

Research Article

Performance Evaluation of an Electric Drive System Applied to a Three-wheel Hybrid Prototype Vehicle for Urban Mobility

Evaluación Del Desempeño De Un Sistema De Tracción Eléctrica Aplicado A Un Vehículo Prototipo Híbrido De Tres Ruedas Para Movilidad Urbana

C A Padilla*¹, M E Audelo², L F Buenaño³, C Choca⁴, J Coello⁵

¹Escuela Superior Politécnica de Chimborazo (ESPOCH), Facultad de Mecánica, Carrera de Ingeniería Automotriz, Riobamba, Ecuador.

²Ingeniero Automotriz, Investigador Independiente, Riobamba, Ecuador.

ORCID

C A Padilla: <https://orcid.org/0000-0002-2241-5421>

M E Audelo: <https://orcid.org/0000-0002-0932-8876>

L F Buenaño: <https://orcid.org/0000-0002-2194-4102>

V CONGRESO
INTERNACIONAL DE
INGENIERÍA DE MECÁNICA

Corresponding Author: C A

Padilla; email:

c_padilla@epoch.edu.ec

Published: 24 July 2024

Production and Hosting by
Knowledge E

© C A Padilla et al. This article is distributed under the terms of the [Creative Commons Attribution License](#), which permits unrestricted use and redistribution provided that the original author and source are credited.

Abstract

In this work, an electric traction system was implemented in a three-wheeled prototype vehicle for urban mobility. An electric motor kit including its controller and a handle-type accelerator is implemented to form a hybrid system of electric and human traction, where the human traction serves as a support when the battery is discharged. In order to move the vehicle, it is necessary to take the power from the motor to the driving wheel of the vehicle, therefore, it was designed and implemented with a transmission by sprocket and chain. Once all the mechanical and electrical components of the electric traction system have been assembled, tests are performed to determine the performance of the engine and transmission. An acceleration test is performed to determine the maximum speed and the time taken to reach, in addition to autonomy tests at a cruising speed of 30 km/h. The results of the acceleration tests show that the vehicle can go from 0 to 45 km/h in 17.6 ± 0.55 s on a maximum slope of 7.5% and in 14.8 ± 1.1 s on a straight road. The vehicle achieves a maximum range of 8.21 km with an average speed of 30 km. From the analysis of the results, it is concluded that the vehicle can perform adequately in urban environments.

Keywords: *electric drive, battery, electric motor, electric vehicle, range, three-wheel prototype.*

Resumen

En el presente trabajo se implementó un sistema de tracción eléctrica a un vehículo prototipo de tres ruedas para movilidad urbana. Se implementa un kit de motor eléctrico que incluye su controlador y un acelerador tipo manija para conformar un sistema híbrido de tracción eléctrica y humana, en donde la tracción humana sirve de apoyo cuando la batería está descargada. Para mover el vehículo es necesario llevar la potencia del motor a la rueda motriz del vehículo, por lo que se diseñó e implementó una transmisión mediante piñón y cadena. Una vez realizado el ensamble de todos los componentes mecánicos y eléctricos del sistema de tracción eléctrico, se procede a realizar pruebas que permitirán determinar el desempeño del motor y transmisión implementados. Se realiza una prueba de aceleración para determinar la velocidad máxima y el tiempo empleado en alcanzarla, además de pruebas de autonomía a una velocidad crucero de 30 km/h. Como resultados se obtiene

 OPEN ACCESS



que en las pruebas de aceleración el vehículo es capaz de pasar de 0 a 45 km/h en 17.6 ± 0.55 s en una pendiente máxima de 7.5% y en 14.8 ± 1.1 s en recta. El vehículo alcanza una autonomía máxima de 8.21 km con una velocidad promedio de 30 km. Del análisis de resultados se concluye que el vehículo es capaz de desempeñarse adecuadamente en entornos urbanos.

Palabras Clave: Tracción eléctrica, Prototipo de tres ruedas, Batería, Motor eléctrico, Autonomía, Vehículo eléctrico.

1. Introducción

El mercado de vehículos con sistemas de tracción eléctrica ha ganado terreno y cada vez hay más fabricantes de vehículos que optan por producir este tipo de vehículos debido a la reducción de emisiones contaminantes, así como ha incrementado las ventas de este tipo de vehículos en Ecuador [1–5], debido a esto se diseña e implementa este sistema de tracción para el prototipo ecológico biplaza del grupo de investigación SAPIA de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, con el objetivo de seleccionar los componentes que permitan reducir el esfuerzo humano en la movilidad del vehículo, durante distancias cortas.

Tomando como punto de partida estudios y proyectos realizados de sistemas de tracción eléctrica por diferentes académicos y estudiantes de centros de educación superior, tenemos un proyecto realizado en la universidad de las fuerzas armadas ESPE, en la cual diseño e implementación de un sistema de control eléctrico en la tracción de un vehículo, para lo cual se toma en cuenta un motor eléctrico, baterías que proporcionen energía al motor eléctrico y un panel para el control electrónico, en dicho proyecto se propone una velocidad máxima. Estos parámetros analizados son tomados en cuenta para el desarrollo del presente proyecto, adicionalmente con el estudio de esta tesis realizada en la ESPE, se puede dar una idea del costo de realizar un proyecto similar.[6]

Adicionalmente en el artículo científico denominado “Modelado del sistema de tracción para un vehículo eléctrico”, realizado por M. Duran, J. Aguilera, G. Guerrero-Ramírez, A. Claudio, L.G. Vela y J. Gudiño-Lau, presentan los componentes diseñados para la conversión de un vehículo convencional de tracción con motor de combustión interna a un vehículo de tracción eléctrica, el cual describe los elementos principales del sistema eléctrico, además presenta un modelo matemático para una simulación del sistema de tracción eléctrica. [7]

En la Figura 1, se observa el vehículo prototipo ya implementado el sistema de tracción eléctrica, con su respectivo motor eléctrico, batería de (Ni-MH) y el controlador del sistema eléctrico de alta tensión [8].



Figura 1

Vehículo prototipo de tres ruedas.

2. Materiales y Métodos

El vehículo prototipo híbrido de tres ruedas tiene implementado un sistema de tracción eléctrico, que ha sido dimensionado y calculado de tal manera que los componentes seleccionados permitan alcanzar la velocidad de 45 Km/h en 15 segundos, además de alcanzar una autonomía de alrededor de 10 km en una velocidad cruceo de 30 km/h. En las siguientes secciones se detalla el desarrollo.

2.1. Cálculos de potencia del motor

Para calcular la potencia necesaria del motor, se debe considerar las fuerzas actuantes en la tracción de un vehículo, desde el punto de vista de la dinámica del vehículo [9], en la Figura 2 se observa las fuerzas actuantes sobre un vehículo y con ellas se puede aplicar las fórmulas expuestas a continuación, se detalla el cálculo de esta potencia [9,10].

Aplicando el comportamiento dinámico del vehículo se obtiene [11,12].

Potencia del motor.

$$Potencia = F_{te} * V_{max}(1)$$

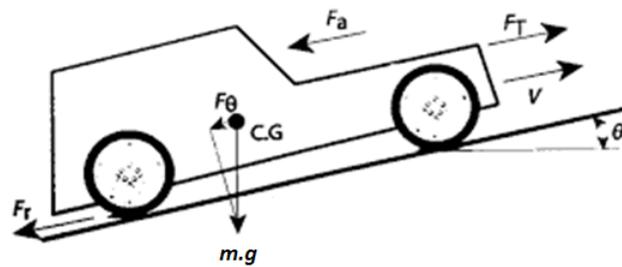


Figura 2

Fuerzas que actúan en la tracción del vehículo.

Donde:

F_{te} : Fuerza total de tracción

V_{max} : Velocidad maxima

Fuerzas de arrastre del vehículo.

$$F_{te} = F_{peso} + F_a + F_{ar} + m * a(2)$$

Donde:

F_{peso} : Fuerza del peso en pendiente

F_a : Fuerza de fricción aerodinamica contra el viento

F_{ar} : Fuerza de fricción entre neumático y calzada

m : Masa

a : Aceleración

Fuerza del peso en pendiente

$$F_{Peso} = m * g * \text{sen}\theta(3)$$

Fuerza de fricción aerodinámica contra el viento.

$$F_a = \frac{1}{2} * A_{fr} * cd * \rho * (vel_t)^2(4)$$



Donde:

F_a : Fuerza aerodinámica

A_{fr} : Area frontal del vehiculo

cd : coeficiente aerodinámico

ρ : densidad del aire

vel_t : velocidad del vehiculo+velocidad del viento

Fuerza de fricción entre neumático y calzada.

$$F_{ar} = U_{rr} * m * g * \cos\theta(5)$$

Donde:

F_{ar} : Fuerza de arrastre

U_{rr} : Coficiente de rozamiento dinámico entre

neumático y asfalto

m : masa del vehiculo

g : gravedad

Θ : ángulo de pendiente

Potencia real requerida del motor

$$P_m = \frac{\text{potencia}}{\eta_m} (6)$$

Donde:

η_m : Eficiencia del motor eléctrico

Finalmente, al reemplazar los valores en las ecuaciones planteadas, se obtiene la potencia necesaria siendo esta de:

$$P_m = 11.111 \text{ KW } P_m = 14.55 \text{ HP}$$

2.2. Kit motor eléctrico

El motor eléctrico es el elemento que permite realizar el movimiento de la rueda motriz en el vehículo prototipo [6], a través de un sistema de transmisión, en la fig. 3 se muestra el motor implementado, se trata de un motor asíncrono de imán permanente trifásico [13,14] con una potencia nominal de 7500 watts y un pico de potencia de 13500 watts, trabaja con una tensión nominal de 72 voltios, un consumo nominal de 89 amperios y un consumo máximo de 200 amperios.

Para la gestión del motor, el kit incluye un controlador de motor modelo EM 200 SP que trabaja con un voltaje nominal de 72 voltios, soporta una potencia máxima de 17640 watts y permite un trabajo con un amperaje que va desde los 200 hasta los 593 amperios, teniendo una eficiencia del 98.5%. cabe recalcar que este controlador tiene una certificación IP67 lo que quiere decir que permanece protegida del polvo y salpicaduras de líquidos, en la Figura 3 podemos observar el kit adquirido para la implementación de la tracción eléctrica



Figura 3

Kit motor eléctrico.

2.3. Transmisión

La transmisión se encarga de direccionar la fuerza del motor hacia la rueda motriz, mediante el uso de piñones y cadenas, a través de un eje de transmisión [15]. Para determinar el tamaño de los piñones se realiza un cálculo mediante la siguiente expresión.

$$N_1 * Z_1 = N_2 * Z_2(7)$$

Donde:

N_1 : velocidad del piñón del motor eléctrico.

Z_1 : numero de dientes del piñón del motor eléctrico.

N_2 : velocidad del piñón del eje motriz.

Z_2 : numero de dientes del piñón del eje motriz.

Esto permitió dimensionar los piñones de tal manera que la velocidad de salida en la rueda motriz sea la esperada. En la Figura 4 se presenta el arreglo de catalinas y piñones diseñado para el sistema de transmisión.

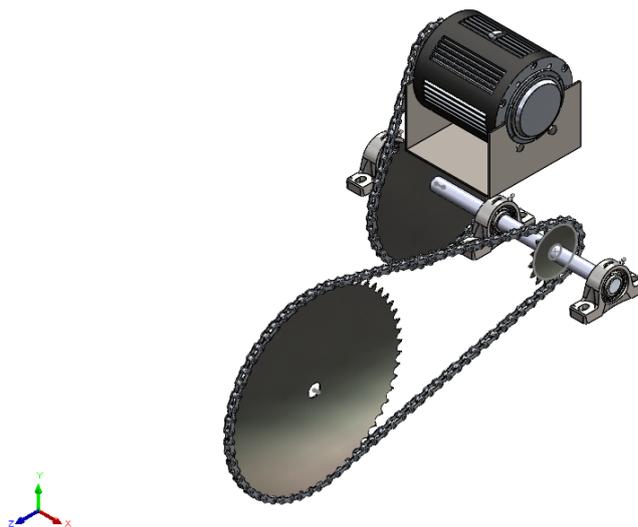


Figura 4

Motor y transmisión del vehículo.

En la Tabla 1, se presenta los resultados al resolver la fórmula de transmisión (7), donde los valores representan a la velocidad en revoluciones por minutos (rpm) y el número de dientes.

**Tabla 1**

Resultados de la relación de transmisión.

Resultados de la relación de transmisión del vehículo		
Descripción	Velocidad (RPM)	Numero de dientes
Piñón del motor	4000	14
Catalina eje de transmisión	1750	32
Piñón eje de trasmisión	1750	16
Catalina rueda motriz	385	72

2.4. Batería

La batería se encarga de suministrar energía al controlador, el cual a su vez energiza el motor eléctrico, logrando así el movimiento del motor y por ende el desplazamiento del vehículo, la batería es un parámetro crítico en la autonomía del vehículo, ya que de la capacidad de la batería depende en gran medida la autonomía que el vehículo puede recorrer sin recargar la batería.

Es importante realizar el cálculo para la implementación de la batería tomando en cuenta parámetros como la autonomía esperada y eficiencias tanto del motor, transmisión, inversor y estados de carga de la batería [16] se utiliza las siguientes ecuaciones:

En primera instancia para la potencia de tracción se tiene que [17,18]:

$$P_{traction} = F_{te} * v(8)$$

Donde:

F_{te} : Fuerza total de arrastre

v : Velocidad

Para la potencia de la línea de transmisión se usa:

$$P_{drive\ line} = \frac{P_{traccion}}{\eta_g * (1 - s)}(9)$$

Donde:

η_g : Eficiencia de la trasmisión

s : Deslizamiento

Con respecto a la energía de la batería se tiene que:

$$E = P_{drive\ line} [Kw] * \frac{d [km]}{v [km/h]}(10)$$

D. Energía real de la batería [19,20]

$$E_{bat} = \frac{1}{\eta_{bat}} * \frac{1}{\eta_m} * \frac{1}{\eta_{inv}} * \frac{1}{(SOC_{max} - SOC_{min})} * E(11)$$

Donde:

η_{bat} : eficiencia de la batería

η_m : Eficiencia del motor eléctrico

η_{inv} : Eficiencia del inversor

SOC_{max} : Estado de carga máximo de la batería

SOC_{min} : Estado de carga mínima de la batería

En la Figura 5 se ilustra la batería implementada en el vehículo prototipo es de Níquel Metal Hidruro, con una potencia de 2089 watts, una tensión nominal de 72 voltios, compuesto de 10 módulos de 7.2 voltios cada uno, una capacidad de 29 Ah, y un peso de 16 Kg, estos factores son importantes para determinar la autonomía del vehículo prototipo

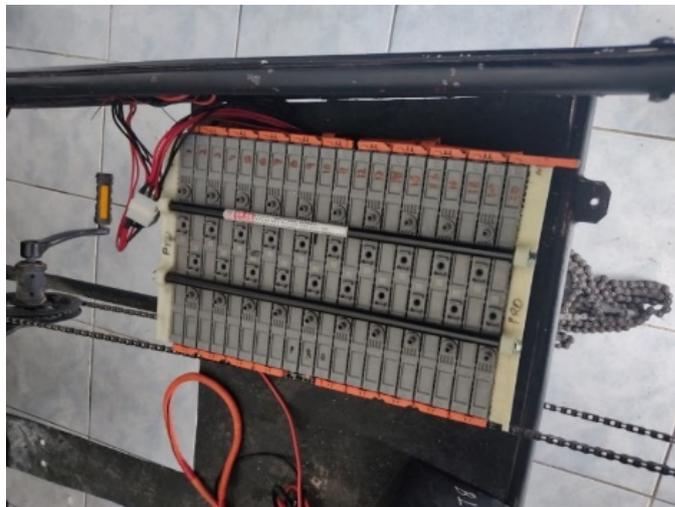


Figura 5

batería de Níquel - Metal - Hidruro.

2.5. Diseño e implementación bases del motor

En la Figura 6 se presenta el modelado de la base para el motor eléctrico, para lo cual se elaboró mediante el uso de software CAD, así mismo se realizó un estudio CAE, esto con el fin de determinar su factor de seguridad y de esta manera asegurar que no existan futuras fallas en su diseño.

Al realizar el estudio estático del elemento diseñado, en la Figura 7 se obtiene una deformación máxima de 0.35331 mm y en la Figura 8 un factor de seguridad de 8.7062,

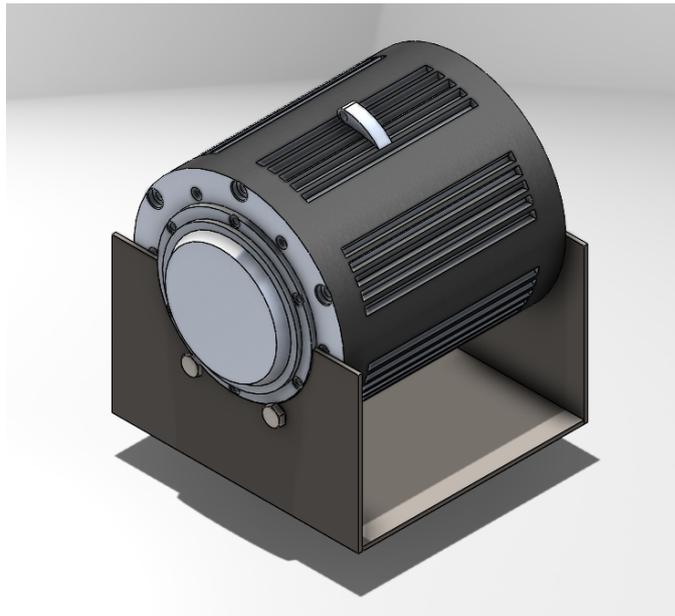


Figura 6

Diseño de base del motor.

aunque se considere sobredimensionado, por la facilidad del diseño y los materiales existentes en el mercado, es factible proceder con la fabricación y mecanizado de dicho elemento mecánico que sostendrá de manera segura el motor eléctrico.

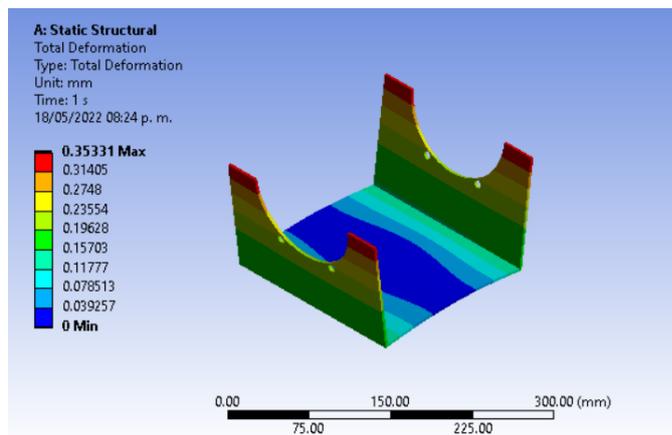


Figura 7

Deformación total.

3. Resultados y Discusión

La prueba de aceleración se la realizó con el objetivo de comprobar la velocidad máxima alcanzada por el vehículo, así mismo el tiempo que requiere para alcanzar

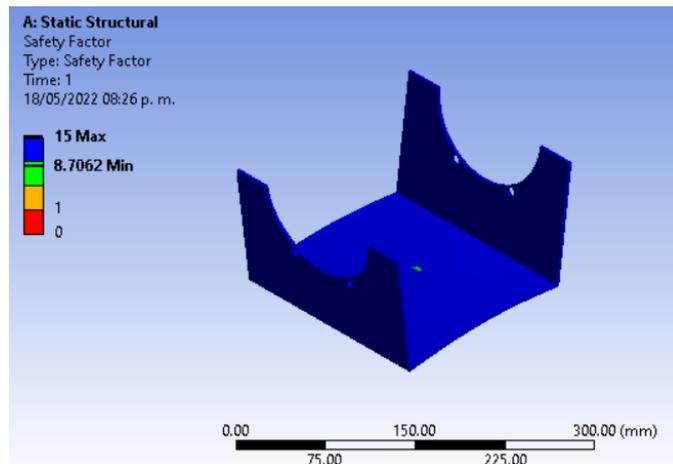


Figura 8

Análisis de factor de seguridad de base de motor.

dicha velocidad, cabe mencionar que en esta prueba se consideró dos condiciones de ruta, las cuales son con presencia de una pendiente de 7.5% y la otra sin presencia de pendiente. En la Figura 9 se presenta el registro de 5 pruebas para cada condición de ruta, el registro fue realizado mediante la aplicación “Torque Pro” el cual permite realizar el registro de velocidad en cada segundo.

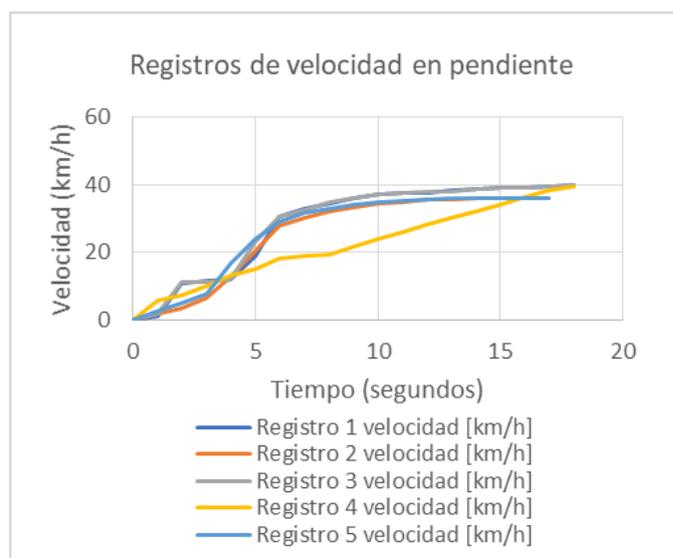


Figura 9

Registros de velocidad en pendiente.

Al realizar un gráfico con los datos registrados, permite una mejor comprensión del comportamiento del vehículo, se puede realizar un estudio estadístico en la Tabla 2, para determinar la velocidad promedio y el tiempo promedio en alcanzar la máxima velocidad del vehículo.



Tabla 2

Tiempo en alcanzar la velocidad máxima en pendiente.

Registros	Tiempo en segundos de 0 a 45 km/h
1	18
2	17
3	18
4	18
5	17
Promedio	17.6
Desviación estándar	0.55
Intervalo de confianza	de 0.68

De igual manera al realizar el registro de datos de la prueba de aceleración en ruta sin pendiente permite obtener la Figura 10 se puede apreciar de mejor manera el comportamiento del vehículo prototipo, cuyo registro de velocidad en relación con el tiempo tiende a alcanzar la velocidad máxima en un mismo punto.

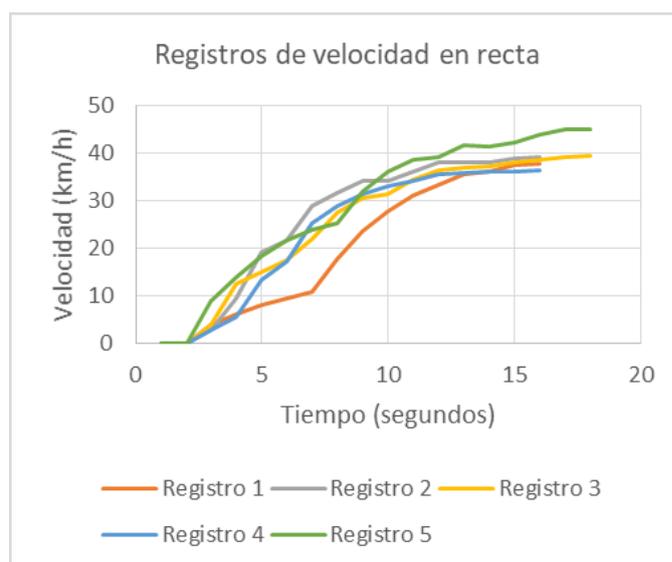


Figura 10

Registros de velocidad en recta.

En la Tabla 3 se puede observar el estudio estadístico, con el cual se determina el tiempo promedio que le toma al vehículo en alcanzar la velocidad máxima.

**Tabla 3**

Tiempo en alcanzar la velocidad máxima en recta.

Registro	Tiempo de 0 a 45 km/h
1	14
2	14
3	16
4	14
5	16
Promedio	14.8
Desviación estándar	1.1
Intervalo de confianza	1.36

3.1. Pruebas de autonomía

En la Figura 11 se muestra la prueba de autonomía realizada en la avenida 9 de octubre de la ciudad de Riobamba, iniciando como punto de referencia la entrada principal de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Para esta prueba de autonomía se consideró una velocidad crucero de 30 km/h, con dos ocupantes y el registro de velocidad y distancia recorrida se la realizó mediante la aplicación TORQUE PRO, además se consideró un SOC máximo de 82 voltios y un SOC mínimo de 62 voltios.

Al terminar el registro de tres pruebas de autonomía realizada, se realizó un estudio estadístico del cual se reporta la Tabla 4 con el fin de establecer la distancia promedio de autonomía que tiene el vehículo prototipo. El resultado indica que se alcanza una autonomía de 8.21 ± 0.10 km circulando por alrededor de 21.88 ± 2.54 min.

Tabla 4

Registros de autonomía.

	Autonomía (km)	Tiempo (minutos)
Registro 1	8.26	20.73
Registro 2	8.19	22.23
Registro 3	8.19	22.68
Promedio	8.21	21.88
Desviación estándar	0.04	1.02
IC	0.10	2.54

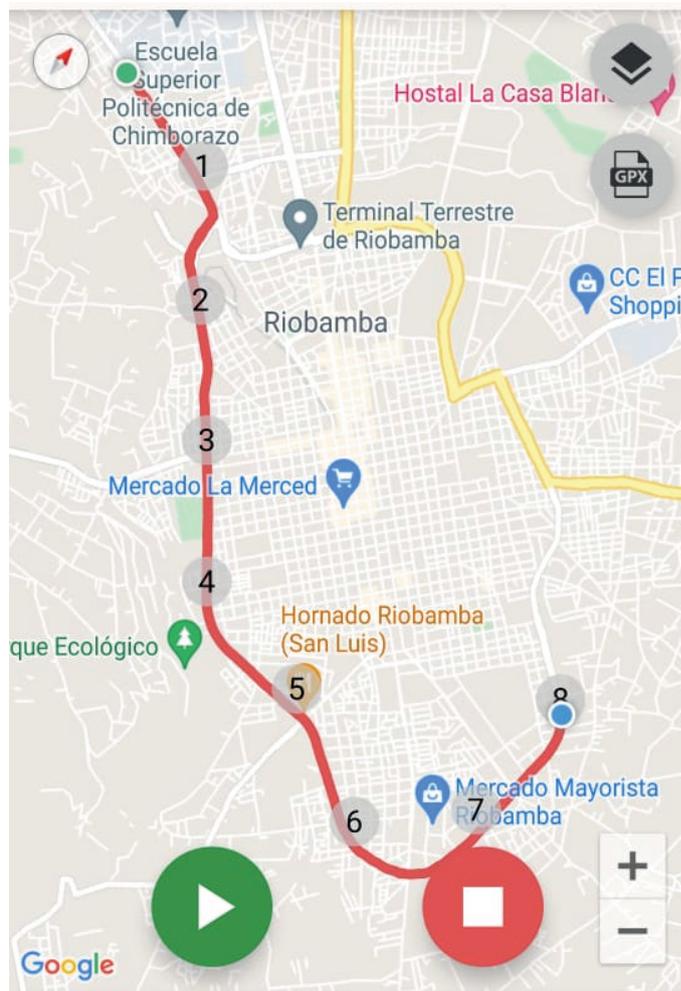


Figura 11

Ruta donde se realizó la prueba de autonomía.

4. Conclusiones

La implementación del sistema de tracción eléctrica permitió reducir el esfuerzo humano considerablemente para el desplazamiento del vehículo, convirtiendo el vehículo de tracción humana a un vehículo eléctrico. En esta propuesta de configuración, la tracción humana se utiliza principalmente en casos en los cuales la batería no sea capaz de proveer energía para la tracción eléctrica cuando el SOC de la batería sea baja.

Para cumplir con los parámetros de peso y potencia requerida para lograr el desplazamiento del vehículo prototipo se implementó un motor eléctrico de marca QSMOTOR BLDC In-Wheel Hub Motor con una potencia de 7.5 KW nominales, con voltaje de 72 V, esta especificación permite alcanzar una velocidad máxima de 40 Km/h en pendiente



de 7.5%, en un tiempo promedio de 17.6 ± 0.68 s afrontando una pendiente máxima de 7.5% y lo logra en 14.8 ± 1.36 s en recta.

Después de aplicar un análisis estructural en software CAD-CAE en la base del motor, la obtención de un factor de seguridad de 15, permitió dar paso a la fabricación de la estructura que alberga el sistema de propulsión eléctrica.

Se realizó pruebas de evaluación de autonomía, de lo cual se determinó una autonomía de 8.21 ± 0.10 km circulando en condiciones de velocidad crucero a 30 km/h, adicionalmente durante estas pruebas se corroboró el ensamble de los componentes eléctricos y mecánicos implementados

References

- [1] En Ecuador se comercializan cuatro marcas de autos eléctricos – AEADE n.d. <https://www.aeade.net/en-ecuador-se-comercializan-cuatro-marcas-de-autos-electricos/> (accessed March 21, 2023).
- [2] Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador. Anuario 2021 2022.
- [3] Instituto Nacional de Estadísticas y Censos. Anuario de Transporte 2019 n.d.
- [4] El Comercio. Parque automotor de Ecuador creció en 1,4 millones de vehículos en una década - El Comercio 2019. <https://www.elcomercio.com/actualidad/parque-automotor-ecuador-crecimiento-decada.html> (accessed October 30, 2021).
- [5] Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador. Anuario 2020 2021.
- [6] Camacho Cañizares ÁS, Guevara Barros EX. Diseño e implementación del sistema de tracción y control eléctrico para un Cross Car Biplaza Turístico. 2014.
- [7] Durán M, Aguilera J, Guerrero-Ramírez A, Claudio A, Vela L, Gudiño-Lau J. Modelado del Sistema de Tracción para un Vehículo Eléctrico. Congreso Anual 2010 de La Asociación de México de Control Automático 2010.
- [8] Molina L, Valencia S. Diseño y construcción de un prototipo de vehículo híbrido ecológico para movilidad urbana en la ciudad de Riobamba mediante el uso del software CAD, CAM, CAE. 2020.
- [9] Gillespie TD. Fundamentals of Vehicle Dynamics. Fundamentals of Vehicle Dynamics 1992. <https://doi.org/10.4271/r-114>.
- [10] Luque P, Álvarez D, Vera C. Ingeniería del automóvil. Sistemas y comportamiento dinámico: sistemas y ... - ALVAREZ MANTARAS, DANIEL, LUQUE RODRÍGUEZ, PABLO, VERA, CARLOS - Google Libros. Primera. Paraninfo; 2008.
- [11] Vélez S, Vera A. Obtención de los parámetros necesarios para el cálculo de la fuerza en rueda de vehículos eléctricos. Universidad del Azuay, 2016.



- [12] Guillermo D, Moreno C. Metodología para minimizar el consumo de combustible en autobuses, que sirven rutas fijas, mediante la reconfiguración del tren motriz. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey, 2015.
- [13] Cembranos Nistal FJ. Ventajas de los motores síncronos asimétricos. n.d.
- [14] Farina AL. Motores eléctricos trifásicos: usos, componentes y funcionamiento 2018.
- [15] Israel A, Palacios P. Diseño del sistema de transmisión de potencia a las ruedas para un vehículo tipo fórmula SAE con motor eléctrico 2016.
- [16] Ehsani M, Yimin G, Longo S, Ebrahimi K. Modern Electric, Hybrid Electric, and Fuel Cell Vehicles. CRC Press; 2018. <https://doi.org/10.1201/9780429504884>.
- [17] Fiori C, Ahn K, Rakha HA. Power-based electric vehicle energy consumption model: Model development and validation. Appl Energy 2016;168:257–68. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.01.097>.
- [18] Guzzella L, Sciarretta A. Vehicle propulsion systems: Introduction to modeling and optimization. Vehicle Propulsion Systems: Introduction to Modeling and Optimization 2013;9783642359132:1–409. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-35913-2/COVER>.
- [19] Kulworawanichpong T, Punpaisarn S. Dynamic simulation of electric bus vehicle. The Standard International Journals (The SIJ) 2014;2.
- [20] Bus Eléctrico K9G – BYD Eléctrico Ecuador n.d. <https://bydelectrico.com/ec/portfolio/bus-electrico-k9g/> (accessed March 27, 2022).