

CAPÍTULO 3

2ª Simulación: un sistema de carga por inducción electromagnética para autobuses en una red de transporte público

Pablo Álvarez López*

En este capítulo se analizará la electrificación de una línea de autobús regular usando un sistema de carga por inducción en determinadas paradas, que cargarán las baterías del autobús mientras los pasajeros suben y bajan. Se enseñará a simular una ruta de autobús que puedan usar los peatones, a crear y gestionar los resultados del módulo *Battery*, y a optimizar el número de estaciones de carga.

Introducción

Actualmente nos encontramos en pleno proceso de transición del vehículo de combustión propulsado por combustibles fósiles al vehículo eléctrico propulsado por baterías eléctricas. Este cambio no solo afecta a los vehículos, sino

* Agencia Aeroespacial Alemana (DLR)

también a la infraestructura vial. Los vehículos en esta transición se pueden agrupar en tres categorías:

1. **Híbridos:** este es un modelo de transición que combina combustibles fósiles con baterías eléctricas, lo que permite circular por infraestructuras orientadas tanto a vehículos eléctricos como a vehículos de combustión
2. **Eléctricos:** modelo propulsado por uno o varios motores eléctricos alimentados por un conjunto de baterías. Es el modelo más ecológico, pero supone un importante cambio en la infraestructura vial.
3. **De pila de combustible:** modelo propulsado por la combinación de hidrógeno y oxígeno. La principal ventaja de este modelo es que los cambios en la infraestructura no son tan pronunciados como en el caso de los vehículos eléctricos, pero existe una gran dificultad para gestionar el hidrógeno.

Aproximación al problema

La primera aproximación que históricamente se hizo a la electrificación del transporte público fueron los trolebuses. Estos vehículos son eléctricos, y van conectados a una catenaria a través de un trole que le proporciona electricidad durante el trayecto. El principal inconveniente de los trolebuses es la inversión necesaria en la infraestructura para su uso. Requiere electrificar todo el trayecto del bus, y esto afecta tanto a las aceras como a la estética de las

calles. Además, salvo que lleve baterías extra o un motor de combustión auxiliar, hace difícil realizar el cambio en las líneas de transporte ya establecidas.

Una segunda aproximación al problema sería el cambio dinámico de baterías en determinados puntos del recorrido. La ventaja de este sistema es que requiere mucha menos infraestructura, ya que se puede hacer en puntos clave del recorrido, como estaciones intermodales o paradas de interconexión, lo que ahorraría costos y no supondría un gran impacto estético. Este sistema ya se está probando en China para los camiones de carga, aunque hay que esperar un tiempo para ver su rentabilidad a largo plazo.

El problema de este método es que el cambio de baterías precisa de una estructura complicada de mantener. Requeriría que en cada punto clave hubiera suficientes baterías acumuladas, cargadas y en buen estado para todos los autobuses que las necesitasen. Además, el proceso mecánico de sustitución necesitaría unos componentes móviles que exigirían un mantenimiento continuo, lo que hace al sistema menos rentable y más expuesto a incidencias como la lluvia o el mal funcionamiento de los componentes mecánicos.

Llegados a este punto, observemos que este sistema tiene tanto ventajas e inconvenientes, pero existe un tercer método basado en la carga dinámica de baterías.

Planteamiento del problema de la inducción

El objetivo a largo plazo es la independencia completa de los combustibles fósiles de una línea de autobús urbano con el menor impacto posible en la infraestructura vial. Esto implica que no podemos usar el modelo 1 (híbrido) debido a que queremos una total independencia de los combustibles fósiles, ni tampoco el 3 (pila de combustible), por la dificultad que conlleva el manejo del hidrógeno. Por ello nos centraremos en el modelo 2 (eléctrico)

El principal problema que hay al día de hoy con el modelo eléctrico es el tiempo de carga necesario para rellenar las baterías. Debido a esto, nos podríamos encontrar en las siguientes tesituras:

1. Tras completar el recorrido, el autobús tiene que estar mucho tiempo recargándose, lo que implica, o bien un segundo autobús que haga el recorrido mientras el primero se recarga, o que no se pueda respetar el horario establecido.
2. Si la ruta es demasiado larga, es probable que el autobús se quede sin energía a mitad de recorrido, lo que limita su autonomía.

Para evitar estos dos problemas, en este artículo se plantea el uso de un autobús eléctrico, con carga por inducción electromagnética. Este tipo de carga se basa en la instalación de un inductor electromagnético en el suelo de la parada de autobús. Cuando el autobús pare, el inductor

electromagnético del suelo excitará una placa de inducción situada debajo del autobús, lo que generará electricidad que se usará para cargar sus baterías. El objetivo es que el autobús comience su recorrido cargado, y en ciertas paradas estratégicas, mientras los pasajeros suben y bajan, el autobús vaya haciendo pequeñas cargas de energía que le permitan llegar hasta el final del recorrido.

Elementos de la simulación

En la simulación se usarán los siguientes elementos:

1. Estaciones de autobús (*BusStops*): serán los lugares en los que el autobús hará la parada para que los pasajeros suban y bajen.
2. Estaciones de carga (*ChargingStations*): serán las encargadas de simular los puntos de carga por inducción. Estarán situadas en la misma posición que ciertas estaciones de autobús.
3. Rutas (*Routes*): en la ruta se definirán las vías (*edges*) y las paradas que tiene que recorrer el autobús durante la ruta. Será una ruta cerrada, y con repetición.
4. Tipo de vehículo (*vType*): en este elemento definiremos todos los atributos que tendrá el autobús (tamaño, peso, etcétera), así como el módulo *Battery*, encargado de simular la carga y uso de una batería.
5. Vehículo (*vehicle*): será el autobús en sí mismo, que tendrá como parámetros el *vType* y la ruta.

Preparación del escenario

El escenario se obtendrá vía *OpenStreetMap*; se harán las modificaciones necesarias e incluirá tráfico generado aleatoriamente con la herramienta *randomTrips*. Se generarán varias densidades de tráfico, de menor a mayor, para estudiar el impacto de una gran cantidad de tráfico en la ruta y consumo de energía del autobús eléctrico. Para este ejemplo, se tomará una zona de la ciudad en la que el autobús a simular tiene tanto carriles exclusivos como carriles compartidos con el resto de vehículos.

Paso 1. Obtención del escenario base

Se debe localizar y encuadrar la zona a simular usando la herramienta *OSMWebWizard* situada en *sumo/tools*. Una vez seleccionada el área, solo hay que pulsar *generate scenario*. En nuestro caso, se usará una sección del anillo norte de la ciudad de Braunschweig en Alemania; en la zona universitaria. La elección de esta ciudad es porque fue la primera ciudad en la que se probó este sistema de inducción electromagnética (proyecto EMIL).

Figura 1. Interfaz de *OSM WebWizard*

Tras finalizar el proceso, se abrirá una instancia de SUMO-GUI lista para simular.

**Figura 2. Red de sumo recién descargada
y lista para simular**

Paso 2. Edición de la infraestructura

En ocasiones, es necesario editar la red usando *netedit* para ajustar conexiones, agregar carriles, etcétera. Para ello se irá a la opción edición/abrir en *netedit* (o pulsaremos Ctrl + T), y se harán los arreglos necesarios. Ciertos cambios requieren que se reconfigure las intersecciones, por lo que, al iniciar la red, se pulsará F5.

Figura 3. Edición de la red en *Netedit*

Una vez arregladas las vías y las conexiones, se procederá a instalar la estación de autobús y la estación de carga. Para ello se va al modo *adicional* (Tecla A), se selecciona un *busStop*, y se hace clic sobre la vía sobre la que se quiere poner la parada de autobús. Un proceso similar se hace con la estación de carga (*ChargingStation*).

Figura 4: Añadiendo una parada de bus y una estación de carga

Ahora se configurará la estación de carga. Para ello se va al modo de inspección (tecla I), y se hace clic sobre la estación de carga. A la izquierda aparecerán todas las opciones de configuración de la estación de carga. Para nuestro problema, se necesita activar la opción *ChargeIn-Transit*, que permitirá al vehículo cargar mientras está encima de la misma. Otras opciones necesarias más adelante serán *chargeDelay* y *Power*.

Paso 3. Creación de la línea de autobús

Netedit dispone de tres modos de edición principal: *Network*, demanda y datos. Para crear la línea de bus, se necesita ir al modo de demanda (Tecla rápida, F3). En este

modo se dispone de varios submodos de edición dependiendo del elemento que se quiera crear. En nuestro caso, se irá al modo de *Rutas* (Tecla rápida R), y se pulsará sobre las calles que compondrán la ruta del autobús. No necesariamente tienen que ser calles consecutivas, pero sí es importante que estén unidas en algún punto, y para ello se dispone del código de colores: Si la calle es verde significa que hay conexión, si es rosa implica que hay conexión, pero no es compatible con el tipo de vehículo seleccionado, y si es amarilla representa que no hay conexión posible.

Figura 5. Edición de una estación de carga

Tras seleccionar la lista de calles, solo hay que pulsar Enter para crear la ruta. Una vez creada, se tienen que indicar las paradas del autobús. Para ello se va al modo de paradas (Tecla A), y se selecciona en la lista *stopBusStop*.

Una vez hecho esto, se selecciona el elemento que parará ahí (en nuestro caso, la ruta que se ha creado), y a continuación se puede modificar la duración de la parada, y una vez hecho esto, solo hay que hacer clic sobre la parada de autobús que se creó previamente. Todos los elementos que discurren sobre esta ruta harán una parada en la estación de autobús.

Figura 6. Creación de una ruta de autobús

El siguiente paso es crear el modelo de autobús (*VType*). Este modelo será común a todos los autobuses eléctricos que discurren por la simulación. Para ello nos dirigimos al modo de tipos (Tecla T), se crea un nuevo vehículo, se renombra como *bus*, y se selecciona *bus* como su *vClass*.

Figura 7. Añadir una parada a la ruta

Finalmente se va a modo de vehículos (Tecla V), y en la lista de posibles vehículos se selecciona *Vehicle (over route)*. Una vez hecho esto, se busca la ruta que se ha creado, se selecciona y se hace clic sobre la ruta.

Figura 8. Ruta terminada

Con esto se termina la creación de la línea de bus. Se guardan los elementos de demanda en un archivo, y se hace la simulación.

Paso 4: Electrificación del autobús

La electrificación del autobús se llevará a cabo activando el módulo (*Device*) *battery* dentro del vehículo que se encargará de simular el consumo de una batería, así como su consumo y recarga. Para ello se debe definir una serie de parámetros extra en la definición de *vType*.

1. *has.battery.device*: activa el módulo (*device*) *battery* dentro del vehículo
2. *maximumBatteryCapacity*: capacidad máxima de la batería en Wh
3. *vehicleMass*: peso del vehículo en kilogramos
4. *frontSurfaceArea*: superficie frontal del vehículo en m^2
5. *airDragCoefficient*: coeficiente de rozamiento con el aire
6. *internalMomentOfInertia*: masa de los elementos rotatorios del vehículo
7. *radialDragCoefficient*: coeficiente de resistencia radial
8. *rollDragCoefficient*: coeficiente de resistencia de los neumáticos con el suelo
9. *constantPowerIntake*: consumo mínimo constante del vehículo
10. *propulsionEfficiency*: eficiencia en la conducción

11. *recuperationEfficiency*: eficiencia en la recuperación de energía
12. *stoppingThreshold*: velocidad máxima para cargar en las estaciones de carga

Actualmente *netedit* no permite definir módulos dentro de los *vTypes*, por lo que se tiene que editar manualmente el archivo XML. Un ejemplo de un autobús eléctrico sería este:

Figura 9. Añadir un autobús eléctrico a nuestra ruta

Adicionalmente, se puede determinar el estado actual de la batería en la definición del vehículo usando el parámetro *actualBatteryCapacity*. Un ejemplo de un vehículo con la capacidad de la batería definida al principio sería este:

Figura 10: Definición de un vehículo con batería

Finalmente, para obtener el archivo de datos con el consumo, se debe editar el archivo de configuración de SUMO (.sumocfg), y añadir las siguientes opciones dentro de la categoría *output*:

1. *battery-output*: para cada vehículo activo con batería dentro de la simulación, devuelve el estado de la batería, así como toda la información relativa al consumo durante cada *timeStep*.
2. *chargingstations-output*: para cada *chargingStation* de la red, devuelve toda la información de las interacciones que ha tenido durante cada *timeStep* (vehículos que se han detenido encima, energía cargada en cada uno de ellos, etcétera).
3. *battery-output.precision*: define la precisión de los valores de carga y descarga de la batería para los archivos *battery-output* y *chargingstations-output*.
4. *device.battery.probability*: define la probabilidad entre 0 y 1 de que los vehículos equipados con el *device battery* la usen. El valor 1 significa que todos los vehículos con el parámetro *has.battery*.

device=true llevarán la batería activa. Este parámetro es útil cuando se quiere simular de forma rápida redes con diferentes porcentajes de vehículos eléctricos. Un ejemplo de un archivo de configuración sería este:

Figura 11. Archivo de configuración

Con todo esto definido, ya se puede ejecutar la simulación, y calibrarla en función de los resultados obtenidos.

Ejecución de la simulación y obtención de resultados

La simulación se puede ejecutar visualmente usando SUMO-GUI, o a través de consola utilizando SUMO. La simulación visual, aunque más lenta que la versión en consola, permite ver en tiempo real el comportamiento del autobús eléctrico, y comprobar si está estacionando y cargando correctamente en las estaciones designadas. Para un mejor seguimiento del autobús se puede hacer clic derecho sobre él, y seleccionar la opción *trackear vehículo*, lo que hará que la cámara siga continuamente al vehículo.

Los resultados se generarán en un archivo similar a este:

Figura 12. Resultados de la simulación

Para calcular las estaciones de carga óptimas, se puede optar por un método numérico que desarrolló Tamas Kurczveil en su doctorado (Kurczveil *et al.*, 2014). Se basa en el método de la *Big M*, y aunque ha generado muy buenos resultados, implica usar la herramienta externa *MatLab*.

En nuestro caso se optará por una aproximación basada única y exclusivamente en las herramientas que provee SUMO. La idea está basada en la “prueba y error”.

1. Si se tiene n estaciones de bus y k posibles estaciones de carga, se sitúa una estación de carga en cada una de las estaciones de autobús, con parámetro eficiencia igual a cero, y con ids siguiendo la serie *chargingStation00*, *chargingStation01*, *chargingStationnn*.
2. Se escribe un *script* de *Python* que, usando *TraCi*, cambie la eficiencia de una estación de carga dada por su índice $[0, n - 1]$ de 0 a 0.95.
3. Se ejecutan todas las simulaciones resultado de combinar todos los posibles estados de las estaciones de

carga (eficiencia 0, o eficiencia 0.95). Si el número de posibles estaciones k es menor que el número de estaciones de autobús, se pueden obviar bastantes simulaciones, y si la línea tiene muchas paradas, es posible paralelizar el proceso. En el peor de los casos se tendrán 2^n simulaciones.

4. Tras ejecutar todas las simulaciones, se toman las cinco o seis simulaciones (dependiendo de n) en las que el autobús acabó con más carga, y se repiten varias veces para afinar el resultado. Tras lo cual, se toma la simulación en la que el autobús acabe con más carga.

Simulación de ejemplo

En nuestro ejemplo hay cuatro paradas y dos posibles estaciones de carga, por tanto, la lista de posibles combinaciones es de $2^4 = 16$:

Combinación	Estaciones de carga			
	CS01	CS02	CS03	CS04
01	OFF	OFF	OFF	OFF
02	OFF	OFF	OFF	ON
03	OFF	OFF	ON	OFF
04	OFF	OFF	ON	ON
05	OFF	ON	OFF	OFF
06	OFF	ON	OFF	ON
07	OFF	ON	ON	OFF
08	OFF	ON	ON	ON
09	ON	OFF	OFF	OFF
10	ON	OFF	OFF	ON
11	ON	OFF	ON	OFF
12	ON	OFF	ON	ON
13	ON	ON	OFF	OFF
14	ON	ON	OFF	ON
15	ON	ON	ON	OFF
16	ON	ON	ON	ON

Pero debido a la restricción de máximo dos posible estaciones de carga, el número de posibilidades se reduce a:

Combinación	Estaciones de carga			
	CS01	CS02	CS03	CS04
01	OFF	OFF	OFF	OFF
02	OFF	OFF	OFF	ON
03	OFF	OFF	ON	OFF
04	OFF	OFF	ON	ON
05	OFF	ON	OFF	OFF
06	OFF	ON	OFF	ON
07	OFF	ON	ON	OFF
08	ON	OFF	OFF	OFF
09	ON	OFF	OFF	ON
10	ON	OFF	ON	OFF
11	ON	ON	OFF	OFF
12	ON	ON	OFF	ON

Tras llevar a cabo las diez simulaciones, el resultado de los tres casos en los que se han obtenido mejores resultados son:

Combinación	Promedio (Kw/h)	Estaciones de carga			
		CS01	CS02	CS03	CS04
01	100	ON	ON	OFF	OFF
02	100	ON	OFF	OFF	ON
03	100	ON	OFF	ON	OFF

Aplicación en políticas públicas de movilidad pública

Dentro del amplio campo de las políticas de movilidad pública, nos centraremos en dos áreas específicas: la movilidad urbana sostenible, y la adaptación de la infraestructura ya existente.

Aplicaciones en la movilidad urbana sostenible

En el área de la movilidad urbana sostenible, este sistema de inducción puede reducir la dependencia de combustibles fósiles, las emisiones de gases de efecto invernadero y la contaminación urbana, ya que los vehículos eléctricos no emiten partículas nocivas al medio ambiente. Cabe remarcar que actualmente la producción de electricidad aún no es 100% renovable, por lo que las emisiones netas de todo el proceso de movilidad urbana no serán totalmente renovables, aunque contribuirá a reducir las emisiones actuales.

Otro aspecto a destacar es la reducción de ruido que conllevaría una red de transporte interurbano eléctrica. La reducción de la contaminación acústica en entornos urbanos mejora significativamente la calidad de vida al reducir enfermedades asociadas al ruido como el estrés, la ansiedad y la falta de sueño. Y esto no solo beneficia a las personas, sino que además protege la fauna urbana sensible al ruido y contribuye a conservar la biodiversidad.

En el aspecto económico, un área urbana menos contaminada y más silenciosa aumenta el valor de las propiedades y promueve el turismo, por lo que a largo plazo el área urbana se convierte en un entorno más atractivo para inversiones y estimula el crecimiento económico sostenible.

Adaptación de la infraestructura

Una de las principales ventajas de la carga por inducción propuesta en este artículo es que la inversión necesaria para adaptar la red de transporte público existente es considerablemente menor en comparación con otros proyectos de electrificación, como la instalación de catenarias. Este sistema solo requiere la incorporación de inductores subterráneos en las paradas de autobús estratégicas, lo que minimiza las alteraciones en el trazado urbano y evita la necesidad de grandes obras civiles que afectan durante un largo tiempo al conjunto de la movilidad urbana. Además, al aprovechar paradas ya existentes, el impacto visual y estético en el entorno urbano es reducido.

Otro aspecto clave es que estas paradas pueden ser compartidas entre autobuses de combustión tradicional y autobuses eléctricos equipados con sistemas de carga por inducción, lo que facilita una transición gradual. Este enfoque progresivo reduce significativamente el impacto económico inicial, ya que permite modernizar la flota de manera escalonada sin interrumpir las operaciones del sistema de transporte público.

Bibliografía

- Kurczveil, T., Alvarez Lopez, P., y Schnieder, E. (2014). Implementation of an energy model and a charging infrastructure in SUMO. *Lecture Notes in Computer Science*, 8594: 33-43.
- López, P. Á., Behrisch, M., Bieker-Walz, L., Erdmann, J., Flötteröd, Y., Hilbrich, R., Lücken, L., Rummel, J., Wagner, P., y WieBner, E. (2018). Microscopic Traffic Simulation using SUMO. 2018 21st International Conference on Intelligent Transportation Systems (ITSC), 2575-2582. <https://doi.org/10.1109/ITSC.2018.8569938>
- Álvarez López, P., y Erdmann, J. (2018). An approach for defining vehicular demand in SUMO. En *SUMO Conference. Simulating Autonomous and Intermodal Transport*.
- Álvarez López, P., y Erdmann, J. (2019). Demand elements in Netedit. En *SUMO Conference. Simulating Connected Urban Mobility*.
- Álvarez López, P., y Erdmann, J. (2016). Supporting additional elements in a simulation using Netedit. En *SUMO Conference. Traffic, Mobility and Logistics*.