto   Journey duration	55m 40s   55m 40s	53m 35s   53m 35s	1h 51m 10s   1 hr 51m 10s

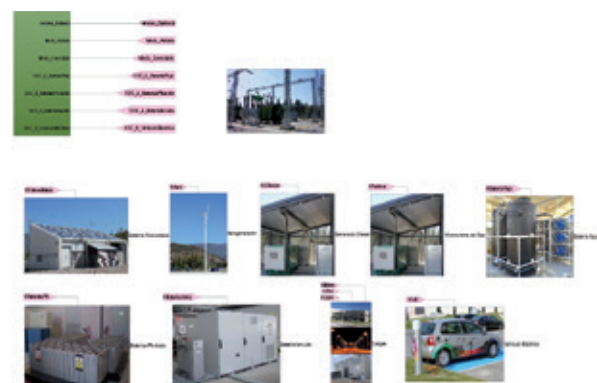
Tal y como muestra la tabla, el freno regenerativo es un elemento muy importante del vehículo eléctrico, porque permite un ahorro de energía significativo en los tres casos. El trayecto urbano es el más beneficiado por el uso de esta tecnología, dado que en este tipo de conducción las variaciones de velocidad son más frecuentes. En ausencia del freno regenerativo, durante el trayecto urbano el coche habría consumido 9,03 kWh, aumentando un 26% el consumo total.

La parte del modelo correspondiente al proceso de carga ha sido también validada con el vehículo eléctrico real.

### Principales conclusiones del estudio

El trabajo desarrollado tiene en cuenta variables como la pendiente de los trayectos, la eficiencia del motor eléctrico y la frenada re-

El modelo del vehículo eléctrico se integrará en la plataforma CEMOS de CENER | The model of the electric vehicle will be integrated in CENER's CEMOS platform





As the table shows, the regenerative brake is a very important element of the EV, because it results in significant energy saving in all three cases. The urban trip benefits the most from using this technology, given that in this type of driving, speed variations are the most frequent. In the absence of the regenerative brake during the urban run, the car would have consumed 9.03 kWh, increasing total consumption by 26%.

The part of the model corresponding to the charging process has also been validated by the real EV.

### Main conclusions of the study

The work developed takes into account variables such as the gradient of the trips undertaken, the efficiency of the electric motor and the regenerative braking. As a

result, the simulations obtain results that are close to the actual behaviour of a vehicle with minimal error.

The flexibility of the model must be highlighted due to its ability to adapt to all types of electric cars that use lithium-ion batteries by simply changing the characteristics parameters of the battery and the vehicle. Moreover, it can carry out an analysis of the total energy consumed and regenerated during the trip, and as such is able to calculate the average consumption in kWh/100 km.

This model becomes a very useful tool when establishing different energy management strategies for smart grids in which the electric vehicle is present, given that it offers a high level of flexibility thanks to its ability to adjust the most important parameters to take into account including: battery capacity, initial SoC adjustment and the different trips that users would like to make. The model is integrated into the CENER-developed CeMOS® simulation platform that uses the Matlab programming language.

As an additional application, this simulation model can be used as a basis to develop a route planning tool for EV users, providing a map that displays the closest charging points and as such, outlining itineraries and guaranteeing that the electric vehicle has sufficient range at all times to reach its destination without a hitch.

The development of EV simulation models such as the one described in this article help promote their use among users as they minimise drivers' concern as regards their range and availability. Furthermore, the simulations help introduce improvements to electric vehicles that aim to

prolong their useful life and enhance their performance, thus promoting the transition towards more efficient mobility and respect for the environment.

generativa, por lo que las simulaciones consiguen resultados que se aproximan al comportamiento real de un vehículo con un error mínimo.

Hay que destacar la flexibilidad del modelo por su capacidad de adaptarse a todo tipo de coches eléctricos que utilicen baterías de Ion-Li, simplemente cambiando los parámetros característicos de la batería y del vehículo. Además, permite realizar un análisis de la energía total consumida y regenerada durante el trayecto, pudiendo calcular de esta forma el consumo promedio en kWh/100 km.

Este modelo pasa a ser una herramienta muy útil a la hora de establecer diferentes estrategias de gestión de la energía en redes inteligentes en las que se encuentre presente el vehículo eléctrico, dado que dispone de una amplia flexibilidad gracias a que permite ajustar los parámetros más importantes a tener en cuenta, como son: la capacidad de la batería, el ajuste del SoC inicial y los diferentes trayectos que se quieran realizar. El modelo está integrado en la plataforma de simulación CeMOS®, desarrollada por CENER, que utiliza el lenguaje de programación Matlab.

Como aplicación adicional, este módulo de simulación puede ser utilizado como base para desarrollar una herramienta de planificación de rutas de viaje para usuarios de vehículos eléctricos, ya que se mostrarán en un mapa los puntos de recarga más cercanos y por lo tanto se pueden trazar itinerarios que aseguren que en todo momento el vehículo eléctrico dispondrá de autonomía suficiente para poder llegar a su destino sin contratiempos.

El desarrollo de modelos de simulación de vehículos eléctricos como el presentado en este artículo, contribuyen a fomentar su uso entre los usuarios, ya que reducen la incertidumbre de los conductores en cuanto a su autonomía y disponibilidad. Además, las simulaciones facilitan introducir mejoras en los vehículos eléctricos que tienen por objeto alargar su vida útil y mejorar sus prestaciones, favoreciendo de esta manera la transición hacia una movilidad más eficiente y respetuosa con el entorno.

Iñigo Pacheco, Gabriel García, Sindia Casado & Raquel Garde

Dpto. de Integración en Red de Energías Renovables  
de CENER-Centro Nacional de Energías Renovables  
Renewable Energy Grid Integration Department at CENER –  
Spain's National Renewable Energy Centre.