

Simulación y planificación de rutas para vehículos autónomos en entornos urbanos

Luis Pedro Garrido Jurado, MSc. Miguel Enrique Zea Arenales
Departamento de Ingeniería Electrónica, Mecatrónica, Biomédica
gar20934@uvg.edu.gt, mezea@uvg.edu.gt

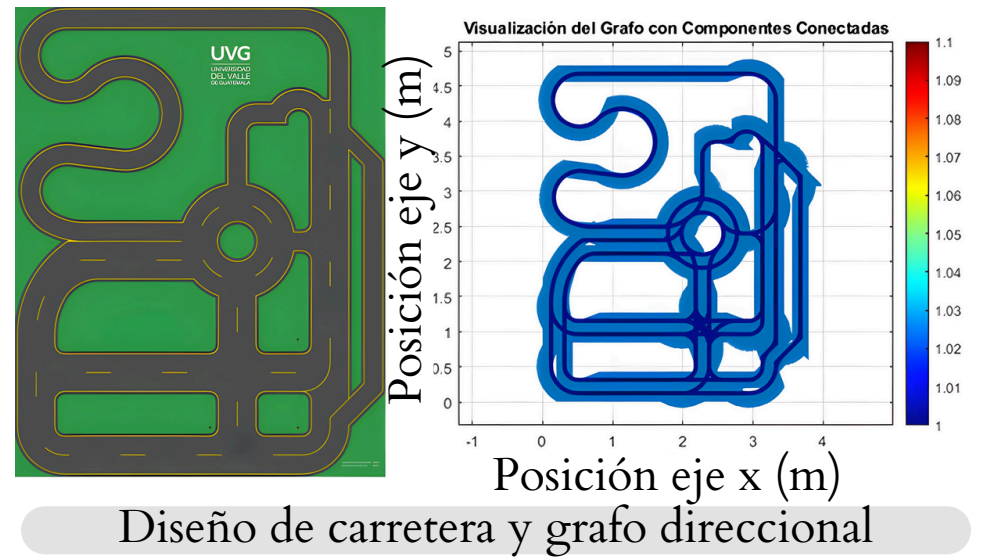


ABSTRACT

Motivado por mejorar la seguridad y eficiencia del transporte, este estudio creó un sistema de simulación, planificación de rutas y control para vehículos autónomos a escala en entornos inspirados en la Ciudad de Guatemala, proporcionando una plataforma para el análisis de estos en un contexto desafiante que no había sido explorado a profundidad en otros estudios. Se implementaron algoritmos de búsqueda de ruta optimizados mediante el algoritmo de Dijkstra y los controladores PID y basado en Lyapunov, los cuales fueron evaluados en simulaciones y pruebas físicas. El segundo mostró mayor precisión (99.6% virtual y 99.2% física) y gestionó hasta dos vehículos. Mientras que el primero ofreció mayor estabilidad en la velocidad (100% en el límite de la velocidad máxima) y capacidad para gestionar hasta tres vehículos. La selección adecuada del controlador fue clave para una implementación segura y eficiente.

METODOLOGÍA

Se diseñó un entorno urbano inspirado en la Ciudad de Guatemala, incorporando características viales como rotondas, cruces y curvas para evaluar escenarios urbanos complejos. La digitalización se realizó con herramientas de diseño asistido por computadora y se procesaron los datos en MATLAB, creando un grafo direccional para la planificación de rutas.



Se desarrollaron y probaron sistemas de control para vehículos autónomos, incluyendo un controlador basado en Lyapunov¹

$$\dot{q}_{ref} = J^{-1}(\dot{p}_d + K h_e),$$

y el controlador PID con acercamiento exponencial

$$v = -k(e_p)e_p = v_0 \left(1 - e^{-\alpha e_p^2}\right) \frac{e_p}{e_p},$$
$$\omega = k_p e_o + k_i \int e_o dt + k_d \frac{de_o}{dt}.$$

Se incorporaron señales de tránsito (alto, semáforos, reducción de velocidad) y se optimizó la simulación mediante la migración de MATLAB a Python, logrando mayor eficiencia y funcionalidades avanzadas.



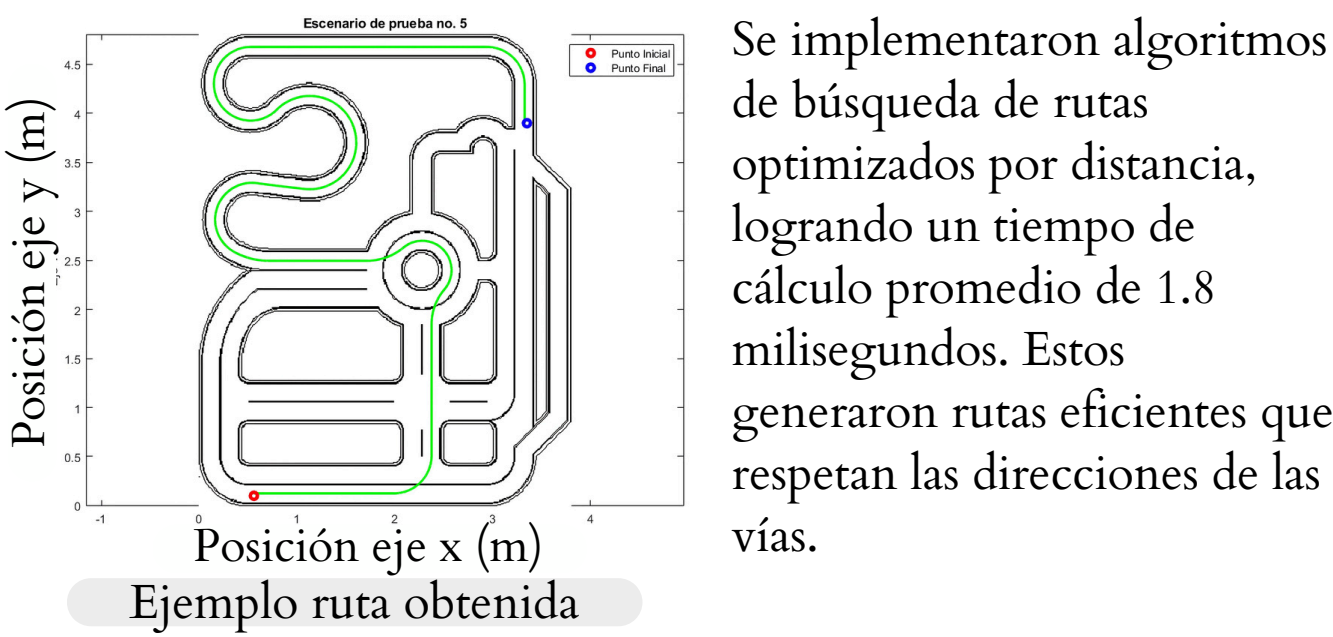
Se evaluó el comportamiento de vehículos autónomos en simulaciones virtuales y pruebas físicas, destacando la evasión de obstáculos y el seguimiento de trayectorias².



Referencias

1. Sásig, E. (2021). Robot móvil diferencial: Navegación Autónoma.
2. Stachniss, C., Wilbers, D., Chebrolu, N., Peters, L., Mersch, B., Behley, J., & Bogoslavskyi, I. (2021). Self-driving cars course – StachnissLab. Uni-bonn.

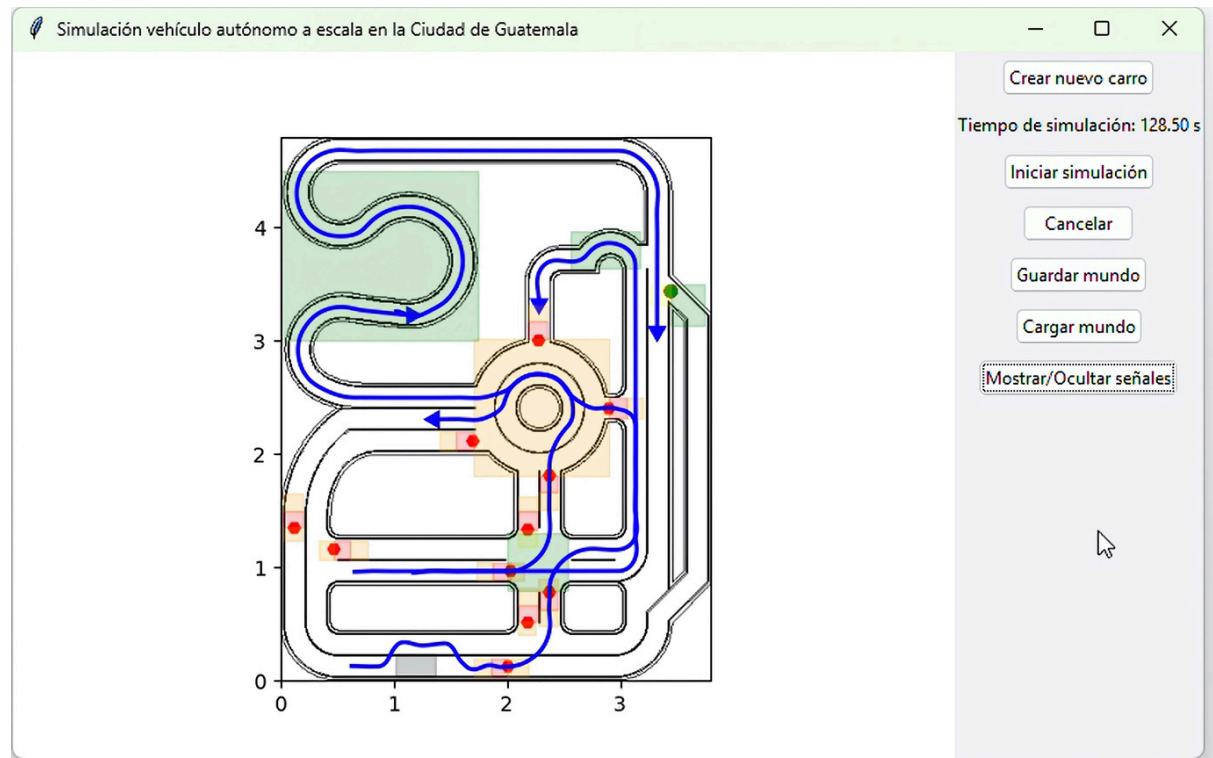
RESULTADOS



Ejemplo ruta obtenida

Se implementaron algoritmos de búsqueda de rutas optimizados por distancia, logrando un tiempo de cálculo promedio de 1.8 milisegundos. Estos generaron rutas eficientes que respetan las direcciones de las vías.

El estudio de un único vehículo autónomo concluyó que el controlador basado en Lyapunov fue adecuado para trayectorias precisas (mejor a 0.07 m/s), y el PID para estabilidad (mejor a 0.13 m/s). Estos casos fueron probados con múltiples vehículos. Las simulaciones, virtuales y físicas, respetan las vías y señales de tránsito.

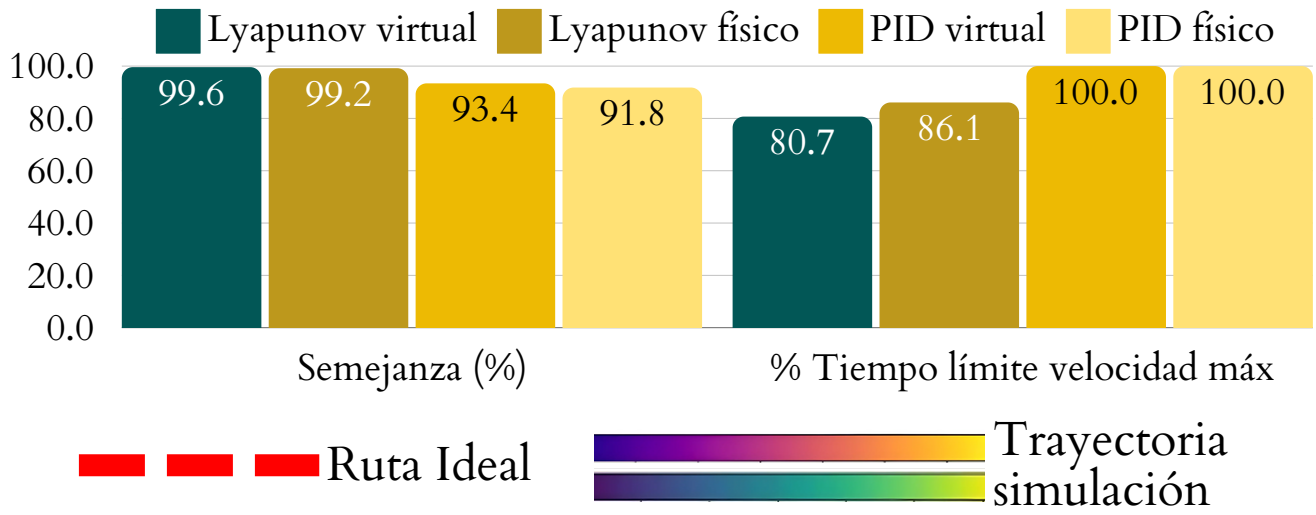


Interfaz gráfica de usuario (GUI)

Simulación de múltiples vehículos autónomos

En las pruebas físicas y virtuales no se registraron colisiones entre vehículos y con objetos. Los vehículos respetaron las señales de tránsito y ejecutaron con éxito la funcionalidad de parqueo automático, demostrando la eficacia y seguridad de los sistemas de control implementados.

El porcentaje de semejanza mide la similitud entre la trayectoria simulada y la ruta ideal. El porcentaje de tiempo dentro del límite de velocidad muestra cuánto tiempo el vehículo estuvo bajo la velocidad máxima. Las barras de color en las gráficas indican el error en metros y las velocidades en m/s.



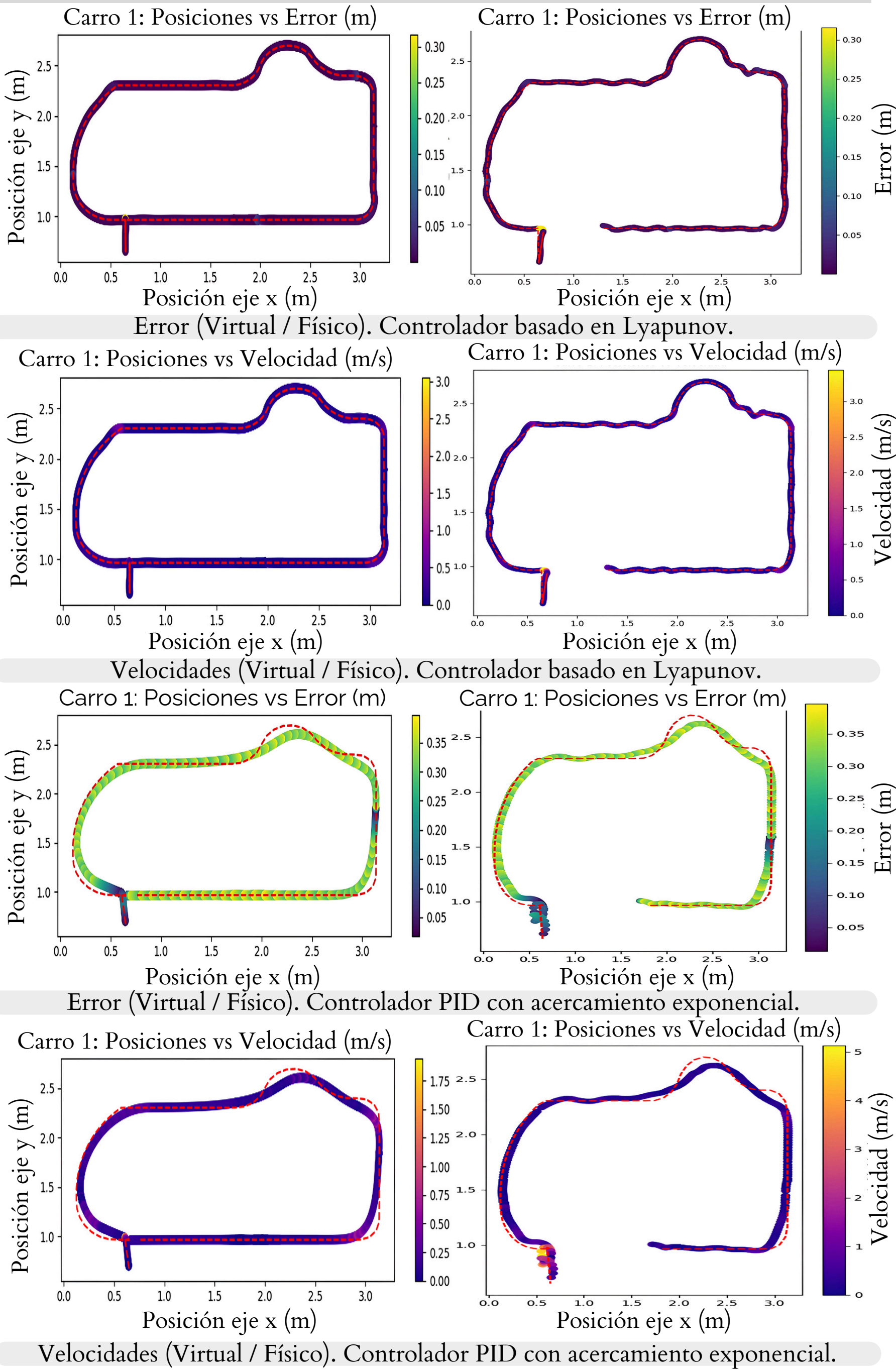
OBJETIVOS

General:

Específicos:

✓ Desarrollar un sistema de simulación y planificación de rutas para vehículos autónomos a escala que sea capaz de replicar y adaptarse a las condiciones viales específicas de la Ciudad de Guatemala, tanto en aspectos de software como de hardware.

- ✓ Digitalizar una carretera a escala del entorno vial de la Ciudad de Guatemala para su uso en simulaciones de navegación autónoma.
- ✓ Adaptar algoritmos de búsqueda de rutas para optimizar la distancia recorrida en un entorno que responda a las señalizaciones viales en el contexto de la Ciudad de Guatemala.
- ✓ Implementar y comparar propuestas de sistemas de control para robots diferenciales que respondan a las señales de tránsito e interacción con otros vehículos.
- ✓ Establecer un método de validación utilizando el sistema OptiTrack dentro del ecosistema Robotar, para monitorear y evaluar continuamente el comportamiento del vehículo autónomo durante las pruebas.
- ✓ Incorporar múltiples vehículos en el entorno simulado para emular condiciones de tráfico realistas y evaluar la interacción entre vehículos autónomos.



CONCLUSIONES

- ★ Se digitalizó un entorno vial con simulaciones y se obtuvieron rutas optimizadas en distancia.
- ★ Se implementaron los controladores basado en Lyapunov y PID; ambos respondieron adecuadamente a las señales de tránsito e interacción con otros vehículos para las simulaciones virtuales y físicas.
- ★ En la simulación de múltiples vehículos, el controlador Lyapunov fue más preciso (99.6% virtual y 99.2% físico), gestionando 2 vehículos. Mientras que el PID fue más estable al mantener siempre la velocidad bajo el límite; manejó hasta 3 vehículos.

TRABAJO FUTURO

- ★ Optimizar evasión en curvas, simulaciones múltiples para el controlador basado en Lyapunov, aprendizaje automático y sensores LiDAR para rutas y detección.
- ★ Descentralizar inteligencia vehicular con control adaptativo para mayor autonomía y conducción segura.