

Modelado de Vehículo Eléctrico en un Trayecto Típico de la Ciudad de Quito

Clairand J.*; Vera J.**

*Universidad de las Américas, Facultad de Ingeniería y Ciencias Agropecuarias, Quito, Ecuador

e-mail: jean.clairand@udla.edu.ec

**Agro ParisTech, ABIES Ecole Doctorale, París, Francia

e-mail: juanfernandovera@gmail.com

Resumen: En este documento se presenta un modelado en Simulink de un vehículo eléctrico, específicamente el Nissan Leaf, y su simulación de potencia y energía consumida. Para esta simulación se utilizó el método EMR a partir de unas medidas GPS que se tomaron en un recorrido con un vehículo de gasolina en la ciudad de Quito. Los resultados de este trabajo muestran lo que consumiría el vehículo eléctrico en las condiciones del recorrido, así como el costo en electricidad y las emisiones de CO₂ que generaría.

Palabras claves: Vehículo Eléctrico, EMR, emisiones CO₂, movilidad, consumo.

Abstract: This paper presents an electric vehicle model in Simulink, specifically the Nissan Leaf, and its simulation of power and energy consumption. For this simulation, the method EMR was used from GPS measures that were taken in a tour with a gasoline vehicle in the city of Quito. The results of this work show the energy needs of the electric vehicle in the tour conditions, and the cost of electricity and the CO₂ emissions generated.

Keywords: Electric Vehicle, EMR, CO₂ emissions, mobility, consumption.

1. INTRODUCCIÓN

El calentamiento global y el cambio climático son factores que obligan a los gobiernos a tomar medidas para la reducción del uso de combustibles. La energía eléctrica es generada todavía en su gran mayoría por fuentes no renovables, por lo que es una causa de los daños al medio ambiente. Por esta razón, ciertos países tienden a impulsar las energías renovables [9].

El transporte es también una fuente importante de contaminación por el número importante de personas que poseen vehículos y por el crecimiento del parque automotor. Por esta razón, la movilidad sustentable es un elemento que trata de cambiar progresivamente el segmento de vehículos eléctricos e híbridos en el mercado automotriz.

Los vehículos eléctricos son propulsados por un motor eléctrico, que tiene la misma potencia que uno de gasolina según el tipo de vehículo, que a su vez es alimentado por una batería de alta capacidad de almacenamiento (del orden de los 20 kWh).

Estos vehículos casi no contaminan, no producen un ruido excesivo como los de gasolina. Sus desventajas prin-

cipales son su poca autonomía (entre 100 y 200 km) y el precio de la batería (entre 5000 y 14000 dólares) que encarece el precio inicial, lo que genera cierta resistencia en las personas para adquirirlos [7].

Está previsto que se vendan 15000 vehículos eléctricos en el Ecuador y que su introducción se produzca este año [8]. Según un estudio de mercado, cuantitativo y cualitativo, realizado por nosotros, las personas tienen ciertas dudas sobre el funcionamiento en la altura de Quito, así como sus posibles beneficios de consumo, ya que la gasolina en Ecuador es actualmente muy barata en el mercado.

Por otro lado, el gobierno ecuatoriano está cambiando su matriz energética: actualmente la tercera parte de la energía producida es no renovable, mientras que se espera que en el 2016 el 95,14 % sea renovable, del cual 93,53 % sea de origen hidroeléctrico. Esto favorecería, entre otras cosas, a una disminución de las emisiones de CO₂.

Se ha realizado varios modelados para simular el comportamiento del vehículo eléctrico. En efecto, el modelado EMR (Energetic Macroscopic Representation) es un ejemplo concreto en el que se ha simulado el vehículo eléctrico[6].

En este estudio se realiza un modelado de un vehículo eléctrico, puntualmente el Nissan Leaf, que vendrá a Ecuador a finales de año, pero además con las condiciones geográficas de Quito. A partir de un escenario de manejo en Quito, se realiza un modelo para obtener el consumo energético. Este estudio nos permite saber la energía eléctrica consumida y las emisiones de CO₂.

2. MODELO DEL VEHÍCULO ELÉCTRICO

2.1 Metodología de Modelado EMR

El modelado del vehículo eléctrico se hizo utilizando un método de análisis de sistemas energéticos llamado Energetic Macroscopic Representation (EMR) cuyo objetivo es tener un modelo de tiempo real y del manejo de energía de sistemas energéticos [3]. El caso del vehículo eléctrico es un ejemplo ideal de aplicación de este método, ya que permite transformar un sistema real a una representación del sistema, bajo un cierto número de hipótesis que serán enumeradas en la sección siguiente. La ventaja de la EMR se encuentra es su facilidad para conservar las propiedades de los elementos energéticos por lo cual es muy útil al estudiar un sistema de transferencias energéticas complejo.

Como se trata de un modelo a tiempo real, la EMR diferencia una cadena de elementos de transmisión energética representados en amarillo y una cadena de control, correspondiente a la inversión del modelo energético, representada en azul. Para aplicar la EMR, se define al sistema energético que está en interacción con el entorno a través de una entrada: producida por el entorno e independiente del sistema y una salida: consecuencia de la evolución del sistema que se impone al entorno. La EMR posee principios de resolución de un sistema energético que son: el principio de interacción y el principio de causalidad. En este estudio no entraremos en el detalle de la descripción de este método, ya que sus principios han sido utilizados en muchas aplicaciones en la industria automotriz, ferroviaria y de energías renovables [2][5].

2.2 Sistemas modelados

Para la elaboración del modelado hay que construir cada uno de los bloques que componen un vehículo eléctrico. Se dividen en cinco partes importantes: fuente de alimentación (verde), sistema de potencia (amarillo), modelo del sistema (morado), control del sistema (celeste) y control de la estrategia (azul).

Además, para ciertos componentes hay que realizar aproximaciones, como por ejemplo de que la batería se comporta físicamente como un gran capacitor.

Hay parámetros que tienen mucha importancia ya que influyen en este modelado específico por las condiciones

de Quito. Un ejemplo es la densidad del aire que tiene el valor $\rho=0,93$.

2.3 Descripción de los sistemas

En la siguiente tabla se expresan las abreviaciones de los diferentes elementos a considerar:

Tabla 1. Abreviaciones de los diferentes elementos

C_{eq}	capacitancia equivalente de la batería
e	fuerza contra-electromotriz del motor
FEM	diferencia de potencial de la inductancia del motor
F_{res}	fuerza resistiva del vehículo
$F_{traccion}$	fuerza de tracción
I_{bat}	corriente de la batería
$I_{convertidor}$	corriente del convertidor
I_{motor}	corriente del motor
k_{motor}	factor de conversión electro-mecánica
k_{red}	factor reductor-rueda
L_{eq}	inductancia equivalente del motor
m	índice de modulación del inversor
$M_{vehiculo}$	masa del vehículo
R_{eq}	resistencia equivalente del motor
R_{rueda}	radio de la rueda
s	operador de la transformada de Laplace
T_{motor}	par del motor
T_{rueda}	par de la rueda
U_{bat}	diferencia de potencial de la batería
$U_{convertidor}$	diferencia de potencial del convertidor
$V_{vehiculo}$	velocidad del vehículo
$\eta_{convertidor}$	rendimiento del convertidor
η_{red}	rendimiento del reductor
$\Omega_{reductor}$	velocidad de rotación del reductor
Ω_{rueda}	velocidad de rotación de la rueda

Se obtienen unas ecuaciones generales de los principales componentes del vehículo:

- **Batería:**

$$I_{bat} = C_{eq} \cdot \frac{dU_{bat}}{dt} = C_{eq} \cdot s \cdot U_{bat} \quad (1)$$

- **Inversor:**

$$U_{convertidor} = U_{bateria} \cdot m \quad (2)$$

$$I_{bat} = m \cdot \eta_{convertidor} \cdot I_{convertidor} \quad (3)$$

Se toma como valor $\eta_{convertidor}=0,95$ si la potencia $P>0$ y $\eta_{convertidor}=\frac{1}{0,95}$ si $P<0$.

- Inductancia del motor de corriente continua:

$$FEM = U_{convertidor} - e = L_{eq} \cdot \frac{dI_{motor}}{dt} + R_{eq} \cdot I_{motor} \quad (4)$$

$$FEM = L_{eq} \cdot s \cdot I_{motor} + R_{eq} \cdot I_{motor} \quad (5)$$

La inductancia equivalente del motor se representa por la suma de una inductancia y de una resistencia.

- Motor de corriente continua:

$$T_{motor} = k_{motor} \cdot I_{motor} \quad (6)$$

$$FEM = U_{convertidor} - k_{motor} \cdot \Omega_{reductor} \quad (7)$$

Para el modelo se simplifica el motor síncrono del Nissan Leaf por un motor de corriente continua, considerando en cambio, unas pérdidas nulas, que aproxima al caso real.

- Reductor:

$$T_{rueda} = T_{motor} \cdot \eta_{red} \cdot k_{red} \quad (8)$$

$$\Omega_{rueda} = \frac{\Omega_{reductor}}{k_{red}} \quad (9)$$

- Ruedas:

$$F_{traccion} = \frac{T_{rueda}}{R_{rueda}} \quad (10)$$

$$\Omega_{rueda} = \frac{V_{vehiculo}}{R_{rueda}} \quad (11)$$

- Chasis:

$$F_{traccion} - F_{res} = M_{vehiculo} \frac{dV_{vehiculo}}{dt} \quad (12)$$

A estas ecuaciones hay que agregarles sus respectivos correctores del comando.

2.4 Recorrido

Para el escenario de manejo, se realizó un recorrido en Quito con un vehículo a gasolina. A partir de un GPS, se tomó los valores de la velocidad instantánea.

El recorrido fue desde la avenida Colón y Amazonas hasta la avenida 6 de Diciembre y Shyris, con una distancia total de 6km en horas de la noche, cuando casi no hay tráfico.

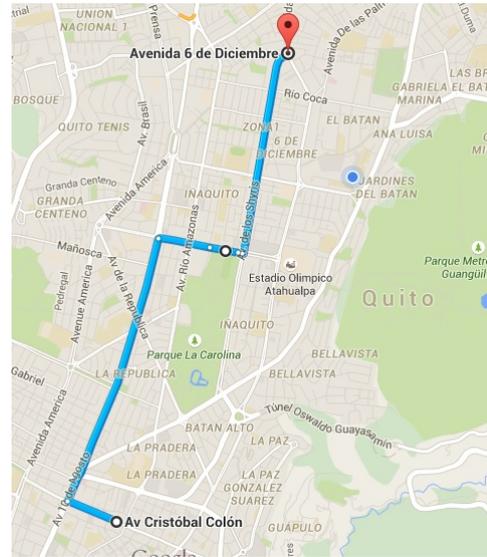


Figura 1. Mapa del recorrido realizado en Quito.

Se obtiene el siguiente perfil de velocidad:

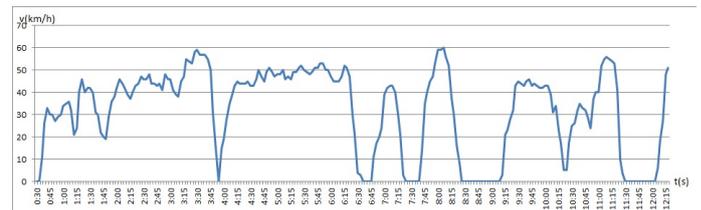


Figura 2. Curva de la velocidad en función del tiempo.

Los puntos en los cuáles la velocidad es nula corresponden a las paradas por semáforos.

De igual manera, se obtiene el perfil de altura.



Figura 3. Curva de la altura en función del tiempo.

3. SIMULACIÓN

3.1 Metodología EMR

Se construye cada una de las partes del modelo EMR del Nissan Leaf:

El bloque de fuente de alimentación que contiene la batería y el entorno:

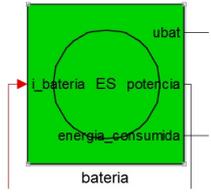


Figura 4. Batería.

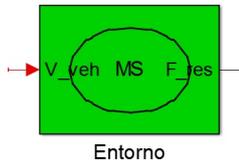


Figura 5. Entorno.

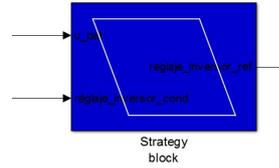


Figura 9. Modelo del Sistema.

Se obtiene el modelo EMR final:

El bloque de sistema de potencia que comprende el inversor, la inductancia equivalente del motor, la parte mecánica del motor, el reductor, las ruedas y el chasis:

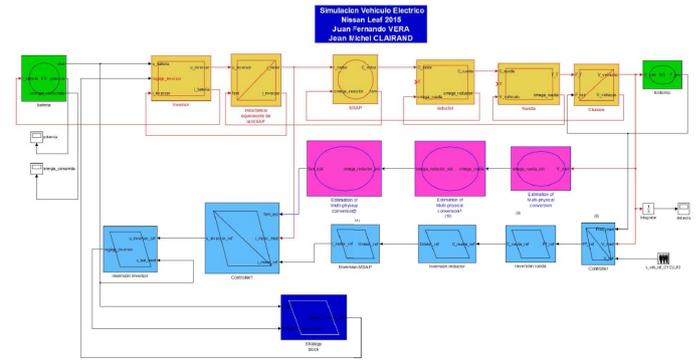


Figura 10. Modelo EMR.

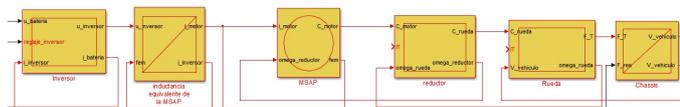


Figura 6. Sistema de potencia.

El bloque del modelo del sistema, que representan las diferentes conversiones físicas:

3.2 Distancia, Potencia y Energía Consumida en el Recorrido

Al lanzar la simulación, se obtiene el perfil de la distancia recorrida en función del tiempo:

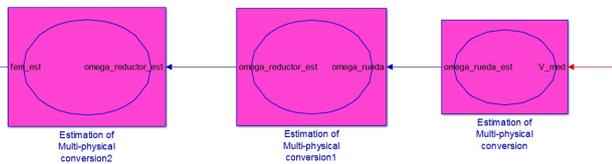


Figura 7. Modelo del Sistema.

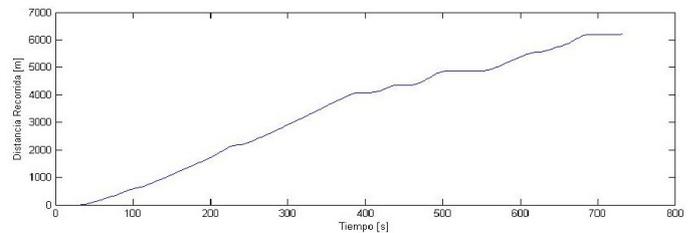


Figura 11. Distancia recorrida en función del tiempo.

El bloque del control del sistema, donde se implementan los diferentes correctores del vehículo:

Se aprecia que la curva es más bien lineal con ciertos momentos en las que es horizontal debido a las pausas por los semáforos.

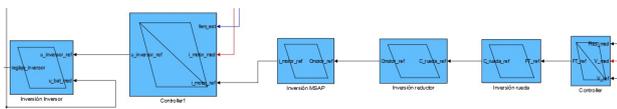


Figura 8. Control del Sistema.

El bloque del control de la estrategia, que consiste en un sistema que no permite a la batería de descargarse hasta un nivel por debajo de la tensión mínima de la batería:

Se obtiene además las curvas de la potencia y de la energía consumida en el recorrido:

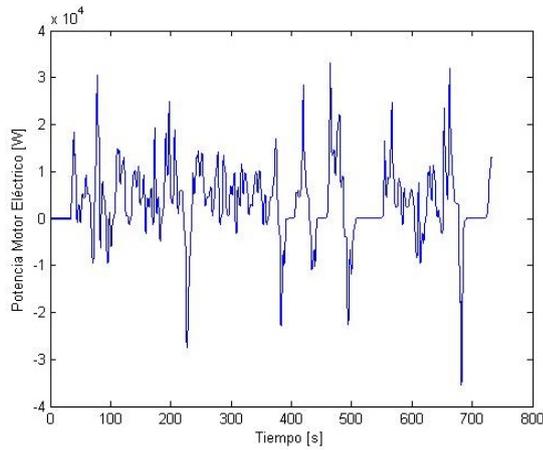


Figura 12. Potencia consumida en función del tiempo.

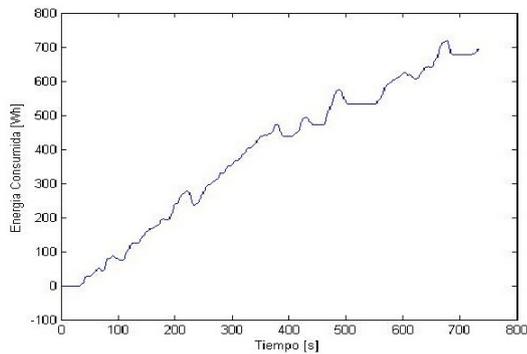


Figura 13. Energía consumida en función del tiempo.

Los picos positivos de potencia y de energía representan el arranque del vehículo después de las paradas, mientras que los picos negativos representan una pequeña recarga de la batería mientras se está en pendientes de bajada o en frenado.

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1 Autonomía

Durante este trayecto de 6km se consume 732 Wh de electricidad. Considerando que el Nissan Leaf tiene una batería de una capacidad de 24 kWh, de las cuáles solo 21 kWh son útiles[10], se puede deducir que para este tipo de manejo en la ciudad de Quito se puede recorrer 172 km.

4.2 Gramos de CO₂ emitidos en el recorrido total en función de las fuentes de producción eléctrica del Ecuador

En la tabla siguiente se expresa la media de huella de carbono según cada fuente de producción de electricidad[11]:

Tabla 2. Huella de carbono de las generadoras de electricidad.

Fuente de electricidad	gramos de CO ₂ por kWh distribuido
Termoeléctrica media (carbón, gasolina, gas)	710
Hidroeléctrica	26
Eólica	26

De los datos del 2011 se obtiene las siguientes porcentajes de producción eléctrica en el Ecuador[1]:

Tabla 3. Generadoras en el Ecuador en 2011.

Térmica	37%
Hidroeléctrica	62%
Biomasa	1%

Las proyecciones para el 2016 son las siguientes:

Tabla 4. Generadoras en el Ecuador en 2016.

Térmica	4,8%
Hidroeléctrica	93,5%
Otras	1,7%

Si solo tomamos en cuenta las fuentes térmicas e hidroeléctricas, actualmente se emitirían 207 gramos de CO₂ por los 732 Wh consumidos en los 6 kilómetros. Proyectándose al 2016, se emitirían 43 gramos de CO₂ por el mismo trayecto.

4.3 Costo

El precio medio de venta del kWh de electricidad en Quito es de 0,08\$ [4]. Es decir que este trayecto de 6 kilómetros, consumiendo 732 Wh, nos costaría 0,059\$. Para dar una mejor idea, un recorrido de 200km con este tipo de manejo costaría 1,95\$ de electricidad.

5. CONCLUSIONES

Este estudio permite dar una idea sobre el consumo en electricidad que tendría el vehículo eléctrico en la ciudad de Quito, así como su costo en electricidad y las emisiones de CO₂ que se generarían.

Sin lugar a duda, si se compara con un vehículo a gasolina, el vehículo eléctrico presenta ventajas en su costo de consumo y es mucho más limpio. Sin embargo, hay que tomar en cuenta los problemas que generaría en la red eléctrica ecuatoriana, ya que las cargas de batería a gran escala generan una carga eléctrica muy importante. Además, es necesario establecer campañas

de "buen manejo" ya que como se aprecia en las curvas de potencia, un arranque o aceleración muy brusca genera pérdidas eléctricas en el vehículo.

Hay que considerar también que se realizó un solo escenario, y para tener resultados más fiables en Quito hay que realizar más escenarios como en subidas o bajadas prolongadas, o cuando el tráfico es muy pesado.

REFERENCIAS

- [1] Esteban Albornoz Vintimila. Visión Sector Eléctrico Ecuatoriano - Beneficios Proyecto Mazar. Ministerio de Electricidad y Energía Renovable. [Online]. Available: <http://www.energia.gob.ec/wp-content/uploads/downloads/2012/10/SICPR01.pdf>
- [2] A. Bouscayrol (2014). Graphical rules of EMR. Université de Lille1.
- [3] A. Bouscayrol (2004). Modélisation et commande des systèmes énergétiques par représentation énergétique macroscopique (REM). Université de Lille 1. [Online]. Available: <http://master-gr2e.univ-lille1.fr/formation/fichiers/smm-diaporama-gr2e.pdf>
- [4] Empresa Eléctrica Quito. Pliego Tarifario Vigente. [Online]. Available: <http://www.eeq.com.ec:8080/documents/10143/88/PLIEGO+TARIFARIO+MARZO+2014/784c96b6-94e4-49a0-b505-8b78638d9687>
- [5] Dr. Walter Lhomme, Dr. Philippe Delarue (2011). EMR and inversion-based control of an electric vehicle. [Online]. Available: <http://www.emrwebsite.org/uploads/Fichiers/EMR11/5-EMR-11-Lhomme-EV.pdf>
- [6] C. Mayet, A. Bouscayrol, J. Pouget, W. Lhomme, T. Letrouvé (2013). Different models of an energy storage subsystem for a hybrid locomotive. [Online]. Available: <http://www.emrwebsite.org/uploads/Fichiers/EMR13/41-EMR13-Hybrid-loco-Letrouve.pdf>
- [7] Sumedha Rajakaruna, Farhad Shahnia, Arindam Ghosh, "Plug In Electric Vehicles in Smart Grids," Overview of Plug-in Electric Vehicle Technologies, K. Ramalingam, C.S. Indulkar, Ed. Springer, 2015, pp. 2731.
- [8] Redacción (2015, Febrero 23). El plan es vender quince mil vehículos eléctricos por año en Ecuador [Online]. Available: <http://www.eluniverso.com/noticias/2015/02/23/nota/4582096/plan-es-vender-quince-mil-vehiculos-electricos-ano>
- [9] Jorge Rosero, Fuentes de Generación de Energía Eléctrica Convencional y Renovable a Nivel Mundial, Revista Politécnica, 2014, Vol 33, No1 .
- [10] U.S Department of Energy. 2011 Nissan Leaf – Advanced Vehicle Testing – Beginning-of-Test Battery Testing Results. Vehicle Technologies Program. [On-line]. Available: http://energy.gov/sites/prod/files/2014/02/f8/battery_leaf_0356.pdf
- [11] World Nuclear Association. Comparison of Lifecycle Greenhouse Gas Emissions of Various Electricity Generation Sources. WNA Report. [On-line]. Available: http://www.world-nuclear.org/uploadedFiles/org/WNA/Publications/Working_Group_Reports/comparison_of_lifecycle.pdf