

UNIVERSIDAD DEL VALLE DE GUATEMALA
Facultad de Ingeniería



**Validación de algoritmos de física granular con énfasis en el
estudio y análisis del tránsito fantasma en entornos reales a
escala**

Protocolo de trabajo de graduación presentado por Brayan Gabriel
Girón García, estudiante de Ingeniería Mecatrónica

Guatemala,

2024

Resumen

La siguiente propuesta de trabajo de graduación está enfocada en la robótica de enjambre, en especial a los algoritmos de física granular, y su validación para emular el fenómeno de los atascos o colas fantasma.

Estos algoritmos se desarrollados previamente y fueron probados a nivel de simulación con partículas. Para poder realizar la validación de dichos algoritmos se debe llevar a cabo la modificación y adaptación del algoritmo para ser implementado en simulaciones con agentes robóticos móviles para emular de mejor forma a los vehículos. Esta adaptación permitirá observar el comportamiento y rendimiento del algoritmo en un entorno de simulación más realista, validando los resultados obtenidos previamente.

Las simulaciones propuestas anteriormente también permitirán una mejor migración de los entornos de prueba simulados a la implementación física con agentes robóticos móviles en la plataforma Robotat. Esta implementación física se llevará a cabo utilizando infraestructura vial a escala para recrear los escenarios reales del tránsito vehicular. Se evaluará cómo se desempeña el algoritmo en los entornos mencionados y se identificarán puntos de mejora, lo que permitirá realizar ajustes y optimizaciones de su funcionamiento al ser implementado en robots móviles en la vida real.

Antecedentes

La física granular estudia el comportamiento de materiales granulares. Estos materiales se caracterizan por estar formados por partículas sólidas de tamaño finito que interactúan entre sí y con su entorno. Los algoritmos de física granular son herramientas computacionales que se utilizan para simular el comportamiento de materiales granulares antes mencionados. Estos algoritmos se basan en las leyes de la física, como la mecánica de Newton, y en modelos matemáticos que describen las interacciones entre las partículas [1].

La Dinámica Molecular (DM) es una herramienta computacional que nos permite observar cómo se comportan un conjunto de partículas, calculando la evolución en el tiempo y promediando una cantidad de interés sobre un tiempo suficientemente largo [2]. En las simulaciones de DM, las partículas se consideran como masas puntuales, que interactúan entre sí mediante potenciales que dependen de la distancia entre ellas [3].

Robotat

El Robotat es un laboratorio ubicado en la Universidad del Valle de Guatemala (UVG) que funciona como plataforma para la experimentación con robots. Este cuenta con un área abierta que simula un ambiente real, cuenta con un sistema de captura de movimiento y una red local WiFi a través de la cual se comunican los robots, lo que permite a los investigadores estudiar el comportamiento de los robots en diferentes escenarios. El Robotat permite una interacción, entre robots con ruedas, drones, humanoides, robots bioinspirados y personas. Todo ello para formar un ecosistema de aprendizaje, desarrollo e investigación [4].

El laboratorio fue creado por el M.Sc. Miguel Enrique Zea Arenales, profesor e investigador del Departamento de Ingeniería Electrónica, Mecatrónica y Biomédica de la UVG. El Robotat ha sido utilizado por estudiantes e investigadores para desarrollar diversos proyectos, incluyendo robots que pueden caminar, nadar e incluso interactuar con humanos. El laboratorio es un recurso único en la región y sumamente valioso para la investigación y la innovación en robótica en Guatemala.

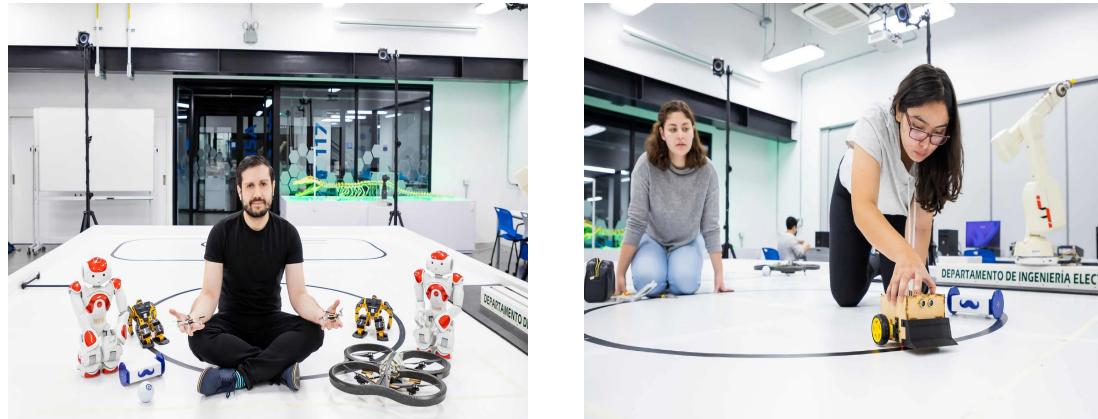


Figura 1: Laboratorio Robotat UVG [4].

Implementación de algoritmos de física granular con robots móviles

Gracias a la colaboración en 2022 de la Universidad de Navarra con la Universidad del Valle de Guatemala, Luis Nij y Juan Diego Robles, lograron poner a prueba algoritmos de física granular para el estudio y modelación de ciertos fenómenos, tales como el fenómeno de la cola fantasma. El tráfico o cola fantasma se produce cuando varios vehículos se encuentran en fila y el primero reduce su velocidad o se detiene de forma abrupta. Esto obliga a los vehículos que le siguen a hacer lo mismo, provocando una reacción en cadena que genera un atasco sin que haya un accidente o una obstrucción evidente [5].

Para la validación física se construyó un sistema simple de circuito de prueba formado por líneas negras pintadas en la plataforma, con el objetivo de verificar la funcionalidad del robot Alphabot2-Pi y su capacidad de seguimiento de trayectorias pintadas en el suelo [6]. En la Figura 2 se observa el movimiento de los 3 robots a través del circuito llevando consigo un código identificador ArUco, el cual les permite marcar el movimiento relativo y extraer datos de velocidades y orientaciones, con lo cual se podría verificar el cumplimiento del comportamiento esperado de las partículas o entes robóticos

En 2023 en la Universidad del Valle de Guatemala, se investigó sobre algoritmos de física granular con el fin de comprender y aprovechar la física granular para el control de robots móviles[7]. Para ello, se exploraron seis algoritmos de física granular, siendo estos la dinámica molecular, la simulación directa de Monte Carlo (DSMC), la dinámica del cuerpo rígido (DCR), el modelo de partículas de bordes afilados compuestas por triángulos, el modelo de elementos discretos (DEM), y el método de elementos finitos (FEM), de los cuales se destacó el desempeño de la dinámica Molecular. Este se evaluó computacionalmente (con simulaciones de hasta 100 partículas), observando que las partículas tienden a agruparse como

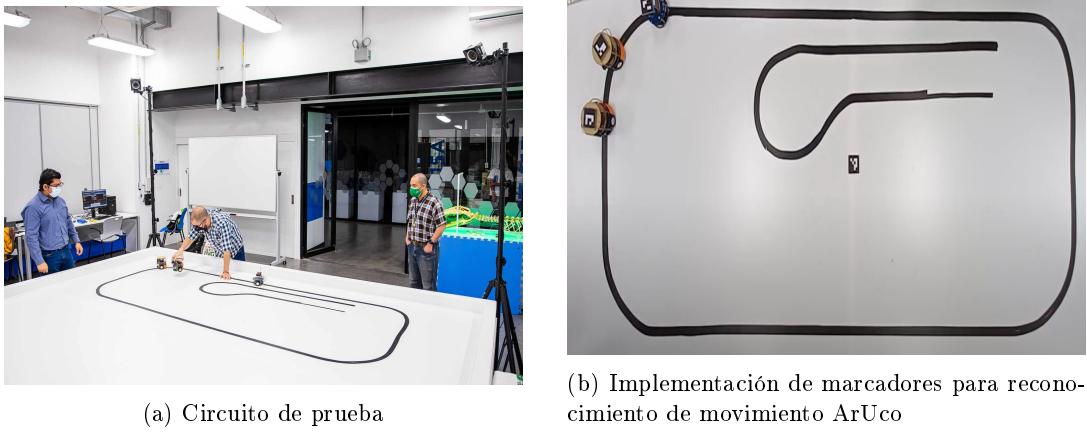


Figura 2: Robots móviles en pruebas de validación a través del circuito creado [6].

resultado de las interacciones del potencial de Lennard-Jones y la naturaleza estadística de las colisiones en un sistema con muchas partículas (Figura 3). Luego se validó el rendimiento del mismo físicamente con 3 agentes robots Pololu 3Pi. También se observó que el potencial de Lennard-Jones (PLJ) hizo que las partículas busquen estabilizarse en la distancia equilibrio, aumentando la fuerza de atracción entre las mismas cuando la distancia es mayor a la de equilibrio y disminuyendo cuando la distancia es menor, lo cual hace que continúen su trayectoria de manera constante. Tomando en cuenta lo anterior se determinó que el PLJ es adecuado para pruebas con robots móviles dada su capacidad de representación de la realidad y prevención de colisiones.

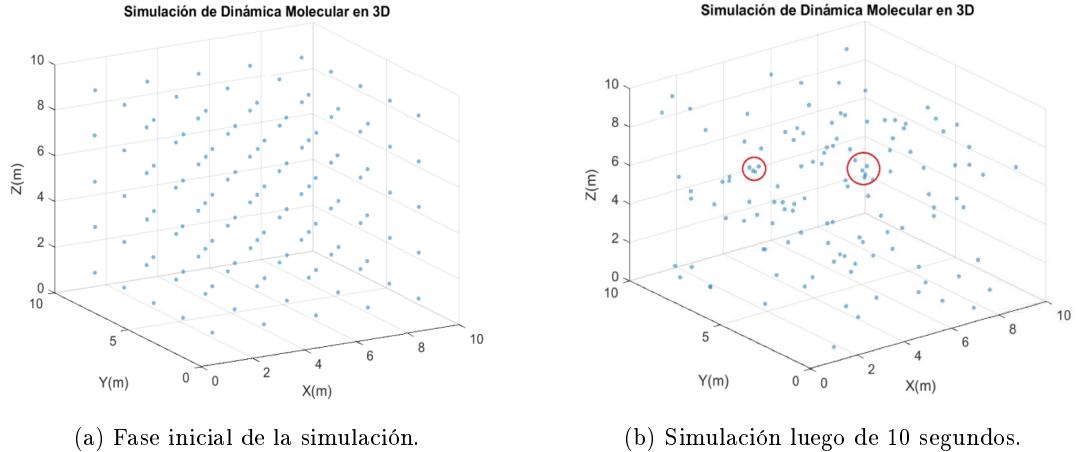


Figura 3: Simulación Dinámica Molecular en 3D [7].

Posteriormente se estudiaron posibles aplicaciones reales para el algoritmo de dinámica molecular, abordando el problema del tráfico o atasco fantasma. Para lo cual se evaluó el desempeño del algoritmo al imitar dicho fenómeno, consiguiendo validar computacionalmente que el algoritmo logra imitar el comportamiento deseado bajo ciertos parámetros. Dicha validación se logró con simulaciones de colas de hasta 4 partículas, en las cuales se detenía una particular súbitamente y se observaba el comportamiento del resto, como se observa en la Figura 4. Se recalca la importancia de la validación futura con mayor número de partí-

culas. Además dado las limitaciones de tiempo y cantidad de agentes robóticos, no se logró realizar la implementación y validación física para este problema en concreto.

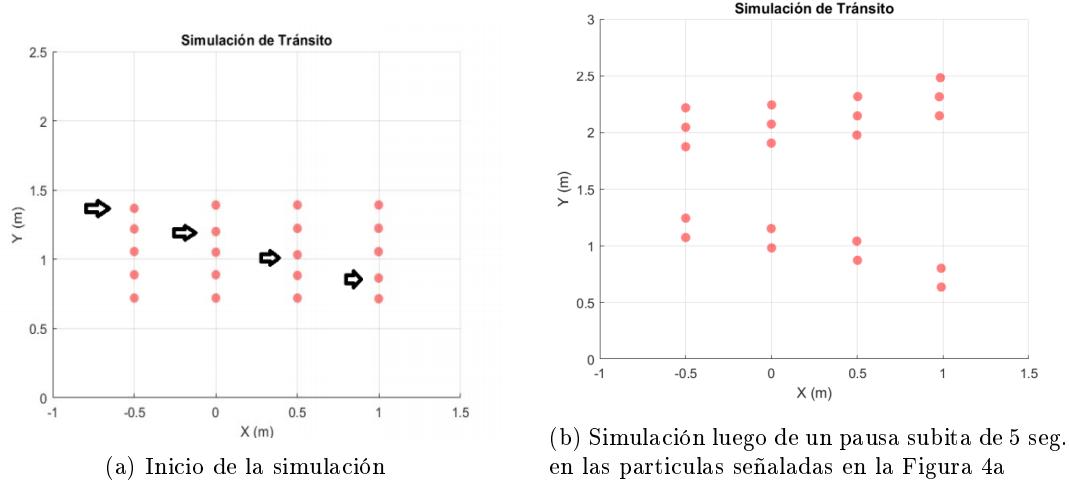


Figura 4: Simulación de aplicación del algoritmo de dinámica modular: tráfico fantasma [7].

Infraestructura para la evaluación de algoritmos computacionales en vehículos autónomos

En 2023 Gabriel Fong desarrolló infraestructura a escala para experimentos de visión por computadora en vehículos autónomos [8]. Para ello se contempló el diseño y fabricación de la infraestructura y de elementos viales funcionales a escala utilizando una reducción de 1:18.75 y material MDF (Figura 5a), de igual forma se fabricaron señales de tráfico y semáforos a escala (Figura 5b). Luego, se implementaron y validaron algoritmos de visión por computadora utilizando el módulo OpenMV Cam H7, para la detección y clasificación de elementos a escala y objetos reales. Posteriormente se utilizó Edge Impulse para el entrenamiento y optimización del modelo TensorFlow Lite. Finalmente, se evaluó la capacidad del modelo entrenado para reconocer señales de alto, señales de peatón y estados del semáforo como se observa en la Figura 6. Como resultado de lo anterior se obtuvo una infraestructura funcional, con la cual se validó que el modelo entrenado es capaz de reconocer las señales de una forma satisfactoria.

Es importante recalcar que la memoria limitada de la OpenMV Cam H7 limitó la complejidad de los modelos y la cantidad de datos de entrenamiento. Así mismo al utilizar la versión gratuita de Edge Impulse, esta solo permitió realizar dos modelos de entrenamiento por dataset.

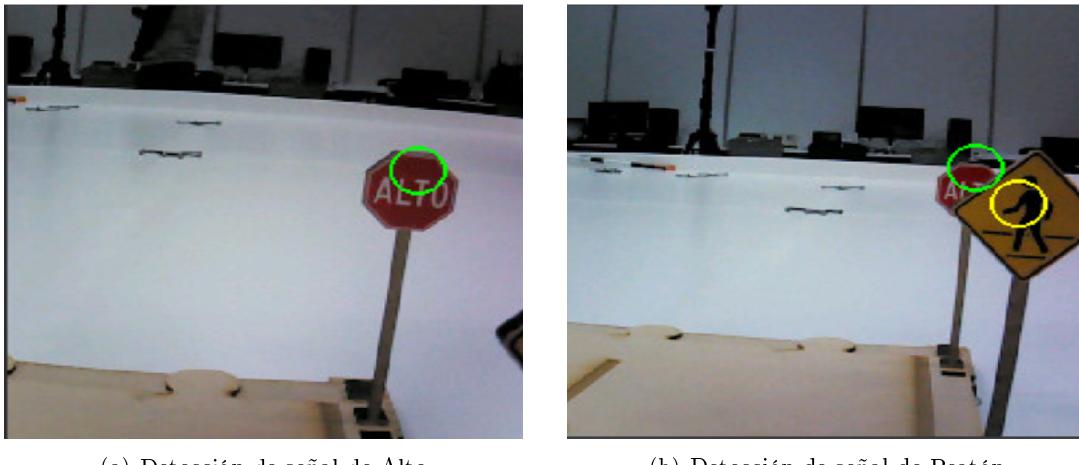
Ya teniendo la infraestructura funcional, Carlos Arribas en su trabajo de tesis [9], toma la misma así como los algoritmos de detección de las líneas de carriles y el algoritmo de detección de semáforos y de señales de tránsito, desarrollados por Fong en [8], para revalidarlos y utilizarlos para el control de vehículos autónomos a escala, siendo esto los Pololu 3Pi+ dentro del ecosistema Robotat. En la figura 7 se observa al robot móvil detectando y siguiendo las líneas del carril.



(a) Carretera a escala

(b) Señales a escala

Figura 5: Infraestructura vial a escala fabricada para validación de algoritmos en vehículos autónomos [8].



(a) Detección de señal de Alto

(b) Detección de señal de Peatón

Figura 6: Detección de Señales de transito con algoritmos de visión de computadora [8].

Para el control del vehículo, Arribas diseñó un controlador lateral empleando el algoritmo de control Stanley con una segunda capa de control empleando un PID. Para el control longitudinal utilizó el algoritmo de acercamiento exponencial. Estos algoritmos de control se implementaron para que el robot móvil logra reaccionar cuando la OpenMV Cam H7 detectara de las líneas de carril, semáforos o señales de tránsito, como se observa en la Figura 8.

Durante su trabajo Arribas se encontró con una limitación en la velocidad de detección mientras el Pololu 3pi+ se encontraba en movimiento. Ademas de que no se logró la interconexión entre los algoritmos de detección de línea junto al algoritmo de detección de señales para realizar una tarea conjunta.

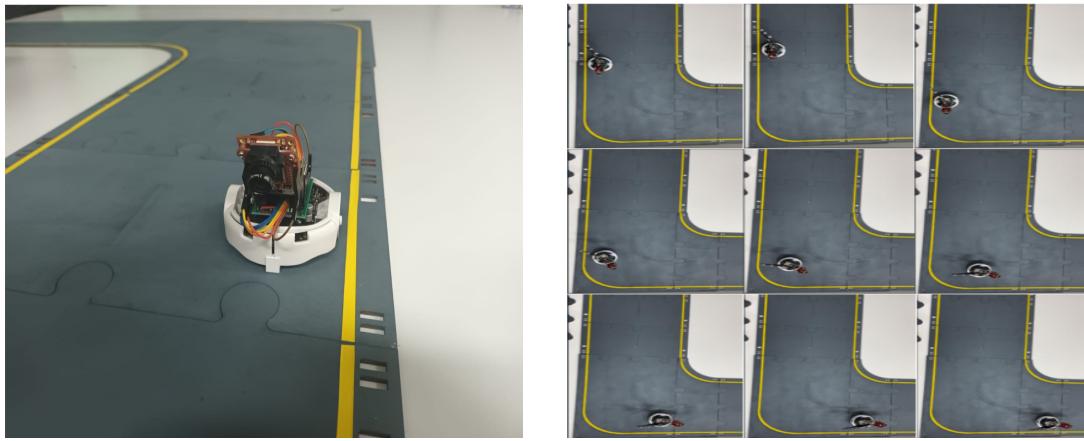
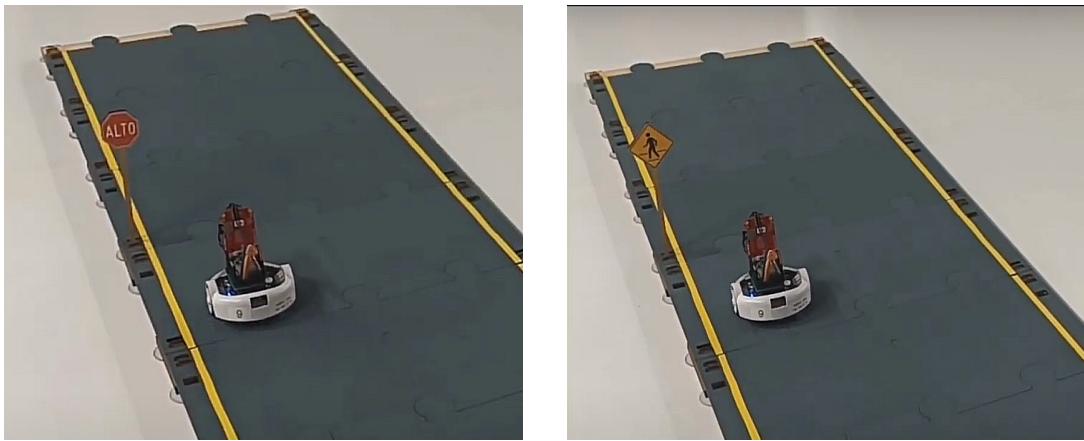
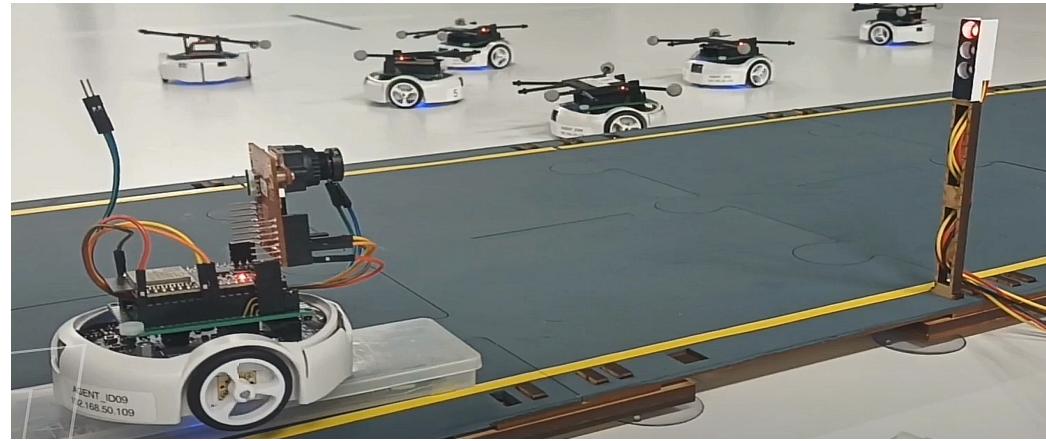


Figura 7: Detección y seguimiento de lineas de carril del vehículo móvil [9] [8].



(a) Reacción ante detección de señal de Alto

(b) Reacción ante detección de señal de Peatón



(c) Reacción ante detección de señal de semáforo

Figura 8: Reacción del vehículo autónomo ante la detección de señales de transito y semáforos [9].

Justificación

Como se mencionó anteriormente, el tránsito o atasco fantasma es un fenómeno que aparece sin una obstrucción física aparente o sin un cuello de botella en las carreteras. Dicho fenómeno se ha convertido en un problema de suma importancia dada su recurrencia y la repercusión que tiene en la vida de las personas. Es por esta razón que se han realizado varios estudios para poder entender, replicar y tratar de darle una solución a dicho fenómeno. Algunas de las propuestas han tratado de implementar algoritmos de física de partículas en agentes robóticos móviles, para poder emular el comportamiento de los atascos fantasma, y así poder estudiarlos en entornos controlados.

En la Universidad del Valle se ha abordado esta línea de investigación en múltiples ocasiones. En 2022, el trabajo se centró más en conocer las características de los agentes robóticos y su integración con la plataforma robótica Robotat. Posteriormente se continuó con la investigación centrándose en el desarrollo del algoritmo de control y la validación por medio de simulaciones con partículas. Ese mismo año también se desarrolló infraestructura vial a escala, para pruebas de robots móviles en entornos reales. Con dicha infraestructura se llegó a realizar pruebas de detección de señales de tránsito y pruebas preliminares de movilidad vehicular sobre la misma.

Tomando en cuenta los trabajos anteriores, sus limitaciones y enfoques, surge la necesidad de continuar con esta línea de investigación para poder implementar conjuntamente los distintos avances previos. Para ello se busca pasar de simulaciones con partículas a simulaciones más realistas con agentes robóticos, con el fin de emular de mejor forma a los vehículos y acercarse más a la realidad. Posteriormente se pretende llegar a la implementación final de los algoritmos en agentes robóticos móviles, realizando pruebas en escenarios reales mediante la infraestructura de ciudades a escala con la que ya se cuenta en la UVG. Con lo anterior se podrá observar y examinar el rendimiento del algoritmo para replicar el fenómeno deseado.

Objetivos

Objetivo General

Optimizar la implementación de algoritmos de física granular previamente desarrollados y validarlos con agentes robóticos móviles en escenarios realistas a escala, para el estudio y análisis del fenómeno de tránsito fantasma.

Objetivos Específicos

- Evaluar la implementación de algoritmos previamente desarrollados e identificar inefficiencias y puntos de mejora.
- Implementar las mejoras identificadas y evaluar el rendimiento de los algoritmos mejorados en escenarios similares a los probados anteriormente.
- Diseñar experimentos a realizarse con robots móviles en escenarios de tránsito fantasma realistas a escala.
- Validar los experimentos diseñados en escenarios realistas simulados.
- Realizar los experimentos en el ecosistema Robotat y evaluar el rendimiento de los algoritmos y el comportamiento de los agentes robóticos.

Marco teórico

La física granular se encarga de investigar las propiedades macroscópicas de sistemas compuestos por grandes conjuntos de partículas sólidas, tales como granos, polvo o partículas pulverizadas, considerando tanto las interacciones entre partículas individuales como las fuerzas externas aplicadas sobre el conjunto. A través del análisis de la dinámica de las partículas y los patrones emergentes de comportamiento, busca comprender fenómenos como la segregación, la compactación, la convección y la formación de patrones, etc [10].

Medios Granulares

Los medios granulares son materiales compuestos por partículas sólidas, que se encuentran lo suficientemente juntas como para interactuar entre sí, pero a la vez no lo suficiente como para formar un sólido continuo. Estas partículas pueden ser de diferentes tamaños, formas y materiales, y pueden estar secas, húmedas o sumergidas en un fluido. Las partículas que componen estos tipos de sistemas interactúan entre sí mediante fuerzas mecánicas. La comprensión de estos sistemas complejos es fundamental para una amplia gama de aplicaciones en ingeniería, física, biología entre otras [11].

Fuerzas e interacciones en medios granulares

Existen diversas fuerzas e interacciones que influyen en el comportamiento de los medios granulares. La combinación de estas fuerzas e interacciones da lugar a un gran número de comportamientos asombrosos que se observan en estos medios. Estas fuerzas se pueden clasificar en dos categorías [11]:

1. Fuerzas de contacto

- **Fuerzas normales:** Son las fuerzas perpendiculares a las superficies de contacto entre las partículas. Estas fuerzas surgen de la repulsión elástica entre las partículas cuando se comprimen. La magnitud de estas fuerzas depende de la elasticidad del material de las partículas y de la fuerza de compresión.
- **Fuerzas tangenciales:** Son las fuerzas paralelas a las superficies de contacto entre las partículas. Estas fuerzas surgen de la fricción entre las partículas cuando se deslizan entre sí. La magnitud de estas fuerzas depende del coeficiente de fricción entre las partículas y de la fuerza normal.
- **Fuerzas de cohesión:** Son las fuerzas que atraen a las partículas entre sí. En medios granulares secos, las fuerzas de cohesión son generalmente débiles o inexistentes. Sin embargo, en presencia de fluidos intersticiales, las fuerzas de cohesión pueden aumentar debido a la formación de puentes líquidos entre las partículas.

2. Fuerzas a distancia:

- **Fuerzas gravitatorias:** Son las fuerzas de atracción entre todas las partículas con masa. La magnitud de estas fuerzas es relativamente débil en comparación con las fuerzas de contacto, pero pueden ser significativas en grandes sistemas granulares.

- Fuerzas electrostáticas: Son las fuerzas de atracción o repulsión entre partículas cargadas eléctricamente. La magnitud de estas fuerzas depende de la carga de las partículas y de la distancia entre ellas.
- Fuerzas de van der Waals: Son las fuerzas de atracción débiles entre partículas debido a las fluctuaciones en sus distribuciones de carga electrónica. La magnitud de estas fuerzas es generalmente pequeña, pero puede ser significativa en partículas muy pequeñas.

Junto con estas fuerzas, hay interacciones que también pueden afectar el comportamiento de los medios granulares, tales como [11]:

- Vibración: La vibración puede hacer que las partículas granulares se muevan y se redistribuyan, lo que puede afectar la densidad de empaquetamiento y la porosidad del medio.
- Flujos de fluidos: La presencia de fluidos intersticiales puede afectar las interacciones entre las partículas granulares y modificar el comportamiento del medio.
- Condiciones de límite: Las condiciones de límite, como las paredes del recipiente que contiene el medio granular, pueden afectar la distribución de las fuerzas y el comportamiento del medio.

Los materiales granulares están formados por una gran cantidad de partículas cuyo tamaño típico va desde micrómetros hasta centímetros. Estas partículas interactúan por medio de fuerzas de corto alcance, es decir, solo por contacto mecánico [12]. La dinámica de un material granular, está gobernada por la ecuación de movimiento de Newton para las coordenadas del centro de masa y los ángulos de Euler de sus partículas i ($i = 1, \dots, N$):

$$\frac{\partial^2 \vec{r}_i}{\partial t^2} = \frac{1}{m_i} \vec{F}_i(\vec{r}_j, \vec{v}_j, \vec{\varphi}_j, \vec{\omega}_j) \quad (1)$$

$$\frac{\partial^2 \vec{\varphi}_i}{\partial t^2} = \frac{1}{J_i} \vec{M}_i(\vec{r}_j, \vec{v}_j, \vec{\varphi}_j, \vec{\omega}_j) , \quad (j = 1, \dots, N) \quad (2)$$

- r_j : Vector de posición de la partícula
- m_i : Masa de la partícula
- F_i : Fuerza
- M_i : Momento o Torque
- φ_j : Orientación angular
- J_i : Tensor de inercia
- v_j : Vector de velocidad

- ω_j : Vector de velocidad angular
- N : Número de partículas

Este sistema de ecuaciones diferenciales no lineales (1) no se puede resolver analíticamente. Es por ello que se utiliza una aproximación numérica para resolver estas ecuaciones, y así calcular las trayectorias de todas las partículas del sistema. Dicha aproximación numérica es la dinámica molecular.

Dinámica Molecular

La Dinámica Molecular (DM) es una técnica de simulación computacional que nos permite adentrarnos en el fascinante mundo a escala molecular, descifrando el comportamiento de sistemas físicos con una precisión sin parangón [13]. Esta poderosa herramienta se basa en los principios de la mecánica clásica para calcular las trayectorias individuales de las partículas que componen un sistema, ya sean átomos o moléculas, durante un intervalo de tiempo determinado.

Las simulaciones de DM se distinguen por sus singulares características [13]:

- Resolución atómica: La DM nos brinda una visión sin precedentes a nivel atómico, permitiéndonos observar las interacciones y el movimiento de las partículas con una resolución inimaginable para los métodos experimentales tradicionales.
- Predicción de propiedades: A partir de las trayectorias simuladas, podemos extraer una amplia gama de propiedades del sistema, incluyendo su estructura, energía potencial, temperatura, propiedades de transporte y comportamiento cinético de reacciones químicas.
- Versatilidad: La DM es una herramienta aplicable a una gran diversidad de sistemas, desde simples fluidos hasta complejas biomoléculas y materiales nanométricos.
- Potencia computacional: Las simulaciones de DM requieren un alto poder computacional, lo que limita el tamaño y la complejidad de los sistemas que se pueden estudiar.

La DM ha revolucionado nuestra comprensión de diversos fenómenos en múltiples áreas científicas, incluyendo [13]:

- Química: Estudio de reacciones químicas, diseño de catalizadores, desarrollo de nuevos materiales y comprensión de propiedades termodinámicas de fluidos.
- Biofísica: Simulación de la estructura y dinámica de proteínas, ácidos nucleicos y membranas celulares, elucidando los mecanismos moleculares de procesos biológicos esenciales.
- Ciencia de materiales: Estudio de defectos en materiales, propiedades mecánicas y procesos de difusión, permitiendo el diseño de materiales con propiedades optimizadas.
- Nanotecnología: Diseño y desarrollo de nanomateriales con funcionalidades específicas para aplicaciones en electrónica, medicina y energía.

Algoritmo de dinámica molecular

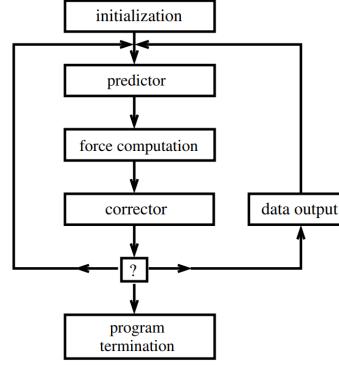


Figura 9: Algoritmo Dinámica Molecular [12].

La simulación de Dinámica Molecular se realiza siguiendo la una serie de pasos o algoritmo como vemos en la Figura 9., dichos pasos son los siguientes [12]:

1. Inicialización: Se define el estado inicial del sistema de partículas, leyendo las coordenadas (\vec{r}_i , φ_i) y sus derivadas temporales de las partículas del archivo de inicialización y especificando el tipo de partícula (granular o pared).
2. Predictor: Se redice el estado futuro del sistema de partículas, mediante el cálculo de las coordenadas y derivadas temporales de las partículas en $t + \Delta t$ usando una expansión de Taylor. La elección del tamaño de paso Δt afecta la precisión y la eficiencia de la simulación.
3. Fuerzas: En esta etapa se seleccionan los pares de partículas que interactúan. Se calculan las fuerzas de interacción entre pares de partículas y entre partículas y paredes. Estas fuerzas determinan el movimiento de las partículas.
4. Corrector: Se ajusta la predicción del paso 2 con base en las fuerzas reales, corrigiendo las coordenadas y derivadas temporales predichas usando las fuerzas calculadas en el paso 3.
5. Extracción de datos: Se registran los datos deseados en intervalos de tiempo predefinidos o cuando ocurren eventos específicos. Para ello el programa calcula los valores deseados directamente o se registran las coordenadas y velocidades en un archivo para su posterior procesamiento.
6. Terminación del programa: El programa se termina en un tiempo predefinido o cuando ocurre un cierto evento. De lo contrario, la simulación continúa en el paso 2 y así sucesivamente.

Algoritmo de Verlet

El algoritmo de Verlet, fue desarrollado por Verlet en 1967. Este es un método numérico empleado para integrar las ecuaciones de movimiento de un sistema de partículas [12]. Algunas de las ventajas por las que se caracteriza este algoritmo son:

- Simplicidad: Su implementación es sencilla y computacionalmente eficiente.
- Conservación de energía: Preserva la energía total y momento en sistemas de partículas con alta precisión.
- Estabilidad: Es estable para una amplia gama de sistemas y condiciones de simulación.

Tomando en cuenta lo anterior es común ver este algoritmo como una opción bastante recurrente para simulaciones de dinámica molecular.

El algoritmo de Verlet se basa en una serie de aproximaciones de Taylor para predecir las posiciones futuras de las partículas en función de sus posiciones pasadas y presentes [12]. La ecuación principal para el algoritmo de Verlet de segundo orden es:

$$r(t + \Delta t) = 2r(t) - r(t - \Delta t) + a(t)(\Delta t)^2 \quad (3)$$

donde:

- $r(t + \Delta t)$ es la posición de la partícula en el tiempo $t + \Delta t$,
- $r(t)$ es la posición de la partícula en el tiempo t ,
- $r(t - \Delta t)$ es la posición de la partícula en el tiempo $t - \Delta t$,
- $a(t)$ es la aceleración de la partícula en el tiempo t ,
- Δt es el paso de tiempo.

Potencial de Lennard-Jones

El potencial de Lennard-Jones es una función matemática utilizada para modelar la interacción entre un par de partículas en dinámica molecular. Es efectivo para describir fuerzas entre átomos no enlazados y moléculas [12].

La ecuación que describe el potencial de Lennard-Jones es:

$$U(r) = 4\epsilon \left[\left(\frac{\sigma}{r} \right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r} \right)^6 \right] \quad (4)$$

donde:

- $U(r)$ es la energía potencial entre dos partículas separadas por una distancia r
- ϵ es la profundidad del potencial, representando la energía mínima
- σ es la distancia a la cual el potencial entre dos partículas es cero.

El término $(\sigma/r)^{12}$ representa la repulsión a distancias cortas debido a la superposición de los electrones, mientras que el término $(\sigma/r)^6$ describe la atracción a distancias más largas debido a las fuerzas de van der Waals.

En la dinámica molecular, el potencial de Lennard-Jones se utiliza para calcular las fuerzas que actúan sobre cada partícula en un sistema molecular. Estas fuerzas se emplean posteriormente para actualizar las posiciones y velocidades de las partículas mediante el algoritmo de Verlet u otro método de integración numérica. Por lo cual una serie de paso que describe de mejor forma como se utiliza tanto el algoritmo de Verlet como el potencial de Lennard-Jones es la siguiente [12]:

- 1. Cálculo de Fuerzas:** Las fuerzas sobre cada partícula se derivan del gradiente del potencial de Lennard-Jones. Dada la ecuación de Lennard-Jones, la fuerza $\mathbf{F}(r)$ se calcula como:

$$U(r) = -\frac{dU_{LJ}(r)}{dr} = 24\epsilon \left[2\left(\frac{\sigma}{r}\right)^{12} - \left(\frac{\sigma}{r}\right)^6 \right] \frac{1}{r} \quad (5)$$

- 2. Actualización de Posiciones:** Utilizando el algoritmo de Verlet, se actualizan las posiciones de las partículas en cada paso de tiempo. Las aceleraciones necesarias para esta actualización se obtienen de las fuerzas calculadas en el paso anterior.
- 3. Iteración Temporal:** El proceso de cálculo de fuerzas y actualización de posiciones se repite iterativamente para simular la evolución temporal del sistema.

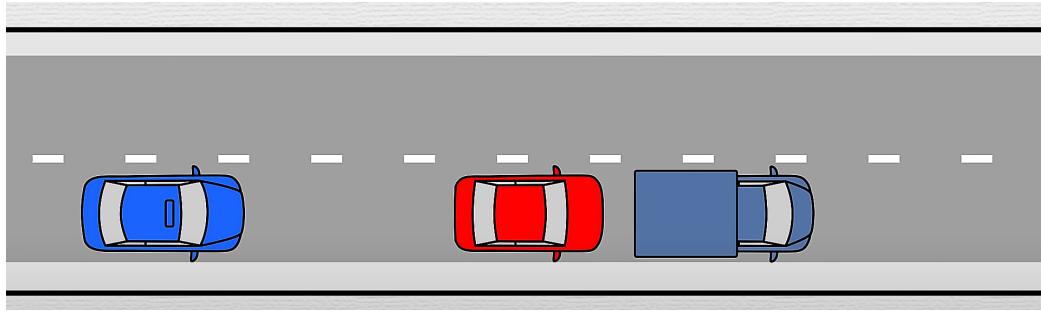
Atascos fantasma

Los atascos fantasma, también conocidos como ondas de tráfico o efecto acordeón, son un fenómeno común en las carreteras, donde se producen retenciones de tráfico sin una causa aparente, como un accidente o obras en la vía. Estos atascos pueden ser frustrantes para los conductores, ya que pueden causar retrasos considerables sin una razón clara [14].

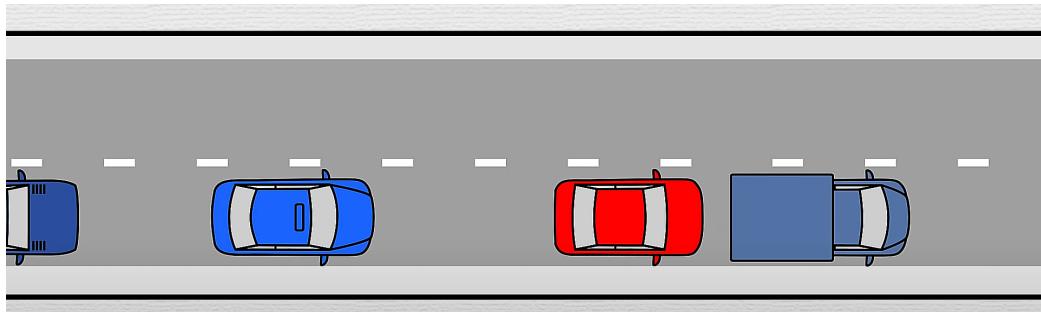
Este fenómeno se forma por perturbaciones que se propagan a lo largo de una columna de vehículos en movimiento como se observa en la Figura 10. Estas perturbaciones pueden originarse por diversos factores, como:

- Un frenazo brusco de un conductor debido a una distracción o a la observación de un obstáculo.
- La incorporación de un vehículo a la vía.
- Una pequeña variación en la velocidad del tráfico.

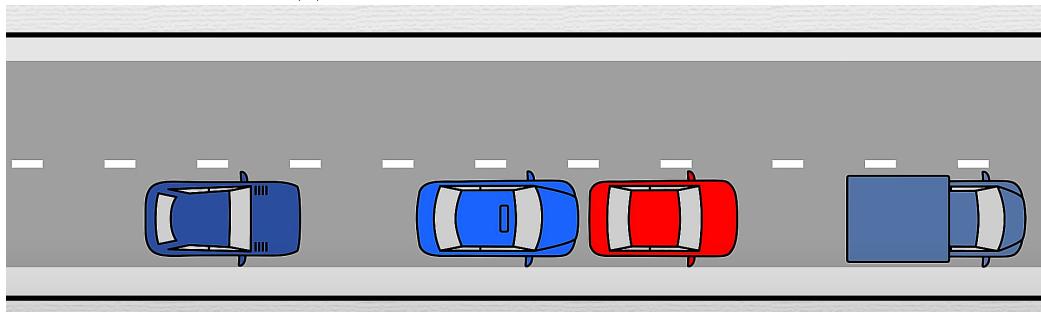
Estas pequeñas alteraciones en el flujo vehicular pueden amplificarse a medida que se transmiten de un vehículo a otro, lo que provoca una desaceleración colectiva y la formación de un atasco.



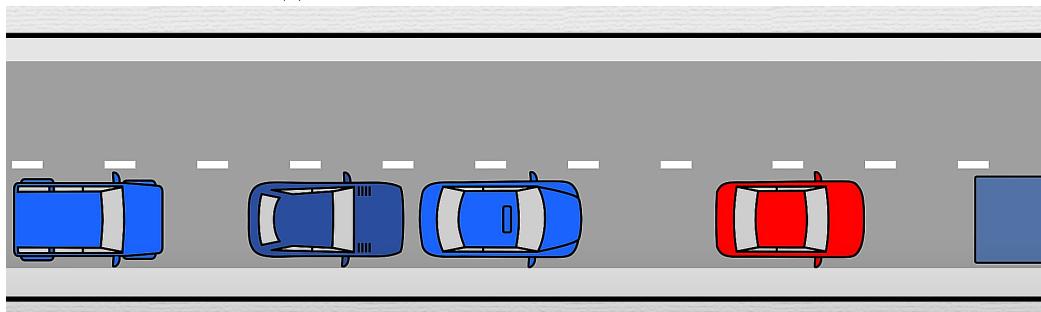
(a) Tránsito normal



(b) Frenada inesperada del primer vehículo



(c) Frenada por reacción del segundo vehículo



(d) Frenada por reacción del tercer vehículo

Figura 10: Propagación de ondas de perturbación en el transito [16].

Formación de atascos fantasma

La física detrás de los atascos fantasma se explica por la teoría de las ondas de tráfico, desarrollada por Kerner. Esta teoría describe cómo las perturbaciones individuales en el tráfico pueden propagarse a lo largo de una columna de vehículos, similar a como las ondas se propagan en el agua [15].

Un factor importante a tomar en cuenta en la formación de los atascos fantasma es la inercia de los vehículos. Cuando un vehículo frena, los vehículos que lo siguen también deben frenar para evitar una colisión. Sin embargo, debido a la inercia, los vehículos que lo siguen tardan un tiempo en reaccionar al frenazo inicial. Este retraso en la reacción provoca una cascada de frenazos, que amplifica la perturbación inicial y conduce a la formación de un atasco.

Otro factor importante es la densidad del tráfico. Cuanto mayor sea la densidad del tráfico, menor será la distancia entre los vehículos y, por lo tanto, más rápido se propagarán las perturbaciones. En condiciones de tráfico denso, incluso una pequeña alteración en la velocidad puede desencadenar un atasco fantasma (Véase Figura 11).

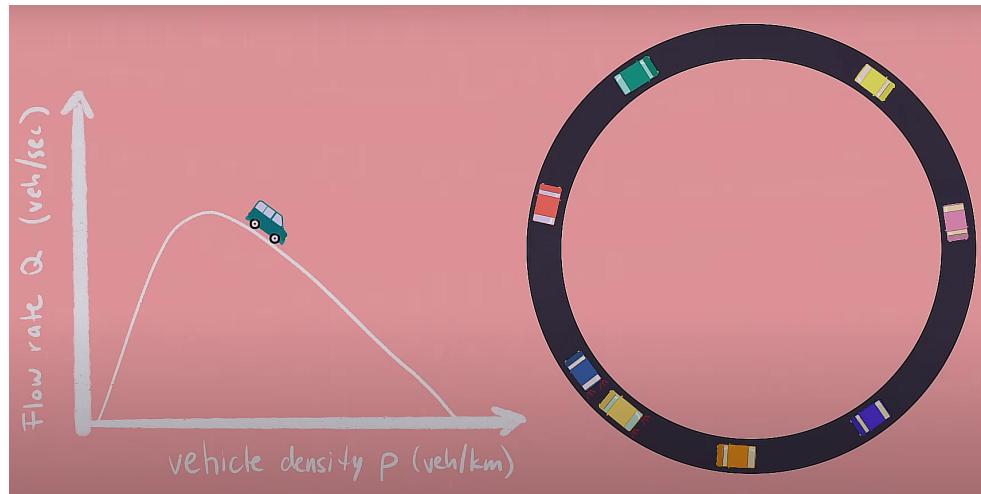


Figura 11: Flujo vs densidad de tráfico [17].

Metodología

Evaluación de algoritmos previos:

Para evaluar la implementación de algoritmos previamente desarrollados, inicialmente se llevará a cabo una revisión exhaustivamente la documentación y el código fuente de los algoritmos existentes, lo cual permitirá entender en detalle su funcionamiento y estructura. A continuación, se realizarán pruebas de rendimiento iniciales para establecer una línea base sobre la cual medir la eficacia de los algoritmos. Los resultados obtenidos de estas pruebas serán analizados minuciosamente para identificar posibles ineficiencias en el desempeño. Dichas ineficiencias serán documentadas para facilitar para posteriormente a partir de las mismas proponer puntos de mejora específicos. Esto permitirá evaluar el estado actual de los algoritmos y a su vez establecer un plan claro para optimizar su rendimiento y efectividad.

Implementación de mejoras y evaluación del rendimiento de los algoritmos mejorados:

Para cumplir el objetivo se llevará a cabo una planificación minuciosa de la implementación de las mejoras. Posteriormente, se procederá a implementar las mejoras directamente en el código del algoritmo, aplicando las mejoras técnicas y modificaciones previamente identificadas durante la fase de análisis. Una vez realizadas las modificaciones, evaluaremos el rendimiento de los algoritmos mejorados en escenarios similares a los probados previamente, utilizando los mismos parámetros para garantizar una buena comparación. Finalmente, se llevará a cabo una comparación rigurosa entre el rendimiento de los algoritmos mejorados y el de los algoritmos originales, para determinar la efectividad de las mejoras implementadas. Esto permitirá asegurar que las mejoras sean implementadas de manera ordenada y sistemática, y que su impacto en el rendimiento sea evaluado de manera precisa.

Integración y Configuración de Agentes Robóticos Móviles:

Para lograr la integración y configuración de agentes robóticos móviles, se dividirá el proceso en tres etapas clave. Primero, se identificarán los requerimientos técnicos y operativos necesarios para la implementación del algoritmo en robots móviles. Esta etapa implica un análisis detallado de las especificaciones del hardware y software de los robots, así como de las condiciones operativas en las que funcionarán.

En la segunda etapa, se procederá a adaptar el código del algoritmo a los agentes robóticos y a la plataforma robótica. Esta adaptación incluirá la modificación y optimización del código para asegurar su compatibilidad y eficiencia en los entornos seleccionados, teniendo en cuenta las limitaciones y capacidades de los robots. Finalmente, se realizarán pruebas de funcionamiento básicas tanto en entornos de simulación como en condiciones físicas reales. Estas pruebas permitirán verificar el correcto desempeño del algoritmo adaptado, identificando y resolviendo posibles problemas antes de su implementación final. Con esto se garantizará una integración robusta y eficiente de los agentes robóticos móviles, alineada con los requerimientos técnicos y operativos definidos.

Diseño de experimentos en escenarios de tránsito fantasma:

Para cumplir con el esté objetivo, primero, se definirán los escenarios de prueba . Esto implicará la selección y caracterización detallada de los entornos en los que operarán los robots móviles, considerando diversos factores como la cantidad de agentes robóticos, la disposición espacial y los obstáculos presentes. Se emplearán herramientas de simulación avanzadas para recrear condiciones realistas y variables que puedan influir en el desempeño de los robots.

En segundo lugar, se delimitarán los parámetros y condiciones de los experimentos. Esto consistirá en establecer los criterios específicos bajo los cuales se evaluarán las capacidades de los robots, incluyendo variables como la velocidad, la precisión en la navegación, la capacidad de detección, respuesta a estímulos, etc. Se definirán métricas claras y objetivas para medir el rendimiento, así como los protocolos de control y las condiciones iniciales de cada experimento. De esta manera, se garantizará que los experimentos se realicen de manera consistente y que los resultados obtenidos sean enriquecedores y puedan reproducirse en el futuro sí fuese necesario. Los experimentos diseñados permitirán una correcta evaluación de la capacidad del algoritmo para emular el fenómeno de los atascos fantasma.

Validación de los experimentos diseñados en escenarios simulados:

Para validar los experimentos diseñados en escenarios simulados, primero, se configurarán las simulaciones y se reproducirá diversos escenarios de tránsito para establecer un entorno controlado y representativo de las condiciones reales. En segundo lugar, se llevarán a cabo simulaciones utilizando los protocolos experimentales establecidos, permitiendo así la observación y análisis de los resultados bajo condiciones específicas. Finalmente, se procederá al ajuste y calibración de los parámetros de simulación basándose en los resultados preliminares obtenidos, lo que permitirá optimizar la precisión y fiabilidad de las simulaciones, asegurando así una validación robusta y efectiva de los experimentos. Esto permitirá tener una mejor base y punto de comparación previo a realizar los experimentos físicos finales.

Validación física de los experimentos en el ecosistema Robotat:

Para la validación de los experimentos en el ecosistema Robotat, se programarán y configurarán los agentes robóticos para asegurar su adecuada interacción con los escenarios de prueba especificados. Posteriormente, se llevarán a cabo pruebas preliminares con el fin de ajustar las configuraciones y verificar que los robots funcionen y se controlen correctamente. Una vez ajustados, se procederá a probar la infraestructura vial a escala para validar su funcionamiento y adaptación dentro del ecosistema. Con la infraestructura y los agentes preparados, se ejecutarán los experimentos diseñados, siguiendo los protocolos establecidos para obtener los datos .Los datos recogidos durante estos experimentos se analizarán a fondo para identificar patrones y resultados importantes. Finalmente, se compararán los resultados obtenidos con los de simulaciones anteriores y con los objetivos de rendimiento establecidos, lo que permitirá evaluar el éxito del experimento.

Cronograma de actividades

Número	Nombre de la tarea	Junio 2024				Julio 2024				Agosto 2024				Septiembre 2024				
		3 - 9	10 - 16	17 - 23	24 - 30	1 - 7	8 - 14	15 - 21	22 - 28	29 - 4	5 - 11	12 - 18	19 - 25	26 - 1	2 - 8	9 - 15	16 - 22	23 - 29
1	Evaluación de la implementación de algoritmos previamente desarrollados																	
1.1	Revisar documentación y código de los algoritmos existentes.																	
1.2	Realizar pruebas de rendimiento iniciales.																	
1.3	Analizar los resultados obtenidos para identificar inefficiencias.																	
1.4	Documentar las inefficiencias y proponer puntos de mejora.																	
2	Implementar mejoras identificadas y evaluar el rendimiento de los algoritmos mejorados																	
2.1	Planificar la implementación de mejoras.																	
2.2	Implementar las mejoras en el código del algoritmo.																	
2.3	Evaluar el rendimiento de los algoritmos mejorados en escenarios similares a los probados anteriormente.																	
2.4	Comparar el rendimiento de los algoritmos mejorados con el de los algoritmos originales.																	
3	Integración Y Configuración de Agentes Robóticos Móviles																	
3.1	Identificar los requerimientos técnicos y operativos del algoritmo para su implementación en robots móviles.																	
3.2	Adaptar el código del algoritmo.																	
3.3	Realizar pruebas de funcionamiento básicas tanto en simulación como en físico																	
4	Diseñar experimentos con robots móviles en escenarios de tránsito fantasma																	
4.1	Definir los escenarios de prueba.																	
4.2	Delimitar los parámetros y condiciones del experimento.																	
5	Validar los experimentos diseñados en escenarios simulados																	
5.1	Configurar simulaciones y reproducir escenarios de tránsito.																	
5.2	Realizar simulaciones con los protocolos experimentales.																	
5.3	Ajustar y calibrar los parámetros de simulación según los resultados preliminares.																	
6	Realizar los experimentos en el ecosistema Roboat																	
6.1	Programar y configurar los agentes robóticos para interactuar con los escenarios de prueba.																	
6.2	Realizar pruebas preliminares para ajustar la configuración y asegurar el correcto control y funcionamiento.																	
6.3	Probar la infraestructura vía a escala.																	
6.4	Ejecutar los experimentos diseñados en el ecosistema Roboat.																	
6.5	Analizar los datos recopilados durante los experimentos.																	
6.6	Comparar los resultados con los obtenidos en simulaciones y con los objetivos de rendimiento.																	
7	Documentación de Resultados																	
7.1	Agrupar y analizar los resultados finales																	
7.2	Redactar informe																	

Figura 12: Cronograma de actividades.

Índice preliminar

Prefacio	III
Resumen	VI
Abstract	VII
1. Introducción	1
2. Antecedentes	2
2.1. Robotat	2
2.2. Implementación de algoritmos de física granular con robots móviles	3
2.3. Infraestructura para la evaluación de algoritmos computacionales en vehículos autónomos	5
3. Justificación	8
4. Objetivos	9
5. Alcance	10
6. Marco teórico	11
6.1. Medios Granulares	11
6.1.1. Fuerzas e interacciones en medios granulares	11
6.2. Dinámica Molecular	14
6.1.1. Algoritmo de dinámica molecular	15
6.1.2. Algoritmo de Verlet	16
6.1.3. Potencial de Lennard-Jones	17
6.3. Atascos fantasma	18
6.3.1. Formación de atascos fantasma	19
6.4. Pololu 3pi+	20
7. Simulaciones computarizadas con agentes roboticos	21
8. Pruebas físicas de control de agentes roboticos móviles	29
9. Implementación del algoritmo en robots móviles	35
10. Pruebas en escenarios realistas a escala	40
11. Conclusiones	50
12. Recomendaciones	52
13. Bibliografía	53
14. Anexos	55
15. Glosario	58

Referencias

- [1] H. Hinrichsen y D. E. Wolf, *The Physics of Granular Media*. John Wiley & Sons, 2004.
- [2] A. Campos, “Adsorción Física de Moléculas Diatómicas,” Tesis de licenciatura, Universidad Autónoma del estado de México, 2014.
- [3] L. Cárdenas, “Dinámica molecular como técnica de simulación,” *Revista Habitus: Semilleros de investigación*, n.º 1, págs. 29-32, 2009.
- [4] UVG, *El Robotat, el hábitat donde interactúan los robots en el CIT*, <https://noticias.uvg.edu.gt/el-robotat-el-habitat-donde-interactuan-los-robots-en-el-cit/>, Accessed: 2024-04-20, 2022.
- [5] UVG, *Cuando la física granular y la robótica se apoyan una a otra*, <https://noticias.uvg.edu.gt/robotat-robotario-fisica-granular-robotica/>, Accessed: 2024-03-24, 2022.
- [6] L. Nij, “Evaluación y validación de plataformas móviles para aplicaciones prácticas de robótica,” Tesis de licenciatura, Universidad Del Valle de Guatemala, 2022.
- [7] V. Valdez, “Implementación de algoritmos de física granular con agentes robóticos móviles en la plataforma Robotat,” Tesis de licenciatura, Universidad Del Valle de Guatemala, 2023.
- [8] G. Fong, “Implementación de infraestructura a escala para la evaluación de algoritmos por visión de computador para vehículos autónomos,” Tesis de licenciatura, Universidad Del Valle de Guatemala, 2023.
- [9] C. Arribas, “Pruebas a escala de algoritmos básicos de visión de computadora y control para vehículos autónomos a escala,” Tesis de licenciatura, Universidad Del Valle de Guatemala, 2023.
- [10] T. Pöschel y T. Schwager, *Introduction to the Physics of Granular Materials*. Springer Science & Business Media, 2005.
- [11] B. Andreotti, *Granular Media: Between Fluid and Solid*. Cambridge University Press, 2013.
- [12] T. Pöschel, *Computational Granular Dynamics: Models and Algorithms*. Springer, 2005.
- [13] D. Frenkel y B. Smit, *Understanding Molecular Simulation: From Algorithms to Applications*. San Diego: Academic Press, 2002.
- [14] J. Barceló, *Fundamentals of Traffic Simulation*. Springer, 2010.
- [15] B. Kerner, *The Physics of Traffic*. Springer, 2004.
- [16] Benjamin Seibold, *The Simple Solution To Traffic*, <https://tecvolucion.com/la-solucion-sencilla-para-terminar-con-los-atascos-de-trafico/>, Accessed: 2024-05-14, 2016.
- [17] Benjamin Seibold, *What is phantom traffic and why is it ruining your life?* https://www.ted.com/talks/benjamin_seibold_what_is_phantom_traffic_and_why_is_it_ruining_your_life, Accessed: 2024-04-25, 2020.