



**Universidad
Tecnológica
del Perú**

“AÑO DE LA ESPERANZA Y EL FORTALECIMIENTO DE LA DEMOCRACIA”

Facultad de Ingeniería

Proyecto de Investigación:

“Análisis dinámico de la estabilidad de un scooter eléctrico al tomar curvas considerando derrape e inclinación”

Integrantes:

Orfilia Genoveva Vásquez Silva

Trujillo Rios Ruth Esther

Talledo Avila Carlos Enrique

Vilcahuaman Masca Esteban Moises

Trigoso Paredes Hugo

Docentes

DORIS MARIBEL ESCRIBA VILLANUEVA

2026

Análisis dinámico de la estabilidad de un scooter eléctrico al tomar curvas considerando derrape e inclinación

Carlos Talledo A.⁽¹⁾, Hugo Trigoso P.⁽²⁾, Ruth Trujillo R.⁽³⁾, Orfilia Vásquez S.⁽⁴⁾ y Esteban Vilcahuaman M.⁽⁵⁾

- ⁽¹⁾ Estudiantes de 3° ciclo de ingeniería sistemas, UTP
- ⁽²⁾ Estudiantes de 3° ciclo de ingeniería sistemas, UTP
- ⁽³⁾ Estudiantes de 3° ciclo de ingeniería ambiental, UTP
- ⁽⁴⁾ Estudiantes de 3° ciclo de ingeniería sistemas, UTP
- ⁽⁴⁾ Estudiantes de 3° ciclo de ingeniería sistemas, UTP

1. Resumen

Este trabajo estudia de manera sencilla pero técnica cómo se comporta un scooter eléctrico al tomar curvas, una situación muy común en el tránsito urbano y donde suelen ocurrir pérdidas de control. El objetivo fue identificar en qué condiciones podrían producirse derrapes, considerando una velocidad constante, el radio de la curva y la fricción entre el scooter y el pavimento. Para ello se utilizó un enfoque basado en la mecánica clásica y se aplicó la Segunda Ley de Newton para modelar las fuerzas que intervienen durante el giro. Con estas ecuaciones se desarrolló un simulador en Python que permitió analizar distintos escenarios de superficie. Los resultados evidencian que curvas más cerradas requieren mayor fricción e inclinación, aumentando el riesgo de inestabilidad.

Palabras claves: estabilidad dinámica, fricción, scooters eléctricos.

2. Introducción

En los últimos años, el uso de scooters eléctricos como alternativa de movilidad rápida y sostenible ha ido en aumento. En Perú, particularmente en Lima, esta situación se ha acelerado debido a la alta congestión vehicular y la búsqueda de medios de transporte económicos. Sin embargo, este aumento no ha sido acompañado de las medidas educativas, viales ni legislativas adecuadas. Como resultado, se ha generado un escenario de riesgo para usuarios y demás personas, pues con frecuencia los conductores de scooters eléctricos circulan por pistas, veredas e incluso en sentido contrario al tránsito. Una situación que se vuelve especialmente crítica durante maniobras en curvas, donde es necesario mantener la estabilidad y control de estos vehículos.

Esta falta de regulación ha generado un aumento de accidentes y lesiones relacionados con el uso de estos vehículos debido al bajo o inexistente uso de cascos de seguridad y desconocimiento de sus límites de estabilidad (Frye et al., 2024). El uso de restricciones de velocidad y regulaciones adecuadas en Denver ha demostrado reducir las lesiones causadas por esta situación de manera significativa (Kahan et al., 2024), resaltando la necesidad de comprender los factores físicos que influyen en la estabilidad de un scooter eléctrico.

Siendo clave el estudio dinámico del movimiento del scooter eléctrico al tomar curvas. Donde la estabilidad de manejo depende de la relación entre velocidad, radio de giro, fricción disponible y la posición del centro de gravedad del sistema conductor-scooter. Hwang & Cheng (2013) indica que en la dinámica de scooters eléctricos un centro de gravedad bajo mejora la estabilidad y reduce la probabilidad de derrapes, mientras que el diseño geométrico, sistema de suspensión e interacción con pistas o veredas influyen directamente en el control durante el giro.

a. Descripción del proyecto

Este proyecto se desarrolló siguiendo un plan de 4 etapas claras. En una primera fase se basó en la revisión teórica y definición del modelo físico en la mecánica clásica. En segundo lugar, se recopilieron datos reales para estimar parámetros como la masa del conductor promedio, scooter y coeficientes de fricción representativos. En tercer lugar, se desarrolló el modelo matemático para implementar un simulador en *Python* versión 3, que permitirá analizar distintos escenarios variando el radio de giro y la fricción. Finalmente, se procesaron los resultados mediante gráficos y tablas para su interpretación.

b. Antecedentes

Daza Martínez y Vargas Tuitise (2024) analizan la dinámica de motocicletas eléctricas describiendo las fuerzas que intervienen en su desplazamiento como: la tracción, resistencia a rodadura y resistencia aerodinámica. Explicando que el equilibrio entre estas fuerzas determina el comportamiento dinámico, estabilidad y seguridad de estos vehículos. Además, señala que la fuerza de fricción entre los neumáticos y el suelo influye directamente en el control y maniobrabilidad del sistema. Respaldando el presente trabajo donde se considera la fuerza de fricción un factor crítico para evitar derrapes al tomar curvas.

Por otro lado, Vanegas Metaute et al. (2024) realizan un estudio de la dinámica de una motocicleta convencional convertida a eléctrica. Analizando cómo la redistribución de masas y la variación del centro de gravedad, causadas por estas modificaciones, alteran su dinámica. Así mediante simulaciones con la herramienta Simulink de Matlab demuestran que la ubicación de los componentes eléctricos altera la estabilidad, aceleración y equilibrio general de los vehículos. Lo cual es interesante y pertinente, pues, la estabilidad de un scooter eléctrico al tomar curvas también dependería de la posición del centro de masa del sistema conductor-scooter. Por ende, influyendo en el equilibrio dinámico durante el giro.

De manera complementaria, Prompakdee et al. (2016) al estudiar la influencia de estas distribuciones del peso y variaciones de posición del centro de gravedad mediante el uso de MSC ADAMS/Truck tool (MSC software) concluyeron que estas alteraciones afectan de manera significativa la aceleración y la estabilidad direccional del movimiento. Si bien el estudio se desarrolló con vehículo de mayor tamaño; buses, los principios físicos analizados también son aplicables a scooters eléctricos. Reforzando así la relación entre velocidad, radio de giro y fuerzas laterales como determinantes de la estabilidad o pérdida de control al tomar curvas.

c. Objetivos

- **Objetivo general**

Analizar la estabilidad de un scooter eléctrico al tomar curvas bajo condiciones de velocidad constante para determinar las condiciones en las que podrían ocurrir derrapes o pérdidas de equilibrio, en función del radio de giro y fricción del medio vial utilizado.

- **Objetivos específicos**

- Describir las fuerzas que actúan sobre un scooter eléctrico durante el giro a velocidad constante, considerando el peso, la fuerza centrípeta y la fricción scooter eléctrico–suelo.
- Determinar el ángulo de inclinación necesario para mantener el equilibrio dinámico en curvas evitando el derrape del scooter eléctrico.
- Analizar cómo diferentes valores del coeficiente de fricción (μ) representando distintas condiciones de superficie (seco, mojado, etc) podrían afectar la estabilidad y el riesgo de derrape.
- Desarrollar un simulador utilizando Python versión 3 para estudiar el comportamiento del scooter eléctrico considerando las variables de coeficiente de fricción y radio de giro.

d. Alcances y limitaciones

- **Alcance**

- Este trabajo se desarrolla utilizando principios teóricos de mecánica clásica para analizar la estabilidad de un scooter eléctrico al tomar curvas. Centrándose en la relación entre la fuerza centrípeta, radio de giro y fricción entre scooter-pavimento para determinar las condiciones de derrape e inclinación.
- Para las evaluaciones se desarrollará un simulador computacional en Python que permitirá evaluar distintas situaciones mediante variación del coeficiente de fricción y el radio de la curva. Facilitando la visualización de zonas seguras y de riesgo; ayudando a comprender los límites de estabilidad al manejar en curvas.
- Se realizará un análisis dinámico simplificado, por ello no se requerirá un laboratorio o instrumentación especializada, haciendo el trabajo viable considerando el tiempo disponible para el curso, los recursos económicos de los estudiantes y el nivel de experiencia en modelado físico y programación.

- **Limitaciones**

- El estudio se realiza con un modelo teórico simplificado útil para la comprensión del problema de estabilidad en scooters eléctricos, pero no para soluciones de fabricación o de diseño industrial. Además, al no considerar fenómenos complejos como la resistencia aerodinámica, deformación de los neumáticos, etc., se reduce el nivel de detalle respecto a un modelo real.
- Este estudio no pretende ser un sustituto real ni validaciones con sensores, pues, utilizará coeficientes de fricción que provienen de literatura técnica y no mediciones experimentales; debido a limitaciones de presupuesto, equipamiento y acceso a instrumentos de medición.
- No se consideran errores humanos, reacciones del conductor ni movimientos debido al modelo ideal de evaluación propuesto.

3. Metodología

En este trabajo no se realizarán pruebas físicas ni de laboratorio, sino que será llevada mediante un modelamiento matemático y de simulación de Python con un enfoque analítico-computacional.

A. Definición del modelo físico: Para este trabajo se modela un sistema de velocidad constante es decir un movimiento circular uniforme (MCU). Además, para utilizar los conceptos del curso se aplicarán restricciones como eliminar la fuerza de resistencia lateral, fuerza de resistencia aerodinámica simplificándose por una fuerza de fricción estática. Siendo las fuerzas consideradas:

- Peso $P = mg$
- Fuerza normal N
- Fuerza de fricción estática F_f
- Fuerza centrípeta F_c

Las cuales se trabajarán considerando un análisis dinámico aplicando la segunda Ley de Newton.

B. Obtención de datos físicos reales: Para acercarse al problema teórico hacia un análisis más realista se consideró el peso promedio del hombre peruano entre los 18 a 49 años de acuerdo con Encuesta Demográfica y de Salud Familiar 2023 - Nacional y Departamental (ENDES 2023) realizada por el INEI de 64.5 kg (INEI, 2024). Mientras, para el peso del scooter se consideraron las marcas más vendidas obteniéndose un rango de entre 12.5-15 kg (Scooterland Perú, 2025); por ello se utilizará el valor medio de 13.75 kg. Estos valores se utilizaron para estimar la masa total del sistema conductor-scooter de 78.25 kg. Para los cálculos de fricción se utilizaron valores promedio de literatura de ingeniería vial, representando distintas condiciones a evaluar en el simulador:

Tabla 1. Valores promedio de coeficientes de fricción estáticos

Condición	μ aproximado
Pavimento seco	0.8
Pavimento mojado	0.5
Baja adherencia	0.4
Superficie muy resbaladiza	0.1

C. Fórmulas que aplica el simulador: El comportamiento del scooter eléctrico al tomar una curva se modeló aplicando la Segunda Ley de Newton, que establece:

$$\sum F = ma$$

Para cada giro el movimiento es circular uniforme siendo por ello nula la aceleración tangencial; por ende, la aceleración relevante es la aceleración centrípeta.

En movimiento circular uniforme:

$$a_c = \frac{v^2}{r}$$

donde:

- v = velocidad constante del scooter

- r = radio de la curva

Aplicando la Segunda Ley de Newton en dirección radial:

$$F_c = ma_c$$

Sustituyendo la expresión de a_c :

$$F_c = m \frac{v^2}{r}$$

Esta fórmula permitirá hallar la fuerza lateral necesaria para que el scooter pueda seguir la trayectoria curva. Por otro lado, la fricción máxima entre el scooter y el pavimento se modeló como:

$$F_{f,\max} = \mu N$$

Donde:

- μ = coeficiente de fricción
- N = fuerza normal

En superficie horizontal considerando que el scooter se encuentra en MCU en el eje vertical de análisis la $\sum F_y = 0$

$$N - mg = 0$$

$$N = mg$$

Sustituyendo este valor en la fuerza de fricción se tendrá

$$F_{f,\max} = \mu mg$$

Para que el scooter no derrape la fuerza centrípeta debe ser menor a la fuerza de fricción:

$$F_c \leq F_{f,\max}$$

Sustituyendo la fuerza centrípeta y la fuerza de fricción en la ecuación anterior se obtendrá:

$$m \frac{v^2}{r} \leq \mu mg$$

Cancelado la masa en ambos lados se tendrá:

$$\frac{v^2}{r} \leq \mu g$$

Finalmente despejando el coeficiente mínimo requerido para evitar el derrape:

$$\mu_{\min} = \frac{v^2}{rg}$$

Por otro lado, durante el giro el scooter se inclina para que la resultante de fuerzas pase por el punto de contacto con el suelo. El equilibrio dinámico conduce a:

$$\tan \theta = \frac{F_c}{mg}$$

Sustituyendo F_c :

$$\tan \theta = \frac{m \frac{v^2}{r}}{mg}$$

Cancelando la m :

$$\tan \theta = \frac{v^2}{rg}$$

Por lo tanto, el ángulo de inclinación máximo al que el conductor podrá inclinar el scooter antes de derrapar será:

$$\theta = \arctan \left(\frac{v^2}{rg} \right)$$

D. Construcción del modelo computacional: Con las ecuaciones físicas ya definidas, se procedió a construir el modelo computacional utilizando *Python versión 3*, que permitió automatizar los cálculos y visualizar los resultados. Para ello las ecuaciones derivadas en los pasos anteriores se tradujeron a las funciones matemáticas dentro del programa respetando su forma física:

- Cálculo de aceleración centrípeta: $a_c = \frac{v^2}{r}$
- Cálculo de fuerza centrípeta: $F_c = m \frac{v^2}{r}$
- Cálculo de fricción mínima requerida: $\mu_{\min} = \frac{v^2}{rg}$

- Cálculo del ángulo de inclinación: $\theta = \arctan\left(\frac{v^2}{rg}\right)$

El programa permite ingresar las variables de velocidad constante (v), radio de giro (r) y coeficiente de fricción (μ).

Los cálculos permitirán realizar:

- Comparación entre μ_{real} y μ_{min} .
- Determinación de condición: seguro o riesgo de derrape.
- Cálculo del ángulo de inclinación necesario.

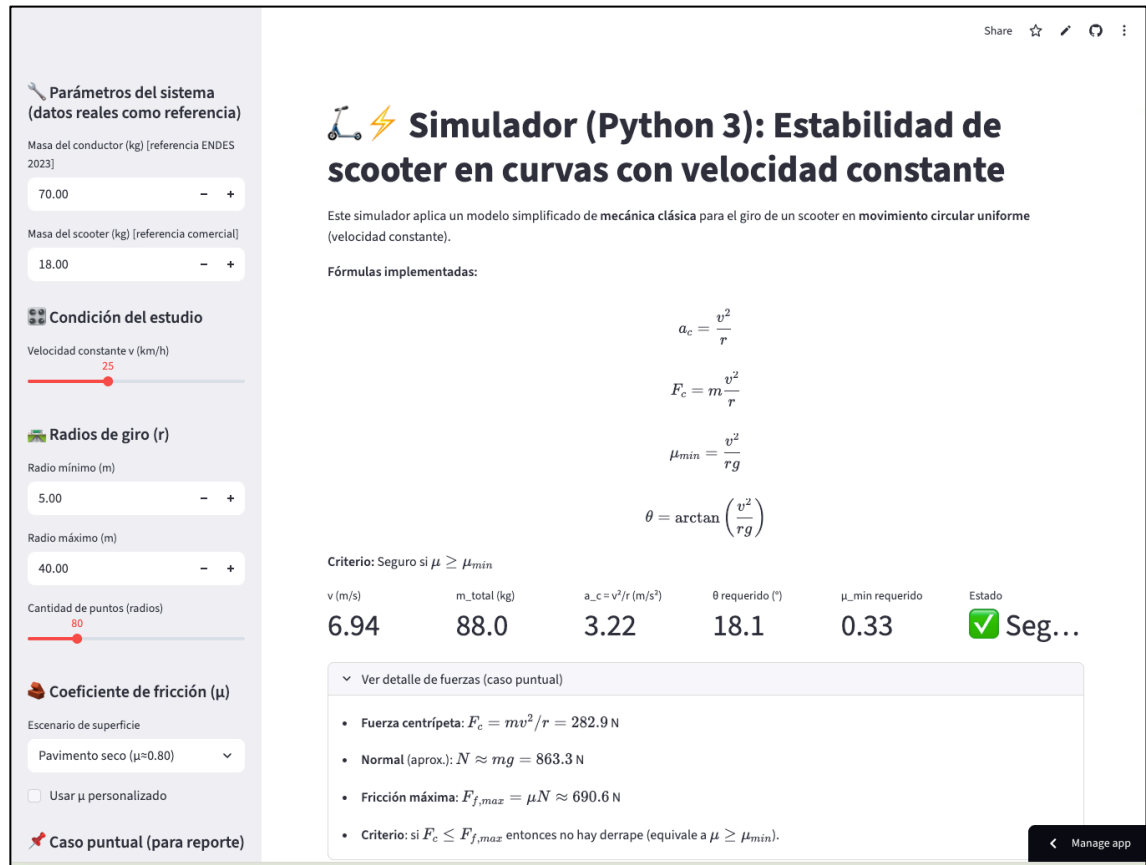
Además, de generar automáticamente:

- Gráficos de μ_{min} vs radio
- Mapas de zonas seguras y de riesgo
- Tablas comparativas de resultados

Lo cual permitirá interpretar el fenómeno físico de manera clara.

Finalmente se realizará la publicación del simulador en el dominio web <https://simulador-python.streamlit.app/>

Figura 1. Vista preliminar del simulador



E. Interpretación física: Finalmente los resultados se analizarán para permitir evaluar los ángulos de inclinación máximos, así como los coeficientes de fricción que soportan el movimiento del scooter antes del derrape.

4. Resultados

5. Conclusiones

6. Bibliografía

1. Daza Martínez, E. R., & Vargas Tuitise, Y. A. (2024). Dinámica de motocicletas eléctricas. *Energía Mecánica Innovación y Futuro*, 13(10). <https://doi.org/10.24133/EMIF.V13.1i.4232>
2. Frye, W., Chehab, L., Feler, J., Wong, L. L. R., Tan, A., Alpers, B. S., ... & Sammann, A. (2024). Popular but precarious: low helmet use among shared micromobility program riders in San Francisco. *Frontiers in Public Health*, 12. <https://doi.org/10.3389/fpubh.2024.1477473>
3. Hwang, Y. L. and Cheng, J. K. (2013). The Dynamic Analysis and Simulation of Electric Scooter. *Applied Mechanics and Materials*, 479-480, 365-368. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amm.479-480.365>
4. INEI. (2024). Perú Encuesta Demográfica y de Salud Familiar 2023 - Nacional y Departamental. https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1950/libro.pdf
5. Kahan, R., Higinbotham, S., Garoosi, K., & Lauder, A. (2024). Electric Scooter-related Injuries Are Becoming More Frequent and Costly in Denver, CO. *Clinical Orthopaedics and Related Research*, 483(2), 318-326. <https://doi.org/10.1097/corr.0000000000003212>
6. Prompakdee, E., Boonporm, P., & Rooppakhun, S. (2016). The Influence of Weight Distribution on the Handling Characteristics of Intercity Bus under Steady State Vehicle Cornering Condition. *MATEC Web Of Conferences*, 81, 04014. <https://doi.org/10.1051/mateconf/20168104014>
7. Scooterland Perú. (2025). Scooterland | Lo mejor en scooter eléctricos y más. <https://scooterland.pe/?srsId=AfmBOoovyBYxWH1HnUD2xT4WJJW7KtYOqRuclKLLNAAyvAo4gic05Uzt>
8. Serway, Raymond, A. y John W. Jewett, Jr. Física para ciencias e ingeniería volumen 1. Cengage Learning. <https://tubiblioteca.utp.edu.pe/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=29522>
9. Vanegas Metaute, D., Delgado Mejía, Á. L., Cruz Riaño, G. B., López Blanco, F. M., & Álvarez Arboleda, B. (2024). Análisis de dinámica longitudinal de una motocicleta convencional convertida a eléctrica, como estrategia para la transición energética. *Encuentro Internacional de Educación En Ingeniería*, 1-11. <https://doi.org/10.26507/paper.3821>

7. Anexos