

Resumen

Los autobuses urbanos son fundamentales para el transporte público de la UE, representando más de la mitad de todos los viajes de transporte público terrestre. Los autobuses eléctricos urbanos en la UE podrían reducir las emisiones de ciclo de vida en un 76% para 2030 en comparación con los diésel. Aunque en 2024 solo el 1,4% de la flota de autobuses de la UE es eléctrica, todos los nuevos autobuses urbanos deberán ser de cero emisiones para 2035. Este objetivo resalta el papel fundamental de los autobuses eléctricos en la transición hacia una movilidad urbana sostenible.

El sistema de Calefacción, Ventilación y Aire Acondicionado (HVAC) es esencial para mantener un ambiente seguro y cómodo en los vehículos, pero también es la principal carga auxiliar, representando el 1,5% del consumo mundial de petróleo. En los autobuses eléctricos urbanos, la autonomía de conducción puede reducirse hasta un 50% en condiciones meteorológicas extremas. Esto resalta la necesidad de modelar y optimizar los sistemas HVAC para reducir su impacto energético y apoyar la adopción a gran escala de autobuses eléctricos para mitigar la contaminación urbana y las emisiones del transporte urbano.

La literatura actual revela importantes lagunas en el desarrollo y aplicación de modelos detallados de sistemas HVAC para autobuses eléctricos que operan en entornos urbanos reales. En concreto, existe una falta de metodologías que integren modelos detallados para evaluaciones precisas del consumo energético. Abordar estas lagunas es crucial

para comprender los flujos de energía y optimizar el uso de los recursos, al tiempo que se reducen los costes y las incertidumbres.

En esta tesis, se ha desarrollado e integrado un conjunto de modelos avanzados en un modelo global completo para simular y optimizar con precisión la operación del sistema HVAC y el consumo de energía de los autobuses eléctricos urbanos en condiciones reales de operación.

El objetivo principal es desarrollar, validar e integrar un conjunto de seis modelos avanzados. Primero, el modelo espacial crea una representación 3D de la ciudad con edificios, árboles y un modelo digital del terreno de las calles. A continuación, el modelo cinemático genera un ciclo de conducción estocástico de un año utilizando datos de rutas, límites de velocidad en las calles y patrones de tráfico. Luego, el modelo climático calcula la temperatura del aire exterior, la humedad, el horizonte visible y los flujos de radiación en todas las superficies del autobús, basándose en datos climáticos a largo plazo, la posición y orientación del autobús y la geometría solar. El modelo térmico y acoplado con el HVAC calcula, por un lado, las ganancias de calor, las temperaturas de los nodos, las transferencias de humedad, las cargas térmicas de los nodos de masas internas y de la carcasa, y las cargas latentes del nodo interior utilizando un sistema de ecuaciones diferenciales ordinarias, basado en las propiedades ópticas y termofísicas del autobús, la ocupación, los cambios de aire, los sistemas auxiliares y las condiciones ambientales. Por otro lado, el modelo acoplado evalúa el modo de operación del HVAC y los puntos de operación de cada componente del equipo, su consumo de energía y eficiencia, y las condiciones de salida del aire y del flujo de condensado. Finalmente, el modelo de batería estima el consumo total de energía del autobús, incluyendo las contribuciones del motor, la frenada regenerativa, el HVAC y otros sistemas, así como el impacto de la eficiencia de la batería.

El segundo objetivo es implementar este modelo global en una herramienta de simulación robusta, aplicarla a rutas de autobuses urbanos reales y extraer conclusiones clave a partir de resultados precisos de consumo de energía desagregado durante períodos prolongados. Esto

incluye la evaluación de estrategias para reducir la demanda total de energía, analizar el impacto de los diferentes subsistemas del vehículo, apoyar la optimización de los componentes del sistema HVAC y evaluar su impacto en el consumo total de energía del vehículo.

Los hallazgos revelan las complejidades de estimar el consumo de energía del HVAC debido a numerosos factores interrelacionados, variables estocásticas y lógica de control discreta, lo que requiere modelos diversos y grandes conjuntos de datos. Una simplificación excesiva del modelo puede llevar a errores significativos, con imprecisiones en la irradiación solar directa superiores al 50% si no se consideran los efectos del sombreado y variaciones notables en las ganancias térmicas en las superficies del autobús. Los resultados destacan el papel crítico de los modelos térmicos transitorios, especialmente cuando se integran con algoritmos de control discreto, y el impacto significativo de la estocasticidad en la alta ocupación sobre la carga térmica.

Las simulaciones muestran que, en condiciones representativas, la demanda media de aire acondicionado en días cálidos de verano es de 12,1 kW, debido especialmente a las cargas solares y de ocupación, mientras que la demanda de calefacción en días fríos de invierno es de 3,3 kW, principalmente debido al aire fresco no recirculado. El modo de aire acondicionado es predominante (44,6% del tiempo), seguido por la ventilación (31,4%). El compresor consume entre el 69 y el 75% de la energía en verano y entre el 58 y el 65% en meses templados y en invierno. El consumo de HVAC representa entre el 5 y el 12% del uso total de energía del autobús. Esta proporción es mayor en paradas más frecuentes y a velocidades más bajas, reduciendo la autonomía de conducción en un 15-20% en días cálidos. En condiciones extremas, el consumo de HVAC puede aumentar hasta un 165% en días cálidos y un 181% en días fríos. El aislamiento y los recubrimientos optimizados pueden reducir la demanda de calefacción y aire acondicionado en un 20-31%, mientras que reducir la capacidad del compresor en un 25% ofrece ahorros de costes sin pérdida de eficiencia.