

Análisis descriptivo de las variables que afectan el tiempo de vida remanente en la operación de elementos críticos de bicicletas eléctricas *

Laura Herrera Giraldo *Universidad de Antioquia*

Alexander Amaya León *Universidad de Antioquia*

Carmen Elena Patiño Rodríguez *Universidad de Antioquia*

Olga Cecilia Úsuga Manco *Universidad de Antioquia*

Fernando Jesús Guevara Carazas *Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín*

Freddy Hernández Barajas *Universidad Nacional de Colombia - Sede Medellín*

Resumen: La importancia de los vehículos eléctricos hoy en día es innegable, es decir, que para comprender su funcionamiento resulta esencial experimentar en rutas que permitan analizar las diversas variables que inciden en su rendimiento. Aunque los estudios de laboratorio son comunes, las condiciones andinas presentan retos significativos por la topografía de la región. En este estudio, se utilizaron técnicas de análisis descriptivo de datos para analizar las variables que afectan la vida útil de los motores de las bicicletas eléctricas, a través del lenguaje de programación R. Se experimentó con 2 motores eléctricos instrumentados en 1 bicicleta eléctrica, midiendo 32 variables; los experimentos se realizaron durante 2 meses en una ruta de la ciudad de Medellín. Además, se encontró que efectivamente existen no solo relaciones lineales y correlaciones entre variables; sino también comportamientos atípicos que proporcionan información valiosa para la toma de decisiones.

Keywords: Análisis descriptivo, motor eléctrico, RUL, ggplot, dplyr, knitr, rmarkdown.

Metodología y Datos

El proyecto se inició incorporando dos modalidades de vehículos eléctricos: dos bicicletas StärkerUrban ST y una patineta Stärker Lite. Este estudio se centra en analizar las variables relacionadas con el motor eléctrico de las bicicletas que cumplen con especificaciones precisas: una potencia de 350 vatios y una velocidad máxima de 25 km/h.

Se llevaron a cabo experimentos utilizando dos motores en dos rutas urbanas de la ciudad de Medellín (Vía Las Palmas y Carril del Metro Plus), así como en un entorno de laboratorio, recorriendo distancias de 15 kilómetros. Estas pruebas se realizaron dos veces al día durante 28 días, con el mismo conductor para todas las pruebas.

Posteriormente, se instrumentalizaron los vehículos mediante sensores para obtener los datos necesarios y definir diversas variables. Se recopilaron un total de 40 variables y 78.886 registros para comprender el rendimiento del sistema, incluyendo corriente, potencia, voltaje y temperatura interna en las tres fases del motor, así como la aceleración en los ejes X, Y, y Z. Además, se consideraron factores ambientales como la humedad y temperatura, medidas a través de sensores

* Autor de contacto: elena.patino@udea.edu.co.

especializados. También se recopilaron datos sin sensor, como el ciclo, la fecha, el número de experimento y el Remaining Useful Life (RUL).

Una vez obtenida la información generada por los sensores, se procedió a la exploración mediante un análisis descriptivo con el objetivo de describir los datos identificando cantidad y tipo de variables, medidas descriptivas, gráficas de las variables y posibles distribuciones e identificación de patrones.

Finalmente, se analizaron los resultados generados en el lenguaje de programación R ([R Core Team, 2019](#)) con el fin de comprender el comportamiento de las variables asociadas al motor de las bicicletas y concluir a partir de esos resultados para validar el RUL, a través de librerías como [readxl \(Wickham and Bryan, 2023\)](#) para importar los datos desde hojas de cálculo, [dplyr \(Wickham et al., 2023\)](#) y [tidyr \(Wickham, Vaughan and Girlich, 2023\)](#) para realizar operaciones de manipulación de datos de manera más eficiente, [ggplot2 \(Wickham, 2016\)](#) para crear visualizaciones personalizadas, y otras librerías para dar formato a figuras como [reshape2 \(Wickham, 2007\)](#) y [gridExtra \(Auguie, 2017\)](#).

Resultados

En el marco del presente estudio, a continuación se presenta el análisis detallado del conjunto de datos recopilados durante las pruebas en ruta y en laboratorio de los motores de bicicletas eléctricas en diversas condiciones y ubicaciones. Con un total de 78.886 registros y 40 variables, nuestro objetivo fue describir las múltiples facetas que afectan el tiempo de vida remanente de estos motores críticos. Para este análisis descriptivo se usó la metodología del análisis del RUL seguida por [Merkt \(2019\)](#) y [Kewalramani and Ram \(2019\)](#).

Aceleraciones

La variable de aceleración en el eje X revela que dicho eje se alinea con la dirección del movimiento. Notablemente, esta variable exhibe una fuerte correlación con el peso del conductor. Así mismo, en la Figura 1 se observa que las aceleraciones en los ejes Y y Z, a pesar de no corresponder directamente a la dirección del movimiento, presentan un comportamiento similar, actuando de manera complementaria al eje X.

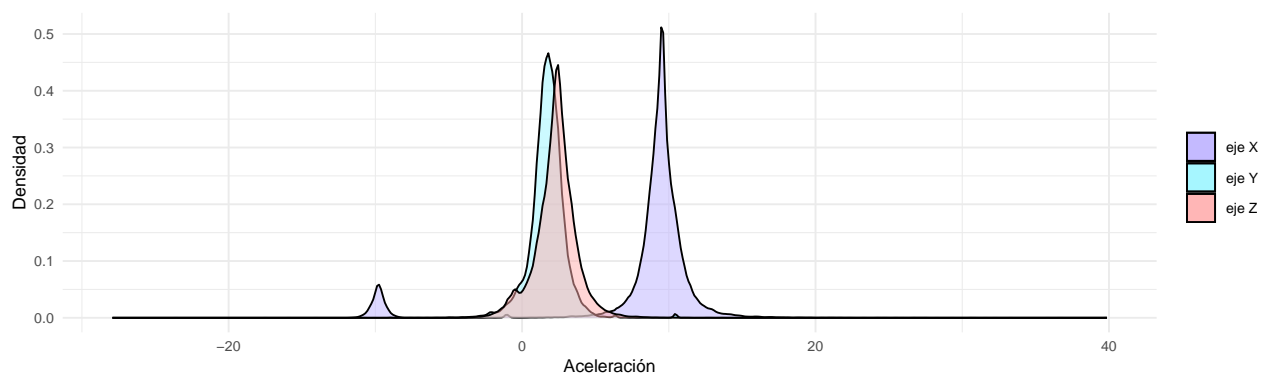


Figura 1: Diagrama de densidad de aceleraciones en los ejes de movimiento.

Corriente, potencia y voltaje

Las gráficas de la Figura 2 proporcionan una representación visual del desempeño de las variables de corriente, potencia y voltaje en tres ubicaciones diferentes (Laboratorio, Metroplus y vía Las Palmas) para ambos motores (Motor 1 y Motor 2).

En la ruta Las Palmas, se observa un aumento esperado en la corriente y la potencia en pendientes pronunciadas, indicando la necesidad de mayor potencia para vencer la resistencia del terreno. Este patrón se refleja en los datos de voltaje, que también aumentan para suministrar la potencia adicional requerida.

En la ruta Metroplus, en terrenos planos, tanto la corriente como la potencia del Motor 2 tienden a ser más constantes, ya que la resistencia al movimiento es menor. El voltaje también se mantiene relativamente estable en terreno plano.

En el entorno de laboratorio, donde se esperaba un comportamiento más estable y predecible, se observaron fluctuaciones mínimas, pero en general, las variables muestran un comportamiento consistente.

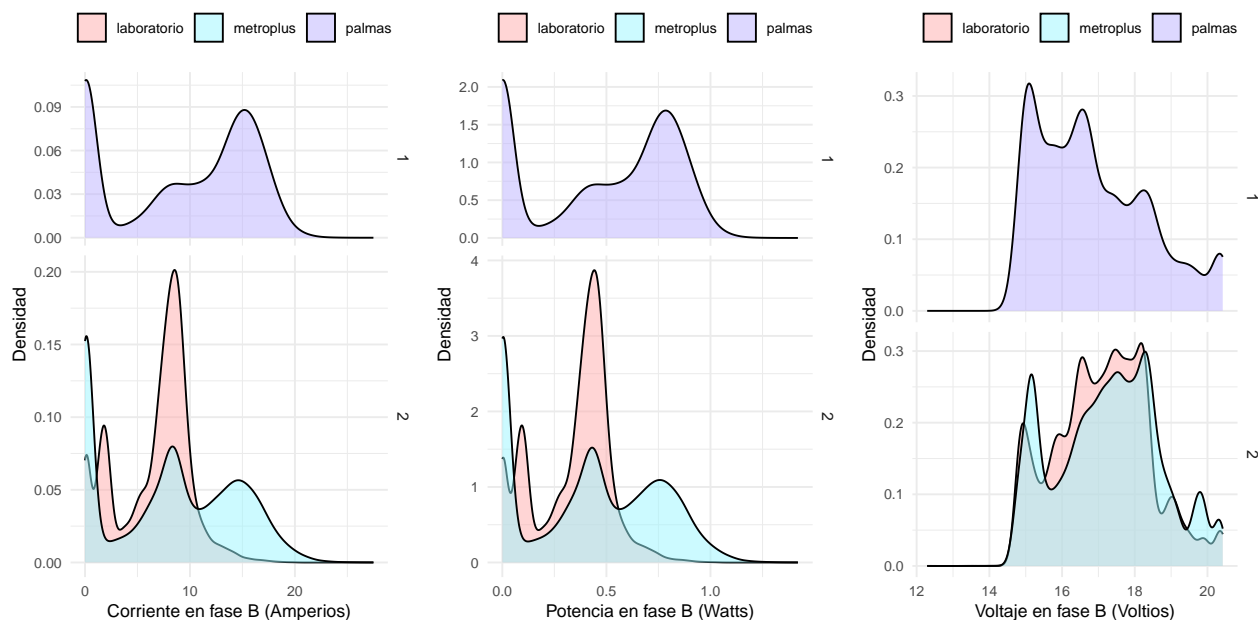


Figura 2: Digramas de densidad de las variables corriente, potencia y voltaje.

Temperatura y humedad ambiental

El análisis de la temperatura interna del Motor 1 en la vía Las Palmas de la Figura 3 revela una concentración de datos entre 0 y 60 °C, con valores cercanos a 0 que no deben interpretarse como ceros absolutos. Sin embargo, el Motor 1 no supera los 60 °C en la ruta Las Palmas debido a las exigencias del terreno, y el motor se quemó durante la prueba, limitando la disponibilidad de información relevante.

En contraste, los datos de temperatura interna en la ruta Metroplus y el Laboratorio se centran principalmente entre 30 y 60 °C. Se observan datos que superan los 90 °C, sugiriendo que el Motor 2 podría desempeñarse eficazmente en condiciones menos exigentes y alcanzar temperaturas más elevadas sin comprometer la integridad del bobinado del motor.

Es crucial destacar que la temperatura ambiental puede influir en la capacidad de disipación de calor del motor, y la humedad ambiental podría afectar la densidad del aire, influyendo en la capacidad de enfriamiento del motor. Ambientes más húmedos pueden proporcionar un efecto de enfriamiento adicional. En un entorno de laboratorio, donde se pueden controlar la temperatura y la humedad ambiental, se pueden mantener condiciones ideales para el funcionamiento del motor.

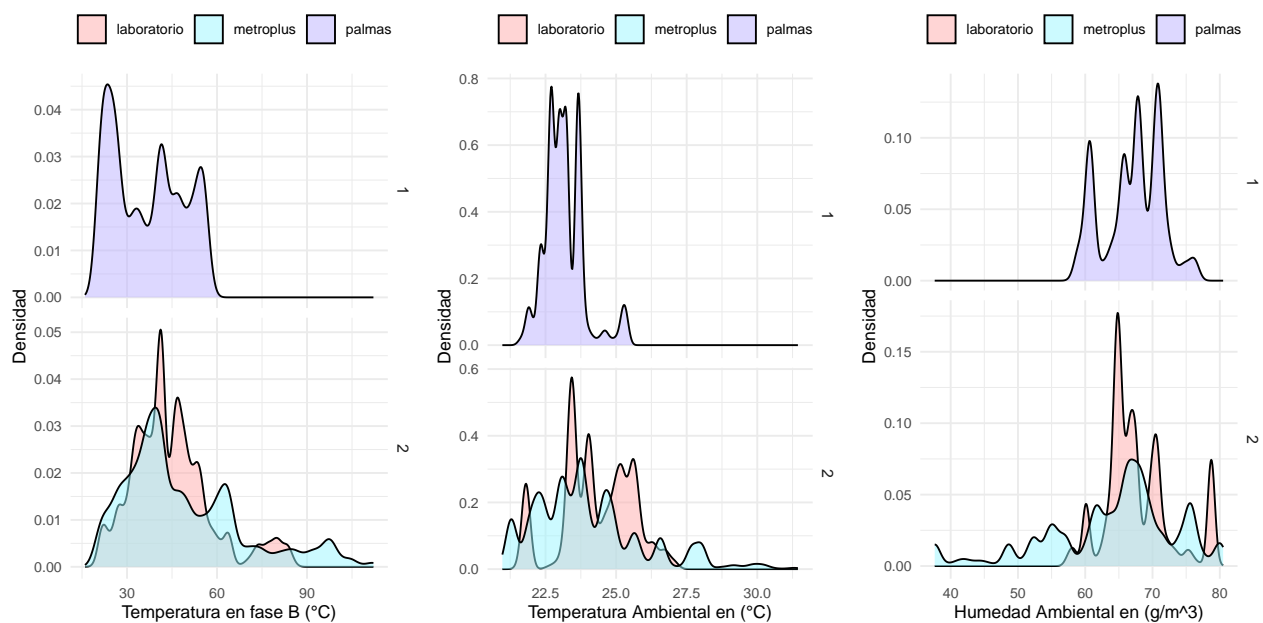


Figura 3: Diagramas de densidad de las variables temperatura interna, temperatura ambiental y humedad.

Relación entre temperatura y fecha

La relación entre la temperatura y la corriente de la Figura 4 se manifiesta como una consecuencia directa de la demanda de potencia. En situaciones donde se requiere una mayor potencia para desplazar una carga, la corriente aumenta, resultando en un calentamiento más pronunciado del embobinado del motor y, por ende, en un incremento de la temperatura.

La observación de la gráfica indica que durante las pruebas de ruta, la temperatura experimentó un aumento significativo, sugiriendo una demanda más elevada de potencia y corriente en estas condiciones. Este hallazgo se respalda adicionalmente al analizar los tiempos de ruta, revelando que el vehículo se descargaba más rápidamente durante las pruebas en ruta en comparación con los ensayos realizados en laboratorio. Este fenómeno subraya la influencia directa del entorno de prueba en el rendimiento del motor, resaltando la importancia de considerar condiciones de operación realistas para una evaluación precisa.

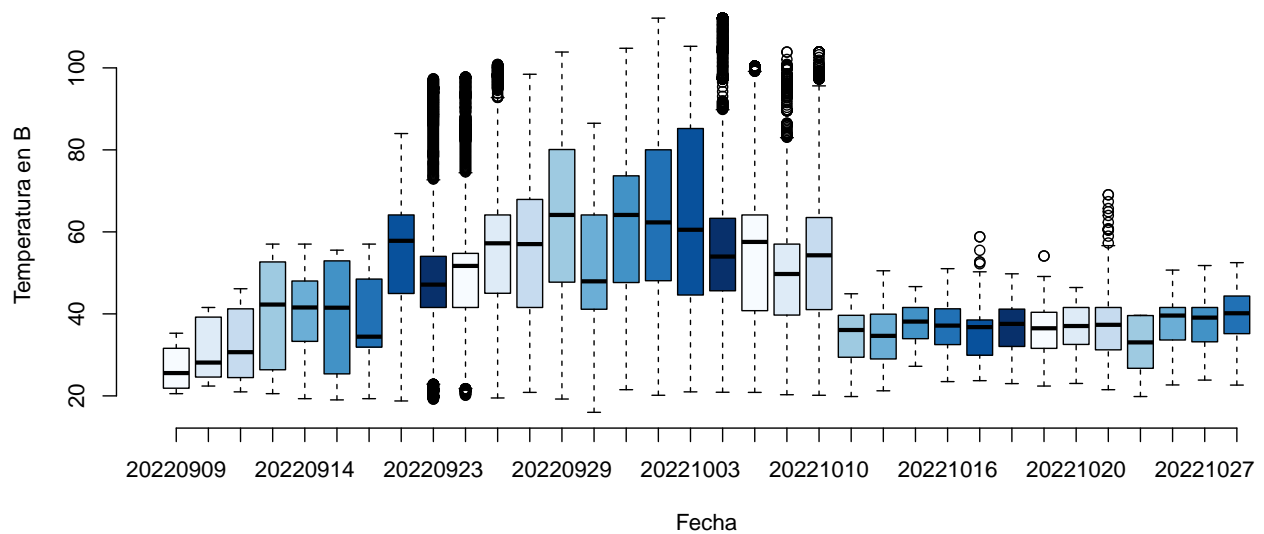


Figura 4: Boxplot comparativo entre las variables temperatura interna y fecha.

Conclusiones

La concentración de datos de temperatura interna del Motor 1 en la vía Las Palmas entre 0 y 60 °C indica que este motor no supera los 60 °C debido a las demandas del terreno y, de hecho, se quemó durante el experimento. Este hallazgo sugiere que las condiciones andinas presentan retos significativos para el rendimiento de los motores eléctricos en bicicletas, destacando la importancia de comprender el impacto específico del terreno en el tiempo de vida remanente.

Los datos de temperatura interna en la ruta Metroplus y el Laboratorio, con una concentración entre 30 y 60 °C y valores que superan los 90 °C, indican un comportamiento más eficaz del Motor 2 en condiciones menos exigentes. Esto resalta la influencia directa del entorno en el rendimiento de los motores eléctricos y la necesidad de considerar las condiciones específicas de operación para una evaluación precisa del tiempo de vida remanente.

La relación entre la temperatura y la corriente, evidenciada por un aumento significativo de la temperatura durante las pruebas de ruta, subraya la conexión directa entre la demanda de potencia y el calentamiento del motor. La observación de que el vehículo se descargaba más rápidamente en ruta que en laboratorio refuerza la importancia de realizar evaluaciones realistas del tiempo de vida remanente, considerando las condiciones específicas de operación.

Referencias

- Auguie, Baptiste. 2017. *gridExtra: Miscellaneous Functions for "Grid"Graphics*. R package version 2.3.
URL: <https://CRAN.R-project.org/package=gridExtra>
- Kewalramani, Rohit and A Ram. 2019. Estimation of Remaining Useful Life of Electric Motor using supervised deep learning methods. In *2019 IEEE Transportation Electrification Conference (ITEC-India)*. IEEE pp. 1–4.
- Merkt, Oana. 2019. On the use of predictive models for improving the quality of industrial maintenance: An analytical literature review of maintenance strategies. In *2019 Federated Conference on Computer Science and Information Systems (FedCSIS)*. IEEE pp. 693–704.
- R Core Team. 2019. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing.
URL: <https://www.R-project.org/>
- Wickham, Hadley. 2007. "Reshaping Data with the reshape Package." *Journal of Statistical Software* 21(12):1–20.
URL: <http://www.jstatsoft.org/v21/i12/>
- Wickham, Hadley. 2016. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York.
URL: <https://ggplot2.tidyverse.org>
- Wickham, Hadley, Davis Vaughan and Maximilian Girlich. 2023. *tidyr: Tidy Messy Data*. R package version 1.3.0.
URL: <https://CRAN.R-project.org/package=tidyr>
- Wickham, Hadley and Jennifer Bryan. 2023. *readxl: Read Excel Files*. R package version 1.4.3.
URL: <https://CRAN.R-project.org/package=readxl>
- Wickham, Hadley, Romain François, Lionel Henry, Kirill Müller and Davis Vaughan. 2023. *dplyr: A Grammar of Data Manipulation*. R package version 1.1.4.
URL: <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>