

MODELADO DEL CONSUMO ENERGÉTICO DE VEHÍCULOS FERROVIARIOS ESTACIONADOS EN COCHERAS

GONZÁLEZ GIL, Arturo ⁽¹⁾; CACABELOS REYES, Antón ⁽¹⁾;

GÓMEZ RODRÍGUEZ, Miguel Ángel; ⁽¹⁾; PALACIN RAMOS, Roberto ⁽²⁾

arturogg@tud.uvigo.es

⁽¹⁾Centro Universitario de la Defensa en la Escuela Naval Militar de Marín

⁽²⁾NewRail - Centre for Railway Research, Newcastle University

RESUMEN

Los sistemas de ferrocarril urbano representan una solución con gran potencial para mejorar la movilidad en las áreas metropolitanas y reducir su contaminación ambiental. Sin embargo, en un contexto caracterizado por constantes subidas en el precio de la energía y donde otros medios de transporte están reduciendo significativamente su impacto medioambiental, estos sistemas deben mejorar su eficiencia energética para mantenerse como una de las opciones más interesantes de transporte sostenible.

Los vehículos ferroviarios suelen mantener parte de sus sistemas auxiliares encendidos durante el tiempo que están fuera de servicio, entre otras razones, para facilitar las operaciones de limpieza y evitar el deterioro de ciertos componentes. En muchos casos, especialmente en los sistemas más antiguos que operan en climatologías adversas, esta práctica puede llegar a suponer consumos muy significativos. Así, investigaciones anteriores han demostrado experimentalmente que este consumo representa aproximadamente el 11% del consumo anual de un vehículo en el metro de Newcastle, Reino Unido, siendo el sistema de calefacción responsable de aproximadamente la mitad de dicho consumo.

En este trabajo se presenta un modelo térmico de los vehículos del metro de Newcastle (Tyne and Wear Metro) para predecir su consumo de calefacción durante el tiempo que están estacionados en las cocheras. Una vez contrastado con datos experimentales, se pretende utilizar este modelo como herramienta de análisis de posibles mejoras para reducir dicho consumo.

Palabras clave: consumo energético; ferrocarriles, TRNSYS

1. Introducción

El 25% del total de emisiones de CO₂ debidas al sector transporte en la Unión Europea (UE) se genera en áreas urbanas [1]. Es decir, el transporte en áreas metropolitanas es responsable de aproximadamente el 8% del total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI) en la UE [2]. Si además tenemos en cuenta los altos niveles de contaminación del aire y los problemas de congestión causados por el excesivo uso del automóvil, podemos concluir que el desarrollo de sistemas de transporte de alta capacidad y no contaminantes es una prioridad para reducir las emisiones globales de GEI y mejorar la calidad de vida en zonas urbanas.

Los sistemas de ferrocarril urbano (metro, tranvía, trenes de cercanías) se caracterizan por ser sistemas de transporte de gran capacidad, eficientes, seguros, libres de emisiones locales y con menores niveles de emisiones CO₂ por pasajero que otros medios de transporte urbano [3], [4]. Por lo tanto, estos sistemas pueden ser considerados como una solución preferente para mejorar la movilidad en las áreas metropolitanas, contribuyendo a reducir su contaminación ambiental y las emisiones globales de GEI.

Sin embargo, en un contexto caracterizado por constantes subidas en el precio de la energía y dónde otros medios de transporte están reduciendo significativamente su impacto medioambiental, los sistemas de ferrocarril urbano deben mejorar su eficiencia energética para mantenerse como una de las opciones más interesantes de transporte sostenible.

La mayoría de soluciones propuestas en la literatura para reducir el consumo de los ferrocarriles urbanos se centran en mejorar sus sistemas de propulsión y frenado, pues, a fin de cuentas, en estos subsistemas se consume aproximadamente el 80% de la energía neta que llega a los vehículos [5]. El 20% restante es consumida por los equipos auxiliares de los vehículos, entre los que se incluyen: equipos de control y refrigeración de los sistemas de tracción/frenado, sistemas de iluminación, calefacción, ventilación y aire acondicionado. En casos donde las condiciones de operación son adversas, como por ejemplo el metro de Oslo, el consumo de los sistemas calefacción puede llegar a representar el 28% del consumo total [6].

Los vehículos ferroviarios suelen mantener parte de sus sistemas auxiliares encendidos durante el tiempo que están fuera de servicio, entre otras razones, para facilitar las operaciones de limpieza y evitar el deterioro de ciertos componentes. En muchos casos, especialmente en los sistemas más antiguos que operan en climatologías severas, esta práctica puede llegar a suponer consumos muy significativos. Así, en una investigación realizada recientemente en el metro de Newcastle (*Tyne and Wear metro*), en el noreste del Inglaterra, se demuestra que el consumo de los equipos auxiliares durante el tiempo que los vehículos están estacionados en las cocheras, representa aproximadamente el 11% del consumo anual [7]. Además, esta investigación señala que aproximadamente el 45% de dicho consumo es debido al funcionamiento del sistema de calefacción, observándose una relación directa entre el consumo total y la temperatura ambiente. De los resultados presentados en dicho trabajo se puede concluir que la implantación de medidas para reducir el consumo de energía en trenes estacionados en cocheras puede producir ahorros significativos a nivel sistema.

El objetivo del presente trabajo es desarrollar un modelo térmico de los vehículos del metro de Newcastle que permita predecir el consumo de calefacción durante el tiempo que estos están estacionados en las cocheras. Con este modelo, se pretende obtener una herramienta válida para el estudio y posible implantación de diferentes medidas de ahorro energético.

En las siguientes secciones, se presentarán las características principales del metro de Newcastle y las condiciones climáticas en que opera; se expondrán los fundamentos básicos del modelo generado en TRNSYS; se compararán los resultados de consumo obtenidos experimentalmente y los obtenidos con el modelo; y finalmente, se resumirán las principales conclusiones del trabajo.

2. Descripción del sistema de metro estudiado

2.1. Generalidades y condiciones climáticas

El metro de Tyne and Wear es un sistema de metro ligero cuyo núcleo de operación es la ciudad de Newcastle upon Tyne, pero que llega hasta la ciudad de Sunderland, en el noreste de Inglaterra. Con un total de 78 km, se trata de la segunda red más larga de ferrocarriles urbanos en el Reino Unido, después del metro de Londres. Además, es el único sistema de metro en el país que es propulsado por una catenaria de 1500 V en corriente continua. Las referencias [8] y [9] ofrecen información más detallada sobre este sistema de metro.

En cuanto a las condiciones climatológicas de la zona, cabe destacar que, de media, las temperaturas máximas raramente sobrepasan los 20–21°C en los meses de verano, mientras que las mínimas suelen estar entre 0°C y 2°C.

2.2. Características de los vehículos

Actualmente, la flota de trenes de este sistema está constituida por 90 vehículos iguales entre sí. Cada vehículo (*Metrocar*) tiene 28 m de longitud y está formado por dos secciones articuladas idénticas. En general, los trenes en servicio están compuestos por dos unidades *Metrocar*, aunque éstas también pueden operar de forma autónoma. Los vehículos de este metro llevan operando desde 1980, año de inauguración del sistema, si bien han sufrido un proceso de renovación entre 1995 y 2000.

Los *Metrocar* tienen los siguientes sistemas auxiliares: calefacción, ventilación, aire comprimido, iluminación y sistemas de control. Cuando los vehículos están en servicio, la demanda de calefacción es principalmente cubierta por el calor recuperado en las frenadas (freno regenerativo). Para los casos en que este calor no sea suficiente para alcanzar las condiciones de confort, se cuenta con dos resistencias eléctricas de 15 kW cada una que calientan directamente el aire del interior del vehículo.

2.3. Consumo energético de vehículos estacionados en cocheras

Durante los periodos que están fuera de servicio, los vehículos permanecen estacionados en las cocheras, generalmente a la intemperie, o bien en cobertizos abiertos por la parte frontal y trasera. Salvo en los casos en que se tengan que realizar operaciones de mantenimiento que requieran desconectar el suministro eléctrico de los vehículos (pantógrafo bajado), estos permanecen con todos los equipos auxiliares encendidos durante el tiempo que pasan en las cocheras, incluso de noche. Con esta práctica se pretende facilitar las labores de limpieza de los vehículos y evitar el deterioro de determinados componentes por congelación y/o condensaciones.

Un estudio reciente indica que el 11% del consumo anual de un vehículo del metro de Newcastle se produce mientras está estacionado en las cocheras [7]. En la Tabla. 1 se muestra la distribución de dicho consumo. Se observa como el mayor gasto energético se debe a la calefacción, que representa aproximadamente un 45% del consumo anual del vehículo estacionado. Naturalmente, este porcentaje es variable en función de las condiciones ambientales, en particular de la temperatura. El citado estudio demuestra que el sistema de calefacción deja de funcionar cuando la temperatura exterior es superior a 12-13°C, por lo que, teniendo en cuenta la baja inercia térmica de este tipo de vehículos [10], se puede concluir que la temperatura de consigna estarán torno a los 14-15°C (nótese que este es un dato que no se ha podido comprobar experimentalmente en dicha investigación).

Tabla 7: Consumo energético de un vehículo *Metrocar* estacionado en cocheras.

| Equipo | Potencia media (kW) | % consumo anual |
|-----------------------------|---------------------|-----------------|
| Calefacción | 6,5 | 45 |
| Iluminación | 1,5 | 10 |
| Compresor | 0,6 | 4 |
| Ventilación y otros equipos | 6 | 41 |

Por otra parte, es interesante destacar que los vehículos parados tienen un consumo constante de aproximadamente 8 kW, debido a la iluminación, el sistema de aire comprimido, funcionamiento de ventiladores y diferentes equipos electrónicos.

4. Modelo térmico de un vehículo *Metrocar*

Para la realización de un modelo térmico del vehículo *Metrocar* se ha utilizado un plug-in que se suministra con el software de simulación térmica transitoria TRNSYS17. Este plug-in denominado trnsys3D se habilita bajo la interfaz del software SketchUp y permite un modelado tridimensional de las diferentes zonas térmicas que pueda contener una determinada envolvente. Además de la incorporación de datos geométricos, esta herramienta permite añadir las condiciones de frontera de cada una de las superficies del modelo térmico.

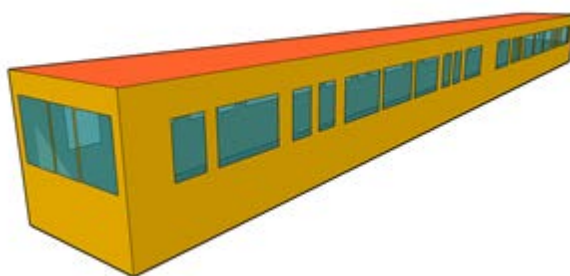


Figura 18. Modelo térmico del vehículo *MetroCar*

La Figura 1 muestra el modelo térmico desarrollado con esta herramienta. Debido a las características constructivas del vehículo *Metrocar* y puesto que la superficie del suelo se encuentra elevada respecto del terreno, todos los cerramientos se han considerado en contacto con la temperatura ambiente exterior.

La envolvente térmica del *Metrocar* está compuesta esencialmente de una primera capa de aluminio en contacto con el ambiente exterior. A continuación se encuentra una cámara de aire e interiormente una última capa de acero. Los perfiles que le dan consistencia estructural al vagón también son de acero pero no han sido considerados en los cálculos térmicos. La cámara de aire existente entre ambas capas de metal tiene un espesor de 5 cm. Se han seleccionado las mismas capas de material para los cerramientos correspondientes con el suelo, las paredes y el techo del habitáculo. Las conductividades térmicas se han obtenido de la base de datos del programa TrnBuild utilizado para la incorporación de los cerramientos en TRNSYS. Para el aluminio se ha tomado 160 W/mK y para el acero 50 W/mK. Dada la naturaleza metálica de estos cerramientos, la resistencia térmica de los mismos apenas se ve influenciada por el espesor de las diferentes capas metálicas, siendo determinante el espesor de la cámara de aire. La superficie acristalada está compuesta de un cristal simple claro de 6 (mm) de espesor y 5.73 W/m²K de conductividad.

La Tabla 2 resume las características principales de los diferentes cerramientos. Se han considerado unos coeficientes de convección de 8.13 y 28.27 W/m²K para la cara interior y exterior del vehículo, respectivamente.

Tabla 8: Transferencia de calor en los cerramientos.

| Coeficientes de transferencia de calor para cada superficie | | | | | |
|---|---------------------|-------|---|---|------------------------|
| | A (m ²) | e (m) | R _{capas} (m ² K/W) | R _{pared} (m ² K/W) | U (W/m ² K) |
| Paredes | 102.220 | 0.090 | 0.181 | 0.225 | 4.450 |
| Vidrios | 35.440 | 0.006 | | | 5.730 |
| Suelo | 73.670 | 0.090 | 0.159 | 0.203 | 4.923 |
| Techo | 73.670 | 0.090 | 0.159 | 0.203 | 4.923 |
| Total | 285 | | | | |

5. Calibración del modelo

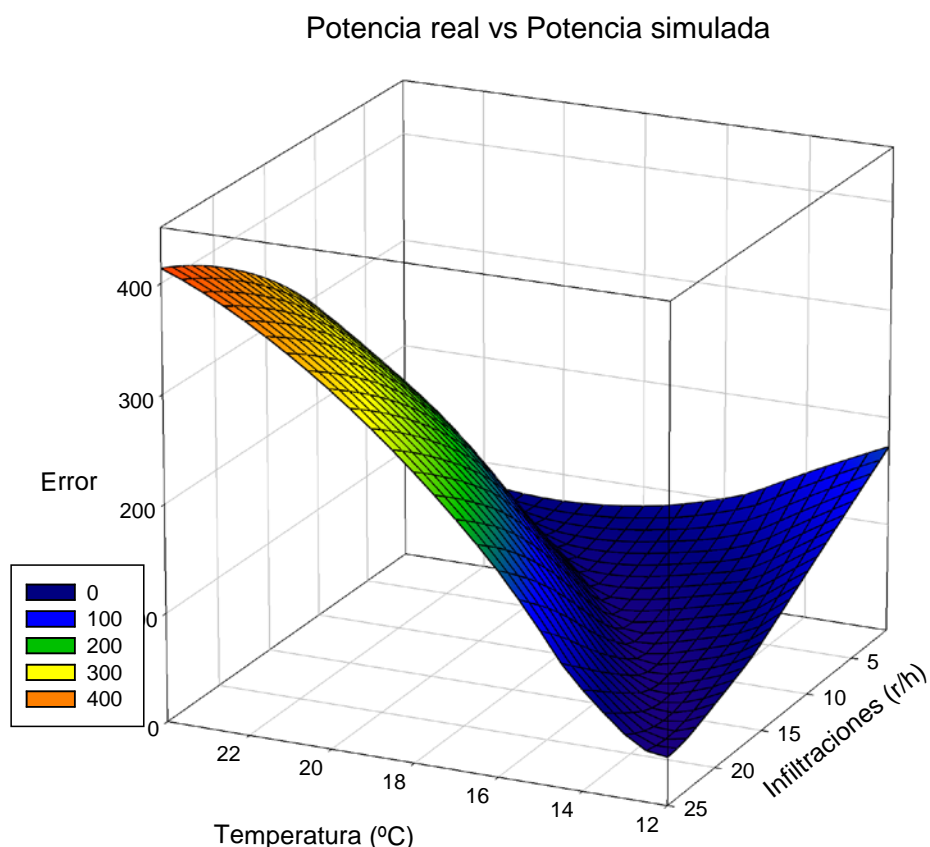
La organización EVO (Organización para la evaluación de la eficiencia) edita y actualiza periódicamente un protocolo para la medición y verificación de sistemas energéticos [11]. En esta publicación se propone una metodología para la calibración de determinados modelos energéticos y se justifica que, una vez que estos modelos se encuentren calibrados, se pueden utilizar para la evaluación de diferentes medidas de ahorro energético.

Las exigencias de calibración que defienden tanto EVO como ASHRAE en [12] permiten la calibración de un modelo únicamente variando las infiltraciones entre 1/10 hasta 10x de los valores esperados. Para este proceso de calibración se ha utilizado la herramienta GenOpt que permite lanzar simultáneamente diferentes simulaciones y trabajar con la capacidad multicore del procesador y de esta manera poder obtener resultados en un tiempo razonable.

Para calibrar el modelo se ha calculado el error cuadrático medio (RMSE) entre la potencia eléctrica real del vehículo y la potencia necesaria que estima el modelo térmico.

6. Resultados: validación del modelo

Haciendo un primer análisis, se obtienen los resultados de la Figura 2. En esta figura se representa el error cuadrático cometido con el modelo térmico (suma de las diferencias al cuadrado de la potencia real medida y la potencia simulada), frente a la temperatura de consigna y frente al número de infiltraciones que se utilizarían para la calibración del modelo. Se aprecia que dependiendo de la temperatura de consigna, se obtiene un mínimo del error para un número de infiltraciones



determinado.

Figura 19. Error cometido frente a infiltraciones y temperatura de consigna.

En el apartado 2.3 se ha razonado porqué en el *MetroCar* la temperatura de consigna está establecida entre 14 y 15 °C. Para la realización del modelo térmico, la temperatura de consigna se ha establecido en 14.6 °C y se ha obtenido que con unas infiltraciones de 15 renov/hse minimiza el error cuadrático. Hay que aclarar que dentro de estas infiltraciones están incluidas las renovaciones del sistema de ventilación, dado que el vehículo no presenta ningún sistema de recuperación para el calor del aire de ventilación. La Figura 3 compara los resultados medidos experimentalmente frente a los obtenidos mediante la simulación transitoria del modelo energético.

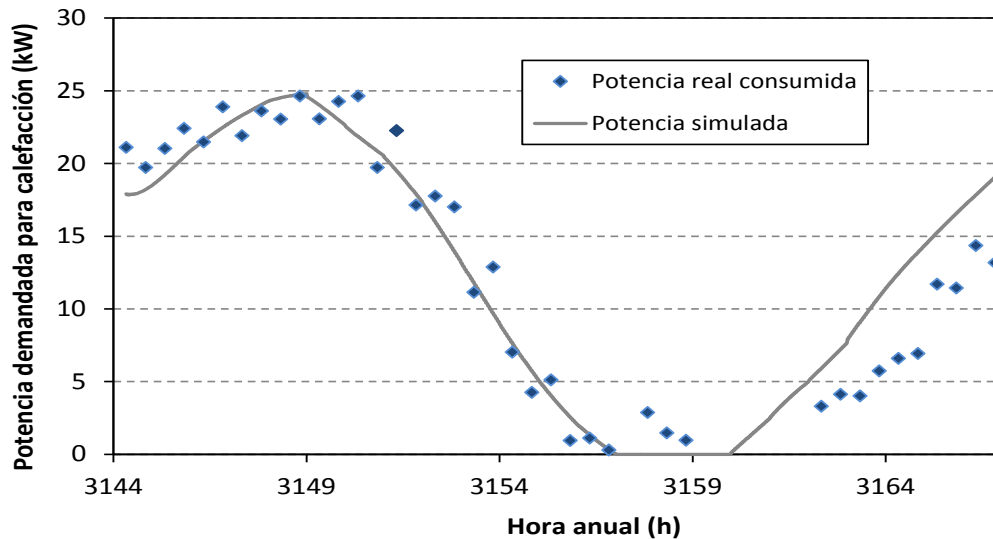


Figura 20. Comparación entre potencia real consumida y potencia simulada por el sistema de calefacción. 15 mayo 2012

Se aprecia que el modelo térmico se aproxima a los datos reales especialmente durante las primeras horas del día simulado. A medida que el día avanza y la temperatura exterior aumenta, el modelo demanda ligeramente más potencia. En cambio la pendiente de las diferentes potencias es similar durante estas horas del día.

Esta desviación del modelo durante las horas matinales del día simulado puede ser debida a la incertidumbre asociada a la orientación original del vehículo. Para la realización de la simulación, se ha considerado una determinada orientación y esta suposición influye especialmente en los momentos del día en los que existe radiación. Además, los datos de temperatura han sido extraídos de la estación meteorológica más cercana, que en este caso ha sido el aeropuerto de Newcastle, y pueden variar ligeramente con respecto a la temperatura ambiente del emplazamiento del vehículo.

7. Conclusiones

Como continuación a un trabajo experimental iniciado por los autores, se ha desarrollado un primer modelo térmico mediante herramientas de simulación transitoria. Los datos obtenidos del modelo teórico se han contrastado con los datos experimentales de los que se dispone.

Para confeccionar el modelo que aproxima el comportamiento térmico de un vehículo *MetroCar* se han empleado ScketchUp, TRNSYS y TrnBuild. Asimismo, se ha utilizado el software de optimización GenOpt para la calibración del modelo.

Dado que los datos experimentales de los que se dispone no son suficientemente extensos, se requiere la validación del modelo con más datos experimentales para contrastar los valores obtenidos bajo diferentes hipótesis y perfeccionar este primer modelo obtenido.

A pesar del reducido error cometido, el modelo todavía presenta cierta incertidumbre puesto que ha sido necesario realizar numerosas hipótesis de partida entre las que están la orientación geométrica del

vehículo, los coeficientes de convección de las paredes o la temperatura de la zona exacta de estacionamiento del vehículo. En trabajos futuros se espera poder reducir la incertidumbre del modelo mediante la medición in situ de las variables necesarias para la simulación.

El único parámetro que se permite variar mediante el método de calibración seleccionado ha sido las infiltraciones del habitáculo. Cuando la temperatura de consigna está entre 14 y 15 °C, el error cometido entre la potencia de calefacción simulada y medida se reduce al mínimo cuando las infiltraciones se encuentran en 15 renovaciones hora.

En líneas futuras también se espera perfeccionar el modelo térmico incorporando los numerosos puentes térmicos presentes en este tipo de vehículos ferroviarios.

Una vez que se obtenga un segundo modelo totalmente calibrado y contrastado, se podrá predecir la energía térmica requerida por estos vehículos. El objetivo final será proponer y validar diferentes medidas para reducir su consumo energético y, consecuentemente, sus emisiones atmosféricas.

1. Referencias

[1] EUROPEAN COMMISSION, Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a Competitive and Resource Efficient Transport System[en línea] Disponible en: <http://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=COM:2011:0144:FIN:en:PDF>.

[2] IEA & UIC, Railway Handbook 2012-Energy Consumption and CO2 Emissions [en línea]. Disponible en: http://www.uic.org/IMG/pdf/iea-uic_energy_consumption_and_co2_emission_of_world_railway_sector.pdf.

[3] VUCHIC, V.R. Urban Transit Systems and Technology. Hoboken, New Jersey (EE.UU): John Wiley & Sons, Inc., 2007.

[4] CHESTER, M.V. HORVATH, A. Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains. Environmental Research Letters, 2009, vol. 4, pp. 1-8.

[5] GONZÁLEZ-GIL, A. PALACIN, R. BATTY, P. POWELL, J.P. A systems approach to reduce urban rail energy consumption. Energy Conversion and Management, 2014, vol. 80, pp. 509-524.

[6] STRUCKL, W. STRIBERSKY, W. GUNSELMANN, W. Life cycle analysis of the energy consumption of a rail vehicle. En International Workshop of Allianz pro Schiene: Improvement of the Environmental Impacts of Rail Transport – Challenges, Good Practices and Future Challenges (Berlin, 2006).

[7] POWELL, J.P. GONZÁLEZ-GIL A. PALACIN, R. Experimental assessment of the energy consumption of urban rail vehicles during stabling hours: Influence of ambient temperature. Applied Thermal Engineering, 2014, vol. 66, pp. 541-547.

[8] HOWARD, D.F. Tyne and Wear Metro – a modern rapid transit system. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, 1976, vol. 190, pp. 121- 136.

[9] PRICKETT, B.R. Electrification of the Tyne and wear Metro. Electric Power Applications, IEE Proceedings B, 1981, vol. 128, pp. 81-91.

[10] AMRI, H. HOFSTÄDTER, R.N. KOZEK, M. Energy efficient design and simulation of a demand controlled heating and ventilation unit in a metro vehicle. En IEEE Forum on Integrated and Sustainable Transportation Systems, FISTS 2011 (Viena, 2011).

[11] International performance measurement and verification protocol IPMVP Efficiency valuation organization EVO. January 2012

[12] ASHRAE Guideline 14-2002. Measurement of energy and demand savings. ISSN 1049-894X. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.