

CONVERSIÓN DE UN CAMIÓN CON PROPULSIÓN CONVENCIONAL A ELÉCTRICO MEDIANTE METODOLOGÍA DE SIMULACIÓN VEHICULAR

CONVERSION OF A CONVENTIONALLY PROPELLED TRUCK TO ELECTRIC USING VEHICLE SIMULATION METHODOLOGY

Sebastián Bibiloni, Santiago Martínez-Boggio y Pedro Curto-Risso

*Instituto de Ingeniería Mecánica y Producción Industrial, Facultad de Ingeniería, Universidad de la
República, Julio Herrera y Reissing 565, Montevideo 11300, Uruguay, sbibiloni@fing.edu.uy.*

Palabras clave: Herramientas de simulación de vehículos, Tren motriz Eléctrico, Ciclos de conducción.

Resumen. Convertir un camión convencional en eléctrico implica una planificación y diseño cuidadosos. El uso de herramientas numéricas es fundamental, ya que permiten simular y analizar opciones de diseño y configuraciones. Esto optimiza el proceso de conversión, asegurando que el camión cumpla con los objetivos de rendimiento. Este estudio se centra en la simulación completa de un camión de alumbrado público originalmente propulsado por un motor diésel. Utilizando el software AVL Cruise M, se realizan validaciones experimentales y optimizaciones de componentes bajo diversas condiciones de conducción. El camión tiene una plataforma de trabajo elevada para acceder a farolas, lo que complica el diseño. Los resultados muestran que el camión eléctrico es un 80% más eficiente que su contraparte no híbrida en entornos urbanos, demostrando la ventaja de utilizar herramientas numéricas para estimar autonomía, consumo de energía y reducción de emisiones de CO₂.

Keywords: Vehicle simulation tools, Electric powertrain, Driving cycles.

Abstract. Converting a conventional truck into an electric vehicle involves careful planning and design. The use of numerical tools is crucial as they enable simulation and analysis of design options and configurations, optimizing the conversion process to ensure the truck meets performance objectives. This study focuses on complete simulation of a public lighting truck originally powered by a diesel engine. Utilizing AVL Cruise M software, experimental validations and component optimizations are conducted under various driving conditions. The truck features a raised working platform for accessing streetlights, complicating the design. Results show that the electric truck is 80% more efficient than its non-hybrid counterpart in urban environments, highlighting the advantage of using numerical tools to estimate range, energy consumption, and CO₂ emissions reduction.

1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, la conversión de vehículos con propulsión convencional en híbridos o eléctricos se presenta como una solución clave para reducir la contaminación generada por actividades humanas (Lelieveld, J et al. 2015). Esto permite mejorar los vehículos a un costo menor que adquirir uno nuevo. Cuando se utiliza energía eléctrica de fuentes renovables, contribuye significativamente a reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y minimiza la contaminación derivada de los desechos de los vehículos (Li, Z et al. 2019).

El Retrofitting de vehículos, actualmente en fase de investigación, es llevado a cabo por algunas empresas, como se analiza en el trabajo de Martinez-Boggio et al. 2023. Para un proceso de Retrofitting eficiente y económico, las herramientas de simulación numérica del vehículo, como AVL CRUISE M, son esenciales. Estas permiten un diseño preciso sin necesidad de prototipos físicos, ahorrando tiempo y costos significativos. A menudo, proporcionan resultados cercanos a la realidad, con diferencias menores al 5% (Zhou, Y et al. 2019).

La adopción de la electrificación vehicular ha demostrado ser una estrategia prometedora para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero. Los vehículos eléctricos eliminan las emisiones de escape asociadas con los motores de combustión interna y son más eficientes, reduciendo las emisiones contaminantes y partículas finas, que afectan la calidad del aire y la salud humana. Los motores eléctricos son inherentemente más eficientes que los diésel en términos de conversión y utilización de energía, resultando en menor consumo energético, mayor autonomía por carga y, en última instancia, una reducción en la demanda total de energía.

En este artículo, se presenta un caso de Retrofitting de un vehículo Diesel a un vehículo eléctrico. Como primera etapa del proyecto, se ha iniciado la electrificación de un camión Diesel convencional utilizado para el mantenimiento y reparación del alumbrado público en una ciudad. Para lograr una reducción efectiva de emisiones y residuos, junto con el cumplimiento de objetivos de rendimiento, potencia y operación, es esencial utilizar herramientas computacionales como AVL CRUISE M. Estas herramientas permiten simulaciones, desarrollo de modelos y análisis de datos, esenciales para diseñar y dimensionar componentes, integrándolos adecuadamente en el vehículo.

2 METODOLOGIA

2.1 Modelado del vehículo

La parte fundamental de este trabajo consiste en modelar el vehículo para comprender y predecir su funcionamiento, lo cual es crucial para diseñar los nuevos componentes necesarios en la electrificación del vehículo. Es esencial tener en cuenta todos los aspectos y requisitos operativos del camión para asegurar que las mejoras implementadas satisfagan estas necesidades.

Se llevaron a cabo medidas en el camión físico y una revisión bibliográfica exhaustiva para recopilar los datos esenciales requeridos para construir submodelos dentro del software. Aunque hubo algunas lagunas en la información, como inercias de ciertos componentes, coeficientes de resistencia a la rodadura de las ruedas y eficiencia de la caja de cambios, estos se estimaron siguiendo los estándares recomendados en la bibliografía.

La validación del modelo se centró en los coeficientes de resistencia a la rodadura y la eficiencia de la caja de cambios, como se detalla más adelante en la Tabla 1, que presenta los datos claves del camión Diesel que será electrificado.

| Parámetro | Valor |
|---|-------------------------------|
| Peso del vehículo [kg] | 5820 |
| Area frontal [m ²] | 4.89 |
| Coefficiente de arrastre [-] | 0.335 |
| Coefficiente rozamiento [%] | 1.8 |
| Potencia/Par máximo motor combustión [kW/Nm] | 125/450 |
| Velocidad máxima de rotación motor combustión [RPM] | 4000 |
| Relación caja de transmisión [-] | 5.07/2.61/1.52/1.00/0.77/0.66 |
| Relación de diferencial [-] | 5.86 |

Tabla 1: Características del camión convencional Diesel.

Para el modelado del vehículo, se utiliza el software de simulación AVL CRUISE M debido a sus capacidades multidisciplinarias en el análisis de sistemas y vehículos. Este software proporciona herramientas avanzadas para realizar análisis de movilidad, diseño y disposición de subsistemas, lo que permite obtener resultados precisos y detallados. Las ventajas principales de AVL CRUISE M es su versatilidad, ya que es capaz de trabajar con vehículos de diferentes tipos de propulsión, como eléctricos, híbridos o de combustión interna. En la Figura 1 se observa la interfaz del modelo con un ejemplo del camión de referencia de propulsión convencional Diesel.

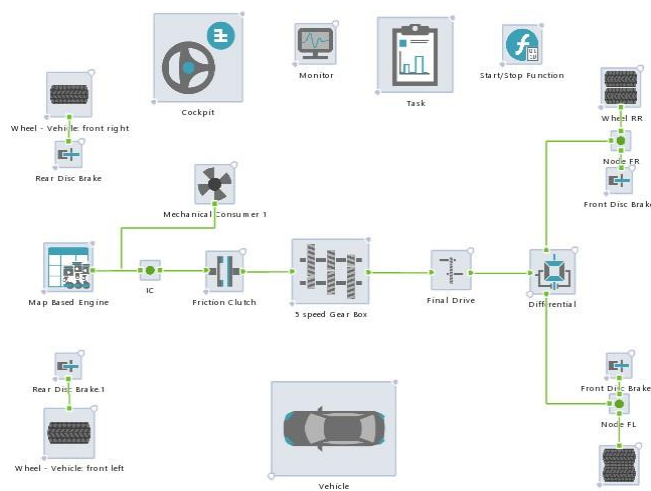


Figura 1: Imagen de interfaz del software AVL con modelo del camión diésel.

Esta herramienta se divide en diferentes submodelos, que corresponden a cada uno de los componentes. El submodelo de vehículo y acoplamiento mecánico abarca todos los aspectos físicos y mecánicos del camión, como las relaciones de marcha, inercias de partes móviles, eficiencias mecánicas, coeficientes de fricción, entre otros. Estos submodelos realizan un balance detallado de las fuerzas instantáneas que actúan sobre el camión, con el fin de determinar el par y la velocidad necesarios a entregar por el sistema de propulsión en orden de satisfacer las demandas requeridas. Al llevar a cabo este balance de fuerzas, se consideran no solo factores como la resistencia aerodinámica, el peso y la resistencia de rodadura, sino que también se incluyen los efectos de las inercias y los rozamientos internos. Un esquema simplificado del modelo se puede observar en la Figura 2. Todas estas variables son tenidas en cuenta con el objetivo de obtener la fuerza de tracción requerida, ya que, si se conoce la

velocidad y condiciones de traslación instantáneas, puede hallarse la potencia y par requeridos por el motor (combustión interna o eléctrico dependiendo el tipo de vehículo) logrando desarrollar el ciclo transitorio establecido.

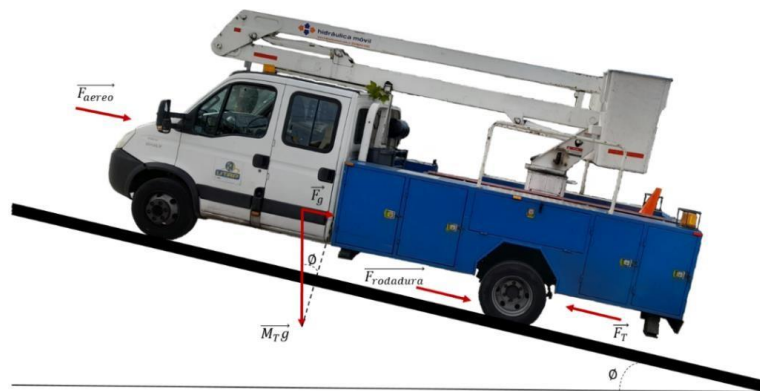


Figura 2: Diagrama de fuerzas sobre camión subiendo una pendiente de ángulo θ .

Para el caso del vehículo propulsado por un motor de combustión interna, se debe detallar el consumo de combustible y emisiones para cada punto de operación en el submodelo de motor. El mismo simula el comportamiento del motor real del vehículo, utilizando el mapa motor específico del vehículo y considerando características clave como el número de cilindros, la cilindrada, el tipo de combustible, las inercias de los componentes, etc. Este submodelo permite simular el funcionamiento del motor, prediciendo consumos, emisiones, rendimientos, entre otros, al tener en cuenta el mapa motor y la velocidad/par requerida durante el funcionamiento del vehículo.

Para el caso del vehículo eléctrico, similar al mapa de consumo de combustible se utiliza el mapa de eficiencia eléctrica del motor de tracción eléctrico. Como se probarán diferentes motores de los cuales no se cuenta con este tipo de mapa (debido a confidencialidad de los fabricantes), se utilizará un mapa base y se escalará multiplicando el torque máximo por el correspondiente al motor a probar (Grunditz, E.A, 2017). En este trabajo se consideran cuatro motores eléctricos con las características detalladas en Tabla 2, donde se observa que los motores tienen diferentes par nominal y velocidad máxima de rotación, así como distintas potencias mecánicas. La preselección se realizó con motores con potencia nominal entre 100 – 160 kW, similar potencia que el motor de combustión interna. Uno de los objetivos de este trabajo es mostrar la capacidad de las herramientas computacionales para la correcta selección, sin necesidad de prototipos experimentales, que reducen significativamente los costos y tiempos.

Para el paquete de baterías se utilizaron módulos comerciales de tipo NMC (química del cátodo) debido a su alta densidad energética (>140 Wh/kg). Esto permite reducir el peso y el volumen, comparado con las celdas de tipo LFP. La Tabla 3 muestra una descripción de los datos utilizados para un módulo de 37 kWh. De los datos del módulo se puede obtener que el voltaje nominal de cada celda es de 3.7V, capacidad de 52 Ah y el módulo completo tiene una densidad energética de 142 Wh/kg.

El submodelo del conductor utiliza la información de todos los submodelos y mediante el accionamiento de los pedales de acelerador, embrague y freno se esfuerza por cumplir con el ciclo de conducción seleccionado. Esto lo realiza por medio de un controlador PID (Proporcional, integral y derivativo) que busca cumplir con el ciclo. Por lo tanto, es crucial

afinar y ajustar adecuadamente estos submodelos, asegurándose de que los parámetros configurables se asemejen lo más posible a los del camión real. Esto garantizará una simulación precisa y efectiva del comportamiento del vehículo.

| Motores por evaluar | Velocidad (rpm) | Torque Nominal (Nm) | Potencia Nominal (kW) | Torque Pico (Nm) | Potencia Pico (kW) |
|-------------------------|-----------------|---------------------|-----------------------|------------------|--------------------|
| TZ400XS-100-K01 | 0-2700 | 1000 | 100 | 2500 | 200 |
| Cascadia HVH410-150 DOM | 0-4800 | 1440 | 125 | 2060 | 165 |
| Cascadia SS-250-115 SOM | 0-12000 | 308 | 130 | 480 | 225 |
| TM4 SUMO MD HV2600-6P | 0-3600 | 970 | 155 | 2760 | 265 |

Tabla 2: Características de los motores eléctricos seleccionados a evaluar.

Basándonos en el modelo convencional previamente establecido, se procedió a desarrollar los modelos del camión eléctrico para la conversión. Se elaboraron dos modelos eléctricos distintos: uno con caja de cambios, el cual se diseñó para contar únicamente con dos cambios - uno de baja para situaciones que demanden mayor fuerza en las ruedas y otro de alta para operaciones normales en calles urbanas; y otro modelo sin caja de cambios, en el cual el motor eléctrico de tracción se encuentra conectado directamente al diferencial. Durante la adaptación de estos modelos, se eliminaron los componentes que ya no eran relevantes y se incorporaron los elementos esenciales para un vehículo eléctrico, incluyendo el motor eléctrico, baterías, inversores, cableado, entre otros. La Figura 3 exhiben el modelo de camión eléctrico en el software, representando el modelo con caja de cambios.

| Parámetro | Valor |
|--|-------------|
| Capacidad nominal [Ah] | 104 |
| Energía nominal [kWh] | 37 |
| Energía utilizable [kWh] | 35 |
| Voltaje nominal [V] | 355 |
| Peso [kg] | 260 |
| Dimensiones [mm] | 925x854x310 |
| Química cátodo [-] | NMC 811 |
| Configuración celdas [-] | 96s x 2p |
| Sistema de acondicionamiento térmico [-] | Glicol-Agua |
| Vida útil hasta 80% capacidad [ciclos] | 2500 |

Tabla 3: Características del módulo de batería NMC.

2.2 Ciclo de conducción y uso

El vehículo en cuestión realiza jornadas de 8 horas diarias con un recorrido promedio de 42 kilómetros, en los cuales durante una operación normal realiza distintos tipos de maniobras como recorrido por caminos en mal estado o desniveles, operación de plataforma aérea, entre otros. Por esto se decidió medir los ciclos de operación normales del vehículo, así como también ciclos especiales de funcionamiento con el objetivo de mejorar la comprensión y modelado del vehículo. Para llevar a cabo esto, se utilizó un sistema de posicionamiento

global (GPS) en el vehículo y la conexión a la ECU mediante OBD2, lo que permitió medir diferentes variables a lo largo del tiempo. Los datos más importantes recolectadas son: velocidad del vehículo, posición, altitud y operación del motor de combustión interna (revoluciones por minuto y carga). Los valores de velocidad del vehículo y posición instantánea contribuyeron a la creación de varios ciclos de conducción que tomaremos como representativo. En total se realizaron cuatro ciclos de conducción, los cuales implicaron más de 6 horas de mediciones, con una distancia recorrida de 116 km.

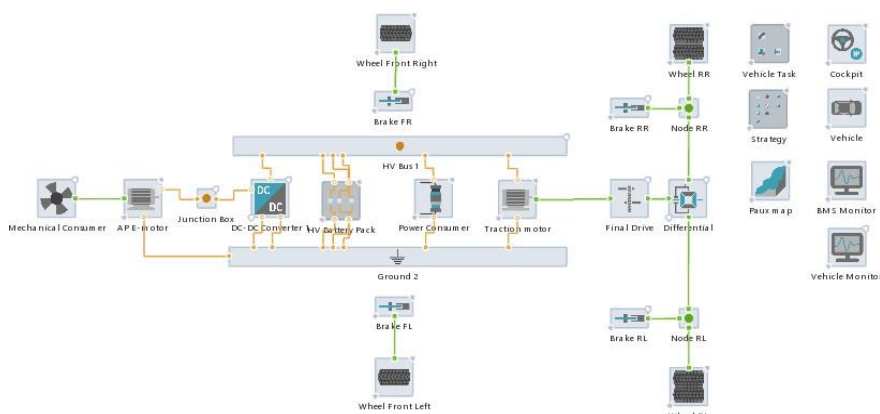


Figura 3: Modelo de camión eléctrico con caja de cambios

En la Figura 4 se muestran los cuatro ciclos de conducción recabados en Montevideo, Uruguay, así como el ciclo de homologación para este tipo de vehículos. En total a lo largo de los resultados se trabajarán con estos 5 ciclos de conducción. El ciclo 1 muestra la operación en autovía combinado con una fase de elevación mientras que los otros ciclos en Montevideo (Ciclo 2 a Ciclo 4) son de tipo urbano. El ciclo de homologación WHVC (Ciclo 5) representa fases urbanas, rurales y de autovía. Se realizó un estudio de la operación del camión, donde se determinó que en general el recorre por día entre 7 y 73 km, con mayor frecuencia entre 31 y 37 km con días extraordinarios que alcanzan picos cercanos a los 100 km. Esto se tomará en cuenta para el dimensionamiento de la batería en términos de energía almacenada luego de determinar el motor eléctrico en términos de potencia.

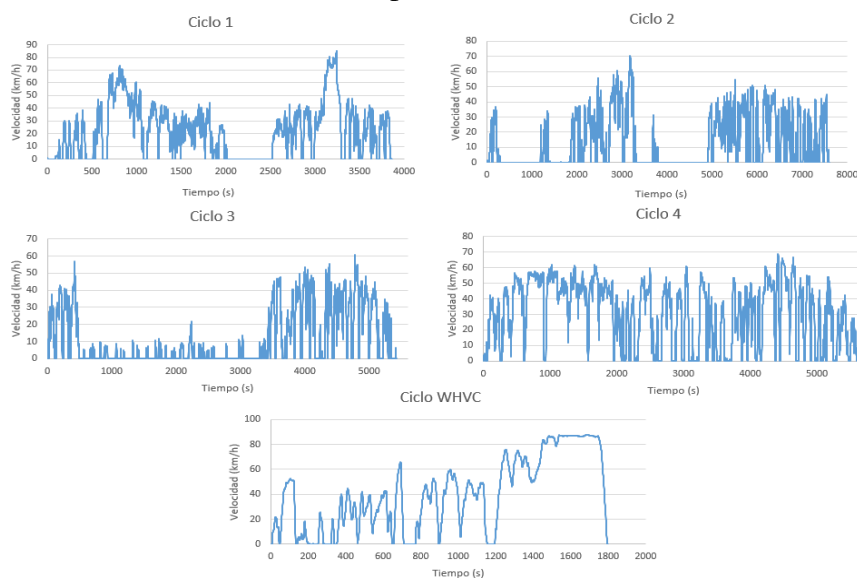


Figura 4: Ciclos de conducción en Montevideo y de homologación (WHVC).

2.3 Validación del modelo

La validación del modelo computacional del vehículo original es de suma importancia, ya que garantiza la precisión y confiabilidad del modelo, lo cual es fundamental para el diseño del sistema de conversión. Para lograr esta validación, se utilizó un mecanismo que consistió en comparar varios parámetros entre el vehículo original y el modelo computacional en un mismo ciclo de operación. Entre los parámetros evaluados se incluyeron los consumos de combustible y la distancia recorrida.

Con el objetivo de cuantificar el consumo de combustible, se instaló en el vehículo un tanque de combustible auxiliar que podía ser fácilmente montado y desmontado junto a una balanza. Calculando la variación de peso del tanque auxiliar desde el inicio hasta el final del ciclo, y tomando en consideración el tipo de combustible utilizado, se pudo determinar la cantidad de combustible consumido durante el ciclo. Para llevar a cabo esta instalación, se procedió a desconectar el tanque original del motor y se estableció la conexión con el tanque auxiliar.

El objetivo fue asegurarse de que el modelo computacional fuera capaz de reproducir con alta precisión el desempeño del vehículo original. Se realizaron ajustes y optimizaciones en el modelo, de manera que los resultados obtenidos en términos de los parámetros mencionados fueran consistentes. Una vez logrado este nivel de concordancia, se considera que el modelo es sólido y capaz de simular de manera completa el comportamiento del vehículo original. Para calibrar el modelo con la fidelidad del vehículo original, se procedió a ajustar algunos parámetros como el coeficiente de resistencia a la rodadura de las ruedas y la eficiencia de la caja de cambios. El conjunto de datos escogido para esta validación demostró discrepancias inferiores al 1%, lo que garantizó una concordancia aceptable entre los resultados obtenidos por el modelo y los experimentales. Algunos de estos resultados logran observarse en la tabla 4, que presenta información crucial para la validación como son los kilómetros recorridos y el consumo de combustible.

| Parámetro | Experimental | Simulación | Diferencia [%] |
|-----------------------------|--------------|------------|----------------|
| Distancia Recorrida [km] | 47.7 | 47.4 | 0.59 |
| Consumo de combustible [kg] | 6.36 | 6.39 | 0.47 |

Tabla 4: Resultados de validación experimental

3 RESULTADOS

3.1 Preselección de components

Para la preselección del motor eléctrico, se llevó a cabo una evaluación exhaustiva de varios candidatos y se comparó su desempeño con el motor de combustión interna (MCI) del vehículo original. A través de un ensayo del comportamiento del MCI que equipa el camión en estudio, proporcionó las curvas características del motor (entrega de par en el eje en función de la velocidad de giro).

Utilizando este conocimiento sobre el comportamiento del MCI a máxima potencia y las relaciones de reducción y marchas correspondientes al diferencial y la caja de cambios, se calculó la fuerza máxima que el MCI podría ejercer en las ruedas para cada cambio en función de la velocidad, como se detalló en Martínez-Boggio, 2022. En estas figuras también incluyeron referencias que indican las pendientes que se pueden superar con esta fuerza, donde un 100% de pendiente representa una inclinación de 45 grados. En términos normales de uso las pendientes no superan el 20% y es en general una referencia a la hora de diseñar sistemas de propulsión. Una de estas comparaciones se puede observar en la Figura 5, para un

motor eléctrico que cumplía con los criterios de preselección. Este método también permitió determinar qué relaciones debían utilizarse para cada motor eléctrico. Es importante destacar que en estas gráficas se representó el par continuo que puede proporcionar el motor eléctrico, no la curva de par máximo.

También se elaboró la Tabla 5, que especifica las modificaciones en la caja de cambios que se aplicarían a cada motor, teniendo en cuenta la posibilidad de prescindir de una caja de cambios. Es esencial recordar que una de las alternativas de diseño implica la conexión directa del motor al diferencial.

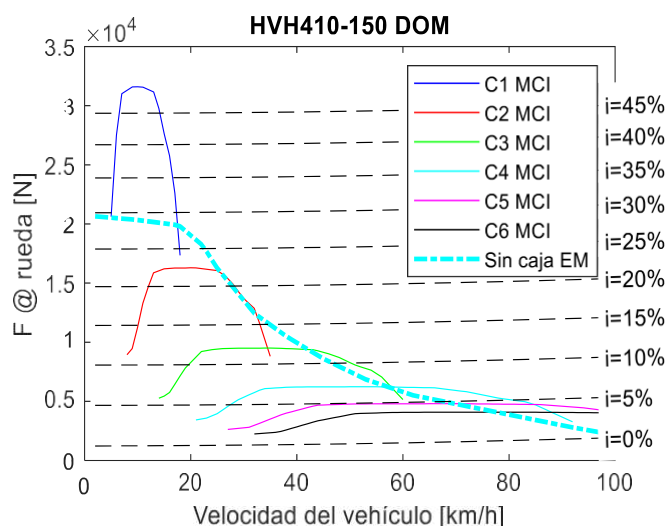


Figura 5: Curva de fuerza en la rueda para el vehículo con propulsión convencional y el eléctrico, siendo el molote del modelo eléctrico el HVH410-150 DOM.

| Caso | Motor | Cambio de baja | Cambio de alta |
|------|-------------------------|---------------------|---------------------|
| 1 | TZ400XS-100-K01 | 3era | 6ta |
| 2 | Cascadia HVH410-150 DOM | Sin caja de cambios | Sin caja de cambios |
| 3 | Cascadia HVH410-150 DOM | 3era | 4ta |
| 4 | Cascadia SS-250-115 SOM | 1era | 2da |
| 5 | TM4 SUMO MD HV2600-6P | Sin caja de cambios | Sin caja de cambios |
| 6 | TM4 SUMO MD HV2600-6P | 4ta | 5ta |

Tabla 5: configuración de los distintos modelos de los motores eléctricos.

3.2 Desempeño en ciclos de conducción

Para los cuatro motores que fueron seleccionados en seis configuraciones, casos, se desarrolló un modelo de simulación específico para cada motor y configuración en AVL Cruise M. Estos modelos se sometieron a simulaciones en el software AVL, evaluándolos en los cinco ciclos de conducción designados. Durante la evaluación de los modelos, se prestaron especial atención a varios parámetros cruciales, como la distancia recorrida, la eficiencia, el par instantáneo entregado por el motor eléctrico y la velocidad instantánea. Además, se monitorearon otros indicadores, como la carga en el paquete de baterías (C-rate), el estado de carga de las baterías (SOC), la corriente en el motor, entre otros, para asegurar que el comportamiento del modelo se alineara con las expectativas. Para las simulaciones el factor de tiempo para las simulaciones de los ciclos de conducción fue 0.0108 en promedio.

En términos de desempeño, las diferencias entre las distancias recorridas por el vehículo modelado y las distancias correspondientes a cada ciclo de conducción fueron inferiores al

2%. En cuanto a la eficiencia, los valores obtenidos para el consumo energético oscilaron entre 64 y 100 kWh/100km. Se aplicó un criterio de preselección que consistió en elegir motores con la mayor eficiencia posible, con el propósito de aumentar la autonomía manteniendo una carga constante. La Figura 6 muestra los consumos de energía obtenidos en la simulación para los distintos motores en los diferentes ciclos de conducción, siendo el ciclo 5 el WHVC. Uno de los objetivos de los proyectos de *Retrofitting* aumentar la eficiencia de los vehículos, por lo que se comparó como cambia esta entre el modelo convencional y el modelo eléctrico. Dicha comparación se puede observar en la tabla 6, donde es claro que la eficiencia del modelo eléctrico es muy superior, ya que los consumos de energía en el eléctrico son prácticamente la mitad.

Se monitoreó el par instantáneo entregado por el motor para evaluar los puntos de operación en los distintos ciclos de conducción. Se observó si estos puntos de operación se encontraban sobre de los límites de par máximo y dónde se ubicaban en la curva de eficiencia del motor. Se buscó que la operación se mantuviera en los puntos de mayor eficiencia posible y que el motor no alcanzara los límites de par máximo. Esto era fundamental, ya que la saturación de los límites de par podría indicar una falta de potencia por parte del motor.

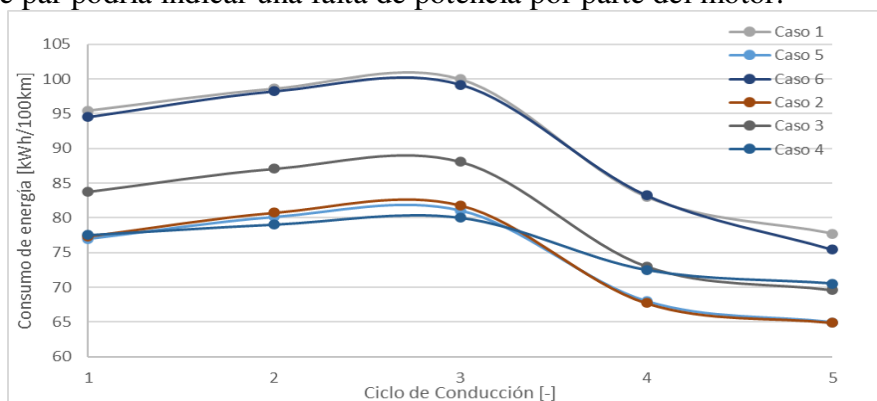


Figura 6: Consumo de energía cada 100 km de cada caso (ver Tabla 5), en cada ciclo de conducción.

| Ciclo de conducción | Consumo volumétrico camión convencional [lt/100km] | Consumo energía camión convencional [kWh/100km] | Diferencia con camión eléctrico diseñado [%] |
|---------------------|--|---|--|
| 1 | 18,3 | 181,4 | 58,3 |
| 2 | 19,8 | 196,6 | 59,4 |
| 3 | 20,0 | 198,8 | 59,8 |
| 4 | 16,0 | 159,1 | 58,5 |
| WHVC | 14,6 | 144,9 | 55,8 |
| Promedio | 17,7 | 176,2 | 58,4 |

Tabla 6: Comparación de consumo energético del camión convencional Diesel con el eléctrico diseñado (motor HVH410-150 DOM de Cascadia Motion).

El motor HVH410-150 DOM de Cascadia Motion, operando a 350V y sin caja de cambios, obtuvo de las mejores eficiencias y capacidades de seguimiento, así como menores diferencias en la distancia recorrida. Por lo tanto, se seleccionó este motor para la electrificación del vehículo en el proyecto de *Retrofitting*. Comparando con el camión convencional, se estima una mejora del 60% en la eficiencia de funcionamiento. El cálculo de la diferencia porcentual se realizó mediante la diferencia del consumo energético (kWh/100km) dividido el consumo del camión convencional (referencia).

3.3 Dimensionamiento de la batería de alto voltaje

Para la preselección selección de baterías se buscó una que tuviera densidad energética alta

y que su voltaje nominal fuera cercano al que requería el motor eléctrico. Para esto se ajustó el modelo computacional en el software AVL, para ampliar su capacidad de almacenamiento útil y su peso en función de la cantidad de módulos de baterías instalados. Es esta forma ajustando un par de parámetros se logra obtener un modelo para el vehículo el cual cambia su comportamiento en función de la cantidad de módulos instalados tenga. Se destaca que, para el peso del vehículo en el modelo, se tuvo en cuenta el peso del camión con propulsión convencional y se estimó el peso del vehículo eléctrico el cual varía en función de la cantidad de baterías.

El objetivo de estas simulaciones es determinar la variación de autonomía y eficiencia en el vehículo a medida que varían la cantidad de módulos de batería. Conociendo cómo evolucionan estas dos variables con la cantidad de módulos o el peso del paquete de baterías puede determinarse la capacidad de almacenamiento necesaria para que el vehículo eléctrico logre alcanzar la autonomía deseada de 100km.

En las Figuras 7a y Figura 7b pueden observarse algunos resultados de las simulaciones, estos son la variación de la autonomía y consumo de energía, respectivamente, en función de la capacidad de almacenamiento de energía útil instalada en el camión. Los cuatro puntos simulados en cinco ciclos de conducción representan 1, 2, 3 y 4 módulos de la batería NMC con cada módulo de 37 kWh de energía almacenada.

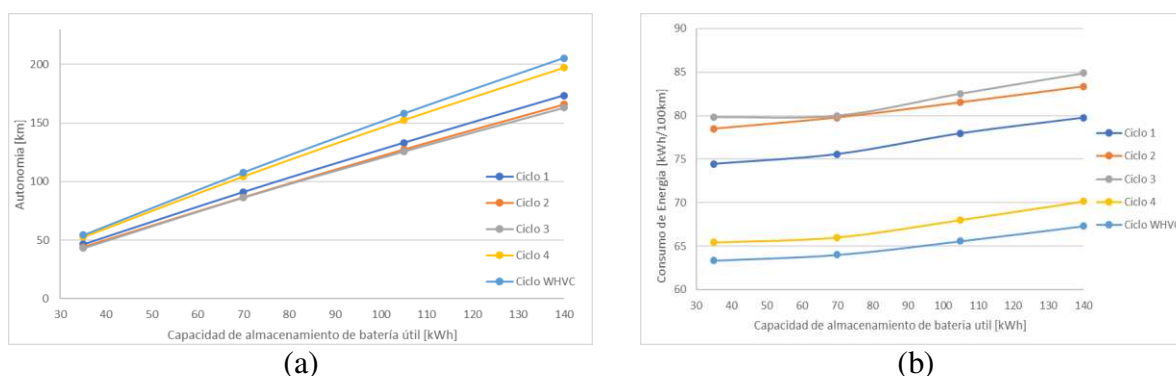


Figura 7: Grafica de autonomía en función de la capacidad de almacenamiento de energía útil en el vehículo (a) y consumo de energía en función de la capacidad de almacenamiento de energía útil en el vehículo (b).

A partir de estos resultados se determina que para lograr alcanzar la autonomía esperada es necesaria una capacidad de almacenamiento de energía útil de 84kWh, por lo que serían necesarias 2.3 módulos de baterías para alcanzar esta capacidad con los módulos. Por esto se decide utilizar simplemente 2 módulos, ya que tres sería un gran sobredimensionamiento. Con dos módulos como fue seleccionado, el peor caso la autonomía que se alcanzó fue en el ciclo 3 con 86.5 km. Por lo que se estima como correcto para la aplicación que se está estudiando. Para evaluar el cambio en la autonomía del camión eléctrico se compara con el de propulsión convencional. Esta comparación puede observarse en la tabla 7. Se encuentran diferencias superiores a 80%, lo que es esperable debido a la gran autonomía que posee el vehículo de propulsión convencional. Esto es una clara desventaja en los vehículos eléctricos, que, sin embargo, en este caso, debido a la utilización que posee este camión la autonomía alcanzada por el modelo eléctrico no es problema.

| Ciclo de conducción | Autonomía camión convencional [km] | Autonomía camión eléctrico [km] | Diferencia con camión eléctrico [%] |
|---------------------|------------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|
| 1 | 547,9 | 91,2 | -83,4 |
| 2 | 505,6 | 86,7 | -82,9 |
| 3 | 500,1 | 86,5 | -82,7 |
| 4 | 624,7 | 104,6 | -83,3 |
| WHVC | 685,8 | 108,0 | -84,3 |
| Promedio | 572,8 | 95,4 | -83,3 |

Tabla 7: Reporte de autonomías de ambos modelos de vehículos.

4 CONCLUSIONES

Este artículo presenta un estudio detallado sobre la conversión de camiones convencionales a vehículos eléctricos utilizando simulación vehicular. En resumen:

- **Importancia de la Simulación Vehicular:** Se destaca la necesidad de usar herramientas como AVL Cruise M para diseñar y optimizar la conversión. La simulación permite analizar el funcionamiento del vehículo eléctrico en diversas condiciones de conducción.
- **Modelado del Vehículo:** Se realiza un minucioso modelado del vehículo original, validado con datos experimentales, lo que garantiza la precisión de las simulaciones. La rapidez para obtener resultados de ciclos de conducción es uno de los puntos fuertes de este tipo de modelos numéricos. El factor de tiempo de simulación fue aproximadamente 0.0108.
- **Selección del Motor Eléctrico:** Se elige el motor HVH410-150 DOM de Cascadia Motion debido a su desempeño satisfactorio en las simulaciones.
- **Dimensionamiento de la Batería:** Se determina una capacidad de almacenamiento de 84 kWh, suficiente para alcanzar la autonomía promedio diaria. Se logra superar la autonomía deseada de 110 km con cargas entre turnos de operación.
- **Eficiencia:** El camión eléctrico es casi el doble de eficiente que su contraparte de combustión interna, lo que reduce significativamente las emisiones de CO₂.

5 REFERENCIAS:

- Grunditz, E.A.; Thiringer, T. Modelling and Scaling Procedure of a Vehicle Electric Drive System. Chalmers Publ. Libr. 2017.
- Heywood, J.B. Internal Combustion Engine Fundamentals; 2018; ISBN 9781260116113.
- Lelieveld, J.; Evans, J.S.; Fnais, M.; Giannadaki, D.; Pozzer, A. The Contribution of Outdoor Air Pollution Sources to Premature Mortality on a Global Scale. *Nature* 2015, 525, 367–371, doi:10.1038/nature15371.
- Li, Z.; Khajepour, A.; Song, J. A Comprehensive Review of the Key Technologies for Pure Electric Vehicles. *Energy* 2019, 182, 824–839, doi:10.1016/j.energy.2019.06.077.
- Martinez-Boggio, S.; Irimescu, A.; Curto-Risso, P.; Merola, S.S. Assessment of a Second Life City Vehicle Refurbished to Include Hybrid Powertrain Technology. *Machines* 2023, 11, 699, doi:10.3390/machines11070699.
- Martinez-boggio, S. Study of the Potential of Electrified Powertrains with Dual Fuel Combustion to Achieve 2025 Emissions Targets in Heavy-Duty Applications, Phd Thesis, Universitat Politècnica de Valencia, 2022.
- Zhou, Y.; Ravey, A.; Péra, M.C. A Survey on Driving Prediction Techniques for Predictive Energy Management of Plug-in Hybrid Electric Vehicles. *J. Power Sources* 2019, 412, 480–495, doi:10.1016/j.jpowsour.2018.11.085