

**ESTRATEGIAS DE CONTROL AVANZADAS PARA LA NAVEGACIÓN
AUTÓNOMA DE MOTOCICLETAS: OPTIMATIZACIÓN DEL SEGUIMIENTO DE
TRAYECTORIA Y ESTABILIDAD DINÁMICA**

CAMILO ANDRES PASCUAS PERDOMO

DIRECTOR: ING. JORGE LUIS AROCA TRUJILLO

CORPORACION UNIVERSITARIA DEL HUILA – CORHUILA

INGENIERIA MECATRONICA

NEIVA

2024

CORPORACION UNIVERSITARIA DEL HUILA – CORHUILA



FACULTAD DE INGENERIA

INGENIERÍA MECATRÓNICA

**ESTRATEGIAS DE CONTROL AVANZADAS PARA LA NAVEGACIÓN
AUTÓNOMA DE MOTOCICLETAS: OPTIMIZACIÓN DEL SEGUIMIENTO DE
TRAYECTORIA Y ESTABILIDAD DINÁMICA**

CAMILO ANDRES PASCUAS PERDOMO

CORPORACION UNIVERSITARIA DEL HUILA – CORHUILA

INGENIERIA MECATRONICA

NEIVA

Resumen

Una motocicleta autónoma es un vehículo de dos ruedas que puede moverse sin intervención humana. Utiliza una combinación de sensores, cámaras y algoritmos para detectar su entorno y tomar decisiones sobre cómo moverse. Este documento muestra la comparación entre el control de una motocicleta autónoma utilizando lógica difusa y un controlador LQR construido en Matlab e implementado en un sistema embebido con un microcontrolador. El seguimiento de trayectorias y la estabilización del balance de un prototipo construido para este propósito se realizan. Se determina cómo el control LQR tiene un buen comportamiento frente al control de lógica difusa en respuesta al impulso representado en los cambios de ángulo en la estabilización.

El desarrollo de motocicletas autónomas representa un avance significativo en la movilidad inteligente, integrando tecnologías de vanguardia que permiten una operación segura y eficiente. Este estudio no solo evalúa el rendimiento de los controladores LQR y de lógica difusa, sino que también investiga la adaptabilidad de estos sistemas en condiciones dinámicas y diversas. Se realiza un análisis exhaustivo de la respuesta ante perturbaciones, considerando factores como la variabilidad del terreno y las condiciones climáticas, lo que

proporciona una comprensión más profunda de la robustez de cada enfoque de control. Los resultados obtenidos no solo resaltan la superioridad del control LQR en términos de estabilidad angular, sino que también abren nuevas vías para la implementación de algoritmos híbridos que podrían combinar las ventajas de ambos métodos, mejorando así la eficiencia y seguridad de las motocicletas autónomas en entornos urbanos complejos.

Palabras clave: Motocicletas Autónomas, Seguimiento de Trayectorias, Estabilización de Balance, Lógica Difusa, Controlador LQR.

Abstract

An autonomous motorcycle is a two-wheeled vehicle that can move without human intervention. It utilizes a combination of sensors, cameras, and algorithms to detect its environment and make decisions on how to move. This document presents a comparison between the control of an autonomous motorcycle using fuzzy logic and an LQR controller built in MATLAB and implemented in an embedded system with a microcontroller. The trajectory tracking and balance stabilization of a prototype built for this purpose are performed. It is determined how the LQR control exhibits better performance compared to fuzzy logic control in response to impulse represented by changes in angle during stabilization.

The development of autonomous motorcycles represents a significant advancement in intelligent mobility, integrating cutting-edge technologies that enable safe and efficient operation. This study not only evaluates the performance of LQR and fuzzy logic controllers but also investigates the adaptability of these systems under dynamic and diverse conditions. An exhaustive analysis of the response to disturbances is conducted, considering factors such as terrain variability and climatic conditions, providing a deeper understanding of the robustness of each control approach. The results obtained not only highlight the superiority of LQR control in terms of angular stability but also open new avenues for the implementation of hybrid algorithms that could combine the advantages of both methods, thereby improving the efficiency and safety of autonomous motorcycles in complex urban environments.

Keywords: Autonomous Motorcycles, Trajectory Tracking, Balance Stabilization, Fuzzy Logic, LQR Controller.

TABLA DE CONTENIDOS

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
1 INTRODUCCIÓN.....	7
2 ANTECEDENTES	9
3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	13
4 JUSTIFICACIÓN.....	15
5 PREGUNTAS DE INVESTIGACIÓN	17
6 OBJETIVOS	18
6.1 OBJETIVO GENERAL.....	18
6.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	18
7 MARCO DE REFERENCIA.....	19
7.1 ANTECEDENTES DEL PROYECTO.....	19
7.2 MARCO TEÓRICO.....	20
7.3 MARCO CONCEPTUAL.....	21
7.4 MARCO JURÍDICO	24
8 METODOLOGÍA.....	26
9 MODELO MATEMÁTICO	29
9.1 MODELO DE ESPACIO DE ESTADOS	32
9.2 CONTROL LINEAL CUADRÁTICO (LQR).....	34
9.3 CONTROL DE LÓGICA DIFUSA (FLC).....	36
10 RESULTADOS	39
11 DISCUSIÓN.....	45
12 CONCLUSIÓN	49
13 REFERENCIAS	51

TABLA DE FIGURAS

FIGURA 1. PERFIL Y DIMENSIONES DE LA BICICLETA: UNA PERSPECTIVA LATERAL.	30
FIGURA 2. PERSPECTIVA SUPERIOR DE LA BICICLETA Y SU ÁNGULO DE DIRECCIÓN	
EFFECTIVO.....	30
FIGURA 3. PERSPECTIVA FRONTAL DE LA BICICLETA Y ÁNGULO DE INCLINACIÓN.....	31
FIGURA 4. DIAGRAMA DE BLOQUES DEL CONTROL LQR.....	34
FIGURE 5, DIAGRAMA DE BLOQUES DE UN CONTROLADOR DE LÓGICA DIFUSA.....	36
FIGURA 6. LA FUNCIÓN DE MEMBRESÍA ES EL ERROR EN EL ÁNGULO DE INCLINACIÓN E_{Φ}	37
FIGURE 7.LA FUNCIÓN DE MEMBRESÍA ES LA DIFERENCIA EN EL ERROR DEL ÁNGULO DE	
INCLINACIÓN $[\Delta E]_{\Phi}$.....	37
FIGURE 8. LA FUNCIÓN DE MEMBRESÍA DE SALIDA ES LA FUNCIÓN EN LA PARTE INFERIOR DE	
LA FIGURA, QUE CORRELACIONA CON EL ÁNGULO DE DIRECCIÓN DESEADO Δ	38
FIGURE 9. SUPERFICIE GENERADA A PARTIR DE LAS REGLAS DADAS AL FLC.X	38
FIGURE 10. DISEÑO DESARROLLADO EN SOLIDWORKS DEL PROTOTIPO DE UNA	
MOTOCICLETA AUTÓNOMA.	39
FIGURE 11. DISEÑO FINAL DEL PROTOTIPO DE MOTOCICLETA AUTÓNOMA.....	40
FIGURE 12. SIMULACIÓN DEL COMPORTAMIENTO DEL ÁNGULO DE BALANCEO CON	
CONTROLES LQR Y FLC.....	40
FIGURE 13. RESULTADO COMPARATIVO DE LOS DOS CONTROLADORES. LA LÍNEA AZUL	
PERTENECE AL FLC Y LA LÍNEA ROJA AL LQR.	42
FIGURE 14. LOS VALORES SINGULARES SE OBSERVAN COMPARANDO SUS RESULTADOS EN	
LOS DOS CONTROLADORES FLC Y LQR.....	43

1 Introducción

Los vehículos de una sola pista, tales como las motocicletas y las bicicletas, se distinguen por su notable agilidad y versatilidad, características que los convierten en opciones óptimas para la navegación en terrenos off-road, incluidos desiertos, montañas y bosques. Este tipo de vehículos exhibe un rendimiento superior al de los vehículos de dos pistas en estos entornos desafiantes, gracias a su capacidad para maniobrar con mayor facilidad y adaptarse a las variaciones del terreno. La ligereza inherente de las motocicletas no solo contribuye a una eficiencia energética sobresaliente, sino que también permite una aceleración rápida, cualidades que son esenciales para el rendimiento en condiciones adversas. En este contexto, se ha desarrollado un modelo matemático avanzado, acompañado de algoritmos de control específicos para motocicletas autónomas, como se detalla en la literatura reciente [2].

La formulación de este modelo matemático representa un avance significativo en la comprensión y el control de las dinámicas de las motocicletas, superando las limitaciones de los enfoques tradicionales [3]. A diferencia de los complejos modelos de dinámica multicuerpo, que pueden resultar poco prácticos para el diseño de sistemas de control, el modelo propuesto logra simplificaciones que conservan las propiedades no holonómicas del sistema [4]. Esto permite una representación más accesible y efectiva de las características dinámicas de las motocicletas, facilitando su aplicación en el desarrollo de sistemas de control autónomos [5]. La integración de estos algoritmos de control no solo mejora la precisión en el seguimiento de trayectorias, sino que también optimiza la estabilidad y el equilibrio de la motocicleta en diversas condiciones operativas, lo que se evidencia en simulaciones numéricas y en la implementación práctica de tecnologías avanzadas en prototipos reales [6].

El modelo empleado en este artículo presenta simplificaciones en comparación con el modelo de dinámica multicuerpo, pero conserva las propiedades de restricción no holonómica del sistema. Por lo tanto, el modelo proporciona una precisión suficiente del sistema y es tratable para fines de diseño de sistemas de control. Hemos ampliado este modelo para tener en cuenta la trayectoria de la motocicleta y el ángulo de dirección, que son parámetros geométricos importantes en la dinámica de las motocicletas y no se consideran en [1].

Los algoritmos de control aseguran un seguimiento asintótico de la trayectoria deseada proporcionada por el módulo de planificación de movimiento. La integración de la planificación de movimiento, el seguimiento de trayectoria y el control de equilibrio de la motocicleta autónoma se demuestra mediante simulaciones numéricas e implementación embebida de controles LQR y lógica difusa en un prototipo. Además, se realizan pruebas experimentales de los algoritmos propuestos en un prototipo real de motocicleta.

2 Antecedentes

El desarrollo de vehículos autónomos ha transformado radicalmente la movilidad moderna, impulsando una investigación intensiva en sistemas de control avanzados. En particular, las motocicletas, como vehículos de una sola vía, presentan características únicas que complican su automatización. A medida que la tecnología avanza, se vuelve imperativo abordar los desafíos inherentes a la implementación de sistemas de control que no solo sean eficientes, sino también seguros. A pesar de los avances significativos en la robótica y la inteligencia artificial, la complejidad dinámica de las motocicletas, que incluye factores como el equilibrio y la estabilidad en condiciones variables, sigue siendo un área de investigación activa y desafiante.

Uno de los principales retos en el control de motocicletas autónomas es la naturaleza no holonómica de estos vehículos, que limita sus movimientos a ciertas trayectorias y requiere un enfoque de control sofisticado. La subactuación, que se refiere a la insuficiencia de actuadores para controlar completamente el sistema, añade una capa adicional de complejidad. Estos desafíos hacen que los métodos de control convencionales sean inadecuados, lo que lleva a la necesidad de explorar enfoques alternativos que puedan gestionar la dinámica compleja de las motocicletas. La investigación en esta área no solo se centra en la estabilidad y el equilibrio, sino también en la capacidad de las motocicletas para adaptarse a entornos cambiantes y a diversas condiciones de conducción.

En este contexto, el objetivo principal de la investigación es comparar dos enfoques de control: la lógica difusa y el regulador cuadrático lineal (LQR). La lógica difusa, basada en principios de razonamiento humano, permite manejar la incertidumbre y la imprecisión inherentes a la dinámica de las motocicletas. Por otro lado, el LQR es un método de control

óptimo que busca minimizar una función de costo, lo que puede resultar en un seguimiento de trayectoria más preciso y una estabilización efectiva del equilibrio. La comparación de estos métodos ofrece una visión integral de sus respectivas eficacias y limitaciones, proporcionando información valiosa para el desarrollo futuro de sistemas de control para motocicletas autónomas.

La evaluación de cómo estos enfoques abordan los retos específicos asociados a la dinámica de las motocicletas es crucial. La investigación se centra en aspectos como la respuesta a perturbaciones externas, la adaptación a diferentes superficies de rodadura y la capacidad de realizar maniobras complejas. Además, se considera la interacción entre el piloto y la motocicleta, un factor que puede influir significativamente en el rendimiento del sistema de control. A través de simulaciones y experimentos, se busca entender cómo cada enfoque maneja estas dinámicas y qué ajustes pueden ser necesarios para optimizar el rendimiento general del vehículo.

El modelado y control de motocicletas se basa en una variedad de enfoques teóricos y prácticos. La utilización de modelos matemáticos, como los discutidos por Sharp, permite una representación precisa de la dinámica del vehículo. Estos modelos, que emplean la ecuación de Lagrange y técnicas de simulación como Simulink y Matlab, son fundamentales para analizar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones. Este tipo de modelado no solo facilita el diseño de controladores, sino que también proporciona una plataforma para la validación de teorías y enfoques propuestos en la literatura científica.

En conclusión, el avance en el control de motocicletas autónomas es un campo prometedor que combina teoría y práctica en un esfuerzo por superar los retos existentes. La comparación de la lógica difusa y el LQR representa un paso significativo hacia la

comprensión de cómo los diferentes métodos pueden aplicarse eficazmente en contextos reales. A medida que la investigación avanza, es esencial continuar explorando nuevas metodologías y tecnologías que puedan integrarse en estos sistemas, asegurando así que las motocicletas autónomas no solo sean funcionales, sino también seguras y eficientes en su operación. La colaboración interdisciplinaria y la innovación en el modelado y control serán clave para el éxito en este ámbito.

Hara et. al. presentaron en [3] el desarrollo de la tecnología de conducción autónoma para motocicletas, destacando la falta de estudios exhaustivos en este campo. Se aborda la estabilidad de las motocicletas a baja velocidad, sin realizar cambios estructurales significativos. Se introduce un modelo basado en SPACAR para obtener un modelo de motocicleta antideslizante linealizado, y se aplica un control de ganancia programado dependiente de la velocidad. El método de programación de ganancia se mejora en comparación con estudios anteriores, y se obtienen respuestas experimentales que muestran una conducción estable a 1,5 km/h.

En [4] y [5] se describe el diseño de un control de velocidad para un motor de corriente continua utilizando lógica difusa con el software LabVIEW. Se realiza una revisión bibliográfica del entorno de diseño e implementación, presentando el uso de la lógica difusa para describir los materiales y métodos utilizados. Se destacan varios procesos relacionados con la idea, creación, desarrollo e implementación del control inteligente, así como los resultados considerando la aplicación y desarrollo para este fin.

Zheng et. Al., en [6] describen la aplicación del giroscopio de momento de control (CMG) en motocicletas o bicicletas no tripuladas para mejorar su estabilidad y movilidad. Destaca la importancia de considerar el mecanismo de dirección junto con el CMG para lograr

un control combinado que optimice el equilibrio del vehículo. El estudio propone un modelo dinámico de la motocicleta y un método de control combinado que integra la dirección y el CMG dual. Se desarrolla un modelo simplificado para el diseño del controlador, demostrando su eficacia mediante ejemplos numéricos. Los resultados de la simulación muestran que el controlador combinado propuesto supera al controlador de dirección y al controlador basado en el péndulo invertido.

Kung et al en [7] presentan una investigación que aborda la gestión inteligente de intersecciones en el contexto de los vehículos conectados y autónomos, destacando la falta de consideración de las motocicletas en este ámbito. Se identifican las diferencias clave respecto a la gestión existente y se propone un enfoque que utiliza la agrupación y los giros a la izquierda en dos fases con zonas de espera para motocicletas. Este enfoque tiene como objetivo mejorar la eficiencia del tráfico en las intersecciones donde los vehículos están conectados y son autónomos, mientras que las motocicletas no lo son. El estudio presenta el primer modelo y análisis de gestión inteligente de intersecciones con motocicletas, demostrando ventajas e inconvenientes para su diseño.

3 Planteamiento del problema

Las motocicletas y otros vehículos de una sola vía presentan desafíos únicos para el control autónomo en comparación con los vehículos de cuatro ruedas más comunes. Estos desafíos incluyen la subactuación, las restricciones no holonómicas y la inherente inestabilidad de estos sistemas de una sola vía. Uno de los principales problemas a abordar es el seguimiento preciso de una trayectoria deseada. Dado que las motocicletas son sistemas altamente no lineales y acoplados, mantener un seguimiento estable de la trayectoria es una tarea compleja que requiere algoritmos de control avanzados.

Además del seguimiento de trayectoria, la estabilización del equilibrio es fundamental para el funcionamiento seguro y confiable de una motocicleta autónoma. Debido a la naturaleza inestable de estos sistemas, se deben desarrollar estrategias de control efectivas para mantener el equilibrio en todo momento, incluso en presencia de perturbaciones externas. Un desafío adicional es la integración de la planificación de movimiento, el seguimiento de trayectoria y el control de equilibrio en un sistema de control unificado. Estos subsistemas deben funcionar de manera coordinada para lograr un rendimiento óptimo y una navegación segura en entornos del mundo real.

Otro aspecto importante para considerar es la robustez del sistema de control ante incertidumbres en los parámetros del modelo y perturbaciones externas. Dado que las condiciones reales del entorno pueden variar, el sistema de control debe ser capaz de adaptarse y mantener un desempeño estable en diversas situaciones. La elección adecuada de la estrategia de control también es crucial. Enfoques como la lógica difusa y el control óptimo (LQR) presentan características diferentes y pueden tener un impacto significativo en el

rendimiento general del sistema autónomo. Es necesario evaluar y comparar estos enfoques para determinar cuál es más apropiado para el control de motocicletas autónomas.

Además, la implementación práctica de estos algoritmos de control en un sistema embebido con un microcontrolador plantea desafíos adicionales. El sistema debe ser capaz de ejecutar los algoritmos de control en tiempo real con un uso eficiente de los recursos computacionales disponibles. La validación experimental de los algoritmos de control en un prototipo de motocicleta real es fundamental para evaluar su desempeño en condiciones reales. Esto permite identificar y abordar cualquier problema o limitación que surja durante la implementación práctica.

En resumen, el control autónomo de motocicletas implica una serie de desafíos únicos, que incluyen el seguimiento de trayectoria, la estabilización del equilibrio, la integración de subsistemas, la robustez ante incertidumbres y perturbaciones, y la implementación práctica en un sistema embebido. Abordar estos desafíos es crucial para lograr un control seguro y confiable de las motocicletas autónomas.

Finalmente, la comparación de diferentes estrategias de control, como la lógica difusa y el LQR, y la validación experimental en un prototipo real, son pasos importantes para avanzar en el desarrollo de sistemas de control avanzados para motocicletas autónomas.

4 Justificación

El desarrollo de motocicletas autónomas tiene el potencial de generar un gran impacto en diversos ámbitos, desde la movilidad personal hasta aplicaciones en entornos hostiles o de difícil acceso. Estas plataformas podrían desempeñar un papel crucial en áreas como exploración, búsqueda y rescate, y asistencia en misiones militares o de seguridad.

A diferencia de los vehículos de cuatro ruedas, las motocicletas ofrecen una mayor maniobrabilidad y capacidad de navegación en terrenos irregulares o accidentados. Esto las convierte en una alternativa atractiva para operar en entornos donde los vehículos convencionales podrían tener dificultades. La autonomía de estas motocicletas ampliaría aún más su versatilidad y alcance de aplicación. Además, el desarrollo de sistemas de control autónomos para motocicletas contribuye al avance tecnológico en el campo de la robótica y la inteligencia artificial aplicada a vehículos. Los desafíos únicos que presentan estos sistemas de una sola vía, como la subactuación y las restricciones no holonómicas, impulsarán el desarrollo de algoritmos de control más sofisticados y robustos.

La investigación en este campo no solo beneficiará a las motocicletas autónomas, sino que también podría tener aplicaciones más amplias en otros vehículos de una sola vía, como bicicletas y Scooter eléctricos. Esto ampliaría aún más el impacto potencial de este trabajo de investigación. Desde una perspectiva económica, la automatización de motocicletas podría dar lugar a nuevas oportunidades de mercado y modelos de negocio, como servicios de transporte autónomo o soluciones de logística en entornos difíciles. Esto podría generar beneficios económicos significativos a largo plazo.

Además, el control autónomo de motocicletas también tiene implicaciones en cuanto a la seguridad vial. Al eliminar el factor humano y mejorar la precisión y reacción de los

sistemas de control, se podría reducir considerablemente el riesgo de accidentes relacionados con motocicletas. Esto tendría un impacto positivo en la salud y el bienestar de la sociedad. Desde un punto de vista tecnológico, el desarrollo de motocicletas autónomas impulsará avances en áreas como percepción del entorno, planificación de movimiento, control de sistemas no lineales y sistemas embebidos. Estos avances tecnológicos tendrán ramificaciones más allá del ámbito de las motocicletas y pueden beneficiar una amplia gama de aplicaciones robóticas y de vehículos autónomos.

Asimismo, la comparación entre diferentes estrategias de control, como la lógica difusa y el LQR, aportará conocimientos valiosos sobre las fortalezas y debilidades de cada enfoque. Esto contribuirá a una mejor comprensión de los trade-offs y la idoneidad de cada método para el control de motocicletas autónomas. La validación experimental de los algoritmos de control en un prototipo real es fundamental para evaluar su desempeño en condiciones reales. Esto permitirá identificar y abordar los desafíos prácticos de la implementación, lo que a su vez facilitará el desarrollo de sistemas de control autónomo más robustos y confiables.

En resumen, la investigación en el control autónomo de motocicletas tiene el potencial de generar avances significativos en áreas como la movilidad, la robótica, la seguridad vial y el desarrollo tecnológico. La comparación de estrategias de control y la validación experimental en prototipos reales son pasos cruciales para lograr un control seguro y confiable de estas plataformas, lo que a su vez abrirá nuevas oportunidades y aplicaciones para las motocicletas autónomas.

5 Preguntas de Investigación

¿Cuál estrategia de control, entre la lógica difusa y el control óptimo lineal cuadrático (LQR), es más efectiva para lograr un seguimiento de trayectoria preciso y una estabilización del equilibrio robusta en el control de una motocicleta autónoma?

Hipótesis:

Se espera que el control LQR tenga un mejor desempeño en el seguimiento de trayectoria y la estabilización del equilibrio de la motocicleta autónoma en comparación con la lógica difusa. El control LQR, al ser un método de control óptimo, debería proporcionar una respuesta más rápida y precisa ante cambios en la trayectoria y perturbaciones, lo que resultaría en un mejor comportamiento general del sistema.

Además, se anticipa que la implementación del control LQR en un sistema embebido con microcontrolador pueda lograrse de manera más eficiente en términos de uso de recursos computacionales, lo que facilitaría su implementación práctica.

Sin embargo, la lógica difusa podría tener ventajas en cuanto a la capacidad de adaptarse a incertidumbres en los parámetros del modelo y a condiciones cambiantes del entorno. Por lo tanto, es necesario evaluar y comparar el desempeño de ambas estrategias de control mediante simulaciones numéricas y pruebas experimentales en un prototipo de motocicleta real para determinar cuál enfoque es más adecuado para el control de motocicletas autónomas.

6 Objetivos

6.1 Objetivo General

Desarrollar un sistema de control autónomo para una motocicleta que permita el seguimiento preciso de trayectorias y la estabilización del equilibrio del vehículo, mediante la comparación y evaluación de estrategias de control basadas en lógica difusa y control óptimo lineal cuadrático (LQR).

6.2 Objetivos Específicos

1. Formular un modelo matemático preciso que capture la dinámica y las restricciones no holonómicas de la motocicleta, incluyendo la trayectoria y el ángulo de la horquilla como parámetros relevantes.
2. Diseñar y evaluar algoritmos de control basados en lógica difusa y control óptimo lineal cuadrático (LQR) para el seguimiento de trayectoria y la estabilización del equilibrio de la motocicleta autónoma.
3. Implementar los algoritmos de control en un sistema embebido con microcontrolador y realizar pruebas experimentales en un prototipo de motocicleta para validar el desempeño del sistema de control en condiciones reales.
4. Comparar el desempeño de los enfoques de lógica difusa y LQR en términos de precisión en el seguimiento de trayectoria, estabilidad del equilibrio, robustez ante perturbaciones y eficiencia computacional, con el fin de determinar la estrategia de control más adecuada para el control de motocicletas autónomas.

7 Marco de referencia

7.1 Antecedentes del proyecto

El control autónomo de motocicletas ha sido un tema de investigación activo durante las últimas décadas, con diversos estudios que han abordado los desafíos únicos de estos sistemas de una sola vía en comparación con los vehículos de cuatro ruedas más tradicionales.

Un estudio realizado por Thanh y Kang [1] analizó la estabilización del equilibrio de motocicletas autónomas utilizando un controlador basado en lógica difusa. Los resultados mostraron que este enfoque puede mantener la estabilidad del vehículo incluso en presencia de perturbaciones externas. Por otro lado, Corno et al. [2] propusieron un sistema de control basado en control óptimo lineal cuadrático (LQR) para el seguimiento de trayectoria en motocicletas autónomas. Su investigación demostró que el control LQR puede proporcionar un seguimiento preciso y una respuesta rápida ante cambios en la trayectoria.

Además, Sánchez-Cubillo y García-Cerezo [3] abordaron la implementación práctica de algoritmos de control en sistemas embebidos para motocicletas autónomas. Destacaron la importancia de lograr un uso eficiente de los recursos computacionales disponibles en los microcontroladores.

Estudios anteriores han explorado enfoques híbridos que combinan diferentes estrategias de control. Por ejemplo, Choi et al. [4] desarrollaron un sistema que integra control predictivo basado en modelo y control borroso para mejorar el desempeño del seguimiento de trayectoria y la estabilización del equilibrio. Sin embargo, la comparación exhaustiva entre estrategias de control, como la lógica difusa y el control LQR, aún no ha sido ampliamente investigada en el contexto de motocicletas autónomas. Analizar y evaluar el desempeño de estos enfoques, tanto en simulaciones como en pruebas experimentales, podría proporcionar

valiosos conocimientos para determinar la estrategia de control más adecuada. Por lo tanto, el presente proyecto busca llenar este vacío en la literatura, al realizar una investigación exhaustiva y comparativa de los algoritmos de control basados en lógica difusa y control LQR para el control autónomo de motocicletas.

7.2 Marco Teórico

La autonomía de vehículos de dos ruedas, como motocicletas, presenta desafíos únicos en comparación con los vehículos convencionales de cuatro ruedas. Estos sistemas de una sola vía se caracterizan por tener restricciones no holonómicas, lo que significa que su movimiento está limitado por restricciones cinemáticas [1]. Además, la subactuación es una característica común de las motocicletas, donde el número de entradas de control es menor que el número de grados de libertad del sistema [2].

Para abordar estos desafíos, se han explorado diversas estrategias de control, entre las cuales destacan la lógica difusa y el control óptimo lineal cuadrático (LQR). La lógica difusa ha demostrado ser una herramienta efectiva para el control de sistemas no lineales, como las motocicletas autónomas, al permitir la modelación de la incertidumbre y la toma de decisiones basada en reglas lingüísticas [3]. Por otro lado, el control LQR es un método de control óptimo que busca minimizar una función de costo cuadrática, lo que puede resultar en un desempeño superior en términos de seguimiento de trayectoria y estabilidad del sistema [4].

En el contexto del control de motocicletas autónomas, la lógica difusa ha sido aplicada con éxito para la estabilización del equilibrio del vehículo. Estudios previos han demostrado que los controladores basados en lógica difusa pueden mantener la estabilidad de la motocicleta incluso en presencia de perturbaciones externas [5]. Asimismo, el control LQR ha

sido utilizado para el seguimiento de trayectoria, mostrando un desempeño preciso y una respuesta rápida ante cambios en la trayectoria deseada [6].

Además de la estrategia de control, la implementación práctica de los algoritmos de control en sistemas embebidos con microcontroladores es crucial para el desarrollo de motocicletas autónomas. Factores como el uso eficiente de los recursos computacionales y la integración de los algoritmos de control con los sensores y actuadores del vehículo deben ser considerados [7].

Por lo tanto, este proyecto de investigación se enfocará en la comparación y evaluación de las estrategias de control basadas en lógica difusa y control LQR para el control autónomo de motocicletas. Se desarrollará un modelo matemático preciso de la dinámica del vehículo, se diseñarán y simularán los algoritmos de control, y se realizarán pruebas experimentales en un prototipo de motocicleta para validar el desempeño de los enfoques propuestos.

7.3 Marco Conceptual

Modelado de la dinámica del vehículo:

El punto de partida es el desarrollo de un modelo matemático preciso que capture la dinámica y las restricciones no holonómicas características de las motocicletas. Este modelo debe incluir parámetros clave como la trayectoria, el ángulo de la horquilla y la estabilidad del equilibrio. La formulación de este modelo matemático servirá como base para el diseño y la simulación de los algoritmos de control.

Estrategias de control:

Una vez establecido el modelo de la dinámica del vehículo, se explorarán dos enfoques de control prometedores: la lógica difusa y el control óptimo lineal cuadrático (LQR). La

lógica difusa se utilizará para abordar la estabilización del equilibrio de la motocicleta, aprovechando su capacidad para modelar la incertidumbre y tomar decisiones basadas en reglas lingüísticas. Por otro lado, el control LQR se aplicará al seguimiento de trayectoria, buscando minimizar una función de costo cuadrática para lograr un desempeño preciso y una respuesta rápida ante cambios en la trayectoria deseada.

Validación experimental:

Finalmente, el proyecto contempla la implementación práctica de los algoritmos de control en un sistema embebido con microcontrolador. Se diseñará y construirá un prototipo de motocicleta autónoma, en el cual se integrarán los sensores y actuadores necesarios para la ejecución de los algoritmos de control. Esto permitirá realizar pruebas experimentales en condiciones reales, validando el desempeño de los enfoques de lógica difusa y LQR en términos de seguimiento de trayectoria, estabilidad del equilibrio, robustez ante perturbaciones y eficiencia computacional.

Comparación y evolución:

La comparación y evaluación exhaustiva de estos dos enfoques de control proporcionará valiosos conocimientos para determinar la estrategia más adecuada para el control autónomo de motocicletas. Esto contribuirá al avance de la autonomía vehicular y sus aplicaciones en áreas como exploración, búsqueda y rescate, y misiones militares o de seguridad. El control autónomo de motocicletas se enmarca en el campo de la robótica y la autonomía vehicular, abordando los desafíos únicos que presentan estos sistemas de una sola vía en comparación con los vehículos convencionales de cuatro ruedas. El desarrollo de motocicletas autónomas requiere una integración multidisciplinaria de conocimientos en áreas

como modelado dinámico, estrategias de control, procesamiento de señales y sistemas embebidos.

En el núcleo de este proyecto se encuentra el modelado de la dinámica del vehículo, el cual constituye la base para el diseño y la evaluación de los algoritmos de control. El modelo matemático debe capturar con precisión las características no lineales y las restricciones no holonómicas de las motocicletas, incluyendo parámetros clave como la trayectoria, el ángulo de la horquilla y la estabilidad del equilibrio. Esto implica la aplicación de principios de mecánica y dinámica de sistemas, así como técnicas de modelado y simulación avanzadas.

Las estrategias de control seleccionadas para este proyecto son la lógica difusa y el control óptimo lineal cuadrático (LQR). La lógica difusa se ha demostrado efectiva para el control de sistemas no lineales y complejos, como las motocicletas autónomas, al permitir la modelación de la incertidumbre y la toma de decisiones basada en reglas lingüísticas. Por otro lado, el control LQR es un método de control óptimo que busca minimizar una función de costo cuadrática, lo que puede resultar en un desempeño superior en términos de seguimiento de trayectoria y estabilidad del sistema.

La implementación práctica de los algoritmos de control es fundamental para el desarrollo de motocicletas autónomas. Esto implica la integración de los controladores con los sensores y actuadores del vehículo, así como la optimización del uso de los recursos computacionales disponibles en los sistemas embebidos con microcontroladores. Aspectos como la precisión de los sensores, la latencia de los actuadores y la eficiencia del código deben ser cuidadosamente considerados. Finalmente, la validación experimental en un prototipo de motocicleta autónoma permite evaluar el desempeño de los enfoques de control propuestos en condiciones reales. Esto incluye la comparación del seguimiento de trayectoria,

la estabilidad del equilibrio, la robustez ante perturbaciones y la eficiencia computacional de los algoritmos de lógica difusa y LQR. Los resultados de estas pruebas experimentales servirán para determinar la estrategia de control más adecuada para el control autónomo de motocicletas, lo que contribuirá al avance de la autonomía vehicular y sus aplicaciones en diversos campos, como exploración, búsqueda y rescate, y misiones militares o de seguridad.

7.4 Marco jurídico

En el contexto colombiano, el desarrollo y la implementación de motocicletas autónomas deben considerar el marco jurídico vigente relacionado con la autonomía vehicular y la normativa de tránsito. A continuación, se destacan los principales aspectos legales que enmarcan este proyecto de investigación:

Reglamentación de vehículos autónomos:

La Ley 1955 de 2019, por la cual se expide el Plan Nacional de Desarrollo 2018-2022 "Pacto por Colombia, Pacto por la Equidad", establece en su artículo 194 la necesidad de reglamentar la circulación de vehículos autónomos en Colombia. El Ministerio de Transporte, en colaboración con otras entidades, debe desarrollar la regulación que permita la operación segura de vehículos autónomos en las vías del país.

Seguridad vial y responsabilidad:

La Ley 1702 de 2013, "por la cual se crea la Agencia Nacional de Seguridad Vial y se dictan otras disposiciones", define los lineamientos y responsabilidades en materia de seguridad vial. En el caso de motocicletas autónomas, será necesario establecer la responsabilidad civil y penal en caso de accidentes o incidentes viales, considerando la transición hacia la autonomía y la interacción con otros usuarios de la vía.

Pruebas y homologación de vehículos:

El Decreto 1660 de 2015, "por el cual se reglamenta la circulación de vehículos automotores por las vías públicas y privadas abiertas al público", establece los requisitos y procedimientos para la homologación de vehículos en Colombia. Para la implementación de motocicletas autónomas, será necesario definir protocolos y requisitos específicos para la aprobación y puesta en circulación de estos vehículos.

Protección de datos y privacidad:

La Ley 1581 de 2012, "por la cual se dictan disposiciones generales para la protección de datos personales", regula el tratamiento de datos personales, incluyendo aquellos que puedan ser recolectados por los sensores y sistemas de las motocicletas autónomas. Será importante establecer lineamientos claros sobre la recolección, almacenamiento y uso de datos personales en el contexto de este proyecto.

Normativa específica para motocicletas:

El Código Nacional de Tránsito, Ley 769 de 2002, y sus decretos reglamentarios, establecen las normas y requisitos para la circulación de motocicletas en Colombia. Cualquier desarrollo o implementación de motocicletas autónomas deberá cumplir con la normativa vigente y las adaptaciones que puedan surgir para este tipo de vehículos.

El cumplimiento de este marco jurídico será fundamental para garantizar la seguridad, la legalidad y la aceptación de las motocicletas autónomas en Colombia. El equipo de investigación deberá mantenerse actualizado sobre los cambios y desarrollos normativos, a fin de alinear el proyecto con las disposiciones legales aplicables.

8 Metodología

1. Modelado de la dinámica del vehículo:

- i. Desarrollar un modelo matemático preciso que capture la dinámica y las restricciones no holonómicas de las motocicletas.
- ii. Incluir en el modelo parámetros clave como la trayectoria, el ángulo de la horquilla y la estabilidad del equilibrio.
- iii. Utilizar técnicas de modelado y simulación avanzadas, como la aplicación de principios de mecánica y dinámica de sistemas.
- iv. Validar el modelo mediante comparaciones con datos experimentales o simulaciones de alta fidelidad.

2. Diseño de estrategias de control:

- i. Implementar un controlador basado en lógica difusa para la estabilización del equilibrio de la motocicleta.
- ii. Definir las variables de entrada y salida del sistema de control difuso.
- iii. Establecer las funciones de pertenencia y las reglas lingüísticas para la toma de decisiones.
- iv. Diseñar el mecanismo de inferencia y difusificación.
- v. Desarrollar un controlador LQR para el seguimiento de trayectoria.
- vi. Formular el problema de control óptimo, definiendo la función de costo a minimizar.
- vii. Calcular las matrices de ponderación del controlador LQR.
- viii. Implementar el algoritmo de control LQR y ajustar los parámetros de sintonización.

3. Implementación práctica y validación experimental:

- i. Diseñar y construir un prototipo de motocicleta autónoma, integrando los sensores y actuadores necesarios.
- ii. Implementar los algoritmos de control basados en lógica difusa y LQR en un sistema embebido con microcontrolador.
- iii. Realizar pruebas experimentales en el prototipo de motocicleta, evaluando el desempeño de los controladores en términos de:
 - iv. Seguimiento de trayectoria
 - v. Estabilidad del equilibrio
 - vi. Robustez ante perturbaciones
 - vii. Eficiencia computacional
- viii. Comparar y analizar los resultados obtenidos con ambas estrategias de control.

4. Análisis y evaluación de resultados:

- i. Procesar y analizar los datos recopilados durante las pruebas experimentales.
- ii. Evaluar el desempeño de los controladores basados en lógica difusa y LQR, considerando métricas como error de seguimiento, tiempo de respuesta y estabilidad.
- iii. Identificar las fortalezas, debilidades y aplicabilidad de cada enfoque de control en el contexto de motocicletas autónomas.
- iv. Documentar los hallazgos y sacar conclusiones sobre la estrategia de control más adecuada para este tipo de sistemas.

5. Difusión y publicación de resultados:

- i. Preparar informes técnicos y artículos científicos que documenten el proceso de investigación y los resultados obtenidos.
- ii. Presentar los hallazgos en congresos, conferencias y revistas especializadas en el área de robótica, control de vehículos y autonomía vehicular.
- iii. Contribuir al avance del conocimiento y la divulgación de las tecnologías desarrolladas en el proyecto.

Esta metodología integral, que abarca desde el modelado teórico hasta la validación experimental, permitirá cumplir con los objetivos del proyecto de investigación sobre el control autónomo de motocicletas. La combinación de enfoques de lógica difusa y control LQR, junto con la implementación práctica en un prototipo, proporcionará valiosos conocimientos para determinar la estrategia de control más apropiada para este tipo de sistemas.

9 Modelo matemático

Aunque existen trabajos previos que abordan el control de motocicletas autónomas, la mayoría de ellos se centran en modelos y algoritmos simplificados que no capturan completamente la complejidad de la dinámica real de una motocicleta. Además, pocos estudios comparan directamente diferentes enfoques de control en condiciones prácticas [8], [9], [10].

Lo que diferencia nuestro trabajo de los anteriores es nuestro enfoque integral, que combina un modelo matemático detallado de la dinámica de la motocicleta con la implementación práctica y la comparación de dos algoritmos de control avanzados. Además, nuestro enfoque considera la integración de la planificación del movimiento, el seguimiento de trayectorias y el control del equilibrio, lo cual refleja mejor las complejas interacciones entre estos aspectos en un entorno realista [11].

Entender y desarrollar la bicicleta como un sistema dinámico requiere la aplicación de modelos dinámicos. Existe una variedad de modelos, tanto lineales como no lineales, que incorporan restricciones holonómicas y no holonómicas. Sin embargo, este trabajo de investigación se centra en una plataforma de bicicleta preexistente, limitándose al estudio de modelos específicos con tracción trasera y dirección delantera.

La Figura 1 ilustra varias medidas utilizadas para describir la geometría de la bicicleta, asignando letras correspondientes a diversas partes rígidas del cuerpo de la bicicleta [12].

Usando una perspectiva frontal de la bicicleta, el ángulo de inclinación (ϕ) se define según la Figura 2. El ángulo de dirección (δ) se representa como se muestra en la Figura 3. El

ángulo de dirección efectivo (δ_{eff}), definido como el ángulo entre el eje x y el eje de la rueda delantera en la vista superior de la bicicleta, se ilustra en la Figura 4.

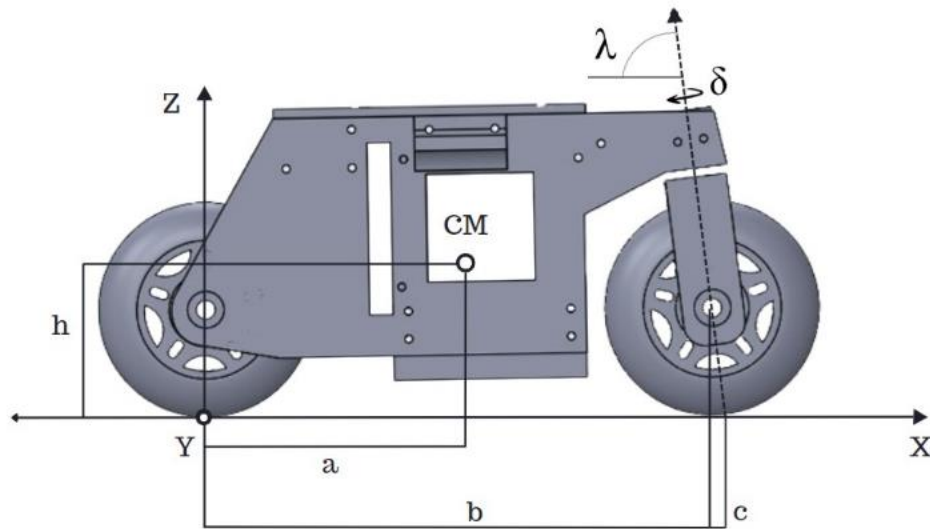


Figura 1. Perfil y Dimensiones de la Bicicleta: Una Perspectiva Lateral.

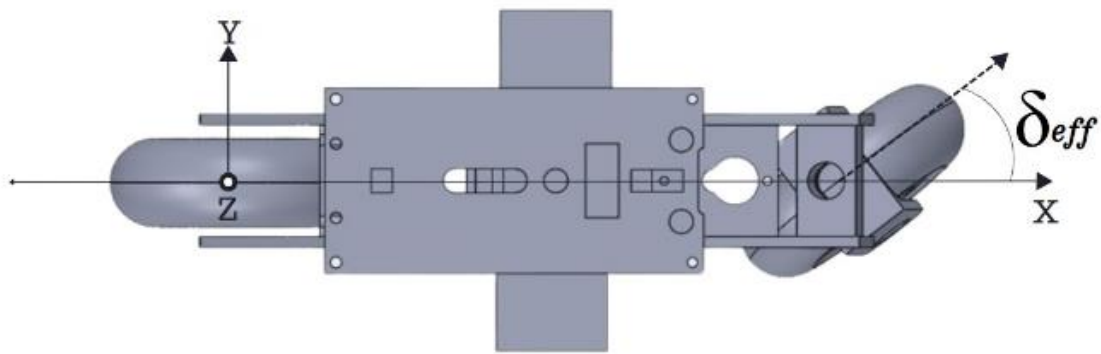


Figura 2. Perspectiva Superior de la Bicicleta y su Ángulo de Dirección Efectivo.

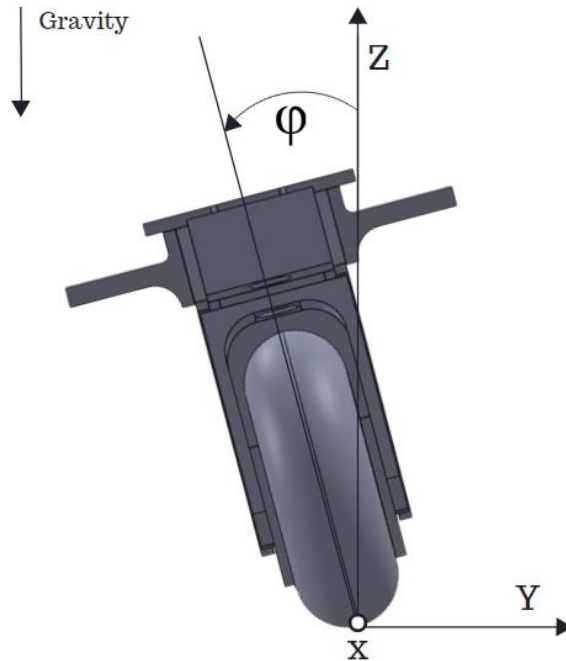


Figura 3. Perspectiva Frontal de la Bicicleta y Ángulo de Inclinación.

Basado en principios físicos, es factible desarrollar un modelo matemático que describa el comportamiento de la bicicleta. Las dimensiones geométricas relevantes se exhiben en la Figura 3, con las siguientes designaciones:

h : Representa la altura del centro de masa.

b : Indica la distancia entre los puntos de contacto de las ruedas trasera y delantera con el suelo.

a : Corresponde a la distancia horizontal entre el centro de la rueda trasera y el centro de masa.

λ : Describe el ángulo de inclinación de la horquilla.

c : Se refiere a la trayectoria del centro de masa.

A través de la aplicación de principios derivados de la segunda ley de Newton para la dinámica rotacional, se establece el equilibrio del momento angular del sistema alrededor del eje x, ubicado en los puntos de contacto de las ruedas, como se muestra en la Figura 3.

$$\frac{d L_x(\dot{\varphi}, \delta, \lambda)}{dt} = T_G(g, h, \varphi) + T_C(b, h, \delta, \lambda, v^2) + T_F(a, b, c, \delta, \lambda) \quad (1)$$

Donde:

g : aceleración gravitatoria,

L_x : momento angular del sistema alrededor del eje x,

T_G : torque generado por la gravedad,

T_C : torque generado por la fuerza centrífuga,

T_F : torque debido a la geometría de la horquilla delantera.

Después de una serie de simplificaciones, se llega a la formulación final del modelo matemático de la siguiente manera:

$$\ddot{\varphi} = \frac{g}{h} \varphi + \frac{a v \operatorname{sen} \lambda}{b h} \dot{\delta} + \frac{(h v^2 - g a c) \operatorname{sen} \lambda}{b h^2} \delta \quad (2)$$

9.1 Modelo de Espacio de Estados

Una representación en espacio de estados (SS) del modelo (2) puede derivarse usando tres variables de estado:

- $x_1 = \varphi$
- $x_2 = \delta$
- $x_3 = \dot{\varphi}$

La entrada de control se elige la derivada de la variable de dirección, representada por $u = \dot{\delta}$ (velocidad de dirección). Cuando se expresa en forma de espacio de estados (SS), el modelo (2) sufre una transformación, adquiriendo la siguiente forma:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \\ \frac{g}{h} & \frac{(h v^2 - g a c) \operatorname{sen} \lambda}{b h^2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \frac{a v \operatorname{sen} \lambda}{b h} \end{bmatrix} u \quad (3)$$

Para llevar a cabo la linealización del sistema, la velocidad de alimentación v no se considera una variable de estado debido a su multiplicación con otra variable de estado (x_2) y la entrada de control. En consecuencia, tanto la matriz del sistema A como la matriz de control B se convierten en funciones dependientes de v :

$$\dot{x} = A(v)x + B(v)u \quad (4)$$

Dado que la variación de la velocidad v afecta la dinámica de la planta, se realiza una medición en tiempo real, y la entrada de control se calcula basándose en esta medición. Y la entrada se define como la derivada de δ en función del tiempo. Además, se proporciona la ecuación de salida a continuación:

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} \quad (5)$$

La entrada se define como la derivada temporal de φ , denotada como $u = \dot{\varphi}$, y representa el vector de salida. La ecuación (2) describe un sistema dinámico lineal de segundo orden con tres polos reales.

$$p_{1,2} = \pm \sqrt{\frac{g}{h}}, p_3 = 0 \quad (6)$$

Los polos, que son valores numéricos reales, están en $\pm 9,954$ y 0 para la bicicleta específica utilizada en este proyecto. Dado que uno de los polos reside en el semiplano derecho del plano complejo, la planta de la bicicleta no controlada es inherentemente inestable. Para estabilizar la bicicleta, se implementan un controlador LQR (Regulador Cuadrático Lineal) y un controlador de lógica difusa.

9.2 Control Lineal Cuadrático (LQR)

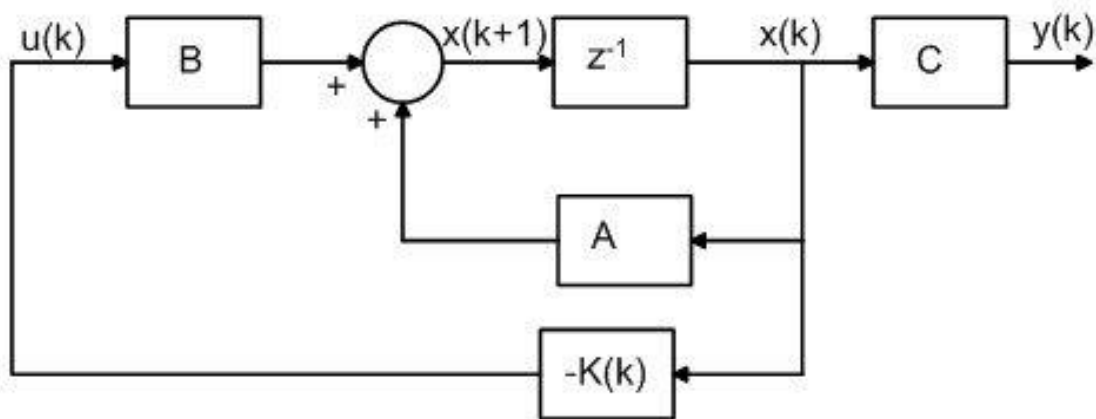


Figura 4. Diagrama de bloques del control LQR.

Observando que el sistema de espacio de estados descrito por las ecuaciones (3) y (5) es tanto controlable como observable, se establece la siguiente ley de control para la motocicleta:

$$u = \dot{\phi} = -Kx \quad (7)$$

$$K = [K_{\phi} \ K_{\delta} \ K_{\phi}] \quad (8)$$

Introduciendo las ecuaciones (7) y (8) en la expresión (3), el sistema de espacio de estados en lazo cerrado se transforma de la siguiente manera:

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ -K_\varphi & -K_\delta & -K_{\dot{\varphi}} \\ \frac{g}{h} - K_\varphi & \frac{(h v^2 - g a c) \text{sen} \lambda}{b h^2} - K_\delta & -K_{\dot{\varphi}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ \frac{a v \text{sen} \lambda}{b h} \end{bmatrix} u \quad (9)$$

Al incorporar las expresiones (7) y (8) en la ecuación (2), la formulación diferencial del sistema de control de la bicicleta se convierte en:

$$\ddot{\varphi} = \frac{bg - av \text{sen} \lambda K_\varphi}{bh} \varphi + \frac{a v \text{sen} \lambda K_\varphi}{b h} \dot{\varphi} + \frac{(h v^2 - g a c - havK_\delta) \text{sen} \lambda}{b h^2} \delta \quad (10)$$

La función de costo a minimizar por el LQR se especifica a continuación:

$$J(u) \quad (11)$$

$$= \int_0^\infty (x^T Q x + u^T R u) dt$$

Donde las matrices Q y R se definen como sigue:

$$Q = \begin{bmatrix} 100 & 0 & 0 \\ 0 & 100 & 0 \\ 0 & 0 & 10 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$= 20$$

La matriz Q refleja los costos asociados con los estados, mientras que la matriz R representa el costo de las entradas.

9.3 Control de Lógica Difusa (FLC)

La Figura 5 muestra el diagrama de bloques del sistema controlador de lógica difusa. El FLC está compuesto por cuatro bloques principales: difusificación, base de conocimientos, motor de inferencia y desdifusificación.

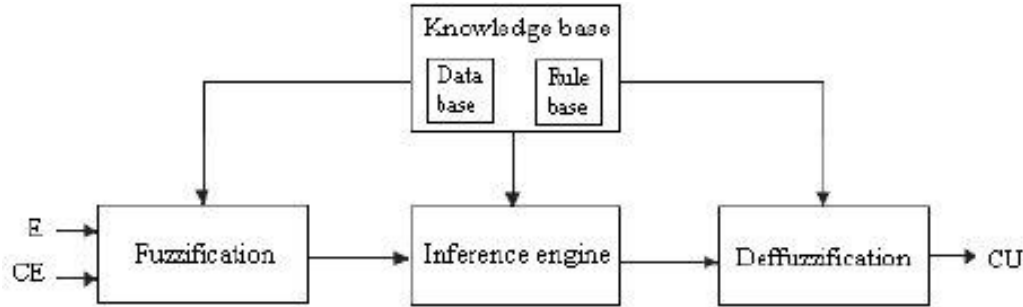


Figura 5, Diagrama de bloques de un controlador de lógica difusa.

Hay dos variables de entrada: error en el ángulo de inclinación, denotado como $e_\varphi(k)$, y el error en el cambio de velocidad, representado como $\Delta e_\varphi(k)$. Ambas variables de entrada se calculan en cada intervalo de muestreo de la siguiente manera:

$$e_\varphi = \varphi_{ref} - \varphi_{out} \quad (13)$$

$$\Delta e_\varphi = \dot{\varphi}_{ref} - \dot{\varphi}_{out} \quad (14)$$

El FLC en esta sección se basa en el sistema propuesto por Hara [3] y Montiel et al. en [16]. Este sistema se utiliza como punto de partida y luego se adapta para ajustarse a la bicicleta instrumentada. El controlador FLC utiliza dos entradas y una salida, como se observa en la Figura 5. Tanto las funciones de membresía de entrada como la función de membresía de

salida se detallan en las Figuras 6, 7 y 8. Las funciones de membresía se ajustan utilizando un método de prueba y error.

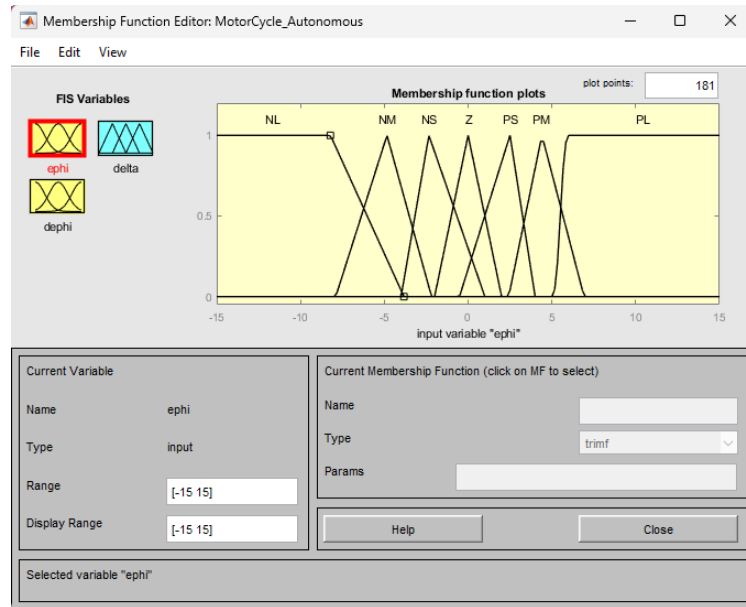


Figura 6. La función de membresía es el error en el ángulo de inclinación e_φ .

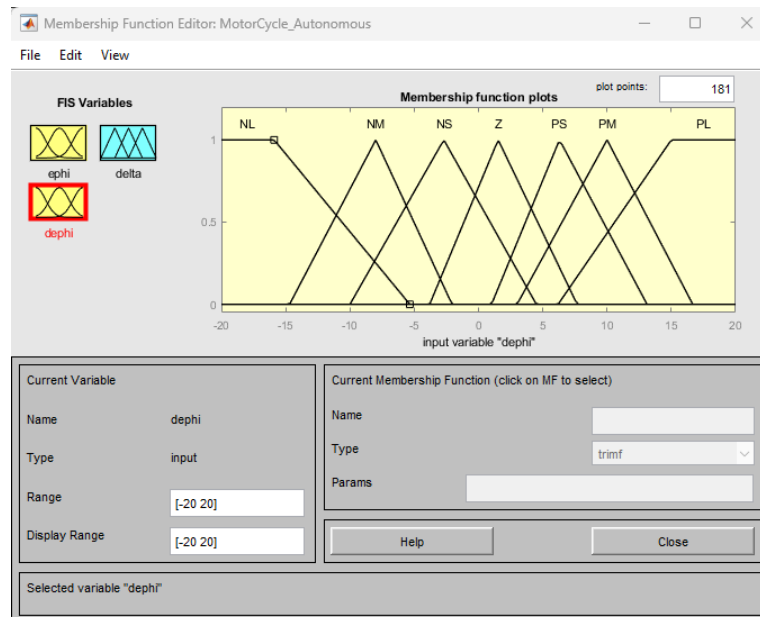


Figura 7. La función de membresía es la diferencia en el error del ángulo de inclinación Δe_φ .

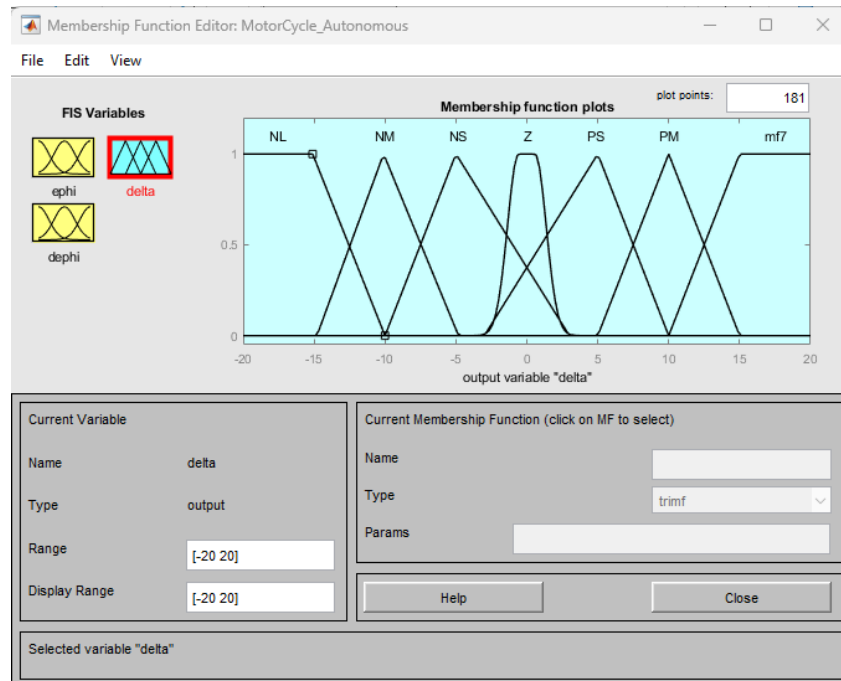


Figura 8. La función de membresía de salida es la función en la parte inferior de la figura, que correlaciona con el ángulo de dirección deseado δ .

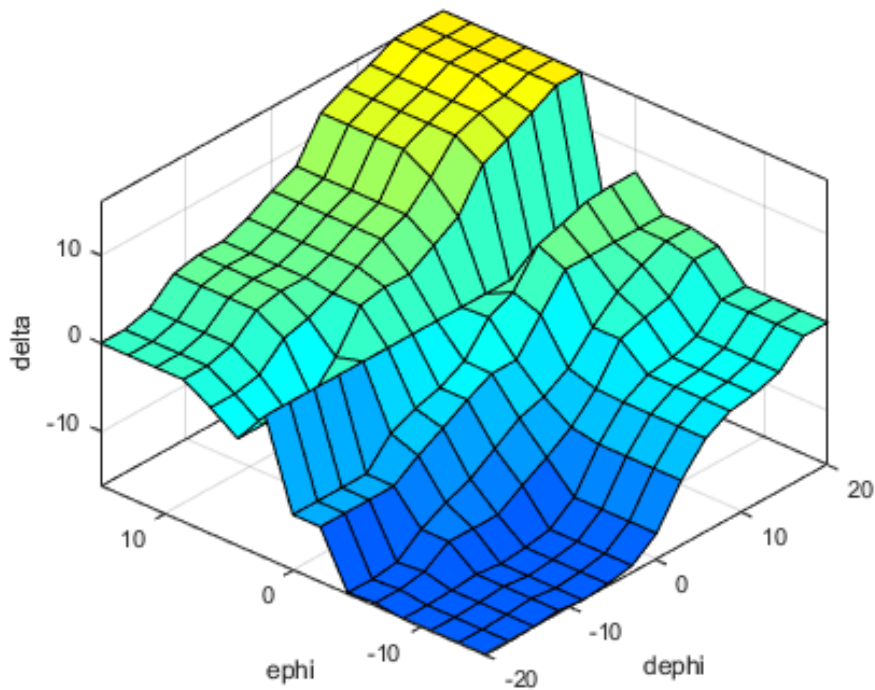


Figura 9. Superficie generada a partir de las reglas dadas al FLC.

10 Resultados

La motocicleta autónoma es un vehículo de dos ruedas diseñado para operar sin la necesidad de un conductor humano. Este tipo de motocicleta emplea una variedad de sensores, cámaras y algoritmos avanzados que le permiten percibir su entorno y tomar decisiones sobre su desplazamiento. En el presente estudio, se lleva a cabo una comparación entre dos métodos de control: uno basado en lógica difusa y otro que utiliza un controlador LQR contrapesado, desarrollado en Matlab y implementado en un sistema embebido con un microcontrolador. Se realizan pruebas para el seguimiento de la trayectoria y la estabilización del equilibrio de un prototipo diseñado específicamente para este propósito.

A continuación, se presentan los detalles del prototipado en SolidWorks y la construcción final del modelo (véanse las Figuras 10 y 11).

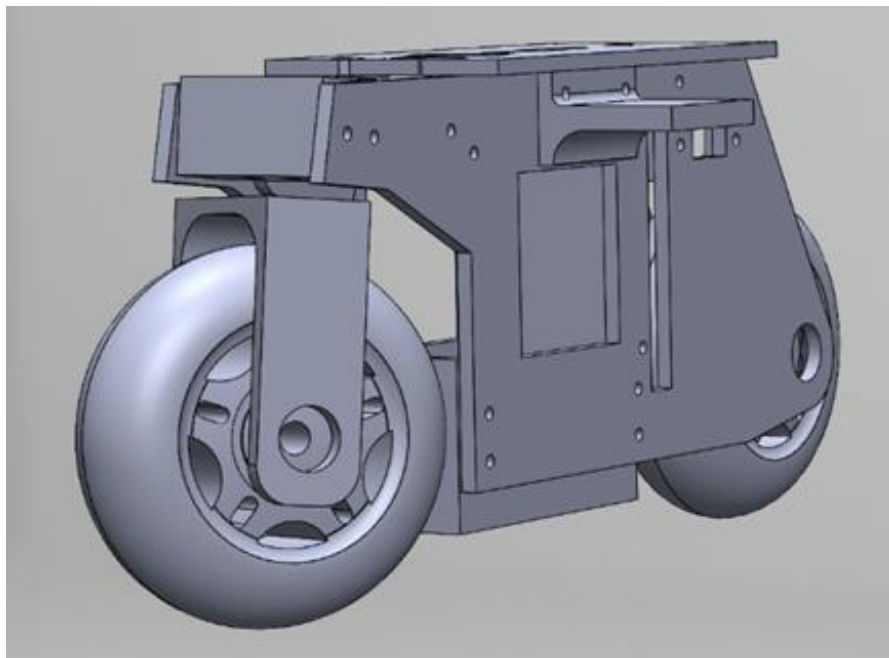


Figura 10. Diseño desarrollado en SolidWorks del prototipo de una motocicleta autónoma.



Figura 11. Diseño final del prototipo de motocicleta autónoma.

Los resultados de la simulación de los dos controladores considerados, considerando un ángulo de balanceo estimado que difiere de cero, muestran que el controlador de regulación cuadrática lineal (LQR) calcula una entrada de velocidad de dirección distinta de cero, como se ilustra en la Figura 10 adjunta.

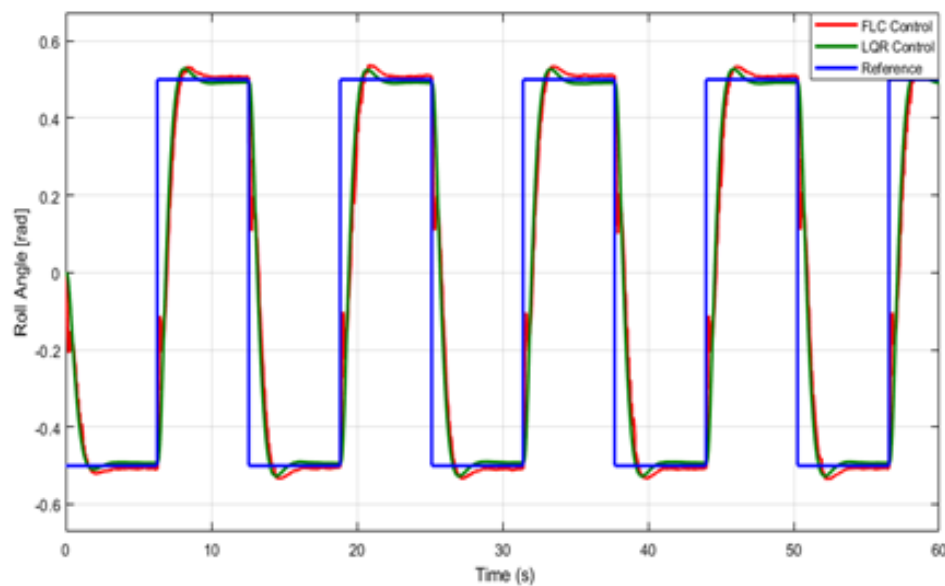


Figura 12. Simulación del comportamiento del ángulo de balanceo con controles LQR y FLC.

Para evaluar la eficacia del controlador de equilibrio LQR, se induce a la bicicleta una perturbación externa consistente en un ángulo de balanceo de $\pm 0,5$ rad ($\pm 28,64^\circ$), que se mantiene durante un lapso de 1 segundo con una periodicidad de 10 segundos.

El diseño del controlador de lógica difusa no presenta pérdidas de rendimiento en el error del ángulo de inclinación, y los niveles de atenuación de perturbaciones coinciden ahora con los obtenidos para cada eje individual. La mejora también es notable cuando se comparan las ganancias principales de las respuestas en lazo cerrado de las perturbaciones de entrada en el error del ángulo de inclinación ($e_\varphi, \Delta e_\varphi$) (ver Figura 12).

Tabla 1. Comparación del Tiempo de Ejecución de los Algoritmos de Control.

Controlador	Tiempo medio de ejecución [s]	Desviación estandar [μs]
LQR	9.47093	3.762
FLC	553.251	51.775

Se lleva a cabo un análisis comparativo de los tiempos medios de ejecución y la desviación estándar de dos algoritmos de control: el Regulador Cuadrático Lineal (LQR) y el Controlador de Lógica Difusa (FLC). Los resultados obtenidos evidencian que el algoritmo LQR presenta un tiempo de ejecución notablemente inferior, con una media de 9,47093 μ s, en contraste con el FLC, que exhibe una media de 553,251 μ s (véase la Tabla I).

Adicionalmente, la desviación estándar del LQR es relativamente baja, alcanzando 3,762 μ s, lo que sugiere una alta consistencia en sus tiempos de ejecución. En contraposición, el FLC revela una mayor variabilidad, con una desviación estándar de 51,775 μ s. Este análisis

concluye que el algoritmo LQR no solo es más eficiente en términos de tiempo de ejecución, sino que también ofrece una mayor estabilidad en comparación con el FLC.

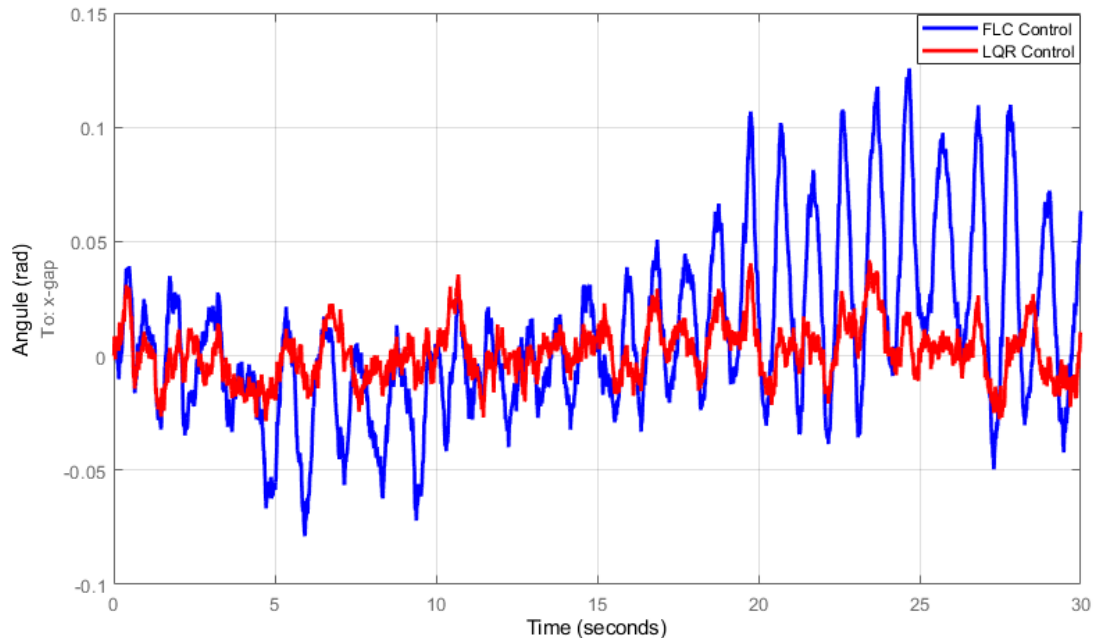


Figura 13. Resultado comparativo de los dos controladores. La línea azul pertenece al FLC y la línea roja al LQR.

Los valores singulares en el contexto del control de lógica difusa son importantes para entender y diseñar sistemas de control basados en lógica difusa, permitiendo evaluar su rendimiento y comportamiento bajo diferentes situaciones y condiciones.

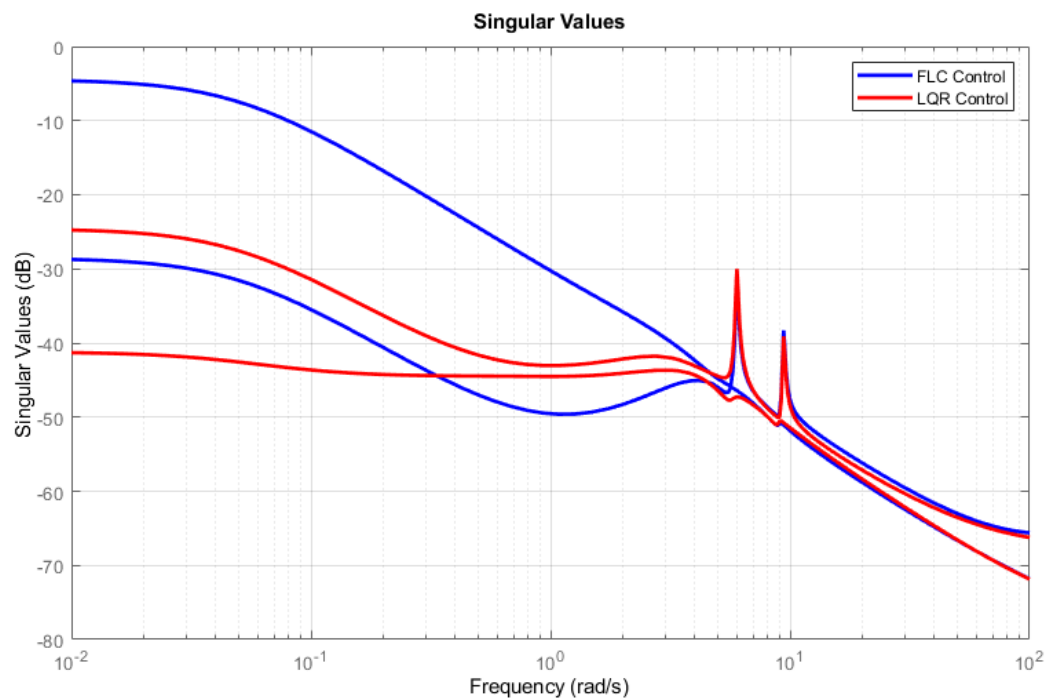


Figura 14. Los valores singulares se observan comparando sus resultados en los dos controladores FLC y LQR.

Tabla 2. Análisis de los experimentos de comparación de controladores

Controlador	Frecuencia de Oscilación [Hz]	Máximo Angulo de inclinación [deg]	Mínimo Angulo de inclinación [deg]	Tiempo de balanceo [s]	Distancia de balanceo [m]
LQR	0.6498	0.275	-0.4465	151.43	10.0
FLC	0.8227	0.683	-0.2878	36.95	10.0

La Tabla II proporciona una comparación entre dos controladores, el Regulador Cuadrático Lineal (LQR) y el Controlador de Lógica Difusa (FLC), en términos de varias

métricas relacionadas con la estabilización de un sistema, posiblemente un vehículo como una bicicleta, en un rodillo o superficie similar. Los datos revelan que el controlador FLC exhibe una frecuencia de oscilación ligeramente mayor (0.8227 Hz) en comparación con el controlador LQR (0.6498 Hz), lo que indica ajustes del sistema más rápidos para mantener el equilibrio. Además, el controlador FLC alcanza ángulos de inclinación máximos y mínimos más pronunciados (0.683 grados y -0.2878 grados, respectivamente) en comparación con el LQR (0.275 grados y -0.4465 grados, respectivamente), lo que sugiere una mayor capacidad para manejar oscilaciones y mantener el sistema en una posición estable.

En términos de tiempo de estabilización, el controlador FLC muestra un tiempo significativamente más corto (36.95 segundos) en comparación con el LQR (151.43 segundos), lo que indica una mayor eficiencia en la capacidad del controlador FLC para corregir desequilibrios y estabilizar el sistema más rápidamente. A pesar de estas diferencias, ambas configuraciones de control logran una longitud de balanceo idéntica de 10.0 metros, lo que sugiere una efectividad comparable en términos de la distancia recorrida durante el proceso de estabilización. En resumen, estos hallazgos destacan las diferencias en el rendimiento entre los controladores LQR y FLC, con el FLC mostrando una mayor capacidad para corregir y estabilizar el sistema de manera rápida y eficiente en comparación con el LQR.

11 Discusión

La investigación sobre vehículos de una sola pista, como motocicletas y bicicletas, ha avanzado significativamente en los últimos años, especialmente en el contexto de la autonomía y el control de su dinámica. Este estudio se alinea con trabajos previos, como el de Sharp [3], que exploró modelos matemáticos de motocicletas utilizando la ecuación de Lagrange. Sin embargo, a diferencia de esos enfoques, nuestra investigación presenta un modelo matemático que, aunque simplificado en comparación con los modelos de dinámica multibody, conserva propiedades cruciales como las restricciones no holonómicas. Esto representa un avance significativo, ya que muchos modelos simplificados no logran capturar la complejidad completa de la dinámica de las motocicletas.

Además, al integrar la planificación de movimiento, el seguimiento de trayectorias y el control de equilibrio, nuestra propuesta mejora la comprensión de las interacciones complejas que ocurren en un entorno real. Esto contrasta con los estudios previos que, aunque han abordado aspectos individuales de la dinámica de motocicletas, a menudo no han considerado la interacción de estos factores en conjunto. La investigación de Hara et al. [3] sobre la estabilidad de motocicletas a baja velocidad es un ejemplo de este enfoque fragmentado, que no capta la complejidad del comportamiento dinámico en condiciones prácticas.

El uso de algoritmos de control avanzados, como el regulador cuadrático lineal (LQR) y el control difuso (FLC), ofrece un marco robusto para abordar los desafíos inherentes a la dinámica de las motocicletas. La comparación de estos dos enfoques en nuestra investigación revela diferencias notables en términos de eficiencia y estabilidad. Mientras que el LQR destaca por su rapidez de ejecución y consistencia, el FLC demuestra una capacidad superior

para manejar oscilaciones y estabilizar el sistema de manera más ágil. Este hallazgo es similar a los resultados de Zheng et al. [6], que también subrayan la importancia de la estabilidad y la movilidad en el control de motocicletas no tripuladas, aunque nuestro enfoque proporciona una comparación directa de las dos metodologías en un contexto práctico.

La implementación de un modelo matemático detallado, tal como se presenta en nuestra investigación, permite una mejor comprensión de los parámetros geométricos críticos que afectan la dinámica de la motocicleta. Este enfoque se complementa con el trabajo de Bruschetta et al. [12], que desarrolló un controlador de piloto virtual para maniobras de alto rendimiento. Sin embargo, en lugar de centrarse únicamente en simulaciones, nuestra investigación incluye pruebas experimentales en un prototipo real, lo que refuerza la validez de nuestros resultados.

La comparación de los tiempos de ejecución entre el LQR y el FLC revela que, aunque el LQR es más eficiente en términos de tiempo de procesamiento, el FLC no sacrifica el rendimiento en situaciones dinámicas. Este aspecto es fundamental, considerando que la capacidad de respuesta es crítica en aplicaciones de vehículos autónomos. La investigación de Merkel & Winner [11] resalta la importancia de la conexión entre el conductor y la motocicleta, lo cual es relevante al evaluar cómo los algoritmos de control pueden adaptarse a las condiciones cambiantes del entorno.

Además, la capacidad del FLC para corregir rápidamente las inclinaciones sugiere que este enfoque podría ser más adecuado para situaciones en las que se requiere una respuesta inmediata, particularmente en escenarios de emergencia. Esto se alinea con los hallazgos de Huertas-Leyva et al. [8], quienes estudiaron la pérdida de control en situaciones críticas de

frenado. La capacidad predictiva del FLC podría ser crucial para mejorar la seguridad en la conducción autónoma de motocicletas.

La investigación de Lucci et al. [9] y [10] sobre el frenado autónomo de emergencia también complementa nuestra discusión, al subrayar la necesidad de protocolos de prueba rigurosos. Nuestra investigación no solo proporciona un modelo teórico, sino que también establece un marco para futuras evaluaciones experimentales, lo que es esencial para el desarrollo de sistemas de asistencia al conductor más avanzados.

En términos de diseño y simulación, el uso de herramientas como SolidWorks y MATLAB permite una representación precisa de las dinámicas de la motocicleta, similar a los métodos utilizados por Sharp [4] en sus simulaciones. Sin embargo, nuestra investigación se distingue al ofrecer una comparación directa y cuantitativa de los resultados de los algoritmos de control en condiciones experimentales.

La importancia de considerar las condiciones del mundo real, como las limitaciones de los sensores y las dinámicas del vehículo, se destaca en nuestra discusión. La investigación de Kung et al. [7] sobre la gestión de intersecciones inteligentes subraya la necesidad de integrar motocicletas en el contexto de vehículos autónomos conectados, lo que refleja la relevancia de nuestro enfoque holístico en el diseño de sistemas de control.

Finalmente, esta investigación no solo contribuye a la comprensión teórica de la dinámica de las motocicletas, sino que también sienta las bases para futuros desarrollos en el campo de los vehículos autónomos. La combinación de modelos matemáticos detallados y controladores avanzados puede ofrecer un camino hacia la mejora de la seguridad y la eficiencia en la conducción autónoma de motocicletas. A medida que la tecnología avanza, la

integración de algoritmos sofisticados y capacidades de detección robustas será crucial para el éxito de estas aplicaciones en el mundo real.

12 Conclusión

Esta sección presenta las conclusiones sobre la simulación y los resultados de las pruebas reales. En conclusión, este estudio aborda los desafíos complejos involucrados en el modelado y control de vehículos de una sola pista, en particular motocicletas, para su operación autónoma. La introducción de modelos matemáticos, como el presentado aquí, ofrece una representación simplificada pero precisa de la dinámica de las motocicletas, teniendo en cuenta factores críticos como la subactuación y las restricciones no holonómicas. Al integrar la planificación del movimiento, el seguimiento de trayectorias y el control del equilibrio, el estudio demuestra la viabilidad del control autónomo de motocicletas a través de simulaciones numéricas y experimentación en el mundo real.

Además, la comparación entre algoritmos de control, a saber, el Regulador Cuadrático Lineal (LQR) y el Controlador de Lógica Difusa (FLC), arroja luz sobre sus respectivas fortalezas y debilidades. El controlador LQR, aunque exhibe tiempos de ejecución más cortos y un rendimiento constante, puede carecer de la agilidad y capacidad de respuesta demostradas por el FLC en términos de tiempo de estabilización, frecuencia de oscilación y ángulos de inclinación máximos. Estos hallazgos sugieren que la elección del algoritmo de control debe basarse en requisitos específicos y métricas de rendimiento, equilibrando la eficiencia con la estabilidad y la capacidad de respuesta.

Asimismo, el estudio destaca la importancia de considerar factores del mundo real, como la dinámica del vehículo, las condiciones ambientales y las limitaciones de los sensores en el diseño e implementación de sistemas autónomos para motocicletas. Al proporcionar una visión general comprensiva del trabajo relacionado y los resultados experimentales, el estudio contribuye a los esfuerzos de investigación en curso dirigidos a avanzar en las tecnologías de

vehículos autónomos, particularmente en el contexto de vehículos de una sola pista como las motocicletas.

En general, los hallazgos presentados en este estudio ofrecen valiosas ideas sobre el diseño, modelado y control de motocicletas autónomas, allanando el camino para futuras investigaciones y desarrollos en este campo en rápida evolución. A medida que las tecnologías de vehículos autónomos continúan avanzando, la integración de algoritmos de control sofisticados y capacidades de detección robustas será crucial para mejorar la seguridad, eficiencia y versatilidad de las motocicletas autónomas en aplicaciones del mundo real.

En resumen, este estudio ha investigado y comparado dos enfoques de control para motocicletas autónomas, proporcionando una visión detallada de sus capacidades y limitaciones en condiciones prácticas. Nuestros resultados destacan la importancia de considerar la complejidad de la dinámica de las motocicletas en el diseño de sistemas de control efectivos y resaltan la necesidad de futuras investigaciones para abordar preguntas abiertas y mejorar aún más el rendimiento del sistema en entornos del mundo real.

13 Referencias

- [1] Hara, S., Nakagami, K., Miyata, K., Tsuchiya, M., & Tsujii, E. (2020). Robust control system design for self-standable motorcycle. *Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 14(3), JAMDSM0030-JAMDSM0030.

- [2] Serrezuela, R. R., Cardozo, M. Á. T., Benavides, V. K. O., & Navarrete, A. M. (2018). A Novel Model of Optimal Hybrid Control in a Space Vector Modulation SVM for Voltage Source Inverter Control. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(10), pp 3418-3425.

- [3] Hara, S., Tsuchiya, M., Kimura, T., & Akai, N. (2023). Experimental study on low-speed control for motorcycles using SPACAR model and gain-scheduling control. *Journal of Electrical Engineering & Technology*, 18(3), 2221-2230.

- [4] Serrezuela, R. R., Trujillo, J. L. A., Zamora, R. S., & Azhmyakov, V. (2018). Start-Up of a PID Fuzzy Logic-Embedded Control System for the Speed of a DC Motor Using LabVIEW. In *Electric Machines for Smart Grids Applications-Design, Simulation and Control*. IntechOpen.

- [5] Serrezuela, R. R., Cardozo, M. A. T., & Chavarro, A. F. C. (2017). Design and implementation of a PID fuzzy control for the speed of a DC motor. *Journal of engineering and applied sciences*, 12(8), 2655-2660.

- [6] Zheng, X., Zhu, X., Chen, Z., Sun, Y., Liang, B., & Wang, T. (2022). Dynamic modeling of an unmanned motorcycle and combined balance control with both steering and double CMGs. *Mechanism and Machine Theory*, 169, 104643.

[7] Kung, C. C., Tsou, T. L., & Lin, C. W. (2020, April). Intelligent intersection management with non-connected and non-autonomous motorcycles. In 2020 IEEE Workshop on Design Automation for CPS and IoT (DESTION) (pp. 39-48). IEEE.

[8] Huertas-Leyva, P., Savino, G., Baldanzini, N., & Pierini, M. (2020). Loss of control prediction for motorcycles during emergency braking maneuvers using a supervised learning algorithm. *Applied Sciences*, 10(5), 1754.

[9] Lucci, C., Marra, M., Huertas-Leyva, P., Baldanzini, N., & Savino, G. (2021). Investigating the feasibility of motorcycle autonomous emergency braking (MAEB): Design criteria for new experiments to field test automatic braking. *MethodsX*, 8, 101225.

[10] Lucci, C., Allen, T., Pierini, M., & Savino, G. (2021). Motorcycle Autonomous Emergency Braking (MAEB) employed as enhanced braking: Estimating the potential for injury reduction using real-world crash modeling. *Traffic injury prevention*, 22(sup1), S104-S110.

[11] Merkel, N. L., & Winner, H. (2020). Measures for the Evaluation of Riders' Adaption to the Changing Vehicle State during Autonomous Emergency Braking Maneuvers on Motorcycles. *Symposium on the Dynamics and Control of Single Track Vehicles*.

[12] Bruschetta, M., Picotti, E., De Simoi, A., Chen, Y., Beghi, A., Nishimura, M., ... & Ambrogio, F. (2020). Real-time nonlinear model predictive control of a virtual motorcycle. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, 29(5), 2214-2222.

[13] Hara, S., Tsuchiya, M., & Kimura, T. (2021, October). Robust Control of Automatic Low-Speed Driving Motorcycle" MOTOROiD". In 2021 IEEE 10th Global Conference on Consumer Electronics (GCCE) (pp. 645-646). IEEE.

[14] Lucci, C., Baldanzini, N., & Savino, G. (2021). Field testing the applicability of motorcycle autonomous emergency braking (MAEB) during pre-crash avoidance maneuver. *Traffic injury prevention*, 22(3), 246-251.

[15] Lucci, C., Savino, G., & Baldanzini, N. (2022). Does Motorcycle Autonomous Emergency Braking (MAEB) mitigate rider injuries and fatalities? Design of effective working parameters and field test validation of their acceptability. *Transportation research part C: emerging technologies*, 145, 103865.

[16] Montiel, J. J. G., Chávarro, A. F. C., Camacho, C. A. P., & Serrezuela, R. R. (2018). Design and Implementation of an Optimal Hybrid Control for a Hydraulic System of Coupled Tanks. *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13(10). pp 3481-3488.

[17] Diederichs, F., Knauss, A., Wilbrink, M., Lilis, Y., Chrysochoou, E., Anund, A., ... & Bischoff, S. (2020). Adaptive transitions for automation in cars, trucks, buses and motorcycles. *IET Intelligent Transport Systems*, 14(8), 889-899.

[18] Persson, N., Andersson, T., Fattouh, A., Ekström, M. C., & Papadopoulos, A. V. (2021, June). A comparative analysis and design of controllers for autonomous bicycles. In *2021 European Control Conference (ECC)* (pp. 1570-1576). IEEE.

14 Anexos

Código implementado en Python del Control PID

```

from machine import Pin, ADC, PWM

import time

import math

# Configuración de pines

motor_left = PWM(Pin(14)) # Pin para motor izquierdo
motor_right = PWM(Pin(15)) # Pin para motor derecho

gyro = ADC(Pin(32)) # Pin para giroscopio
accel = ADC(Pin(33)) # Pin para acelerómetro

# Parámetros de control

Kp = 1.0 # Ganancia proporcional
Kd = 0.1 # Ganancia derivativa

target_angle = 0 # Ángulo objetivo (vertical)

dt = 0.1 # Intervalo de tiempo

# Variables de estado

previous_error = 0

current_angle = 0

def read_sensors():

    # Leer datos del giroscopio y acelerómetro

    gyro_value = gyro.read() # Simulación de lectura

    accel_value = accel.read() # Simulación de lectura

    # Convertir a ángulo (esto dependerá de tu sensor)

```

```

    angle = gyro_value * 0.1 + accel_value * 0.1 # Ejemplo de fusión de sensores

    return angle

def control_stability(current_angle):

    global previous_error

    error = target_angle - current_angle

    derivative = (error - previous_error) / dt

    output = Kp * error + Kd * derivative

    # Controlar motores basado en la salida

    motor_left.duty(max(0, min(1023, 512 + output))) # Ajusta el rango según tu hardware
    motor_right.duty(max(0, min(1023, 512 - output)))

    previous_error = error

while True:

    current_angle = read_sensors()

    control_stability(current_angle)

    time.sleep(dt)

```

Código Implementado de Algoritmo de Lógica Difusa

```

import numpy as np

import skfuzzy as fuzz

import matplotlib.pyplot as plt

# Definir el rango de entrada

angle_range = np.arange(-30, 31, 1) # Ángulo de inclinación en grados

angle_rate_range = np.arange(-10, 11, 1) # Tasa de cambio del ángulo en grados/segundo

output_range = np.arange(-100, 101, 1) # Salida del controlador (potencia del motor)

```

```

# Definir las funciones de membresía para el ángulo
angle_low = fuzz.trapmf(angle_range, [-30, -30, -10, 0])
angle_zero = fuzz.trimf(angle_range, [-10, 0, 10])
angle_high = fuzz.trapmf(angle_range, [0, 10, 30, 30])

# Definir las funciones de membresía para la tasa de cambio del ángulo
angle_rate_negative = fuzz.trapmf(angle_rate_range, [-10, -10, -5, 0])
angle_rate_zero = fuzz.trimf(angle_rate_range, [-5, 0, 5])
angle_rate_positive = fuzz.trapmf(angle_rate_range, [0, 5, 10, 10])

# Definir las funciones de membresía para la salida
output_negative = fuzz.trapmf(output_range, [-100, -100, -50, 0])
output_zero = fuzz.trimf(output_range, [-50, 0, 50])
output_positive = fuzz.trapmf(output_range, [0, 50, 100, 100])

# Visualización de las funciones de membresía
plt.figure(figsize=(10, 8))

plt.subplot(3, 1, 1)

plt.title("Funciones de membresía para el ángulo")

plt.plot(angle_range, angle_low, 'b', label='Bajo')
plt.plot(angle_range, angle_zero, 'g', label='Cero')
plt.plot(angle_range, angle_high, 'r', label='Alto')

plt.legend()

plt.subplot(3, 1, 2)

plt.title("Funciones de membresía para la tasa de cambio del ángulo")

plt.plot(angle_rate_range, angle_rate_negative, 'b', label='Negativo')
plt.plot(angle_rate_range, angle_rate_zero, 'g', label='Cero')

```

```

plt.plot(angle_rate_range, angle_rate_positive, 'r', label='Positivo')

plt.legend()

plt.subplot(3, 1, 3)

plt.title("Funciones de membresía para la salida")

plt.plot(output_range, output_negative, 'b', label='Negativo')

plt.plot(output_range, output_zero, 'g', label='Cero')

plt.plot(output_range, output_positive, 'r', label='Positivo')

plt.legend()

plt.tight_layout()

plt.show()

# Definición de las reglas difusas

rule1 = np.fmin(angle_low, angle_rate_negative)
rule2 = np.fmin(angle_low, angle_rate_zero)
rule3 = np.fmin(angle_low, angle_rate_positive)
rule4 = np.fmin(angle_zero, angle_rate_negative)
rule5 = np.fmin(angle_zero, angle_rate_zero)
rule6 = np.fmin(angle_zero, angle_rate_positive)
rule7 = np.fmin(angle_high, angle_rate_negative)
rule8 = np.fmin(angle_high, angle_rate_zero)
rule9 = np.fmin(angle_high, angle_rate_positive)

# Agregar las reglas

output_activation_negative = np.fmax(rule1, np.fmax(rule2, rule3))
output_activation_zero = np.fmax(rule4, rule5)
output_activation_positive = np.fmax(rule6, np.fmax(rule7, rule8))

```

```
# Defuzzificación

output_negative_value = np.fmin(output_activation_negative, output_negative)

output_zero_value = np.fmin(output_activation_zero, output_zero)

output_positive_value = np.fmin(output_activation_positive, output_positive)

# Combinar las salidas

aggregated = np.fmax(output_negative_value, np.fmax(output_zero_value,
output_positive_value))

# Obtener el valor de salida final

output = fuzz.defuzz(output_range, aggregated, 'centroid')

print(f"Salida del controlador de lógica difusa: {output:.2f}")
```