

Diseño de un Modelo Matemático para el Cálculo de la Autonomía de Tres Configuraciones de Autobús Eléctrico “Autobuses AGA de Colombia”

Design of a Mathematical Model to Calculate the Autonomy of Three Electric Bus Configurations to be Manufactured by “Autobuses AGA de Colombia”

Projeto de um Modelo Matemático para Calcular A Autonomia de três Configurações de Ônibus Elétricos a Serem Fabricados por “Autobuses AGA de Colombia”

Mario Medina-Pinto ^a
Yolanda Torres-Pérez ^b

^a Maestría Energías Renovables,
Universidad Pedagógica y Tecnológica
de Colombia- Uptc. Facultad Seccional
Duitama, mariomedina@uptc.edu.co

^b Escuela de Ingeniería Electromecánica, Grupo
de Investigación en Energía y Nuevas Tecnologías
GENTE-Universidad Pedagógica y Tecnológica
de Colombia –Uptc. Facultad Seccional
Duitama, yolanda.torres01@uptc.edu.co

Resumen— El desarrollo de vehículos eléctricos en el mundo, está empezando a tener un efecto positivo en la disminución de los gases efecto invernadero y el mejoramiento de la eficiencia energética, principalmente en el sector transporte, (carga y pasajeros). En consecuencia, al impulso que trae la industria de la electromovilidad, la empresa Autobuses AGA de Colombia viene desarrollando un autobús eléctrico en tres configuraciones distintas, tanto en dimensiones como en capacidad de pasajeros y capacidad de baterías y en la que no cuenta con un modelo matemático que le permita calcular su autonomía, antes de su fabricación. Por tal motivo se generó un algoritmo, con una base matemática a partir de las ecuaciones de la dinámica vehicular, cálculos de potencia, energía y estado de carga de las baterías. Al modelo desarrollado se le ingresaron datos del ciclo de conducción armonizado WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure por sus siglas en inglés)[1], datos de fichas técnicas del proveedor de chasis eléctrico y fichas técnicas de las carrocerías. Estos datos fueron procesados utilizando los softwares Matlab y Excel, repitiendo el ciclo de conducción hasta obtener un estado de carga de batería del 20% y de 0%. Con esta data se crearon gráficos de potencia, energía, consumo, y autonomía entre otros y una tabla de datos finales para cada configuración, en dos estados de capacidad de pasajeros del autobús, vacío y capacidad máxima permitida. Se obtuvieron datos de consumo, autonomía y por consiguiente su eficiencia, los cuales le van a servir a la empresa para poder tomar decisiones de diseño antes de la fabricación del autobús, compararse con otros fabricantes en temas de eficiencia energética y así mismo optimizar sus procesos de desarrollo de autobuses eléctricos para participar en licitaciones en Colombia.

Palabras clave— Autonomía, ciclo de conducción, consumo energético, dinámica vehicular, modelado matemático.

Abstract— The development of electric vehicles in the world is beginning to have a positive impact, the reduction of greenhouse gases and the improvement of energy efficiency, mainly in the transport sector (cargo and passengers). Consequently, to the impulse that the electromobility industry brings, the company “Autobuses AGA de Colombia” has been developing an electric bus in three different configurations, both in dimensions and in passenger capacity and battery capacity and in which it does not have a mathematical model that allows you to calculate its autonomy, before its manufacture. For this reason, an algorithm was generated, with a mathematical base from the equations of vehicular dynamics, calculations of power, energy and state of charge of the batteries. Data from the WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure) harmonized driving cycle, data from technical sheets of the electric chassis supplier and technical sheets of the bodies were entered into the mathematical model developed. These data were processed using Matlab and Excel software, repeating the driving cycle until a battery charge state of 20% was obtained. With this data, Power, energy consumption, and autonomy graphs were created, among others, and a table of final data for each configuration, in two states of bus passenger capacity, empty and maximum capacity allowed. Data on consumption,



autonomy and therefore its efficiency were obtained, which will help the company to make design decisions before manufacturing the product, compare with other manufacturers on energy efficiency issues and likewise optimize their processes. development of electric buses to participate in tenders in Colombia.

Keywords— Autonomy, driving cycle, energy consumption, mathematical modeling, vehicle dynamics, mathematical modeling.

Resumo— O desenvolvimento dos veículos elétricos no mundo começa a ter um efeito positivo na redução dos gases com efeito de estufa e na melhoria da eficiência energética, principalmente no setor dos transportes (cargas e passageiros). Conseqüentemente, ao impulso que a indústria da eletromobilidade traz, a empresa Autobuses AGA da Colômbia vem desenvolvendo um ônibus elétrico em três configurações diferentes, tanto em dimensões quanto em capacidade de passageiros e capacidade de bateria e no qual não possui um modelo matemático que permita você calcular sua autonomia, antes de sua fabricação. Para isso, foi gerado um algoritmo, com base matemática a partir das equações de dinâmica veicular, cálculos de potência, energia e estado de carga das baterias. Os dados do ciclo de condução harmonizado WLTP (Worldwide Harmonized Light Vehicles Test) [1], dados das fichas técnicas do fornecedor do chassis elétrico e fichas técnicas das carroçarias foram inseridos no modelo desenvolvido. Esses dados foram processados usando o software Matlab e Excel, repetindo o ciclo de condução até obter um estado de carga da bateria de 20% e 0%. Com esses dados foram elaborados gráficos de potência, energia, consumo, autonomia, entre outros, e uma tabela final de dados para cada configuração, em dois estados de lotação do ônibus, vazio e lotação máxima permitida. Foram obtidos dados de consumo, autonomia e conseqüentemente sua eficiência, que vão ajudar a empresa a tomar decisões de projeto antes da fabricação do ônibus, comparar-se com outros fabricantes nas questões de eficiência energética e da mesma forma otimizar seus processos desenvolvimento de ônibus elétricos para participar de licitações Na Colômbia.

Palavras chave— Autonomia, ciclo de condução, consumo de energia, dinâmica veicular, modelação matemática.

I. INTRODUCCIÓN

Hoy en día, el mundo está sobrellevando uno de los más grandes problemas medio ambientales de los últimos tiempos, debido principalmente al aumento de la generación de Gases de Efecto Invernadero (GEI), como consecuencia del alto consumo de combustibles fósiles, principalmente en el transporte tanto de personas como de mercancías.[2]

Este panorama mundial también ocurre en Colombia, donde cerca del 55% de los viajes realizados a diario en las ciudades, es llevado a cabo por sistemas de transporte urbano público masivo, al igual que han aumentado las rutas escolares y empresariales, las cuales usan combustibles fósiles para su funcionamiento.[3]

De la mano de la generación de gases de efecto invernadero también se encuentra el tema del consumo y eficiencia energética de los sistemas de transporte, ya que según el documento Plan de Acción Indicativo del Programa de Uso Racional de Energía "PAI-PROURE 2022-2030" (adoptado bajo la Resolución 40156 de Abril de 2022.[4]), muestra que la participación del sector transporte en el consumo energético nacional fue del 41% (550 PJ) en 2019, siendo el más alto de todos los sectores.[5]

De los anteriores datos, el sector de mayor consumo energético es el carretero con un 88%, le sigue el transporte aéreo con una participación del 10%, el

marítimo con un 1% y por último el fluvial y ferroviario cada uno con el 0.1%. Dado el consumo energético, el transporte de carga (camiones y tractocamiones) tienen una mayor participación con un 36%, el transporte público de pasajeros (buses, busetas, microbuses y taxis), con un 34%, enseguida los automóviles y camionetas con un 16% y por último las motocicletas con un 14%.[5]

Adicionalmente, el Gobierno Nacional aprobó el Consejo Nacional de Política Económica y Social "CONPES" de Transición Energética denominado CONPES 4075, en el que establece la política sobre lineamientos, estrategias y acciones que le permitirán a Colombia mantener su seguridad y confiabilidad energética, además de promover las Fuentes no Convencionales de Energía Renovable, también hace énfasis en el transporte sostenible y su eficiencia energética entre otras.[6]

En este sentido, existen autores que han utilizado diferentes herramientas para simular el comportamiento de los vehículos eléctricos, bajo ciertas condiciones puntuales según su necesidad, donde su principal característica es el uso de software especializado y el uso de diferentes ciclos de conducción tanto estandarizados como basados en rutas reales de aplicación. Uno de los ciclos de conducción más utilizados actualmente en diferentes países del mundo, es el ciclo WLTP el cual fue elaborado por la **Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas** (CEPE) [7] y adoptado como

Reglamento Técnico Mundial No. 15 por el Foro Mundial para la Armonización de la Reglamentación sobre Vehículos (WP.29) en marzo de 2014. [7]

En la Universidad Carlos III de Madrid, el autor Martín Juan, desarrolló una interfaz gráfica, utilizando el software Matlab y Simulink, basados en el comportamiento de las fuerzas actuantes que determinan la dinámica vehicular de un automóvil eléctrico y el modelo de representación macroscópica energética, para luego determinar su autonomía, usando ciclos de conducción homologados como lo son el Nuevo ciclo de conducción europeo (New European Driving Cycle" o denominado ciclo NEDC, entre otros y un ciclo experimental efectuado en la Ciudad de Madrid, España. [8]

En la misma Universidad, el autor Samuel Rodríguez Carmona, realizó dos modelos de simulación basados en el software Matlab/Simulink, el cual ya cuenta con bibliotecas estandarizadas para su uso. En este artículo, utilizaron las ecuaciones que rigen la dinámica vehicular y las adaptó a dos librerías que tiene el software "Simscape y Simulink". En este estudio se utilizó el ciclo de conducción urbano desarrollado por la Comunidad Económica Europea y denominado ECE-15, comparando los resultados de las dos librerías.[9]

En una Tesis de Maestría de la Universidad Politécnica de Madrid, el autor Felipe Calderón Peralvo, desarrolló un modelo con el que determinó el consumo energético de un autobús

eléctrico urbano con baterías de la marca China BYD, y referencia K9, usando el software de simulación "AVL Cruise" y aplicando un ciclo de conducción de la ruta 74 de la Empresa Municipal de Transportes de Madrid, haciendo un análisis de las ecuaciones y funciones matemáticas de la dinámica vehicular, utilizadas por el software. [10]

En la Revista de Ingeniería Automotriz y Tecnologías, el autor H. Suvac, usó el software Matlab para determinar la potencia y el par requerido por un vehículo eléctrico, en el que hizo una revisión de las fuerzas que hacen que el vehículo se mueva y las que ofrecen resistencia al avance; usó un ciclo de conducción Urbano para obtener resultados de par y potencia en función del tiempo. [11]

En el departamento de Ingeniería Automotriz de la Facultad de Tecnología de la Universidad Gazi, de la Ciudad de Ankara, Turquía, Ahmet Onur Kiyakli1, desarrolló un modelo de la dinámica vehicular basado en el software Matlab/Simulink, con lo que determinaron los efectos de los parámetros usados en el modelo que inciden en el rendimiento del vehículo y su consumo energético. En este caso utilizaron el ciclo de conducción NEDC y comparado con el actual ciclo de conducción WLTP ya que es un ciclo armonizado actualmente a nivel mundial. En el artículo, simularon un solo ciclo tanto NEDC como WLTP, para encontrar la autonomía en kilómetros, el Estado de Carga de la Batería

denominado "SOC" y el consumo de energía (KWH) por cada 100km[12].

En general, y después de hacer una revisión documental, los autores coinciden en utilizar las ecuaciones de la dinámica vehicular como lo es fuerza aerodinámica, fuerza de rozamiento, fuerza de ascenso, fuerza de tracción y fuerza de inercia, como base para utilizarlas en software especializado como lo es Matlab/simulink y AVL Cruise para determinar eficiencia, consumo y autonomía de diferentes vehículos eléctricos.

En todos los casos se observa la utilización de software especializado, limitado a cálculos puntuales de vehículos ya construidos; donde no se tiene en cuenta el potencial de uso del diseño de un modelo matemático que sirva como base a empresas que están en proceso de desarrollo de sus vehículos eléctricos y no cuentan con software especializado.

Por tal motivo el objetivo de esta investigación fue diseñar un modelo matemático teórico, con base en fichas técnicas de proveedores de chasis eléctricos, que ya se encuentran en el mercado colombiano, con datos de pesos, capacidad de las baterías y potencia, así como las fichas técnicas de las carrocerías que planea fabricar la empresa AGA, donde se encuentran datos de pesos y dimensiones. Así mismo se escogió el ciclo de conducción WLTP, el cual permite tener parámetros estándar relacionados con la velocidad y tiempo de la prueba y que ya

está siendo adoptado inicialmente por empresas fabricantes de vehículos familiares de países como Estados Unidos, Japón, China y países pertenecientes a la Unión Europea y que poco a poco han venido utilizando grandes marcas fabricantes de buses, como lo es la alemana MAN & TRUCKS[13], para determinar principalmente la autonomía de los autobuses que fabrican. A continuación, se presenta un Artículo de investigación científica y tecnológica donde se describe primero la matemática que rige la dinámica vehicular, luego usando el principio de equilibrio dinámico se determina la fuerza de tracción necesaria para poder determinar el consumo de energía y por consiguiente el estado de carga de la batería (SOC).

Luego, se ingresaron al modelo, los datos suministrados por las empresas fabricantes de chasis y por la empresa Autobuses AGA, además del ciclo de conducción WLTP, el cual está compuesto por tres fases, una fase low más una fase médium y luego nuevamente una fase low, representativos de una ruta urbana.

Con estos datos ya procesados para tres configuraciones diferentes de chasis + carrocería, y variando la capacidad de pasajeros en cada una de las configuraciones, se llegó a los resultados y conclusiones principales del proyecto.

II. METODOLOGÍA

El enfoque metodológico que se utilizó en el proyecto fue analítico-predictivo, ya que se utilizaron datos técnicos

suministrados por proveedores de chasis y de carrocería, además del ciclo de conducción, para modelar su comportamiento, utilizando las ecuaciones de la dinámica vehicular para ver el comportamiento del autobús, en diferentes condiciones de operación; luego se utilizó el modelo para predecir el comportamiento del autobús en temas de autonomía, en un ciclo de conducción específico. A continuación, se presenta en detalle cómo se realizó el proyecto:

A) Determinación de variables que inciden en la dinámica vehicular de un autobús eléctrico

El efecto de la fuerza de tracción de un vehículo eléctrico incluye las fuerzas de rozamiento, aerodinámica, de inercia entre otras. En la Fig. 1 se muestra el diagrama de cuerpo libre, en el que se ven las fuerzas involucradas en la dinámica vehicular.

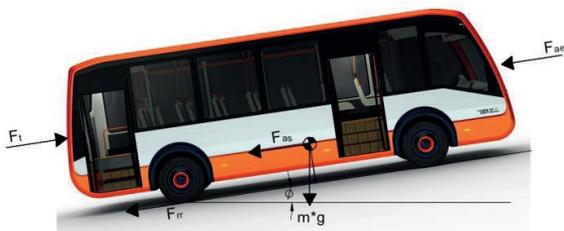


Fig. 1. Diagrama de cuerpo libre de autobús eléctrico AGA.

Fuente: Autobuses AGA de Colombia

Partiendo de la sumatoria de fuerzas donde:

$$\sum F = F_t - F_{as} - F_{ae} - F_{rr} \quad (1)$$

Una de las primeras ecuaciones utilizadas en el cálculo de la fuerza de tracción es la fuerza de rozamiento (2), como se muestra a continuación[14]:

$$F_{rr} = \mu_{rr} * m * g \quad [N] \quad (2)$$

donde F_{rr} es la fuerza de rozamiento, m es la masa del autobús con cada uno de sus estados de carga de pasajeros y de peso de chasis y carrocería, g es la aceleración de la gravedad y (μ_{rr}) coeficiente de rozamiento.

El coeficiente de rozamiento se halló con base en la ecuación (3), para una superficie en asfalto y tomando la velocidad máxima determinada por el ciclo de conducción.

$$\mu_{rr} = 0,0136 + 0,4 \times 10^{-7} * v^2 \quad (3)$$

Otra fuerza utilizada es la fuerza aerodinámica F_{ae} causada por la aerodinámica del vehículo. Esta fuerza es afectada directamente por el área frontal del autobús A , coeficiente aerodinámico o de forma C_d , la densidad del aire ρ y la velocidad del autobús v , según el ciclo de conducción WLTP y según se muestra a continuación:

$$F_{ae} = \frac{1}{2} * \rho * A * C_d * v^2 \quad [N] \quad (4)$$

No se tomó la velocidad relativa, debido a que la aplicación del ciclo de conducción se supone se hace en sitio cerrado, por lo que solo se tiene en cuenta el ciclo de conducción con sus diferentes velocidades.

La siguiente es la fuerza de ascenso F_{as} , en el que m es la masa del autobús, g es la aceleración de la gravedad y $sen\theta$ es el ángulo de la pendiente que tiene la vía, como se muestra a continuación:

$$F_{as} = m * g * sen\theta \quad [N] \quad (5)$$

En el presente caso de estudio no se tuvo en cuenta la fuerza de ascenso, debido a que el ciclo de conducción WLTP, no incluye pendientes, por lo que su fuerza es cero.

B) Cálculo del Equilibrio Dinámico

Partiendo de la Segunda Ley de Newton [15] y considerando el autobús como una partícula, debido a que el efecto de rotación del cuerpo con respecto al centro de gravedad se puede omitir, se tiene que la sumatoria de fuerzas en el eje X es igual a la masa por la aceleración en x:

$$\sum F_x = ma_x \quad (6)$$

y con base en el "**Principio del equilibrio dinámico**" y trasponiendo el vector ma se tiene un sistema nulo de vectores en el que el vector $-ma$ con módulo ma y con sentido opuesto al de la aceleración se llama vector de inercia, se tiene:

$$\sum F_x - ma_x = 0 \quad (7)$$

Reemplazando las fuerzas se tiene

$$F_t - F_{hc} - F_{ad} - F_{rr} - ma_x = 0 \quad (8)$$

Despejando la fuerza de tracción F_t del sistema se tiene:

$$F_t = F_{ad} + F_{rr} + m \frac{d\phi}{dt} \quad (9)$$

Luego, con la ecuación 10 se calculó la aceleración del ciclo de conducción WLTP, en sus fases (low+medium+low), como la derivada de la velocidad respecto al tiempo usando diferenciación numérica, en el que se utilizó el método de diferencias finitas centrada en el medio[16]:

$$a = \frac{d\phi}{dt} \quad (10)$$

C) Cálculo de potencia eléctrica y consumo de energía

Con base en los datos de fuerza de tracción se procedió a hallar la potencia eléctrica de cada configuración, utilizando la siguiente ecuación:

$$P = F_t * v \quad [KW] \quad (11)$$

Donde, F_T es la fuerza de tracción y v es la velocidad del ciclo de conducción.

En el caso de los chasis eléctricos escogidos en este estudio, no se tuvo en cuenta la potencia de los equipos auxiliares como lo son las puertas neumáticas, luces internas y externas (todas con tecnología LED), ya que los chasis cuentan con dos baterías auxiliares, cada una con una capacidad de 90Ah; además estos autobuses no cuentan con equipo de aire acondicionado.

Luego, se halló el consumo de energía, el cual se determina como la integral de la potencia en función del tiempo como se muestra a continuación:

$$E = \int_0^t P(t) * dt \quad (12)$$

Donde E es la energía y P es la potencia. Para este cálculo se utilizó integración numérica por el método de trapezoide [16].

D) Cálculo del Estado de Carga de la Batería "SOC"

Con base en los datos de energía consumida según el ciclo de conducción, se procedió a calcular el SOC de la batería (Estado de Carga, por sus siglas en inglés - State of Charge), el cual se halló según la siguiente ecuación

$$SOC = \frac{\text{Energía batería cargada} - \text{Energía consumida}}{\text{Energía batería cargada}} 100 (\%) \quad (13)$$

Con base en la ecuación 13, se determinaron dos estados de carga de la batería, una con una carga del 20% y una con baterías completamente descargadas, es decir al 0% de carga.

E) Cálculo de la distancia recorrida

Ahora, independientemente del momento en que se calcule, se halló la distancia recorrida durante el ciclo de conducción, utilizando integración numérica por el método de trapezoide[16]:

$$x = \int_0^t v * dt \quad (14)$$

Donde x es la distancia y v es la velocidad del ciclo en función del tiempo [15].

F) Cálculo de la autonomía

En el desarrollo de este artículo, se entiende por autonomía, como la distancia en kilómetros que puede recorrer un autobús con carga completa de baterías, en cada una de las configuraciones [17]. También se tuvo en cuenta cuál es la distancia recorrida, cuando el estado de carga de la batería SOC está en el 20%.

Con base en la información del estado de carga de la batería en cada una de las configuraciones propuestas por Autobuses AGA, se comparó la data generada en el cálculo del SOC de la batería, relacionada con el tiempo que se demoró en descargarse completamente la batería y la distancia recorrida en ese mismo tiempo.

G) Diseño de algoritmo para el cálculo de la autonomía

Con base en el modelamiento matemático realizado, se procedió a generar un algoritmo con la finalidad de tener una serie de instrucciones detallada que sirva de base para la generación de un programa que determine la autonomía de otras futuras configuraciones de autobuses eléctricos a fabricar por la empresa AGA y no dependa de software especializado costoso y que

solo se utilizará una sola vez para estos cálculos.

A continuación, en la Fig. 2 se muestra el diagrama de flujo elaborado para el cálculo de la autonomía de los vehículos.

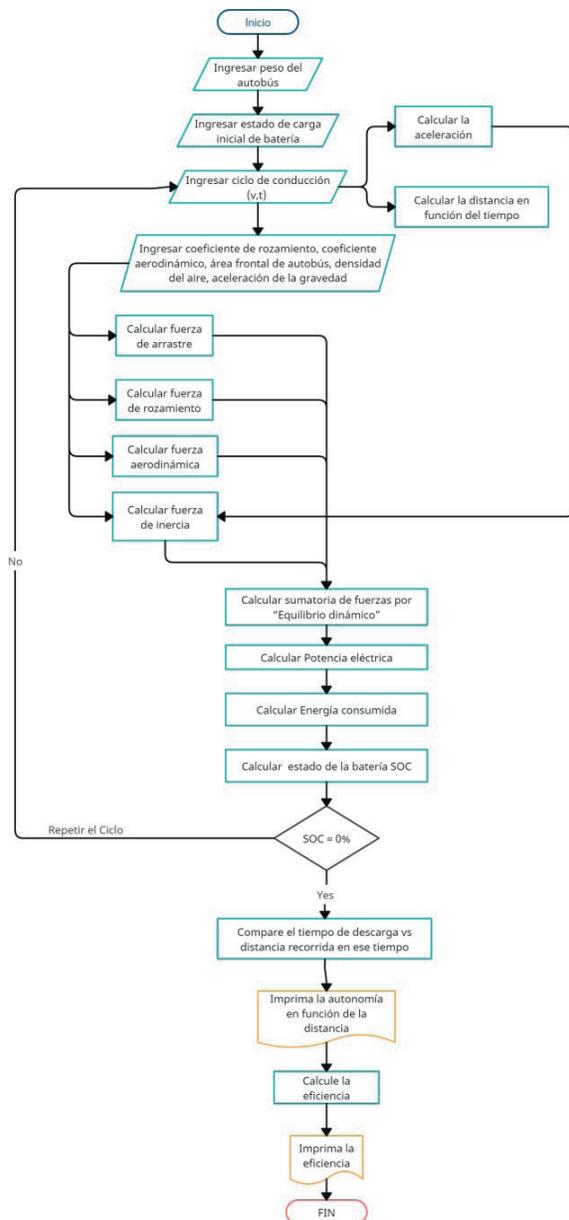


Fig. 2. Diagrama de flujo para el cálculo de autonomía de autobús eléctrico.
Fuente: Autores

H) Datos de entrada al modelo matemático

1) Configuraciones de chasis-carrocería

Los datos de entrada utilizados en el proyecto, fueron suministrados por los proveedores de chasis eléctrico y por la empresa Autobuses AGA en relación a la carrocería.

El autobús eléctrico urbano con configuración No. 1, Fig. 3, tiene una longitud de 12.082mm, un ancho de 2.500mm y una altura de 3.030mm. Además, tiene una capacidad máxima de 81 pasajeros incluido el conductor y un peso vacío de 13.501kg (chasis eléctrico + carrocería, sin pasajeros).

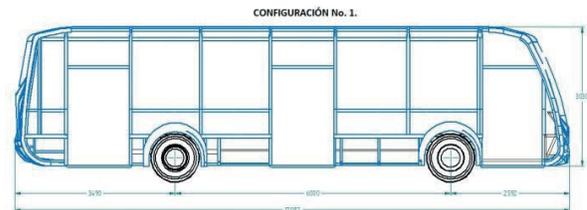


Fig. 3. Configuración No. 1 de autobús eléctrico para 81 pasajeros
Fuente: Autobuses AGA de Colombia

El autobús eléctrico urbano con configuración No. 2, Fig. 4, tiene una longitud de 11.632mm, un ancho de 2.500mm y una altura de 3.030mm. Además, tiene una capacidad máxima de 81 pasajeros incluido el conductor y un peso vacío de 12.940kg (chasis eléctrico + carrocería, sin pasajeros).

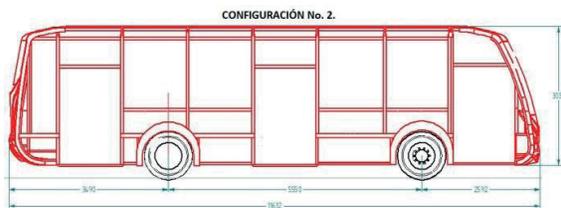


Fig. 4. Configuración No. 2 de autobús eléctrico para 81 pasajeros
Fuente: Autobuses AGA de Colombia

El autobús eléctrico urbano con configuración No. 3, Fig. 5, tiene una longitud de 9.340mm, un ancho de 2.500mm y una altura de 3.030mm. Además, tiene una capacidad máxima de 51 pasajeros incluido el conductor y un peso vacío de 9.735kg (chasis eléctrico + carrocería, sin pasajeros).

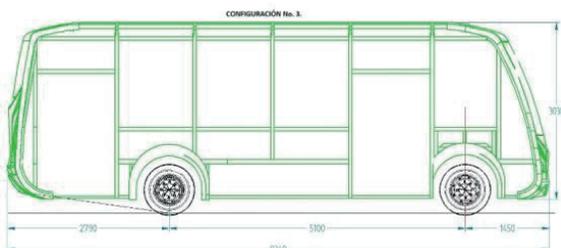


Fig. 5. Configuración No. 3 de autobús eléctrico para 51 pasajeros
Fuente: Autobuses AGA de Colombia

En las tablas No. 1,2 y 3, se muestra el resumen de los datos utilizados en los cálculos, basados en las configuraciones No. 1, 2 y 3 de los buses, en las que se consideran también el peso de los pasajeros, (el cuál es de 68kg, conforme a lo dispuesto en la Norma Técnica Colombiana NTC 5206:2009 para autobuses de hasta 79 pasajeros y la Norma Técnica Colombiana NTC4901-3 para autobuses de 80 a 120 pasajeros), según la capacidad de ocupación de cada

configuración, además de los datos de pesos de chasis, carrocería y capacidad de batería.

Tabla 1. Datos técnicos para configuración No. 1.

| DESCRIPCIÓN | CONFIGURACIÓN 1. | |
|---|------------------|--------|
| | Cantidad | Unidad |
| Peso de chasis eléctrico 1. | 8.600 | Kg |
| Capacidad baterías | 350 | KWH |
| Potencia de motor | 250 | KW |
| Peso de carrocería | 4.833 | Kg |
| Peso 81 pasajeros (total) | 5.508 | Kg |
| Peso autobús vacío (chasis + carrocería+ conductor) | 13.501 | Kg |
| Peso autobús capacidad máxima. (chasis + carrocería + 81 pasajeros) | 18.941 | Kg |

Fuente: Autobuses AGA de Colombia y proveedor de chasis

Tabla 2. Datos técnicos para configuración No. 2.

| DESCRIPCIÓN | CONFIGURACIÓN 2. | |
|---|------------------|--------|
| | Cantidad | Unidad |
| Peso de chasis eléctrico 2 | 8.200 | Kg |
| Capacidad baterías | 350,00 | KWH |
| Potencia de motor | 250,00 | KW |
| Peso de carrocería | 4.672 | Kg |
| Peso 81 pasajeros (total) | 5.508 | Kg |
| Peso autobús vacío (chasis + carrocería+ conductor) | 12.940 | Kg |
| Peso autobús capacidad máxima. (chasis + carrocería + 81 pasajeros) | 18.380 | Kg |

Fuente: Autobuses AGA de Colombia y proveedor de chasis

Tabla 3. Datos técnicos para configuración No. 3.

| DESCRIPCIÓN | CONFIGURACIÓN 3. | |
|---|------------------|--------|
| | Cantidad | Unidad |
| Peso de chasis eléctrico | 6.000 | Kg |
| Capacidad baterías | 250 | KWH |
| Potencia de motor | 210 | KW |
| Peso de carrocería | 3.735 | Kg |
| Peso 51 pasajeros (total) | 3.468 | Kg |
| Peso autobús vacío (chasis + carrocería+ conductor) | 9.735 | Kg |
| Peso autobús capacidad máxima. (chasis + carrocería + 51 pasajeros) | 13.203 | Kg |

Fuente: Autobuses AGA de Colombia y proveedor de chasis

Adicionalmente, se tuvieron en cuenta los datos mostrados en la tabla 4, referentes al coeficiente de rozamiento, hallado usando la ecuación (3), coeficiente aerodinámico, densidad del aire (se tomó Duitama), área frontal del autobús y aceleración de la gravedad.

Tabla 4. Datos adicionales necesarios en los cálculos

| DESCRIPCIÓN | Cantidad | Unidad |
|----------------------------|----------|--------|
| Coeficiente de rozamiento | 0,014 | |
| Coeficiente aerodinámico | 0,35 | |
| Densidad del aire | 1,06 | Kg/m3 |
| Área frontal del autobús | 7,5 | m2 |
| Aceleración de la gravedad | 9,8 | m/s2 |

Fuente. El autor

2) Ciclo de conducción WLTP

Otros datos de entrada utilizados son los ciclos de manejo o ciclos de conducción, los cuales entregan información de velocidad vs. tiempo; en el caso del presente estudio se utilizó un ciclo de conducción estandarizado denominado "WLTP" [7], el cual arroja datos de velocidad en km/h, pero en este estudio se convirtió la velocidad a metros por segundo (m/s) y el tiempo sí se manejó en segundos (s).

Se usaron tres fases; una fase Low como se muestra en la Fig. 6, seguido de una fase médium Fig. 7, y luego una fase low nuevamente, ya que los autobuses estudiados van a ser tipo urbano, es decir solo van a circular en ciudad.

De acá en adelante el ciclo de conducción WLTP es llamado WLTC, ya que estas fases determinan un ciclo de ciudad.

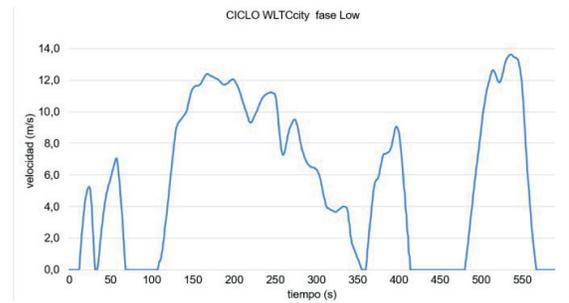


Fig. 6. Fase Low, ciclo de conducción WLTP, en su versión WLTCity. Fuente: Datos tomados de Reglamento (UE) 2017/1151 de la Comisión Europea.

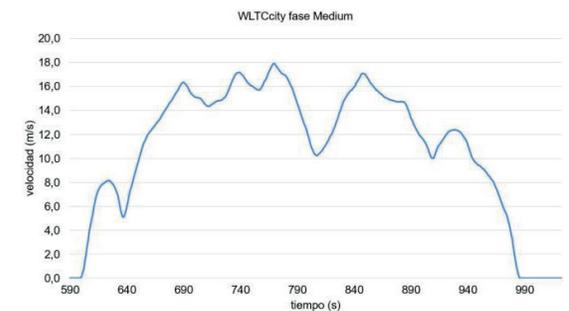


Fig. 7. Fase médium, ciclo de conducción WLTP, en su versión WLTCity. Fuente: Datos tomados de Reglamento (UE) 2017/1151 de la Comisión Europea.

Este ciclo compuesto por la fase "low", seguido de una fase "médium" y luego una fase "low" nuevamente, según información tomada del Reglamento (UE) 2017/1151 de la **Comisión Europea** [7], se repitió tantas veces como fue necesario hasta llegar a un SOC de 20% de carga y luego hasta agotar la batería, es decir un SOC del 0% de carga.

1) Simulación del modelo matemático

Para la simulación del modelo matemático cuyo fin último fue la determinación de la autonomía de tres configuraciones de autobuses eléctricos de la empresa Autobuses AGA de Colombia, se emplearon dos softwares: Matlab, que es un software de alto nivel utilizado en

el cálculo numérico y programación y Excel en el que se parametrizaron tablas con datos finales.

Se utilizaron las ecuaciones de dinámica vehicular, las cuales se parametrizaron en Excel, en el que se incluyeron los datos de entrada mostrados en las Tablas 2 y 3 y suministrados por el fabricante del chasis eléctrico en sus tres versiones y del fabricante de la carrocería en sus tres versiones, teniendo en cuenta también la capacidad de pasajeros (cantidad máxima de pasajeros a bordo y vacío) permitida por la Norma Técnica Colombiana NTC 4901-3 e implementada bajo la resolución 3753 de 2015[18] y Resolución 4200 de 2016 [19], emitidas por el Ministerio de Transporte de Colombia.

También, se incluyeron datos adicionales como lo son: coeficiente de rozamiento, coeficiente aerodinámico, densidad del aire entre otros, mostrados en la Tabla 4.

Debido a que Matlab es un software potente con relación a cálculos numéricos, se creó un código para efectuar todos los cálculos relacionados con la utilización de derivación e integración numérica, como fue en el caso del cálculo de la aceleración (10), el consumo de energía (12) y la determinación de la distancia (14).

Con los datos arrojados en Matlab y la parametrización en Excel se obtuvieron los datos de salida como lo fue el estado de carga de batería (SOC) y la autonomía para cada configuración de autobús eléctrico.

III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A continuación, en las figuras de esta sección, se muestran algunos de los resultados de forma gráfica sobre aceleración, potencia eléctrica, consumo de energía, estado de carga de la batería y autonomía.

Los resultados mostrados, están basados en la simulación de un solo ciclo de conducción WLTC, compuesto de una fase Low, seguido de una fase médium y nuevamente una fase Low, el cual tiene una duración total de 1612 segundos.

Se tomaron los datos de la Tabla 1, definidos para la configuración No. 1; adicionalmente se tomaron datos de la condición más crítica de peso, que en este caso es la suma del peso de chasis eléctrico, más el peso de la carrocería y la máxima capacidad de ocupación de pasajeros, que es de 81 incluido el conductor.

Para los otros resultados mostrados en las tablas, se usó la misma metodología con la que se determinó la autonomía de las demás configuraciones con sus respectivas capacidades de carga de pasajeros.

En la Fig. 8, se muestran los datos de aceleración del autobús, los cuales se hallaron utilizando la ecuación (11) y el método de diferenciación finita centrada en el centro [16], con datos basados en el ciclo de conducción WLTC con sus fases “low, médium y low”.

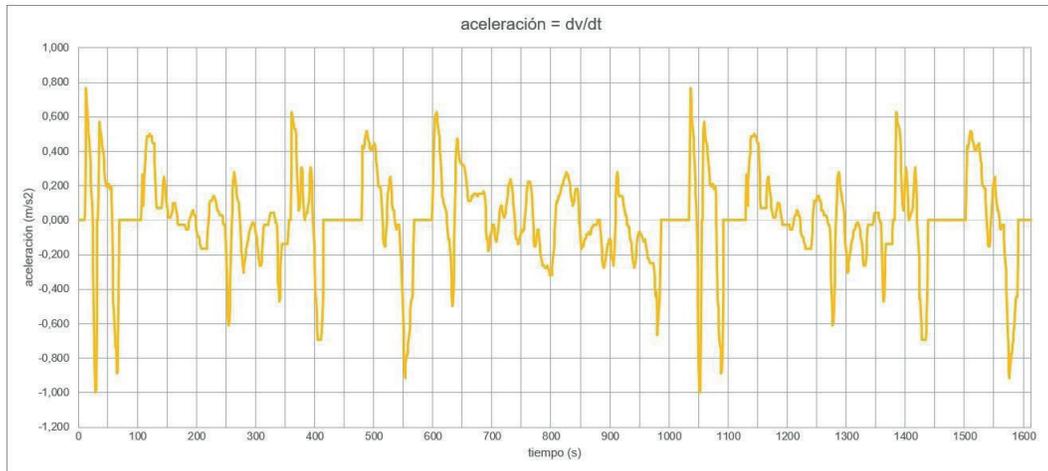


Fig. 8. Gráfica de aceleración según datos de velocidad y tiempo del ciclo de conducción WLTC
Fuente: Autores

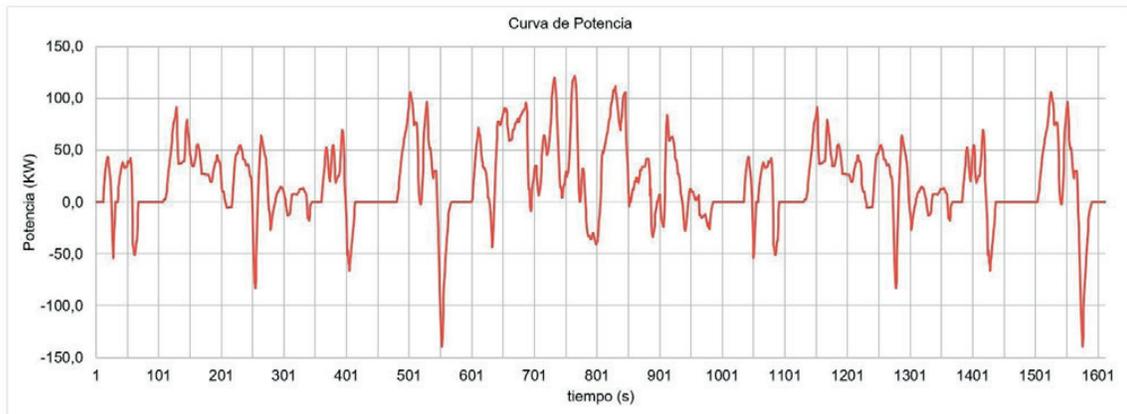


Fig. 9. Gráfica de Potencia eléctrica según datos de velocidad y tiempo del ciclo de conducción WLTC
Fuente: Autores

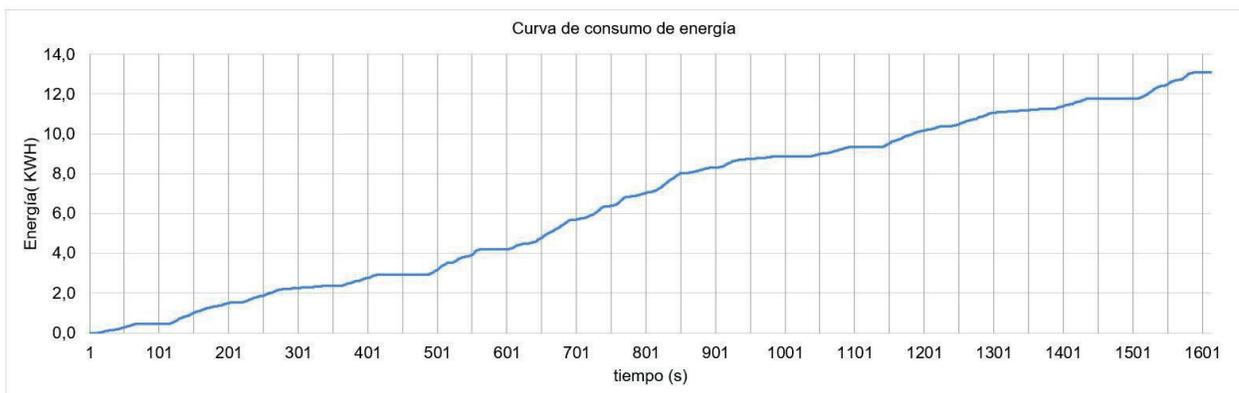


Fig. 10. Gráfica de Potencia eléctrica según datos de velocidad y tiempo del ciclo de conducción WLTC
Fuente: Autores

En la Fig. 9 se muestran los datos de potencia eléctrica hallados por medio de la ecuación (11) en la que se observan datos de potencia negativa, la cual es requerida en el proceso de frenado, dada la condición del motor eléctrico. Esta potencia no es utilizada ya que ninguno de los chasis evaluados tiene regeneración.

En la Fig. 10, se muestra el consumo de energía, el cual fue hallado por medio de la ecuación (12) y utilizando integración numérica por el método de trapezoide y el ciclo de conducción WLTC en sus fases "low, médium y low".

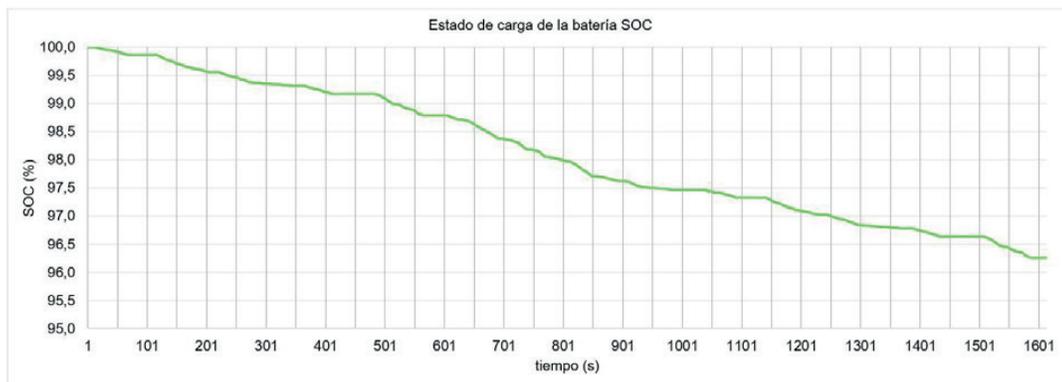


Fig. 11. Gráfica de estado de carga de la batería según datos de velocidad y tiempo del ciclo de conducción WLTC
Fuente: Autores

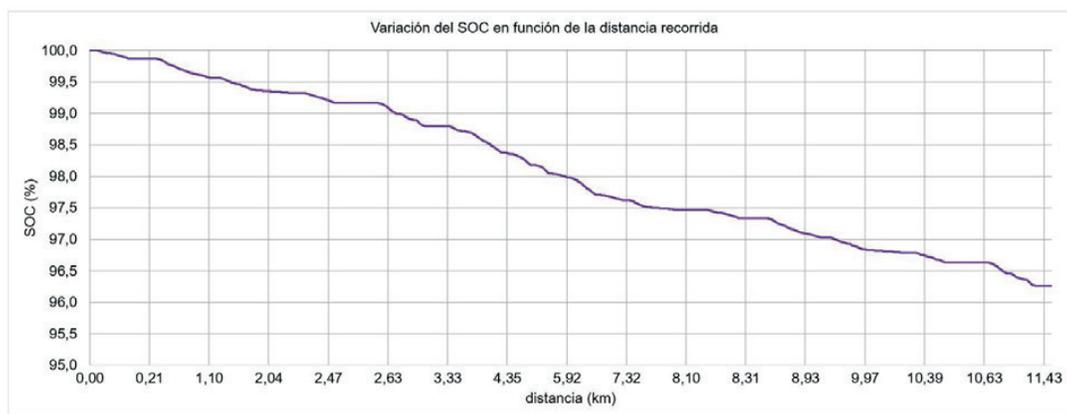


Fig. 12. Gráfica de variación del Estado de carga de la batería en función de la distancia recorrida según ciclo de conducción WLTC
Fuente: Autores

Basados en los datos mostrados en la Fig. 12, se observa que después de recorrer 11,43km las baterías han tenido una descarga aproximada de un 4%,

obteniendo un consumo de 1,145KWH/km, para la configuración 1.

En la Fig. 11 se muestra el estado de carga de la batería (SOC), con base en

la ecuación (13) y simulando un ciclo de conducción WLTC, en sus fases “low, médium y low”, con una duración de 1612s, para la configuración No. 1 de chasis eléctrico y carrocería con capacidad máxima de pasajeros.

En la Fig. 12 se muestra el estado de carga de las baterías en función de la distancia recorrida, según el ciclo de conducción WLTC.

El ciclo de conducción WLTC se repitió hasta obtener dos estados del SOC, uno del 20% de carga, que es el óptimo al que se debe llegar en operación del autobús para alargar la vida útil de la batería y el otro estado de 0% de carga, que sería la descarga completa de la batería, en el que se obtuvieron datos para cada una de las configuraciones teniendo en cuenta los dos estados adicionales de capacidad de pasajeros, vacío y capacidad máxima. En la tabla 4. se muestran los resultados finales obtenidos después de simular el ciclo de conducción WLTC, para la configuración del autobús No. 1. en dos estados de capacidad de pasajeros, vacío y capacidad máxima permitida de pasajeros, que en este caso es de 81.

Tabla 4. Autonomía para configuración No. 1.

| CONFIGURACIÓN No. 1 | | | | |
|--------------------------------------|-----------|----------------|------------------------|---------------------|
| Estado de carga de pasajeros | PESO (kg) | RESULTADOS | | |
| | | Autonomía (km) | | Eficiencia (KWH/km) |
| | | SOC al 100% | SOC al 20% (Recomenda) | |
| Vacío | 13.501 | 422,83 | 338,26 | 0,827 |
| Capacidad máx. Permitida 81pasajeros | 18.941 | 305,12 | 244,55 | 1,145 |

Fuente: Autores

En el caso más crítico de la configuración No. 1, el cual es el de la capacidad máxima permitida de pasajeros que este caso es de 81 pasajeros incluido el conductor y para llegar a una descarga completa de las baterías, se repitió el ciclo 26,7 veces, con lo que se obtuvo una autonomía de 305 km; pero se recomienda no llegar a la descarga completa, sino a un SOC del 20%, lo que aumenta la vida útil de la batería, dando como resultado una autonomía de 244km y una eficiencia de 1,145KWH/km.

En la tabla 5. se muestran los resultados finales obtenidos para la configuración No. 2. En el caso más crítico de la configuración No. 2, con una capacidad máxima permitida de pasajeros que en este caso es de 81 incluido el conductor y para llegar a una descarga completa de las baterías, se repitió el ciclo 27,5 veces, con lo que se obtuvo una autonomía de 314 km; pero como se recomienda llegar a un SOC del 20%, se obtuvo como resultado una autonomía de 251 km y una eficiencia de 1,112KWH/km.

Tabla 5. Autonomía para configuración 2.

| CONFIGURACIÓN No. 2 | | | | |
|--------------------------------------|-----------|----------------|------------------------|---------------------|
| Estado de carga de pasajeros | PESO (kg) | RESULTADOS | | |
| | | Autonomía (km) | | Eficiencia (KWH/km) |
| | | SOC al 100% | SOC al 20% (Recomenda) | |
| Vacío | 12.940 | 439,978 | 351,98 | 0,794 |
| Capacidad máx. Permitida 81pasajeros | 18.380 | 314,270 | 251,416 | 1,112 |

Fuente: Autores

En la tabla 6. se muestran los resultados finales obtenidos después de simular el ciclo de conducción WLTC, para la configuración No. 3. en estado de carga de pasajeros vacío y en estado de carga de pasajeros con capacidad máxima permitida, el cual es de 51 pasajeros incluido el conductor.

Tabla 6. Autonomía para configuración 3.

| Estado de carga de pasajeros | CONFIGURACIÓN No. 2 | | | |
|--------------------------------------|---------------------|----------------|------------------------|---------------------|
| | PESO (kg) | RESULTADOS | | Eficiencia (KWH/km) |
| | | Autonomía (km) | | |
| | | SOC al 100% | SOC al 20% (Recomenda) | |
| Vacío | 9.735 | 411,40 | 329,12 | 0,607 |
| Capacidad máx. Permitida 51pasajeros | 13.203 | 308,55 | 246,84 | 0,809 |

Fuente: Autores

En el caso más crítico de la configuración No. 3, con capacidad máxima permitida de pasajeros y para llegar a una descarga completa de las baterías, se repitió el ciclo 27 veces, con lo que se obtuvo una autonomía de 308 km; pero con un estado de SOC del 20%, dándose como resultado una autonomía de 246km y una eficiencia de 0.809KWH/km.

IV. CONCLUSIONES

Los resultados de este proyecto de investigación son de gran utilidad para Autobuses AGA, como fabricante de autobuses eléctricos, dado que podrá contar con una primera herramienta computacional, que le permite calcular la autonomía de los buses que va a fabricar, así como su consumo en KWH/km, obteniendo ventajas competitivas entre las que se destacan:

Los datos de autonomía y eficiencia energética, le permite a la empresa tomar decisiones de diseño antes de la fabricación de sus autobuses eléctricos, como es el caso de la optimización del peso de la carrocería.

Le permite a la empresa tener un comparativo basado en un ciclo estándar de conducción a nivel internacional, como lo es el ciclo WLTC con el que se pueda comparar con otras empresas con autobuses similares, basados en datos de autonomía y eficiencia energética, con el fin de obtener un vehículo competitivo.

Además, la generación de los datos de aceleración, potencia, consumo de energía y autonomía, le permitirá a la empresa Autobuses AGA, contar con información necesaria para participar en licitaciones a nivel nacional de buses y microbuses cero emisiones como lo propone el gobierno colombiano en el Plan de Acción Indicativo PAI-PROURE 2022-2030 [5].

Este desarrollo planteado en el proyecto, le servirá a la empresa Autobuses AGA para determinar la autonomía de los autobuses que va a fabricar, no solamente basados en el ciclo de conducción WLTC, sino en ciclos reales, según las rutas en las que vayan a operar los autobuses, teniendo en cuenta la pendiente del terreno y otros parámetros que se pueden agregar al modelo matemático.

Para las configuraciones simuladas, se obtuvo que la configuración más eficiente es la No. 2, la cual tiene una eficiencia de 0,809 KWH/km, teniendo en cuenta que la simulación se hizo basados en su capacidad máxima de ocupación de pasajeros, que en este caso es de 51 pasajeros incluido el conductor.

Este proyecto es la base para continuar a futuro con el desarrollo de un software especializado, permitiendo tener confiabilidad en la generación de los datos, evitar errores de manipulación de estos y escalabilidad, ya que se podría llegar a vender a empresas fabricantes de autobuses eléctricos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Ingeniero Alejandro Muñoz, por su aporte para entender el funcionamiento de un vehículo eléctrico y al Ingeniero Fidel Romero, por sus aportes de ingeniería.

REFERENCIAS

- [1] Dieselnets, "Worldwide Harmonized Light Vehicles Test Procedure (WLTP)", 2016, [Online]. Available: https://en.wikipedia.org/wiki/Worldwide_Harmonised_Light_Vehicles_Test_Procedure.
- [2] ONU MEDIO AMBIENTE, "Estrategia Nacional De Movilidad Eléctrica", Unidad Planeación Min. Energética, Repub. Colomb., vol. 12, no. 6, pp. 378–381, 2019.
- [3] P. Mojica, G. Cuéllar, and C. Medina, "Buses y Camiones Eléctricos", p. 86, 2016, [Online]. Available: <https://www.commons.wikimedia.org>.
- [4] M. de M. y Energía, "Resolucion 40156 2022 MME ADOPCIÓN PROURE" p. 162, 2022.
- [5] S. De Demanda, "Plan Acción Indicativo del PROURE", 2022.
- [6] DEPARTAMENTO NACIONAL DE PLANEACIÓN, "Documento CONPES 4075", p. 108, 2022.
- [7] Unión Europea, "Reglamento (UE) 2017/1151 de la Comisión Europea", no. 4. pp. 1–643, 2017.
- [8] J. A. Martín Moreno, "Herramienta de simulación de vehículos eléctricos", Universidad Carlos III de Madrid, 2013.
- [9] S. R. Carmona, "Modelado y simulación de un coche eléctrico en Simulink-Simscape", Universidad Carlos III de Madrid, 2020.
- [10] F. Calderón and J. M. López, "Desarrollo de un modelo de configuración eléctrica de autobús urbano con baterías", Universidad Politécnica de Madrid, 2020.
- [11] H. Suvak, "Academic @ Paper", 2016, doi: 10.18245/ijaet.38209.
- [12] A. O. Kiyakli and H. Solmaz, "Modeling of an Electric Vehicle with MATLAB / Simulink", vol. 2, no. 4, pp. 9–15, 2018, doi: 10.30939/ijastech.475477.

- [13] "TIP Trailer y MAN unidos por la sostenibilidad en la última milla", 2022. www.press.mantruckandbus.com.
- [14] F. J. R. JARAMILLO, "MODELACIÓN Y SIMULACIÓN DE UN TREN MOTRIZ PARA CHASIS TUBULAR DE UN VEHÍCULO ELÉCTRICO MONOPLAZA TIPO NEV PARA PERSONAS PARAPLÉJICAS", Universidad Técnica del Norte, 2022.
- [15] P. J. C. Ferdinand P, Beer. E. RUSSELL JOHNSTON, JR., Mecánica Vectorial para Ingenieros Dinámica, Novena Edi. 2010.
- [16] Steven C. Chapra; Raymond P. Canale, Métodos numéricos para Ingenieros, Quinta Edi. McGraw-Hill.
- [17] C. Fernández Lanchares, "Simulación de vehículos eléctricos", Universidad de Valladolid, 2018.
- [18] M. de Transporte, "Resolución 0003753 del 06 de octubre de 2015: Por la cual se expide el Reglamento Técnico para vehículos de servicio público de pasajeros y se dictan otras disposiciones", p. 18, 2015.
- [19] M. de Transporte, "Resolución 004200 del 7 de octubre de 2016, Por lo cual se modifica y adiciona la Resolución 3753 de 2015 y se dictan otras disposiciones", 2016.