



Evaluación dinámica de fuerzas en mecanismo de dirección para integración de sistemas Steer-by-Wire automotrices

Dynamic force evaluation in steering mechanisms for integration into automotive steer-by-wire systems

Giovanny Viniciol Pineda-Silva
ua.giovannypineda@uniandes.edu.ec

Universidad Regional Autónoma de los Andes, Ambato, Tungurahua, Ecuador
<https://orcid.org/0000-0002-2785-1249>

José Pablo Proaño-Remache
josepr93@uniandes.edu.ec

Universidad Regional Autónoma de los Andes, Ambato, Tungurahua, Ecuador
<https://orcid.org/0000-0002-8565-3320>

Antonio Gabriel Castillo-Medina
ua.antonio cm83@uniandes.edu.ec

Universidad Regional Autónoma de los Andes, Ambato, Tungurahua, Ecuador
<https://orcid.org/0000-0002-0045-7495>

Juan Diego Zurita-Vargas
ua.juanzv40@uniandes.edu.ec

Universidad Regional Autónoma de los Andes, Ambato, Tungurahua, Ecuador
<https://orcid.org/0000-0003-1044-2681>

RESUMEN

El estudio analiza las fuerzas máximas requeridas en el sistema de dirección del vehículo Great Wall H6 sin considerar la asistencia incorporada. Mediante mediciones directas de parámetros geométricos y aplicación de ecuaciones específicas, se determinó la fuerza necesaria en el volante y el par requerido en la cremallera. Los resultados muestran que se requiere una fuerza de 168,43 N en el volante, superando el límite normativo de 150 N, lo que justifica la necesidad de asistencia hidráulica. El par calculado en la cremallera de 31 Nm constituye el valor mínimo para implementar sistemas de dirección eléctrica o estacionamiento automático. La eficiencia del sistema de cremallera alcanza 96,5%, reduciendo significativamente el esfuerzo del conductor. Los hallazgos proporcionan datos fundamentales para el diseño de sistemas de dirección automatizados y verifican el cumplimiento de normativas internacionales de seguridad vehicular.

Descriptores: dirección vehicular; sistemas steer-by-wire; asistencia hidráulica. (Fuente: Tesauro UNESCO).

ABSTRACT

The study analyses the maximum forces required in the steering system of the Great Wall H6 vehicle without considering the built-in assistance. Through direct measurements of geometric parameters and the application of specific equations, the force required on the steering wheel and the torque required on the rack were determined. The results show that a force of 168.43 N is required on the steering wheel, exceeding the regulatory limit of 150 N, which justifies the need for hydraulic assistance. The torque calculated on the rack of 31 Nm is the minimum value for implementing electric steering or automatic parking systems. The efficiency of the rack system reaches 96.5%, significantly reducing driver effort. The findings provide fundamental data for the design of automated steering systems and verify compliance with international vehicle safety standards.

Descriptors: vehicle steering; steer-by-wire systems; hydraulic assistance. (Source: UNESCO Thesaurus).

Recibido: 05/07/2025. Revisado: 19/07/2025. Aprobado: 27/07/2025. Publicado: 08/08/2025.

Sección artículos de Tecnología



INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de la industria automotriz, los vehículos se manufacturan e ingenían con tecnologías avanzadas que permiten al operador ejecutar maniobras de viraje aplicando esfuerzos mínimos, gracias a la incorporación de diversos mecanismos de apoyo y soporte. Las modalidades más difundidas comprenden la asistencia hidráulica y la eléctrica. Ambos enfoques proporcionan una percepción de mayor fluidez y optimizan la capacidad de maniobra (Revista técnica de Centro Zaragoza, 2021).

En territorio ecuatoriano, conforme a los datos proporcionados por CINAIE (2024), durante el año 2024 circulan aproximadamente 2.610.469 vehículos livianos, de los cuales 116.742 unidades corresponden a modelos nuevos, los mismos que por disposiciones de las regulaciones vigentes, incorporan un sistema de dirección electrónica, la cual carece de una conexión física entre el volante y las ruedas, sino que únicamente se comunican mediante señales codificadas. Estos tipos de dirección emplean motores eléctricos para rotar los neumáticos (AEADE, 2024).

Los motores eléctricos son empleados para diversos sistemas ADAS (Advanced Driver Assistance Systems) que involucran la conducción autónoma y estacionamiento automático donde el vehículo gira sin la intervención del conductor. Resulta necesario determinar la fuerza que el motor deberá ser capaz de generar de acuerdo a las exigencias del sistema, así como de las distintas normativas nacionales e internacionales.

Los límites en los esfuerzos máximos ejercidos por los conductores en el volante están regulados por la Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas. En el reglamento número 79 se establece que para vehículos de pasajeros es obligatoria la instalación de alguna asistencia a la dirección si la fuerza al volante es mayor a 150N. Por otra parte, en caso de que la asistencia falle, dicha fuerza no deberá superar los 300N. Asimismo establece que las ruedas delanteras deberán girar en un tiempo máximo de 4 segundos a la posición correspondiente a un giro para una curva de 12m de radio. En caso de una falla en el sistema de asistencia, el tiempo deberá ser de 4 segundos correspondiente a una curva de 20m de radio (Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas, 2018).

En la época contemporánea, la innovación tecnológica y la continua implementación de la electrónica y electricidad, así como la automatización dentro del desarrollo automotriz han desencadenado en una de las tecnologías más llamativas, la denominada Steer By Wire, o en español Dirección por cable. Esta tecnología elimina la conexión mecánica entre el volante y las ruedas, resultando en una comunicación eléctrica, la cual con la ayuda de sensores de posición, giran el motor paso a paso situado en la cremallera. El principal desafío en esta tecnología consiste en que no existe una fuerza mecánica que se transmite al conductor, lo que puede desencadenar en una desorientación de los sentidos. Es por ello que constantemente se está desarrollando nuevas tecnologías capaces de producir una fuerza artificial al volante y garantizar una conducción más realista. Mientras en un sistema de dirección mecánica asistida eléctricamente se enfoca en mejorar la transmisión mecánica en la cremallera, la dirección por cable se enfoca en mejorar las unidades de retroalimentación hacia el conductor (Irmer et al., 2023).

A nivel nacional, se han desarrollado importantes estudios cuyo objetivo es demostrar la importancia del diseño de un sistema de dirección. Tal es el caso del estudio de Solis Obando et al. (2022), quienes desarrollaron una revisión bibliográfica para determinar los principales avances en estos sistemas, destacando la continua mejora en el confort y seguridad. Los sistemas de dirección por cable son aplicables únicamente a modelos con una carga en el eje frontal relativamente bajos, pues en caso de ser cargas mayores, el consumo energético del motor eléctrico descargaría rápidamente la batería. Una posible solución a este problema se está desarrollando, y es el sistema de dirección electrohidráulica híbrido. Este sistema consiste en una combinación de ambos tipos de dirección acoplados mediante dos módulos electrónicos los cuales se activan de acuerdo a la demanda del volante. En casos donde se requiere una mayor fuerza para hacer girar las ruedas es el módulo hidráulico el que se activa, mientras que



en fuerzas más leves a velocidades de crucero funciona el eléctrico. Sin embargo, esta tecnología posee varios inconvenientes, siendo el principal, la retroalimentación del torque y fuerza al volante, los cuales son inconsistentes al momento de accionarse ambos módulos a la vez (Luan et al., 2024).

Uno de los últimos avances en los sistemas de dirección es la implementación de sistemas de lógica difusa en vehículos Steer by Wire. La ventaja de esta tecnología radica en que reconoce toda la dinámica del vehículo y de esa forma consigue optimizar la relación y ángulo de giro así como la retroalimentación al volante (Zhou et al., 2024). La incorporación de todos estos sistemas involucra una gran cantidad de datos y señales que deben ser procesados; en algunos casos la BCM (body control module) es la encargada de ello, pero es posible que pronto se utilicen módulos propios y específicos para el control de estas funciones. Actualmente, se está desarrollando técnicas de monitoreo de fallas y funcionamiento correcto de los sistemas Steer by Wire a través de red CAN (controller area network). Los estudios y experimentaciones demuestran una aceptación de estos sistemas de inspección en varios vehículos utilizados, esto se debe en gran medida a la universalidad de dicho protocolo de comunicación (Lee et al., 2025).

El presente estudio tiene como propósito cuantificar la fuerza máxima que debe ejercer un conductor para rotar las ruedas del vehículo Great Wall H6 sin considerar el aporte de la asistencia empleada. Con dicho parámetro resulta factible determinar el par mínimo requerido en caso de pretender adoptar una asistencia a la dirección eléctrica, o implementar mecanismos de estacionamiento automatizados.

MÉTODO

Para el desarrollo de la presente investigación se utilizó el vehículo Great Wall H6 año 2019 como sujeto de estudio, sobre el cual se realizaron las distintas mediciones. Algunos datos se obtuvieron de las especificaciones técnicas del fabricante; sin embargo, los parámetros geométricos del sistema requirieron de una medición directa con herramientas calibradas, principalmente pie de rey y flexómetro para longitudes mayores.

Para calcular el torque en la columna de dirección primero se obtienen las medidas de los ángulos de giro tope a tope tanto de las ruedas como del volante.

Tabla 1. Ángulos de giro de cada rueda

Ángulo Rueda Izquierda Rueda Derecha

Interno	32°	32°
Externo	29°	29°
Total	61°	61°

El radio de giro está dado por la siguiente ecuación:

$$R_g = \theta / (2(\alpha + \beta))$$

Donde:

- θ : Ángulo de giro tope a tope del volante
- α : Ángulo de giro interno de la rueda
- β : Ángulo de giro externo de la rueda

Antes de proceder al análisis de fuerzas se debe tomar en cuenta las siguientes características del sistema de dirección:



Modelo Ackerman

Al momento de tomar una curva es necesario que la rueda interior tenga un mayor ángulo de giro que la exterior, y esto se consigue mediante la denominada geometría Ackerman. Dicha geometría permite al vehículo realizar un giro de forma constante. Es imposible desarrollar un Ackerman perfecto; sin embargo, la geometría que más se aproxima es la trapezoidal mostrada en la siguiente figura.

La geometría Ackerman cobra más importancia en giros pronunciados a elevada velocidad como taxis, los cuales en Londres alcanzan un ángulo de giro de ruedas de hasta 60° (Barton & Fieldhouse, 2024).

Los principales obstáculos en el diseño de un sistema de dirección con un Ackerman al 100% residen en la impredecibilidad de la trayectoria de las ruedas durante el giro debido a la gran cantidad de variables que participan. En la mayoría de los diseños se toma en cuenta únicamente el ángulo de deslizamiento de las ruedas debido a la fricción con el suelo, y últimamente se está analizando el comportamiento del vehículo utilizando un Ackerman negativo, es decir, que la rueda interna tenga un ángulo de giro menor que la externa (Su, 2023).

Un Ackerman correctamente diseñado deberá ser igual a la siguiente expresión (Jazar, 2025):

$$\cot(\delta_o) - \cot(\delta_i) = w/l$$

Relación de giro

En un vehículo, el ángulo de giro del volante es diferente al que giran las ruedas, a esta situación se la conoce como relación de dirección o Steer Ratio (Wu & Li, 2020). En general los vehículos livianos requieren un total de entre 3 y 3,5 vueltas del volante para girar las ruedas de tope a tope y presentan una relación de giro de entre 15-20° (Barton & Fieldhouse, 2024).

En la actualidad, se busca optimizar la relación de dirección aplicando sistemas que varían el valor de dicha relación; esto es más fácil de incorporar en sistemas de dirección eléctrica y Steer by Wire. En estos sistemas si el vehículo está a bajas velocidades, la relación adopta un valor más bajo mejorando la conducción y viraje en conducciones urbanas. Por otro lado, a velocidades altas se requiere una menor sensibilidad al volante por lo que al aplicar una relación más alta, la conexión es más directa, mejorando la estabilidad, maniobrabilidad y seguridad. El tiempo de respuesta deberá ser de máximo 0,5 segundos (Song et al., 2024).

En un sistema Steer by Wire, la relación de giro deberá ser bidireccional, de esa forma es más fácil transmitir las fuerzas y movimientos generados en las ruedas hacia el volante debido al terreno. El incremento gradual de la relación de giro respecto a la velocidad conserva un factor de ganancia inicial de 5, para después incrementarse de forma cuadrática respecto a la velocidad. A medida que la conexión se hace más directa, el conductor necesita aplicar menos torque al volante para generar una respuesta en las ruedas directrices (Klomp et al., 2024).

Ángulos de Ruedas directrices

En las ruedas direccionales existe una serie de inclinaciones, las cuales se encargan de que exista la reversibilidad o auto alineación. El ángulo de salida o Kingpin es el ángulo de inclinación del pivote; esto hace que las ruedas se levanten al momento de girar, y tiendan a caer por acción del peso del vehículo. Por otro lado, el ángulo de avance está formado por la inclinación del pivote desde una vista lateral, se encarga de absorber los impactos del terreno de una forma óptima (Cascajosa, 2015).

Distancia de desfase

Se encarga de reducir la resistencia a la rodadura; mientras mayor sea este parámetro, genera mayor estabilidad durante el frenado (Cascajosa, 2015).



Posteriormente se procede al cálculo de los pares de rozamiento y levantamiento de las ruedas para lo cual se realizó la medición de los siguientes valores:

Tabla 2. Medición de parámetros geométricos

Parámetro	Símbolo	Magnitud	Unidad
Diámetro de área de contacto de neumático	a	0.16	m
Distancia mangueta centro de rueda	d	0.05	m
Altura entre brazo superior e inferior	b	0.23	m
Distancia lateral entre uniones 1 y 2	d ₂	0.1	m

El coeficiente de rozamiento efectivo se obtiene mediante la gráfica correspondiente (Barton & Fieldhouse, 2024).

El ángulo Kingpin se obtiene aplicando la ecuación y la altura del brazo de momento efectivo con la ecuación:

$$\lambda = \tan^{-1}(d_2/b)$$

$$h = \sqrt{(d^2 + (a/3)^2)}$$

El momento de levantamiento se calcula con la ecuación que se muestra a continuación y es igual en ambas ruedas si no se toma en cuenta al conductor:

$$M_s = u_e \cdot (m \cdot 9,81) \cdot h$$

El momento de elevación del vehículo con cada rueda aplicando sus respectivas fórmulas:

$$MJ_{Der} = (m \cdot 9,81) \cdot d \cdot \sin(\lambda) \cdot \cos(\lambda) \cdot \sin(\delta_i)$$

$$MJ_{Izq} = (m \cdot 9,81) \cdot d \cdot \sin(\lambda) \cdot \cos(\lambda) \cdot \sin(\delta_a)$$

Finalmente se obtiene el momento total por rueda con la ecuación:

$$MT1 = MJ_{Der} + M_s$$

$$MT2 = MJ_{Izq} + M_s$$

RESULTADOS

A continuación, se presenta en la siguiente tabla, parámetros de entrada, para el cálculo de las fuerzas que actúan en el sistema de dirección, desde las ruedas hasta el volante. Estos valores incluyen datos específicos relacionados con las características mecánicas y geométricas del sistema en estudio.

Tabla 3. Parámetros iniciales del sistema de dirección



Parámetro	Símbolo	Magnitud	Unidad
Masa/rueda	m	492	kg
Distancia mangueta-rueda	d	0,05	m
Diámetro de contacto	a	0,16	m
Altura entre brazos	b	0,23	m
Ángulo Kingpin	λ	23,5	°
Brazo de momento efectivo	h	0,0731	m
Ángulo de giro externo	δ_a	29	°
Ángulo de giro interno	δ_i	32	°
Eficiencia	n	97	%
Número de vueltas de tope a tope	v	3	-
Sentido de giro	-	Derecha	-
Coefficiente de rozamiento efectivo	ue	0,3	-

Para el cálculo de la fuerza y par en la columna de dirección se procede a realizar el diagrama del sistema de dirección del vehículo con giro máximo en uno de los sentidos.

Una vez que se dispone de los valores mencionados con anterioridad, se puede calcular la fuerza en la cremallera de dirección con las siguientes ecuaciones:

$$F_1 = MT1/(a_1 \cdot \cos(\gamma_1))$$

$$F_2 = MT2/(a_2 \cdot \cos(\gamma_2))$$

$$FT = F_1 + F_2$$

Para calcular el diámetro del piñón se debe obtener en primera instancia la longitud que este recorre; la cual, al dividirla para el número de vueltas del volante, se obtiene su perímetro y finalmente el parámetro buscado, mediante las ecuaciones:

$$L = l_2(\sin(\delta_a) + \sin(\delta_i))$$

$$P = L/3$$

$$r = P/2\pi$$

El momento en la cremallera, momento y fuerza en el volante de dirección están dados por:

$$Msr = FT \cdot r$$

$$TSW = Msr/n$$

$$Fsw = Tsw/d$$

Una vez aplicadas todas las ecuaciones que involucran al sistema de dirección se obtuvieron los siguientes resultados, los cuales permiten conocer si el vehículo estudiado cumple con la normativa internacional, así como utilizar los datos de fuerza y momento en la cremallera para una posible conversión a un sistema automatizado.



Tabla 4. Resultados obtenidos

Parámetro	Símbolo	Magnitud	Unidad
Momento total 1	M_1	152,35	Nm
Momento total 2	M_2	148,37	Nm
Fuerza en la cremallera	FT	4812,81	N
Recorrido de cremallera	L	0,121767	m
Perímetro del piñón	P	0,04058	m
Radio de piñón	r	0,00645	m
Momento en la cremallera	Msr	31,0426245	Nm
Momento al volante	TSW	32,0027057	Nm
Fuerza al volante	Fsw	168,435293	N

DISCUSIÓN

De los resultados finales obtenidos, los más importantes son el momento en la cremallera y la fuerza al volante, pues son los valores que se utilizan para los distintos estudios planteados previamente.

En un sistema steer by wire, se utiliza un motor eléctrico para girar las ruedas y debe tener la fuerza suficiente para moverlas en una latencia máxima de 0,5 segundos tal como se estableció (Song et al., 2024). Las características técnicas que determinan el proceso de selección de un motor eléctrico se basan en el torque, debido a que este tipo de motores arrancan con el torque máximo.

En este caso para poder adaptar correctamente un motor eléctrico en la cremallera de dirección, es necesario instalar un motor eléctrico de al menos 31Nm. En caso de no disponer de motores con esa especificación, se puede incorporar un sistema reductor, para poder incrementar el torque final.

Asimismo como se mencionó previamente, este tipo de sistema de dirección necesita un módulo de transmisión de torque al volante para simular la fuerza y condiciones de las ruedas y el conductor sienta una conducción más real y conectada al entorno. En este vehículo dicho módulo deberá ser capaz de producir en el volante una sensación máxima de torque de 32Nm debido a las pérdidas a lo largo de la columna de dirección.

Los cálculos realizados de transmisión de fuerza se realizaron sin tomar en cuenta el sistema de asistencia, de esta forma se puede verificar si cumple con la normativa. Debido a que la fuerza máxima a aplicar al volante por el conductor es de 168,43 N, es obligatorio la incorporación de un sistema de asistencia que pueda reducir dicha fuerza a un valor menor a los 150N la cual puede ser hidráulica o eléctrica. En este caso la asistencia aporta únicamente con una fracción de la fuerza necesaria para girar las ruedas por lo que el motor eléctrico deberá ser de menor potencia que la del sistema steer by wire. El sistema de asistencia deberá reducir la fuerza final al volante al menos en un 10,95% para poder pasar la normativa internacional y poder ser distribuido en las calles.



A pesar de contar con un sistema de cremallera, la eficiencia de este método es excelente pues llega a reducir hasta un 96,5% la fuerza de las ruedas, de tal manera que la fuerza ejercida por el conductor representa únicamente el 3,5% de la fuerza final total.

Adicionalmente la normativa específica que en caso de fallar el sistema de asistencia la fuerza al volante no debía exceder los 300 N. En este caso se cumple a cabalidad con dicha disposición, debido a que la fuerza en el volante es 44% menos de la máxima permitida. La baja fuerza al volante se debe en gran medida a la carga sobre el eje frontal la cual es mucho más baja que otros vehículos del mismo segmento debido al motor 1.5 turbo, el cual es ligero y compacto reduciendo el peso delantero. La suspensión juega un papel importante en la distribución del peso, y en este vehículo, es capaz de reducir de manera eficiente la carga que soportan las ruedas. Es debido a estos motivos que un buen diseño de chasis es la base para una condición cómoda y segura.

CONCLUSIONES

En base al análisis realizado se concluye que los últimos estudios se han enfocado en el desarrollo y mejora de sistemas de dirección que permitan una conducción más autónoma como es el caso del sistema steer by wire, el cual elimina cualquier conexión mecánica entre el volante y las ruedas. Para la implementación de dicho sistema se debe conocer el par que el motor eléctrico debe entregar y cuanto es la fuerza y torque que debe transmitir al volante de forma artificial.

Los principales valores que intervienen en el sistema de dirección y determinan la fuerza que debe ejercer el conductor en el volante son la carga sobre el eje delantero, ángulo de salida o Kingpin, relación de giro, geometría Ackerman, entre otros, los cuales generan una fuerza y torque en cada rueda, la cual es transmitida al volante mediante los brazos de dirección, cremallera y columna.

Existe una fuerza máxima que debe ejercer el conductor para girar el vehículo en reposo que es el momento donde mayor fuerza se necesita y por lo tanto la condición crítica del diseño. Si la fuerza es mayor a los 150N, se debe colocar algún tipo de asistencia, y en caso de fallar la ayuda, la fuerza no deberá superar los 300N.

Una vez realizado el estudio de fuerzas del vehículo Great Wall H6 se obtuvieron las magnitudes del par en la cremallera que tiene un valor de 32Nm mientras que la fuerza al volante es de 168,43 N. Debido a que la fuerza al volante pura sin asistencia es mayor a los 150N, se requiere una asistencia. En este caso el vehículo posee una asistencia hidráulica.

FINANCIAMIENTO

No monetario

CONFLICTO DE INTERÉS

No existe conflicto de interés con personas o instituciones ligadas a la investigación.

AGRADECIMIENTOS

A UNIANDES.

REFERENCIAS

- Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador. (2024). *Anuario 2023*. AEADE.
- Barton, D. C., & Fieldhouse, J. D. (2024). *Automotive chassis engineering*. Springer.
- Cascajosa, M. (2015). *Ingeniería de vehículos, sistemas y cálculos*. Tébar Flores.
- Cámara de la Industria Automotriz Ecuatoriana. (2024). *Boletín parque automotor circulante*. CINAIE.



- Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas. (2018). *Prescripciones uniformes relativas a la homologación de vehículos por lo que respecta al mecanismo de dirección [2018/1947]*. Comisión Económica para Europa de las Naciones Unidas.
- Irmer, M., Degen, R., Nüßgen, A., Thomas, K., Henrichfreise, H., & Ruschitzka, M. (2023). Development and analysis of a detail model for steer-by-wire systems. *IEEE Access*, 11, 7229–7236.
- Jazar, R. N. (2025). *Vehicle dynamics: Theory and application* (4th ed.). Springer.
- Klomp, M., Bruzelius, F., Bergström, O., Jansson, J., Brink, F., & Wennberg, L. (2024). Steer-by-wire – The challenge of angles and torque. In W. Huang & M. Ahmadian (Eds.), *Advances in dynamics of vehicles on roads and tracks III. IAVSD 2023. Lecture notes in mechanical engineering* (pp. 771–781). Springer.
- Lee, J.-H., Park, J.-W., Woo, J., Kim, S., Kwon, B., Jo, S.-H., & Jeong, J.-H. (2025). Integrated inspection system based on CAN communication for inspecting steering wheels with HOD module. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 20(2), 947–957.
- Luan, Z., Zhao, W., & Wang, C. (2024). Mode switching and consistency control for electric-hydraulic hybrid steering system. *Automotive Innovation*, 7(2), 166–181.
- Revista técnica de Centro Zaragoza*. (2021, 9 de febrero). Sistemas de dirección del automóvil. <https://revistacentrozaragoza.com/sistemas-direccion-automovil/>
- Solis Obando, K. D., Yaselga, E., & Guevara, M. (2022). El sistema de dirección y el papel que desarrolla en los vehículos. *Polo del Conocimiento*, 7(3), 911–929.
- Song, X., Fritzell Westlund, M., Drugge, L., & Zhao, L. (2024). A study on the influence of steer-by-wire failure modes on driving safety. In W. Huang & M. Ahmadian (Eds.), *Advances in dynamics of vehicles on roads and tracks III. IAVSD 2023. Lecture notes in mechanical engineering* (pp. 671–683). Springer.
- Su, L. (2023). Analysis of the car model and Ackermann's steering geometry. *Highlights in Science, Engineering and Technology*, 73, 1–13.
- Wu, X., & Li, W. (2020). Variable steering ratio control of steer-by-wire vehicle to improve handling performance. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 234(3), 774–782.
- Zhou, S., Li, Y., & Tong, S. (2024). Event-triggered adaptive fuzzy finite-time control for steer-by-wire vehicle systems. *International Journal of Fuzzy Systems*, 26(4), 1191–1202.