

## Modification of permanent magnet ac electric scooter motor to test controlled stator electrical faults

Víctor Arturo Maldonado Ruelas\*, Melanie Nicole Mata Barbosa\*, Raúl Arturo Ortiz Medina\*

*\*Universidad Politécnica de Aguascalientes, Aguascalientes, México*

(Tel: (449)4421400 ext. 2060; [victor.maldonado@upa.edu.mx](mailto:victor.maldonado@upa.edu.mx); [melanie.mata@upa.edu.mx](mailto:melanie.mata@upa.edu.mx); [raul.ortiz@upa.edu.mx](mailto:raul.ortiz@upa.edu.mx))

**ABSTRACT:** This paper presents the electrical modification of the windings of a 350 W three-phase permanent magnet ac motor (PMACM) of an electric scooter to insert short-circuit faults in a controlled manner. The PMACM is an in-wheel motor (outer rotor) that was altered in two of its windings in order to cause two types of faults: short-circuit faults between windings and short-circuit faults between winding and stator structure (chassis). The type of fault of interest to cause is the incipient type; therefore, the selection of the taps will be in the same coils or close to the star point. To guarantee that the values of the electrical parameters in the windings (resistance and self-inductance) correspond to those of the manufacturer, they are measured by means of instruments and the industrial method is also used to obtain the nominal values without the presence of a fault and in the presence of incipient short-circuit faults. Faults are entered manually and temporarily by means of electrical contactors; the information is measured by means of an RLC instrument and an oscilloscope for current and voltage measurement in each phase.

**Key Words:** Light electric vehicles, electric scooter, PMSM, incipient faults, fault detection.

### 1. INTRODUCCIÓN

En los últimos años, el incremento de vehículos eléctricos (VE), incluyendo los denominados ligeros (VEL); ha aumentado su demanda, gracias a los bajos precios de diferentes marcas comerciales (Dang et al. (2020)). Esto impacta, principalmente, en la mejora de la calidad del aire; reduciendo las emisiones de gases producidas por vehículos a gasolina (Díaz et al. (2018)).

En los VEL, la principal fuente motriz es el motor eléctrico; que dentro de sus características debe tener buena relación potencia-peso, alto par de arranque y operación a diferentes regímenes de frecuencia (Coelho et al. (2018); ElMoghazy et al. (2019)). Dependiendo de las combinaciones máquina-conversor es que se da la clasificación de los motores de corriente alterna de imanes permanentes (PMACM, por sus siglas en inglés) dentro de los cuales se encuentran los dc brushless y los de reluctancia magnética, que cuentan con las características mencionadas. Una configuración muy útil de los PMACM en los VEL son los motores rotor in-wheel, los cuales alojan al motor en una o más ruedas, donde el campo del rotor gira alrededor del devanado del estator, siendo esta característica muy práctica para los diferentes VEL como motocicletas, bicicletas y scooter (Kumar et al. (2021); Kim et al. (2020)).

El uso de scooter eléctrico es una realidad hoy en día; no sólo porque es cero emisiones; también por su simplicidad, espacio físico y poca o nula regulación necesaria para operar en las ciudades (Sobrino et al. (2023)). Por lo cual,

uno de los retos dentro del área de los scooter eléctricos, es evaluar la confiabilidad y seguridad principalmente de los componentes eléctricos fundamentales para su operación (Liu et al. (2021)).

La operación óptima del motor incide directamente en el rendimiento de la batería, por lo cual; la presencia de algún tipo de falla ya sea mecánica y/o eléctrica, cambia las condiciones de consumo energético en la batería (Nunes et al. (2019)).

Los métodos actuales de detección de fallas en este tipo de motores eléctricos, se basan en sistemas estadísticos, fuera de línea y/o medición y entrenamiento de varias variables por medio de algoritmos inteligentes (Dong et al. (2020); Jami, et al. (2021); Chauhan et al. (2022)). También se han realizado trabajos que presentan de forma experimental a nivel laboratorio con resultados interesantes en vehículos eléctricos (Alvarez et al. (2018), (Kavin et al. (2023)).

Por lo tanto, contar con un motor alterado para poder provocar fallas de corto-circuito en los devanados del motor de manera controlada, permite la validación de los algoritmos de detección de fallas, caracterizar las fallas eléctricas y el facilitar la instrumentación para poder realizar algoritmos de identificación o incluso diagnóstico de fallas para la aplicación específica de scooter eléctrico.

El presente artículo está organizado de la siguiente manera: la sección 2 presenta las características y

estructura interna del motor de corriente alterna de imanes permanentes PMACM del scooter eléctrico. La sección 3 presenta la modificación del PMACM y la selección de derivaciones. Las mediciones y resultados por los dos diferentes métodos se presentan en la sección 4. La sección 5 presenta las conclusiones del trabajo y la discusión de los resultados de este trabajo. Por último la última sección presenta la bibliografía leída.

2. PMACM DE SCOOTER ELÉCTRICO

2.1 Características básicas

El PMACM que se modificó, pertenece a un scooter eléctrico de la marca Xiaomi modelo m365; se elige porque es económicamente accesible y las refacciones, incluido el motor, tienen gran disponibilidad. Las características principales del scooter eléctrico se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Características físicas y eléctricas del scooter eléctrico m365 Xiaomi

| Características    | Valor          |
|--------------------|----------------|
| Batería            | 12 V ion litio |
| Corriente Batería  | 5100 mAh       |
| Potencia del motor | 350 W          |
| Autonomía          | 25 km          |
| Peso               | 25 kg          |

2.2 Estructura interna

El scooter cuenta con un PMACM in wheel, alojado en la rueda frontal que se sujeta con un par de tapas laterales. El rin de la rueda contiene al rotor del motor que se encuentra en la parte exterior y produce su campo magnético con imanes permanente de tierras raras (neodimio). El estator, mostrado en la Fig. 1 también está contenido en la rueda, este se mantiene fijo en la parte central y aloja al devanado que es alimentado por una batería a través de un convertidor.

El devanado del motor se divide tres fases unidas internamente en un punto en conexión estrella. Cada fase, tiene 9 bobinas divididas en 3 grupos de 3 devanados en 27 ranuras del estator, divididas simétricamente. Para cada bobina, se utilizan 7 alambres magnetos calibre 26 en paralelo y se tienen 7 vueltas en cada ranura. El sentido de enrollamiento cambia de una ranura a otra, con la finalidad de eliminar campos magnéticos dispersos; el tener 7

alambres en paralelo ayuda a distribuir la corriente alta en las fases y, se tienen 3 pares de polos por fase, ya que se requiere mayor par de arranque en velocidades bajas por la funcionalidad del scooter.



Fig. 1. Devanados del PMSM de scooter eléctrico

La Fig. 2 presenta la distribución de las bobinas por fase, la conexión de alimentación, el tipo de enrollamiento por bobina y la salida al punto de conexión estrella. Este diagrama de construcción propia, es una guía de diseño y construcción, el cual se obtuvo a través del análisis físico del motor.

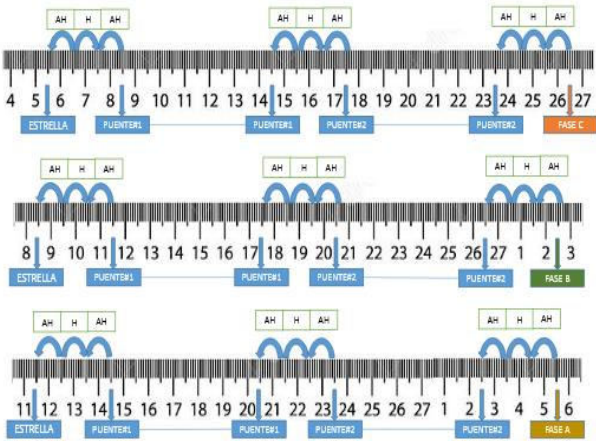


Fig. 2. Conexión del estator del PMSM

3. MODIFICACIÓN DEL MOTOR

Para la modificación del PMACM, se consideran dos tipos de fallas eléctricas de corto-circuito en los devanados: corto-circuito entrevueltas y corto-circuito entre devanado y chasis. Este tipo de fallas se presentan por calentamiento en los devanados, generando la degradación del aislante, generando así cortocircuitos en las bobinas, ya sea entre ellas y/o con respecto a la estructura del estator o chasis, el cual está conectada con el punto de unión de la estrella del motor. La

modificación del PMACM consiste el re-devanado del motor para añadir derivaciones, también llamados TAPs, que permitan generar corto-circuitos entre un número determinado de vueltas del devanado y de una vuelta específica del devanado al chasis. Para la modificación se considera el tipo de falla a reproducir, la magnitud de esta y el espacio que se tiene en la rueda para que los TAPs puedan ser manipulados sin alterar el funcionamiento del motor.

La Fig. 3 presenta el esquema que especifica la modificación de las fases A y B, la posición de cada TAP y las vueltas que cortocircuita cada uno. La fase B está modificada con 4 TAPs que se usan para representar fallas entre devanados. Los primeros dos son los TAPs 1 y 2, que se encuentran en la primera vuelta de las primeras dos bobinas del devanado respectivamente, al inicio de la conexión de línea, con una diferencia de 7 vueltas entre ellas. Los TAPs 3 y 4 se encuentran al final de la fase, ambos en la última bobina en las vueltas 4 y 6, antes del punto de salida a la estrella con una diferencia de 2 vueltas entre ellas.

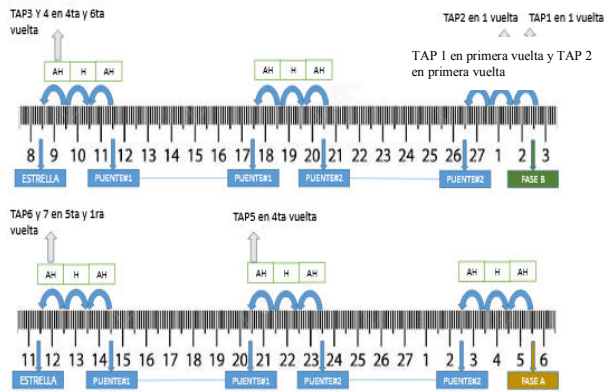


Fig. 3. Modificación en dos de las fases del PMSM

La modificación de la fase A con tres TAPs, que también se puede ver en la Fig. 3, se usa para representar la falla entre el devanado y el chasis del estator. El TAP 5 en la 6ta bobina de la línea de alimentación con respecto a la estrella con una diferencia de 24 vueltas entre ellas; esta falla se coloca como prueba para una falla abrupta, para generar un caso de falla severa. El TAP 6 en la última bobina con respecto a la estrella con una diferencia de 5 vueltas entre ellas; y por último el TAP 7 en la última bobina con respecto a la estrella con una diferencia de 1 vuelta entre ellas para probar la falla de corto-circuito más pequeña posible.

La fase C no tiene alteración alguna y se re-devana con la misma estructura del motor sano por eso no aparece en la Fig. 3. Con excepción de la falla abrupta contemplada con el TAP 5, las fallas que se generan en este trabajo son incipientes, es decir no representan más del 10% de cambio en los parámetros del motor. La fig. 4 presenta la modificación en el PMACM ya con los TAPs disponibles en el devanado del estator.

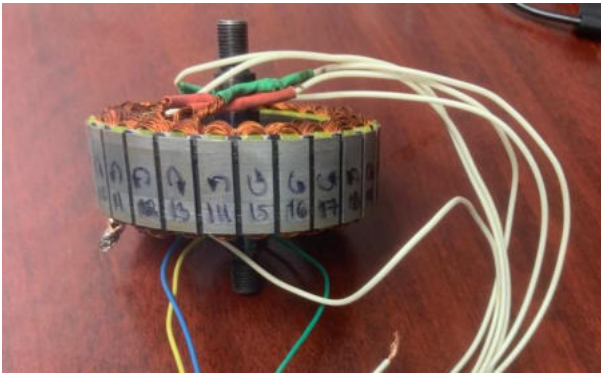


Fig. 4. Estator modificado del scooter eléctrico

4. MEDICIÓN Y OBTENCIÓN DE PARÁMETROS

4.1 Resultados RLC

Para la medición de los resultados inicialmente se utilizó un instrumento RLC para el motor sano y sin modificaciones, es decir, con características de fábrica. Cuando el motor no se ha modificado sólo tiene las líneas disponibles, por lo tanto, se midieron los valores entre líneas y no con respecto a la estrella. También se hacen mediciones con el motor modificado, pero sin provocar fallas con el fin de comparar el estado sano del motor antes y después de la modificación. La Tabla 2 presenta los resultados de la comparativa de los parámetros obtenidos a partir del motor sin modificaciones y los del motor alterado con TAPs, pero sin aplicar falla alguna.

Tabla 2. Parámetros eléctricos del PMACM

| Valor | Medición de líneas<br>Motor fabricante |      |      | Medición de líneas<br>Motor modificado |      |      |
|-------|----------------------------------------|------|------|----------------------------------------|------|------|
|       | A-B                                    | B-C  | C-A  | A-B                                    | B-C  | C-A  |
| R(Ω)  | 0.48                                   | 0.47 | 0.44 | 0.36                                   | 0.39 | 0.35 |
| L(μH) | 329                                    | 407  | 333  | 384                                    | 397  | 378  |

Los valores de los parámetros eléctricos medidos del motor modificado sin provocar falla entre cada una de las fases y la estrella son: R=0.349Ω y L=170.0μH para

la fase A;  $R=0.338\Omega$  y  $L=183.0\mu H$  para la fase B y;  $R=0.369\Omega$  y  $L=188.0\mu H$  para la fase C.

Así mismo, se hicieron las mediciones de resistencia (R) e inductancia (L) ante la presencia de fallas con las dos condiciones de corto-circuito establecidas en la sección anterior. La primera presenta las fallas en la fase B del motor; cortocircuitando la conexión del TAP 1 y 2 (corto-circuito entre bobinas de 7 vueltas); y la segunda cortocircuitando entre el TAP 3 y 4 (corto-circuito entre bobinas de 2 vueltas). Los resultados se presentan en la Tabla 3, que muestra los valores en cada una de las fases de alimentación.

**Tabla 3. Fallas de corto-circuito entre devanados PMACM método RLC**

|                | Medición en Fase corto-circuito TAP 1 - TAP 2 |      |      | Medición en Fase corto-circuito TAP 3 - TAP 4 |      |      |
|----------------|-----------------------------------------------|------|------|-----------------------------------------------|------|------|
| Valor          | A                                             | B    | C    | A                                             | B    | C    |
| R ( $\Omega$ ) | 0.37                                          | 0.43 | 0.37 | 0.34                                          | 0.34 | 0.37 |
| L ( $\mu H$ )  | 167                                           | 190  | 167  | 169                                           | 189  | 183  |

La segunda parte de medición corresponde a las fallas provocadas por las derivaciones de la fase A; cortocircuitando las conexiones del TAP 5, 6 y 7 con respecto a la estrella. Los resultados de estas mediciones se presentan en la Tabla 4.

**Tabla 4. Fallas de corto-circuito del devanado con respecto al chasis en el PMACM método RLC**

|                | Medición fase TAP 5- E |     |     | Medición fase TAP 6- E |     |     | Medición fase TAP 7- E |     |     |
|----------------|------------------------|-----|-----|------------------------|-----|-----|------------------------|-----|-----|
| Valor          | A                      | B   | C   | A                      | B   | C   | A                      | B   | C   |
| R ( $\Omega$ ) | 0.2                    | 0.3 | 0.3 | 0.3                    | 0.3 | 0.3 | 0.3                    | 0.3 | 0.3 |
| L ( $\mu H$ )  | 102                    | 192 | 186 | 156                    | 191 | 187 | 165                    | 190 | 185 |

#### 4.2 Resultados por el método de los tres voltímetros

El método de los tres voltímetros, se utiliza para medir a través de una señal exploratoria; el ángulo de desfase que existe entre el voltaje y la corriente, y con base en eso, hacer una aproximación de cuatro parámetros eléctricos como la Impedancia (ZL), Reactancia (XL), Resistencia (R) e Inductancia (L).

El experimento mide el voltaje RMS de fase (V<sub>1</sub>) y la corriente RMS (I) y se miden las señales de voltaje y corriente. El motor, al ser un circuito resistivo e inductivo

presentará un desfase en las señales y se mide el ángulo entre ellos ( $\alpha$ ); donde  $f$  es la frecuencia de operación. Utilizando las fórmulas del método que se presentan en las Ec. (1)-(4) se pueden obtener los valores de resistencia e inductancia para cada fase. (Alexander et al, (2013))

$$Z_L = \frac{V_1}{I} \quad (1)$$

$$X_L = Z_L \sin(\alpha) \quad (2)$$

$$R = Z_L \cos(\alpha) \quad (3)$$

$$L = \frac{X_L}{2\pi f} \quad (4)$$

Se repiten los experimentos para las mismas fallas del apartado anterior, y los resultados se presentan en la Tabla 5 y la Tabla 6.

**Tabla 5. Fallas de corto-circuito entre devanados PMACM método de los tres voltímetros**

|                | Medición en Fase corto-circuito TAP 1 - TAP 2 |      |      | Medición en Fase corto-circuito TAP 3 - TAP 4 |      |      |
|----------------|-----------------------------------------------|------|------|-----------------------------------------------|------|------|
| Valor          | A                                             | B    | C    | A                                             | B    | C    |
| R ( $\Omega$ ) | 0.39                                          | 0.34 | 0.35 | 0.43                                          | 0.34 | 0.37 |
| L ( $\mu H$ )  | 110                                           | 206  | 170  | 168                                           | 189  | 183  |

**Tabla 6. Fallas de corto-circuito del devanado con respecto al chasis en el PMACM método de los tres voltímetros**

|                | Medición fase TAP 5- E |     |     | Medición fase TAP 6- E |     |     | Medición fase TAP 7- E |     |     |
|----------------|------------------------|-----|-----|------------------------|-----|-----|------------------------|-----|-----|
| Valor          | A                      | B   | C   | A                      | B   | C   | A                      | B   | C   |
| R ( $\Omega$ ) | 0.2                    | 0.3 | 0.3 | 0.3                    | 0.3 | 0.3 | 0.3                    | 0.3 | 0.3 |
| L ( $\mu H$ )  | 098                    | 174 | 180 | 165                    | 203 | 190 | 167                    | 198 | 188 |

#### 4.3 Comparativa de los parámetros obtenidos

Las mediciones obtenidas por ambas metodologías pretenden ser un indicador para la revisión de que las modificaciones realizadas el PMACM fueron llevadas a cabo de manera correcta. Las Tablas 7 y 8 muestran los porcentajes de las diferencias que se tienen entre las mediciones, tomando como base la medición del RLC.

Esto muestra claramente que las mediciones realizadas con los corto-circuitos con respecto a la estrella, que son más severas, tienen mayor estabilidad con respecto a los corto-circuitos incipientes entre fases.

**Tabla 7. Comparativa de los parámetros obtenidos en las fallas de corto-circuito entre devanados PMACM**

| Valor                          | Diferencia en porcentaje fase corto-circuito TAP 1 - TAP 2 |       |       | Diferencia en porcentaje en fase corto-circuito TAP 3 - TAP 4 |       |       |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------|-------|-------|---------------------------------------------------------------|-------|-------|
|                                | A                                                          | B     | C     | A                                                             | B     | C     |
| <b>R (<math>\Omega</math>)</b> | 7.26                                                       | -20.9 | -4.59 | 26.3                                                          | 0.88  | 0.16  |
| <b>L (<math>\mu</math>H)</b>   | -33.99                                                     | 8.41  | 1.79  | -0.59                                                         | -0.02 | -0.04 |

**Tabla 8. Fallas de corto-circuito del devanado con respecto al chasis en el PMACM método RLC**

| Valor                          | Diferencia (%) fase TAP 5- E |     |     | Diferencia (%) fase TAP 6- E |     |     | Diferencia (%) fase TAP 7- E |     |      |
|--------------------------------|------------------------------|-----|-----|------------------------------|-----|-----|------------------------------|-----|------|
|                                | A                            | B   | C   | A                            | B   | C   | A                            | B   | C    |
| <b>R (<math>\Omega</math>)</b> | 3.7                          | 5.4 | 2.9 | 3.2                          | 5.9 | 0.3 | 12.9                         | 1.2 | 13.3 |
| <b>L (<math>\mu</math>H)</b>   | 4.9                          | 9.4 | 3.2 | 5.8                          | 6.3 | 1.6 | 1.2                          | 4.2 | 1.6  |

## 6. CONCLUSIONES

En los resultados del trabajo se presentan las mediciones del PMACM modificado ante la presencia de fallas eléctricas de corto-circuito entre vueltas de una misma bobina y con la estrella del devanado de la máquina. La modificación realizada al motor permite provocar distintas fallas de manera controlada. Al medir se obtiene que los parámetros básicos del devanado de la máquina, se encuentran variaciones en los parámetros eléctricos cuando el motor se somete a una falla intencionada y cuando el motor se encuentra sano.

Para el caso de medición RLC, se presentan variaciones en los valores nominales entre un 2.3% y un 7.5% en las condiciones de fallas incipientes; y sólo la falla de tipo abrupta que se consideró (TAP 5 respecto a estrella) presenta una fallas del 32% con respecto al nominal.

Los resultados obtenidos por medio del método de los tres voltímetros presentan variaciones muy similares entre 2.4% y un 7.2% cuando se trata de fallas de tipo incipiente. Sin embargo, este método requiere mucha precisión en la medición y buena resolución de los aparatos de medición y adquisición para garantizar que el ángulo de desfaseamiento que existe entre el voltaje y la corriente es correcto.

Finalmente, la modificación al PMACM permite observar cómo se comportan los parámetros eléctricos en presencia de fallas; Se observa que con una falla de más del 10% del devanado, las metodologías de detección empleadas en este trabajo pueden funcionar correctamente, pero cuando se trata de detectar fallas incipientes como las más pequeñas que se consideraron en la modificación del PMACM, se requerirá algún otro método o algoritmo de detección en línea o fuera de línea para garantizar oportunamente la detección de fallas eléctricas de corto-circuito.

## REFERENCIAS

- Arifin, C. N., Nur, M. I., & Ariwibowo, A. (2013). Design and implementation of electric scooter vehicle. *Journal of Physics: Conference Series*, 1524(1), 012046.
- Alexander, C. K. & Sadiku M. N. O. (2013). Fundamentos de circuitos eléctricos. 5ta edición. Mc Graw Hill, 978-607-15-0948-2
- Alvarez-Salas, R., Maldonado-Ruelas, V., Villalobos Piña, F., Ortiz-Medina, R.. (2018). Multiple criteria fault detection of a BLDC motor (brushless direct current). *DYNA*, 93(5). 556-562. DOI: <https://doi.org/10.6036/8714>
- Chauhan, V., Kumar, A., & Kumar, S. (2021). A comprehensive on electric vehicles and their recent advancements. In *Advances in Electric Power, Energy and Control* (pp. 415-423). Springer
- Coelho, M. L., & Ribeiro, R. A. (2018). Battery management system for electric scooters. In *2018 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)* (pp. 624-628). IEEE
- Dang, X., Li, P., & Yang, Z. (2020). Design and implementation of a smart electric scooter for sharing service. In *2020 IEEE 16th International Conference on Automation Science and Engineering (CASE)* (pp. 1104-1109). IEEE
- Díaz, G. M., Lima, L. D. S., de Brito, T. A., & Santi, A. G. (2018). Design of a brushless direct current motor for electric scooter application. In *2018 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)* (pp. 2502-2507). IEEE
- Dong, M., Gao, J., & Hu, Z. (2020). Fault diagnosis method of electric vehicle motor based on support vector machine. In *2020 IEEE International*

*Conference on Mechatronics and Automation (ICMA)*  
(pp. 2109-2113). IEEE

- ElMoghazy, A. Y., & Farouk, A. (2019). Performance improvement of electric scooters using fuzzy logic control for battery balancing. In *2019 2nd International Conference on Energy Efficient Technologies for Sustainability (ICEETS)* (pp. 79-83). IEEE
- Jamil, F., & Singh, B. (2021). Review on intelligent control algorithms for electric scooters. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Inventive Computation Technologies* (pp. 1243-1248). Springer
- Kavin, R., Abishek, P., Akash, M., Gokulsanjay, K., & Jebastin, G. D. (2023). Fault Detection and Monitoring of BLDC Motor Using ANN. *International Conference on Networking and Communications (ICNWC)*, Chennai India, 2023, (pp. 1-5), DOI: 10.1109/ICNWC57852.2023.10127376
- Kim, C. M., & Yoon, G. S. (2020). Design of a sliding mode control for a permanent magnet synchronous motor in electric scooters. *Energies*, 13(11), 2826.
- Kumar, S., & Chauhan, V. (2021). Energy management strategies for electric vehicles: a review. In *Advances in Electric Power, Energy and Control* (pp. 341-350). Springer
- Liu, C., & Li, M. (2021). Analysis of the charging service mode for electric scooters based on charging piles. In *Proceedings of the 4th International Conference on Green Energy and Environmental Technology* (pp. 111-120). Springer
- Nunes, L., Almeida, R., & Rodrigues, J. (2019). Optimization of electric scooters for sharing systems. In *2019 14th Iberian Conference on Information Systems and Technologies (CISTI)* (pp. 1-6). IEEE
- Sobrinho N., Gonzalez J. N., Vassallo J. M. & Baeza M. A. (2023). Regulation of shared electric kick scooters in urban areas: Key drivers from expert stakeholders. *Transport Policy*, vol. 134, pp. 1-1