



Universidad Politécnica
de Madrid

**Escuela Técnica Superior de
Ingenieros Informáticos**



Grado en Ingeniería Informática

Trabajo Fin de Grado

**Simulación del Flujo de Vehículos en
una Red con Conexiones Inestables**

Autor: María Luisa Oliete Calvo
Tutor: Juan Antonio Fernández del Pozo

Madrid, Junio 2025

Este Trabajo Fin de Grado se ha depositado en la ETSI Informáticos de la Universidad Politécnica de Madrid para su defensa.

Trabajo Fin de Grado
Grado en Ingeniería Informática

Título: Simulación del Flujo de Vehículos en una Red con Conexiones Inestables

Junio 2025

Autor: María Luisa Oliete Calvo

Tutor: Juan Antonio Fernández del Pozo

Departamento de Inteligencia Artificial

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Informáticos

Universidad Politécnica de Madrid

Resumen

El propósito de este Trabajo de Fin de Grado es la creación, implementación y análisis de un modelo de simulación de tráfico que represente y modele el comportamiento del flujo vehicular en condiciones de inestabilidad de la red vial de la zona centro de Madrid.

Durante la realización del presente trabajo, se utiliza un modelo de simulación basado en eventos discretos, (DES), para la representación de flujos dinámicos de tráfico. Este modelo representa el sistema de tráfico como una secuencia de eventos, donde los cambios significativos en las variables de estado del sistema, están asociados con los eventos que ocurren solo en instantes de tiempo discretos.

El sistema implementado simula la llegada aleatoria de vehículos, su paso por intersecciones reguladas por semáforos y la interacción entre los distintos tipos de vehículos en un entorno vial dinámico que facilita el análisis de la evolución del sistema. Para representar matemáticamente el comportamiento del tráfico, se ha hecho uso de la teoría de los procesos estocásticos, concretamente el de Poisson para modelar las llegadas de vehículos a la red vial y la teoría de colas para gestionar el flujo vehicular en las intersecciones.

Se ha desarrollado una interfaz gráfica en Python que permite configurar los parámetros del sistema, visualizar el tráfico en tiempo real y exportar los resultados para el análisis que se lleva a cabo posteriormente. Además, se ha implementado un sistema de generación y gestión de eventos en Python mediante colas de prioridad, garantizando eficiencia y orden en la ejecución del modelo.

Abstract

The purpose of this Final Degree Project is the design, implementation, and analysis of a traffic simulation model that represents and reproduces the behavior of vehicle flow under conditions of network instability in the central area of Madrid.

Throughout the development of this work, a Discrete Event Simulation (DES) model has been used, for representing dynamic traffic flows. This model treats the traffic system as a sequence of discrete events, where significant changes in the system's state variables occur only at specific points in time.

The implemented system simulates the random arrival of vehicles, their movement through intersections controlled by traffic lights, and the interaction between different types of vehicles in a dynamic road environment, facilitating the analysis of system behavior. To mathematically represent traffic dynamics, the model relies on stochastic process theory, specifically, the Poisson process for modeling vehicle arrivals and queuing theory to manage flow at intersections.

A Graphical User Interface (GUI) has been developed in Python, enabling users to configure system parameters, visualize traffic in real time, and export simulation results for subsequent analysis. Furthermore, the simulation includes a robust event generation and management system implemented via priority queues, ensuring both efficiency and order in the execution of the model.

Tabla de Contenidos

1. Introducción	1
1.1. Motivación	2
1.2. Ámbito y Alcance	3
1.3. Objetivos	5
1.3.1. Objetivos Específicos	5
1.4. Estructura del Trabajo	5
2. Fundamentos y Estado del Arte	7
2.1. Historia de la Simulación	7
2.2. Simulación en la Actualidad	9
2.2.1. Concepto de Modelo en Simulación	10
2.2.2. Subdivisión Modelos del Sistema	10
2.3. Modelo de Simulación de Eventos Discretos	13
2.4. Herramientas y Software de Simulación	13
2.5. Aplicaciones de la Simulación	14
3. Modelo Empírico	17
3.1. Localización de las Vías Urbanas a Simular	17
3.2. Variables del Sistema	19
3.3. Estado del Sistema	19
3.4. Eventos	19
3.5. Parámetros del Sistema	20
3.6. Variables de Entrada	20
4. Modelo Conceptual	21
4.1. Definición y Estructura del Sistema	21
4.1.1. Primera Aproximación del Sistema	22
5. Modelo Matemático	25
5.1. Proceso de Poisson para Llegadas de Vehículos	25
5.2. Teoría de Colas en Intersecciones	26
5.2.1. Parámetros del Sistema de Colas	27
5.2.2. Representación de Parámetros del Sistema	27
5.2.3. Métricas Derivadas del Modelo $M/M/1$	29
5.3. Representación Formal del Estado del Sistema	29
5.4. Gestión de Eventos	30

TABLA DE CONTENIDOS

6. Prototipo de Simulación	31
6.1. Supuestos del Modelo	31
6.2. Ejemplo de Ejecución	31
6.3. Arquitectura del Código	36
6.3.1. Bibliotecas Utilizadas	36
6.3.2. Clases Principales	37
6.3.3. Modelado Probabilístico y Generación de Eventos	40
6.3.4. Interfaz Gráfica	41
6.3.5. Generación de Archivos CSV	42
6.4. Limitaciones del Prototipo	43
7. Resultados de la Simulación	45
7.1. Visualización	45
7.2. Entorno de Simulación	45
7.3. Caso de Simulación	46
7.3.1. Distribución por Tipo de Vehículo	46
7.3.2. Entrada y Salida de Vehículos	50
7.3.3. Tiempos de Trayecto	51
7.4. Conclusiones del Estudio	55
8. Conclusiones	57
8.1. Evaluación de los Objetivos	57
8.2. Líneas Futuras	58
8.3. Evaluación Personal	58
8.4. Análisis de Impacto	59
Bibliografía	61
Anexos	67
A. Informe de Originalidad	67

Índice de Figuras

1.1. Comparativa Volumen Diario Vehículos por Tipo de Vía 2023 [1]	2
1.2. Mapa Cinturones Viales de Madrid [4]	4
2.1. Boceto Máquina Voladora Leonardo Da Vinci [9]	8
2.2. Simulador Médico Computarizado para Entrenamiento Clínico [13]	9
2.3. Evolución Oscilaciones Péndulo Simple [17]	12
2.4. Clasificación Modelos de Simulación [15]	13
3.1. Mapa Redes Viales Centro Madrid. Google Maps.	18
3.2. Vista Aérea de Calle Ortega y Gasset. Google Maps.	18
4.1. Aproximación de Disposición Tráfico. Elaboración Propia.	23
4.2. Proceso Desarrollo Modelo Conceptual [29]	24
5.1. Intersección Modelada como Sistema de Colas. [40]	27
5.2. Sistema de Colas en Intersección. Elaboración Propia.	28
5.3. Teoría de Colas FIFO. Elaboración Propia.	28
6.1. Ventana del Simulador.	32
6.2. Ventana del Simulador con Config.	32
6.3. Panel de Control con Registro de Eventos.	33
6.4. Panel de Control con Registro de Eventos.	34
6.5. Panel de Control con Registro de Eventos.	34
6.6. Representación del Entorno Vial Simulado.	35
6.7. Diagrama UML de Clases Simulador.	39
6.8. Visualización Interfaz Gráfica y Componentes.	42
6.9. Contenido CSV Exportado tras la Simulación.	43
7.1. Diagrama de Barras de Vehículos en Curso o Finalizados. Elaboración Propia.	47
7.2. Diagrama de Barras por Tipo de Vehículo. Elaboración Propia.	48
7.3. Diagrama de Barras por Tipo de Vehículo y Estado del Trayecto. Elaboración Propia.	49
7.4. Diagrama de Barras Velocidad por Tipo de Vehículo. Elaboración Propia.	50
7.5. Evolución Vehículos que Abandonan la Red. Elaboración Propia.	51
7.6. Evolución Vehículos que se Mantienen en la Red. Elaboración Propia.	51
7.7. Diagrama de Caja del Tiempo Trayecto por Tipo Vehículo. Elaboración Propia.	52

ÍNDICE DE FIGURAS

7.8. Densidad Tiempo Trayecto por Tipo de Vehículo. Elaboración Propia. . .	54
8.1. Objetivos ODS Agenda 2030 [55]	60
A.1. Captura Porcentaje Coincidencia Turnitin.	68

Índice de Tablas

6.1. Clases Principales del Simulador y Funcionalidades.	38
7.1. Distribución por Tipos de Vehículo.	46
7.2. Velocidad por Tipo de Vehículo.	49
7.3. Estadísticas del Tiempo de Trayecto por Tipo de Vehículo.	52

Capítulo 1

Introducción

En las últimas décadas, las grandes ciudades han experimentado un crecimiento demográfico y económico que ha multiplicado las necesidades de movilidad. Paralelamente, los ciudadanos exigen desplazamientos cada vez más rápidos, seguros y sostenibles, lo que plantea la necesidad de diseñar y establecer modelos de gestión del tráfico capaces de atender volúmenes de vehículos cada vez mayores sin comprometer la calidad de vida urbana. Además, el aumento del flujo vehicular y la adaptación del mismo a la complejidad y dinamismo de las redes viales, han propiciado la necesidad de desarrollar herramientas avanzadas para el análisis y la optimización del tráfico.

En este contexto, el propósito de este Trabajo de Fin de Grado es la creación, implementación y análisis de un modelo de simulación de tráfico que represente el flujo de vehículos en una red con conexiones inestables.

Durante la realización del presente estudio, se hará uso de un modelo de simulación basado en eventos discretos, idóneo para la representación de flujos dinámicos de tráfico. Este modelo constituye una herramienta fundamental para la modelización y el análisis de sistemas dinámicos, en los que los cambios de estado, ocurren en instantes de tiempo discretos.

A través de este modelo, se busca comprender las alteraciones en las dinámicas de tráfico en condiciones de inestabilidad, las cuales obligan a la búsqueda de rutas alternativas. Igualmente se pretenden identificar los patrones de congestión así como posibles cuellos de botella que puedan afectar a la eficiencia del sistema para la evaluación de posibles estrategias de optimización.

Se analizarán métricas como el tiempo medio de espera, la longitud media de las colas y velocidad media por tipo de vehículos, con el objetivo de determinar el tiempo necesario para alcanzar un estado de estabilidad en la red.

La relevancia de este estudio se acentúa al observar el elevado flujo vehicular que transita diariamente por las distintas categorías viales. Como se muestra en la figura 1.1, las vías principales soportan una carga de tráfico significativamente mayor que las secundarias y locales, con una Intensidad Media Diaria (IMDm) muy superior.

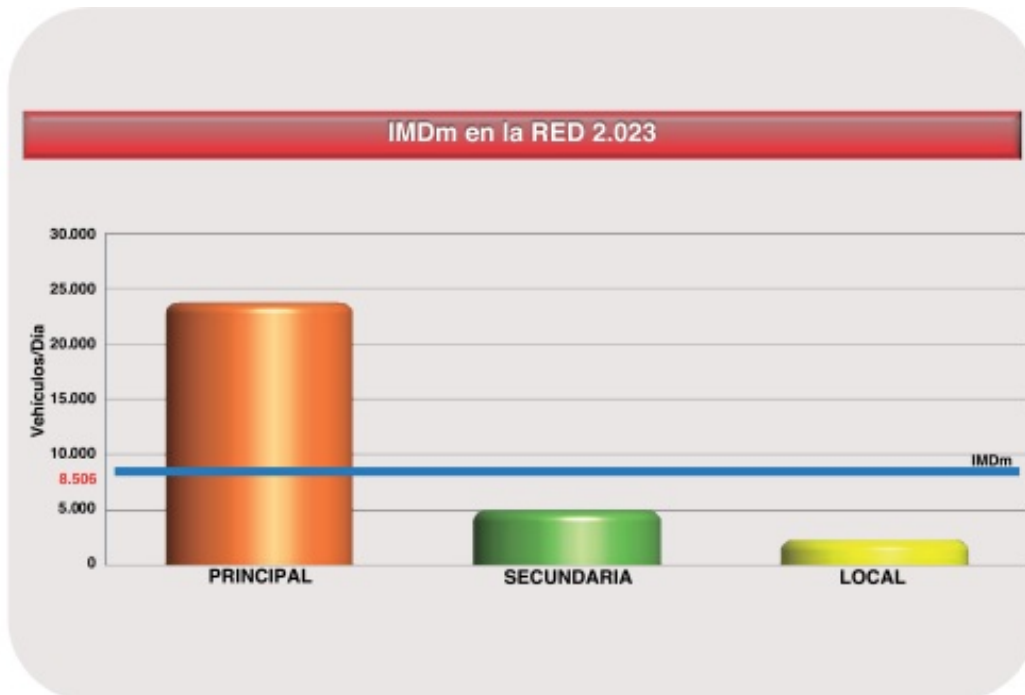


Figura 1.1: Comparativa Volumen Diario Vehículos por Tipo de Via 2023 [1]

Este elevado volumen de vehículos pone en evidencia la necesidad de contar con estrategias de reorganización y redistribución del tráfico, especialmente en situaciones donde la infraestructura vial se vea afectada por averías, mantenimiento o eventos inesperados. Un sistema de simulación eficiente permitirá evaluar en tiempo real posibles rutas alternativas para minimizar los efectos de congestión y garantizar la fluidez del tránsito.

En términos generales, este estudio no solo contribuirá al desarrollo de modelos de simulación aplicables a la gestión del tráfico, sino que también servirá como una base para futuras investigaciones en el ámbito del transporte inteligente y la optimización de infraestructuras viales.

1.1. Motivación

La elección de este tema responde a mi interés por la modelización y la optimización de sistemas complejos.

El presente trabajo tiene como objetivo profundizar en el estudio de la simulación y el análisis de sistemas dinámicos, así como en la obtención de métricas que permitan una adecuada formulación de conclusiones orientadas a la propuesta de soluciones aplicables en entornos reales. Estas soluciones buscan op-

timizar los flujos vehiculares y contribuir al desarrollo de una movilidad urbana más eficiente y sostenible.

Considero que los modelos de simulación constituyen una herramienta fundamental para la predicción del comportamiento vehicular bajo diferentes escenarios, lo que los convierte en un recurso de gran utilidad para la planificación urbana y la toma de decisiones en materia de movilidad.

1.2. **Ámbito y Alcance**

El presente Trabajo de Fin de Grado se centra en el desarrollo de un simulador del flujo vehicular, orientado al estudio del comportamiento del tráfico en presencia de incidencias dentro de la red vial. El proyecto abarca la definición formal del sistema, incluyendo variables, parámetros y reglas de evolución, así como la modelización del entorno urbano, los distintos tipos de vehículos y las características estructurales de la red.

La simulación planteada en este estudio se centrará en el entorno urbano delimitado por el cinturón vial del centro de Madrid, representado en color rojo en la figura 1.2. En particular, se analizarán flujos vehiculares en las calles de Serrano, Goya, Alcalá y Ortega y Gasset, las cuales representan ejes estructurales del tráfico urbano en la zona. Esta elección permitirá estudiar dinámicas reales en escenarios de alta densidad vehicular y evaluar el impacto de posibles incidentes o restricciones de circulación en la red.

Este estudio se enmarca en un contexto más amplio de aplicaciones relacionadas con la gestión eficiente de infraestructuras, la planificación urbana sostenible, la seguridad vial y el desarrollo de ciudades inteligentes, smart cities, [2], [3].

Para facilitar la experimentación y el análisis, se desarrollará una interfaz gráfica en Python, que permitirá configurar parámetros, visualizar el tráfico y su evolución en tiempo de ejecución y exportar resultados, sentando así una base sólida para estudios posteriores y aplicaciones en sistemas de transporte inteligentes.

Capítulo 1. Introducción

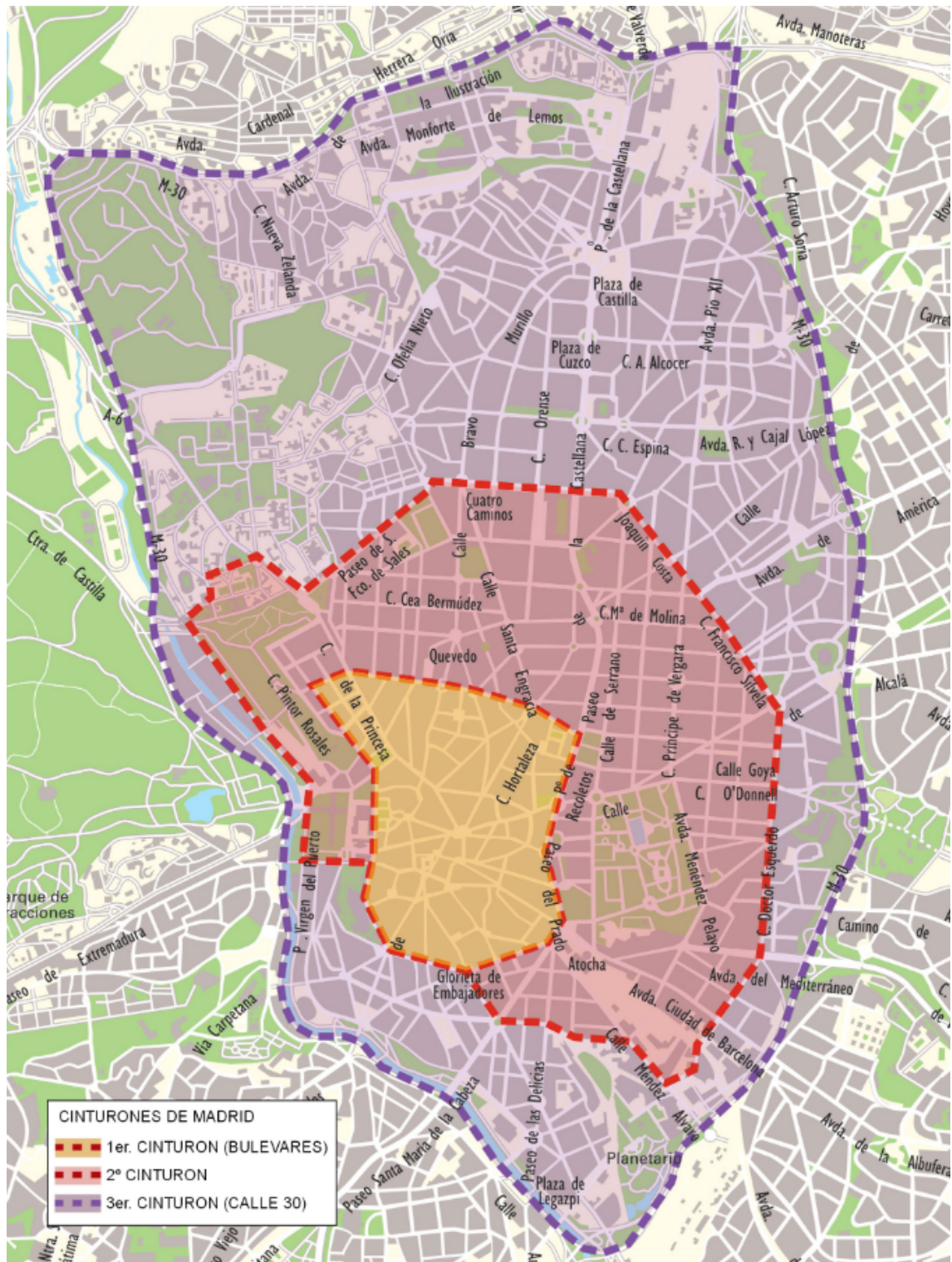


Figura 1.2: Mapa Cinturones Viales de Madrid [4]

1.3. Objetivos

El objetivo principal de este Trabajo de Fin de Grado consiste en el desarrollo de la simulación del flujo vehicular que permita analizar y comprender las alteraciones en la dinámica del tráfico bajo condiciones de inestabilidad.

Para ello, se plantea diseñar e implementar un modelo de simulación basado en eventos discretos que represente fielmente el comportamiento del sistema, permita la obtención de métricas relevantes y finalmente, facilite la interpretación de los resultados obtenidos para la posterior extracción de conclusiones aplicables a la planificación urbana y la gestión del tráfico.

1.3.1. Objetivos Específicos

- Desarrollar los modelos empírico, conceptual, matemático y computacional del sistema de tráfico.
- Diseñar y ejecutar experimentos de simulación, incluyendo el estudio de los parámetros.
- Elaboración del prototipo de simulación.
- Desarrollar una interfaz gráfica que permita la visualización y configuración dinámica del sistema simulado.
- Realizar un análisis descriptivo de los datos obtenidos mediante la simulación.

1.4. Estructura del Trabajo

El presente trabajo consta de 8 capítulos y se incluye también la bibliografía y apéndices.

- **Introducción:** Incluye la Motivación, el Ámbito y Alcance, la Estructura del Trabajo y la explicación detallada de los objetivos específicos que se pretenden alcanzar con la realización de este Trabajo de Fin de Grado.
- **Fundamentos y Estado del Arte:** Comprende la Historia de la Simulación, la Simulación en la Actualidad, los Modelos de Simulación de Eventos Discretos, las Herramientas y Software de Simulación y las Aplicaciones de la Simulación.

Capítulo 1. Introducción

- **Modelo Empírico:** Se realiza la descripción del modelo del sistema de manera detallada y exhaustiva, incluyendo las entidades, agentes, relaciones, restricciones y parámetros.
- **Modelo Conceptual:** Contiene la Definición y Descripción del Sistema y de sus componentes.
- **Modelo Matemático:** Se detallan los fundamentos teóricos empleados en la simulación, incluyendo el proceso de Poisson para modelar la llegada de vehículos y la teoría de colas para la gestión del el flujo vehicular en las intersecciones reguladas por semáforos.
- **Prototipo de Simulación:** Se presenta el Prototipo de Simulación desarrollado con el objetivo de reproducir el comportamiento y las condiciones del tráfico urbano, analizar en profundidad aspectos como el flujo vehicular y la variabilidad de los tiempos de trayecto.
- **Resultados de la Simulación:** En este capítulo se analizan los resultados obtenidos de las simulaciones del prototipo desarrollado. El objetivo principal es examinar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones a través de representaciones gráficas que permitan observar de forma clara la evolución y dinámica del flujo vehicular simulado.
- **Conclusiones:** Se lleva a cabo la extracción y documentación de los resultados de la simulación para ambos prototipos. En esta fase se incluyen la Evaluación de Objetivos, Líneas Futuras, Evaluación Personal e Impacto en los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS).

Capítulo 2

Fundamentos y Estado del Arte

2.1. Historia de la Simulación

Desde tiempos antiguos, la simulación ha sido clave para la comprensión y la toma de decisiones en sistemas complejos. Su importancia radica en la capacidad de representar, analizar y predecir el comportamiento de procesos sin la necesidad de experimentar directamente sobre el sistema real.

Los primeros indicios de simulación se enmarcan en prácticas ancestrales como el seguimiento de eventos astronómicos, el calendario de estaciones y la planificación de actividades esenciales como la caza o la recolección de alimentos [5]. Estas acciones representaban intentos rudimentarios de modelar el entorno y anticiparse a eventos naturales para mejorar la supervivencia humana [6].

Posteriormente, los ejemplos formales de simulación los encontramos en el ámbito militar, donde las civilizaciones como la romana, utilizaban juegos de guerra para entrenar a sus tropas en estrategias de combate sin arriesgar sus vidas en conflictos reales [7]. A lo largo de la historia, esta metodología evolucionó hasta convertirse en un pilar del entrenamiento militar moderno, con simulaciones avanzadas que permitían la recreación de escenarios tácticos y estratégicos en entornos virtuales [8].

Más allá del ámbito militar, la simulación ha desempeñado un papel crucial en el arte, la ingeniería y la ciencia. Durante el Renacimiento, artistas como Leonardo da Vinci [9], utilizaban modelos físicos y bocetos detallados para probar sus ideas antes de llevarlas a cabo en proyectos de arquitectura, anatomía y mecánica, tal y como se observa en la figura 2.1.

Esto permitió avances significativos en la construcción de infraestructuras y en el desarrollo de tecnologías innovadoras, como sus diseños de máquinas voladoras y sistemas hidráulicos.

Capítulo 2. Fundamentos y Estado del Arte

Con el avance de la tecnología, la simulación ha evolucionado desde modelos analógicos, en los que se usaban dispositivos físicos para imitar el comportamiento de sistemas reales, hacia simulaciones digitales, basadas en el uso de computadoras para modelar matemáticamente dichos procesos. La simulación analógica fue común hasta mediados del siglo XX, mientras que la digital ha dominado desde la aparición de los ordenadores electrónicos [10].

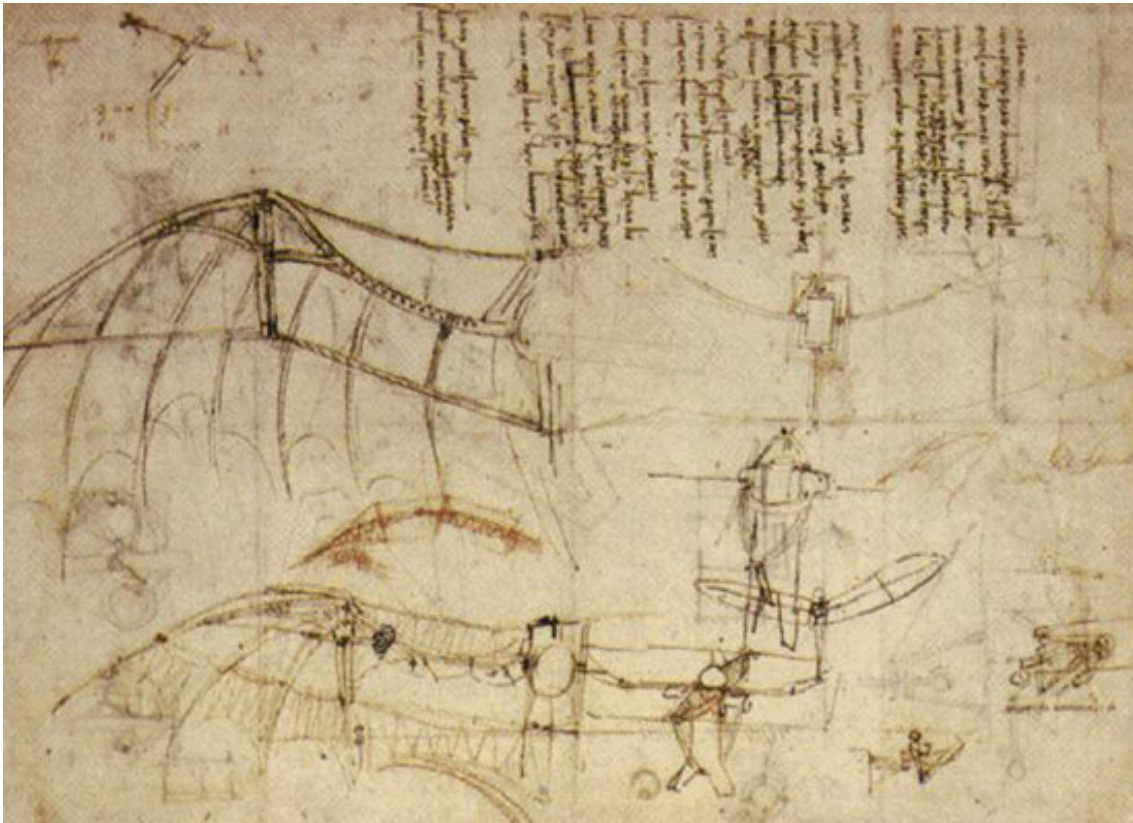


Figura 2.1: Boceto Máquina Voladora Leonardo Da Vinci [9]

En el siglo XX, con el auge de la computación, la simulación se extendió a numerosos campos, desde la ingeniería aeronáutica hasta la medicina, permitiendo probar hipótesis y desarrollar soluciones antes de su implementación en el mundo real.

Uno de los avances más representativos en este contexto fue la incorporación de simuladores clínicos computarizados en la formación médica [13]. Estos dispositivos permitieron recrear situaciones reales en entornos controlados, facilitando el aprendizaje de técnicas diagnósticas, quirúrgicas y de respuesta ante emergencias sin comprometer la seguridad de los pacientes. Esta metodología revolucionó la enseñanza en ciencias de la salud y consolidó la simulación

como una herramienta esencial para el desarrollo profesional en medicina.



Figura 2.2: Simulador Médico Computarizado para Entrenamiento Clínico [13]

2.2. Simulación en la Actualidad

En la actualidad, la simulación constituye una herramienta metodológica fundamental en el estudio y análisis de sistemas complejos en sectores tan diversos como la salud, la economía, el transporte y la inteligencia artificial.

Su uso en la modelización del tráfico, el diseño de fármacos y la predicción de fenómenos naturales ha revolucionado la forma en que se estudian los sistemas.

Gracias a los avances en la computación y en la inteligencia artificial, las simulaciones se han vuelto más precisas y accesibles, facilitando la experimentación

sin los costos o riesgos asociados con la manipulación directa del sistema real.

2.2.1. Concepto de Modelo en Simulación

Para llevar a cabo una simulación, es imprescindible el desarrollo de un modelo que permita representar el sistema de interés de manera estructurada y comprensible.

Un modelo es una representación de un evento que puede ser real, para la realización del estudio de un sistema, o creado artificialmente para la representación de un caso de uso [14].

Para producir un modelo, es necesario abstraer de la realidad una descripción de un sistema dinámico. El modelo puede representar el sistema en un nivel específico de abstracción o en múltiples niveles de abstracción, con el objetivo de representar el sistema de manera matemáticamente confiable.

Mediante la utilización de un modelo matemático o modelo simbólico, este procedimiento permite describir el comportamiento de los sistemas y estudiar fenómenos dinámicos complejos sin necesidad de experimentar con sistemas reales, con el objetivo de comprender su comportamiento, facilitando la predicción, el análisis y optimización en múltiples áreas de aplicación.

2.2.2. Subdivisión Modelos del Sistema

Un modelo de sistema puede clasificarse en determinista o estocástico. En los modelos estocásticos, al menos algunas de las variables de estado del sistema, presentan un comportamiento aleatorio. Tanto los modelos deterministas como los estocásticos pueden, a su vez, subdividirse en modelos estáticos o dinámicos, en función de si incorporan o no la evolución del sistema a lo largo del tiempo.

Modelo de Sistemas Estáticos

Un modelo de sistema estático es aquel en el que la variable tiempo, no es significativa. Este tipo de modelo puede analizarse en base a las siguientes condiciones.

1. El análisis se enfoca en la capacidad de un sistema, como un peaje, en función del número de carriles y la cantidad de vehículos que lo atraviesan.

2. Se considera un número fijo de carriles y una tasa de servicio constante por carril.
3. No se tiene en cuenta el momento exacto en el que los vehículos llegan al sistema, pues lo relevante es la tasa promedio de llegada.
4. La simulación se basa en evaluar el comportamiento promedio del sistema, sin contemplar la evolución temporal del tráfico.

Sin embargo, si quisiéramos estudiar la evolución del flujo vehicular y cómo varía la congestión a lo largo del día, entonces el modelo a utilizar sería dinámico.

Modelo de Sistemas Dinámicos

En los modelos dinámicos, la variable tiempo desempeña un papel significativo. Dentro de los modelos de simulación dinámicos, encontramos dos tipos, continuo y discreto [15, cap. 1, sec. 1.1.1].

La mayoría de los sistemas dinámicos tradicionales estudiados en la mecánica clásica, tienen variables de estado que evolucionan de manera continua [16]. Ejemplos de estos incluyen una partícula en un campo gravitacional, un péndulo oscilante o un bloque deslizándose sobre un plano inclinado. En cada uno de estos casos, el movimiento está caracterizado por una o más ecuaciones diferenciales que modelan la evolución continua del sistema en el tiempo. Lo observamos en la siguiente gráfica 2.3.

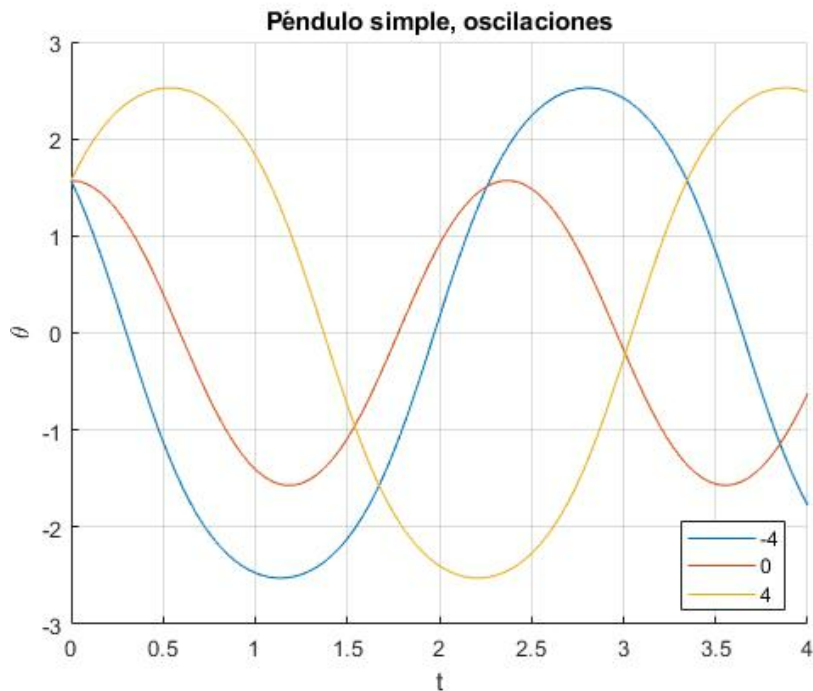


Figura 2.3: Evolución Oscilaciones Péndulo Simple [17]

En contraste, los sistemas de colas, como es el caso de la representación de los flujos dinámicos de tráfico, son de carácter discreto [18]. Este modelo representa el sistema de tráfico como una secuencia de eventos, donde los cambios significativos en las variables de estado del sistema, están asociados con eventos que ocurren en instantes de tiempo discretos, lo que permite el estudio de la evolución del sistema a lo largo del tiempo [15, cap. 1, sec. 1.1.1].

Caracterización Modelos de Sistema

La caracterización de un modelo de sistema puede representarse de manera esquemática mediante un diagrama de árbol, el cual parte del concepto general de modelo de sistema como nodo raíz y se ramifica progresivamente a través de niveles de clasificación. En cada nivel, se bifurca hacia distintas tipologías según sus propiedades deterministas o estocásticas, su comportamiento estático o dinámico, y en el caso de este último, finalmente según su evolución continua o discreta en el tiempo, como se muestra en la figura 2.4.

2.3. Modelo de Simulación de Eventos Discretos

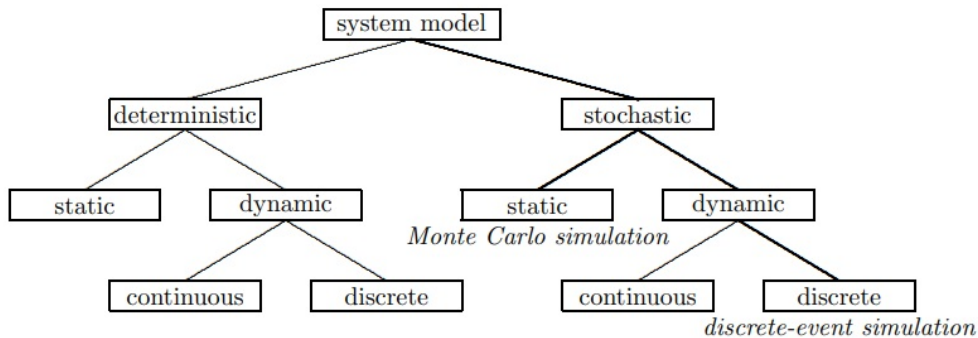


Figura 2.4: Clasificación Modelos de Simulación [15]

2.3. Modelo de Simulación de Eventos Discretos

En el caso de estudio que nos ocupa, se utilizará un modelo de simulación basado en eventos discretos (DES) para la representación de flujos dinámicos de tráfico. Este modelo representa el sistema de tráfico como una secuencia de eventos. Los eventos son ocurrencias instantáneas que pueden provocar cambios en el estado del sistema, el cual se define mediante una o más variables que lo describen completamente en un momento dado. Estas variables se denominan variables de estado.

2.4. Herramientas y Software de Simulación

La historia de la simulación de eventos discretos ha estado marcada por avances en lenguajes de programación especializados en modelado y simulación. En los años 50 y 60, los primeros lenguajes como GPSS [19] y SIMSCRIPT [20], fueron diseñados específicamente para la simulación de sistemas de colas y eventos discretos. En décadas posteriores, lenguajes como SLAM [21] y SIMAN [22], introdujeron capacidades más avanzadas para modelar diferentes tipos de sistemas.

Hoy en día, existen diversas herramientas especializadas en simulación de eventos discretos para modelar redes de tráfico, entre las que destacan las siguientes.

- **SUMO, Simulation of Urban Mobility.** Plataforma de simulación de tráfico a gran escala utilizada en planificación urbana y sistemas inteligentes de transporte [23].

- **AIMSUN.** Software para modelado y simulación de tráfico en entornos urbanos y redes viales complejas [24].
- **VISSIM.** Herramienta de simulación microscópica que permite modelar el comportamiento individual de los vehículos y peatones [25].
- **SimPy en Python y Simmer en R.** Bibliotecas de código abierto para la implementación de simulaciones DES personalizadas [26], [27].

2.5. Aplicaciones de la Simulación

La simulación tiene una amplia variedad de aplicaciones en distintos campos del conocimiento proporcionando herramientas fundamentales para el análisis, la experimentación y la formación [15], [28]. A continuación, se presentan seis áreas en las que la simulación ha demostrado ser una herramienta imprescindible.

1. **Transporte y Tráfico.** La simulación es ampliamente utilizada en la planificación y gestión del tráfico urbano. Permite evaluar el impacto de cambios en la infraestructura [23], [24].

Existen dos tipos de simulaciones:

- *A Nivel Macroscópico*, analizan redes completas de carreteras y sistemas de transporte público.
- *A Nivel Microscópico*, modelan el comportamiento individual de los vehículos. [25].

Gracias a estos modelos, es posible prever atascos, optimizar rutas y mejorar la eficiencia del tránsito en áreas urbanas y regionales. Dada la suma importancia, el presente estudio versa sobre esta aplicación.

2. **Toma de Decisiones en el Ámbito Empresarial.** En el ámbito empresarial, la simulación se emplea para la toma de decisiones estratégicas y la optimización de procesos. Las herramientas de modelado permiten analizar cadenas de suministro y mejorar la asignación de recursos [29].

Además, se han desarrollado simulaciones de juegos de negocio que ayudan a los líderes y gerentes empresariales a desarrollar habilidades para la toma de decisiones en situaciones complejas y competitivas [14].

3. **Medicina y Ciencias de la Salud.** La simulación juega un papel crucial en la medicina, tanto en la formación de profesionales de la salud como en la

investigación y desarrollo de nuevos tratamientos [13].

Se utilizan modelos de simulación en cirugías virtuales para que los médicos practiquen procedimientos antes de realizarlos en pacientes reales [13], [15].

Igualmente, en la investigación médica se emplean simulaciones para evaluar el comportamiento de fármacos en el cuerpo humano y para estudiar la propagación de enfermedades infecciosas, ayudando a diseñar estrategias de prevención y control [29].

4. **Educación y Formación.** La simulación también ha revolucionado el ámbito educativo al proporcionar entornos de aprendizaje interactivos y dinámicos [29].

Se han desarrollado herramientas de simulación para enseñar conceptos complejos en áreas como la física, la biología y la ingeniería. El aprendizaje basado en juegos y simulaciones permite a los estudiantes desarrollar habilidades prácticas en un entorno controlado, preparándolos para enfrentar desafíos del mundo real en sus respectivas disciplinas [2].

5. **Simulación del Tráfico Urbano y Sistemas de Transporte.** Este Trabajo de Fin de Grado se enmarca dentro de la simulación del tráfico urbano, una aplicación ampliamente extendida de los modelos de eventos discretos. Estos sistemas permiten representar el comportamiento dinámico de vehículos y peatones en entornos urbanos, analizar cuellos de botella, evaluar medidas de regulación del tráfico y optimizar la gestión de infraestructuras viales [23]-[25].

Más allá del tráfico urbano, la simulación se ha aplicado también a otros dominios como el transporte interurbano, autopistas, redes ferroviarias, sistemas marítimos y aéreos, así como a flujos de personas, cadenas de suministro y redes de telecomunicaciones [2], [29].

La flexibilidad de los modelos de simulación hace posible abordar problemas complejos de movilidad y planificación urbana, como los tratados en este proyecto, utilizando herramientas modernas de simulación discreta, interfaces gráficas y procesamiento de datos en tiempo real.

Capítulo 3

Modelo Empírico

El modelo empírico se basa en la observación directa de la realidad para la obtención de conocimiento y se fundamenta mediante la formulación de hipótesis que posteriormente, mediante experimentación, serán sometidas a prueba.

En este marco, el desarrollo de un modelo empírico requiere de una fase inicial de exploración e investigación que permita identificar los aspectos relevantes del sistema, establecer relaciones entre variables, y definir las reglas de comportamiento que guiarán la evolución del modelo.

El sistema objeto de estudio que se va a simular y que pretende ser una aproximación representativa de una red vial urbana, está compuesto por nodos, los cuales representan las intersecciones, semáforos o puntos de decisión y las aristas, que modelan las vías de transporte.

3.1. Localización de las Vías Urbanas a Simular

En la figura 3.1, se observa que las vías urbanas a simular se corresponden con las arterias principales del centro de la ciudad de Madrid.

En la figura 3.2, se observa una vista aérea de la calle Ortega y Gasset, eje estructural clave dentro del modelo vial simulado. Esta representación permite contextualizar visualmente la configuración urbana y justificar su selección como uno de los tramos críticos para analizar la congestión y el comportamiento del tráfico en condiciones de inestabilidad.

Capítulo 3. Modelo Empírico

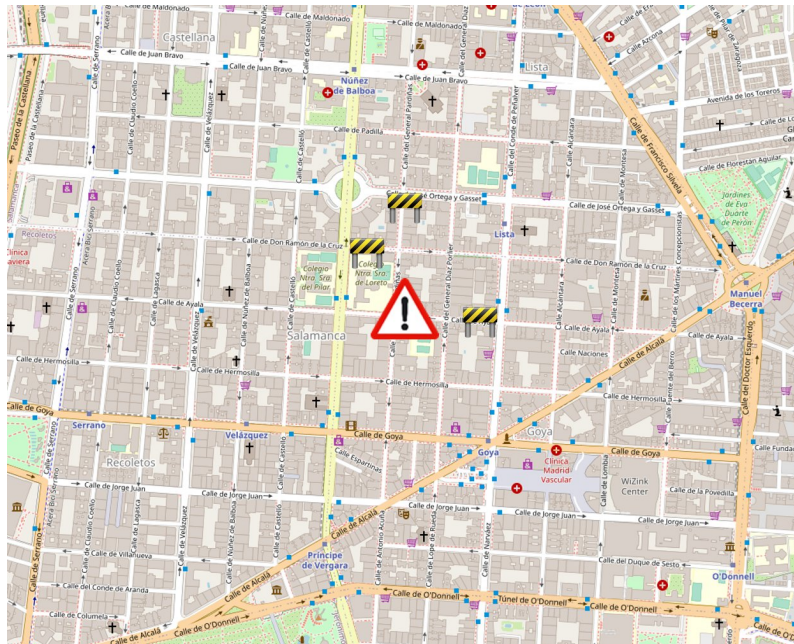


Figura 3.1: Mapa Redes Viales Centro Madrid. Google Maps.



Figura 3.2: Vista Aérea de Calle Ortega y Gasset. Google Maps.

Vamos a llevar a cabo una descripción pormenorizada de los diferentes componentes que formarán parte de nuestra red vial.

3.2. Variables del Sistema

Sobre esta infraestructura circulan los vehículos. Son elementos activos con diferentes atributos relevantes que vamos a tener en cuenta, como son *el número, la velocidad, la posición o el tiempo de ejecución*.

1. **Número de Vehículos.** Es la variable más relevante del sistema a simular. Irá variando conforme avance la simulación dado que si finalizan su trayecto, abandonarán la red.
2. **Velocidad.** Se trata de una variable dinámica que evoluciona a lo largo del tiempo si por ejemplo, un semáforo cambia de color o se producen atascos.
3. **Dirección y Sentido del Vehículo.** Es la posición en la que un vehículo se encuentra y varía a lo largo de la simulación.
4. **Tiempo de Ejecución.** Es el tiempo asociado a cada vehículo e indica el tiempo que se encuentra en la red hasta que finaliza su trayecto.

3.3. Estado del Sistema

El estado del sistema en un instante dado, se representa mediante un vector que recoge el valor de múltiples variables dinámicas pertenecientes a todos los subsistemas que conforman la red vial. Este estado incluye la posición, velocidad y tiempo de viaje de cada vehículo en circulación, así como el color y fase de cada semáforo, la configuración y estado de las vías, ocupación, sentido, densidad, y otras condiciones relevantes como la hora del día o la meteorología. Esta representación completa permite una simulación realista y detallada del comportamiento del tráfico urbano en condiciones variables.

3.4. Eventos

Los tipos de eventos que se pueden dar en nuestro sistema se pueden corresponder con una llegada, *arrival*, con un *cambio*, cambio de dirección, o una *intersección*, relacionado con los puntos de cruce.

También pueden estar presentes los atascos, las congestiones y los eventos de carácter impredecible e inesperados. Igualmente los que hayan sido planificados con anterioridad. Es decir, aquellos aleatorios o deterministas.

3.5. Parámetros del Sistema

Estos se mantienen constantes y por tanto, no dependen del tiempo de simulación. No obstante, en la interfaz gráfica se podrán modificar estos parámetros antes de que comience la simulación.

Son aquellas magnitudes que se mantienen constantes durante la simulación y que definen el entorno estructural y contextual del modelo. Entre ellos se encuentran la configuración de carriles, la duración de las fases semafóricas y la topología de la red vial. Además, también podemos considerar las condiciones meteorológicas, lluvia o viento, el horario del día, y la presencia de incidencias como averías o accidentes.

3.6. Variables de Entrada

Las variables de entrada son aquellas que se muestran al inicio de la simulación y que van variando conforme avanza el tiempo. Se enumeran a continuación.

1. **Número de Vehículos.** Es la cantidad total de vehículos simulados.
2. **Tipo de Vehículo.** Cada vehículo es aleatoriamente clasificado como turismo, moto, furgoneta o autobús.
3. **Tiempo Total de Simulación.** Periodo sobre el cuál se genera el comportamiento del flujo vehicular.
4. **Tramos Urbanos y Direcciones.** La simulación se desarrolla sobre cinco tramos del centro de Madrid, incluyendo las siguientes calles, Serrano, Velázquez, Goya, Ortega y Gasset, Ayala y Alcalá. Representan las calles de entrada y salida asociadas al recorrido del vehículo así como la dirección de circulación.
5. **Tipo de Evento y Velocidad.** Mencionados anteriormente.

Tras esta primera aproximación, el siguiente paso consiste en la conversión del modelo empírico en el modelo conceptual.

Capítulo 4

Modelo Conceptual

El modelo conceptual es la representación abstracta, estructurada y detallada del sistema que se desea simular. Constituye la base lógica del modelo computacional que se implementará posteriormente, y su función es identificar los elementos fundamentales del sistema, sus relaciones, restricciones y comportamientos dinámicos.

El modelo conceptual se construye bajo un paradigma orientado a procesos en el que cada entidad, vehículo, sigue un trayecto definido por una secuencia de eventos discretos que describen su paso por la red y que se representan mediante esperas en intersecciones o semáforos, desplazamientos o decisiones de rutas alternativas. Estos eventos son gestionados por el sistema de simulación en función de la disponibilidad de los recursos y las condiciones del tráfico en tiempo simulado.

4.1. Definición y Estructura del Sistema

La modelización y la simulación constituyen técnicas complementarias que se utilizan para predecir y optimizar el comportamiento de sistemas complejos. Este modelo parte de la necesidad de simplificar la realidad y abstraerla manteniendo su fidelidad a los aspectos más relevantes para el fenómeno en estudio. Así se construye una representación del sistema que sea, al mismo tiempo, comprensible, computacionalmente viable y suficientemente precisa para generar inferencias válidas.

La estructura del sistema consta de los siguientes elementos [14]

1. **Sistema.** Un sistema es una construcción o colección de diferentes elementos que juntos producen resultados que no pueden obtenerse por sí solos.
2. **Estado del Sistema.** Incluye información sobre todas las variables y parámetros que son relevantes en el sistema.
3. **Variables del Sistema.** Son aquellas magnitudes que describen el sistema y que varían a medida que avanza la simulación.

Capítulo 4. Modelo Conceptual

4. **Parámetros del Sistema.** Son aquellas magnitudes que describen el sistema y que se mantienen constantes a medida que avanza la simulación.
5. **Eventos.** Son aquellas acciones o sucesos que afectan al estado del sistema en un momento determinado. Pueden ser eventos que hayan sido planificados con anterioridad para que sucedan en un momento determinado o aleatorios.
6. **Restricciones.** Son las condiciones o limitaciones que afectan al comportamiento del sistema y su evolución. Estas restricciones pueden estar asociadas con prioridades en la ejecución de eventos, políticas de control o rangos de uso de ciertos recursos. Asimismo, se consideran restricciones relacionadas con los recursos disponibles, el tiempo, el espacio, la energía o los materiales.

4.1.1. Primera Aproximación del Sistema

Una primera aproximación del sistema, que es el que se implementará y desarrollará en los próximos capítulos, es la representación que se muestra en la figura 4.1. En ésta, se representan las intersecciones reguladas por semáforos, los vehículos en circulación, y la infraestructura vial.

Esta imagen ilustra los principales componentes estructurales del sistema. El estado se refleja en el color de los semáforos en un instante dado. Las variables del sistema, como la velocidad o el número de vehículos que se mantienen en la red, evolucionan conforme se desarrolla la simulación. Los parámetros del sistema, como la configuración de carriles o la duración de las fases semafóricas, permanecen constantes durante cada ejecución de simulación.

Por último, los eventos como la llegada de un vehículo a una intersección o el cambio de luz del semáforo, se producen en momentos discretos y alteran la dinámica del flujo vehicular.

4.1. Definición y Estructura del Sistema

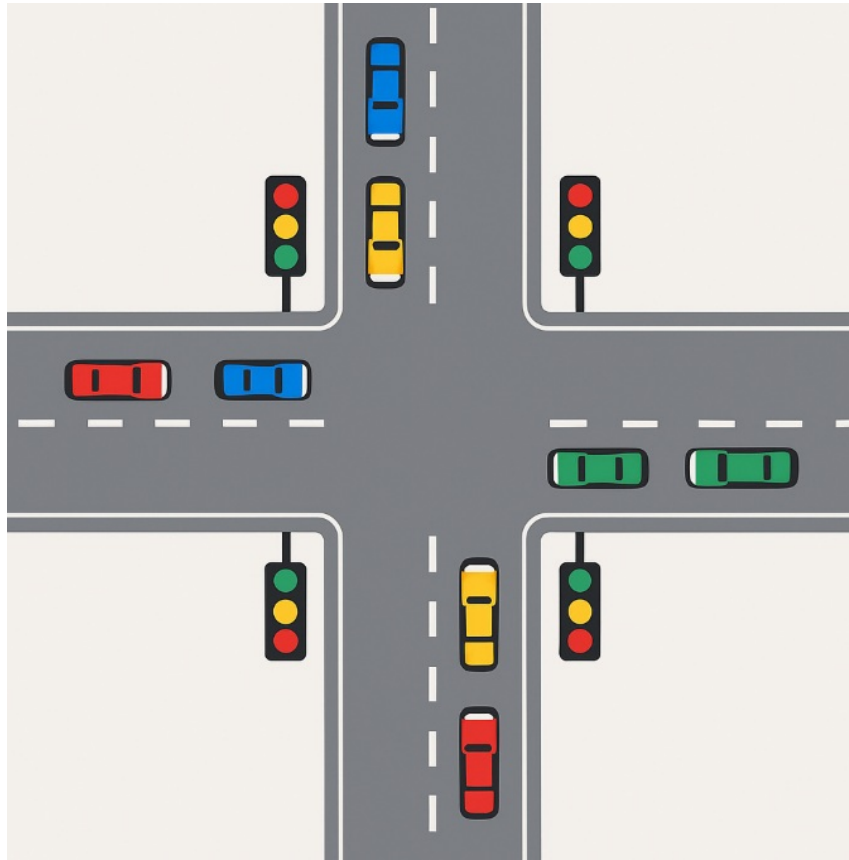


Figura 4.1: Aproximación de Disposición Tráfico. Elaboración Propia.

El modelo conceptual actúa como un puente entre la descripción en base a la observación directa del sistema, modelo empírico, y su implementación computacional 6.

Este modelo computacional constituye la implementación programada del sistema mediante estructuras de datos y algoritmos que replican el funcionamiento definido en los modelos empírico y conceptual, basándose también en la formalización y desarrollo del modelo matemático del sistema,

A través del modelo computacional, se puede estructurar y desarrollar la simulación de eventos discretos, gestionar la evolución del sistema en el tiempo y observar el comportamiento emergente del tráfico bajo condiciones controladas.

La creación de este modelo permite la conversión del modelo de especificación en una representación funcional en código, 4.2, permitiendo la interacción de los elementos del sistema.

Una vez desarrollado, mediante la ejecución de experimentos de simulación, llevaremos a cabo recogida de métricas tales como número de vehículos finalizados

Capítulo 4. Modelo Conceptual

y otras variables de estado relevantes.

Con ello quedaría definida la base operativa del sistema que permite, verificar y validar los resultados obtenidos, y si estos son concordantes con los requisitos estipulados.

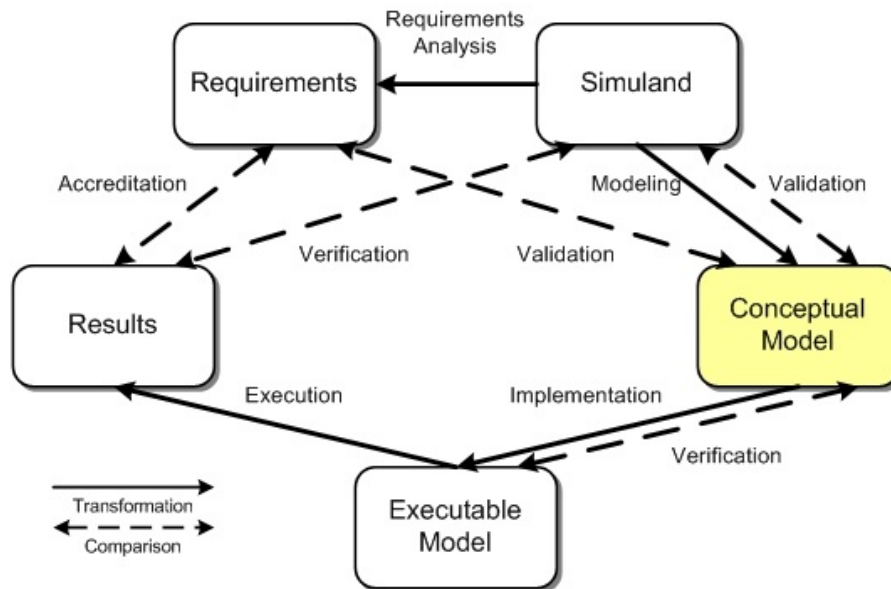


Figura 4.2: Proceso Desarrollo Modelo Conceptual [29]

Capítulo 5

Modelo Matemático

El modelo matemático del presente trabajo está basado en la teoría de colas y en procesos estocásticos, concretamente el proceso de Poisson y la distribución exponencial. Este marco teórico permite modelar con precisión la dinámica de llegada de vehículos, su permanencia en el sistema y el comportamiento en las intersecciones.

La simulación se implementa como un modelo de eventos discretos, en el que el estado del sistema solo cambia en instantes específicos de tiempo, coincidiendo con eventos como la llegada de un vehículo, el cambio de un semáforo o el abandono del sistema.

5.1. Proceso de Poisson para Llegadas de Vehículos

Está caracterizado como un modelo de tiempo continuo en el que los tiempos entre eventos, siguen una distribución exponencial. Aunque la simulación desarrollada en este trabajo se basa en eventos discretos, se hace uso del proceso de Poisson como generador de llegadas al sistema, traduciendo sus resultados a una secuencia de eventos programados en instantes de tiempo discretos y se asume que,

- Las llegadas de vehículos son independientes entre sí.
- La probabilidad de que ocurra una llegada en un intervalo de tiempo pequeño Δt es proporcional a la longitud de ese intervalo.
- La tasa media de llegada de vehículos por tipo está dada por un parámetro λ_i , para cada tipo $i \in \{\text{moto, coche, furgoneta, autobús}\}$.

El número de llegadas $N(t)$ en un intervalo de tiempo t sigue una distribución de Poisson.

$$P(N(t) = k) = \frac{(\lambda t)^k e^{-\lambda t}}{k!}$$

donde:

Capítulo 5. Modelo Matemático

- λ es la tasa total de llegada de vehículos al sistema expresada en vehículos por segundo.
- k es el número de vehículos que llegan en el tiempo t , expresado también en segundos.

Cada tipo de vehículo se elige con una probabilidad proporcional a su tasa de llegada λ_i , tal y como se define en el diccionario `ARRIVAL_RATES` del simulador:

```
ARRIVAL_RATES = {  
    'moto': 0.05,  
    'coche': 0.1,  
    'furgoneta': 0.02,  
    'autobús': 0.01  
}
```

Por tanto, la probabilidad de que el siguiente vehículo generado sea un coche es:

$$P(\text{coche}) = \frac{\lambda_{\text{coche}}}{\sum_i \lambda_i} = \frac{0,1}{0,05 + 0,1 + 0,02 + 0,01} = \frac{0,1}{0,18} \approx 55,5 \%$$

Esto implica que, en promedio, más de la mitad de los vehículos que entran al sistema serán coches, seguidos por motos, furgonetas y autobuses según sus respectivas tasas.

5.2. Teoría de Colas en Intersecciones

Una vez que los vehículos ingresan en el sistema, cuando ya se ha iniciado la simulación, deben atravesar intersecciones que pueden generar esperas. Estas intersecciones se modelan como sistemas de colas, donde los vehículos esperan su turno para avanzar, dependiendo del estado del semáforo.

La figura 5.1, ilustra una intersección modelada como un sistema de colas, donde se representan los carriles de entrada, L1 a L4, los semáforos que regulan el paso, T1 a T4, y las trayectorias de cruce dentro del nodo. Esta estructura permite analizar las dinámicas de espera y servicio que surgen en cada dirección según el estado del semáforo y la llegada de vehículos.

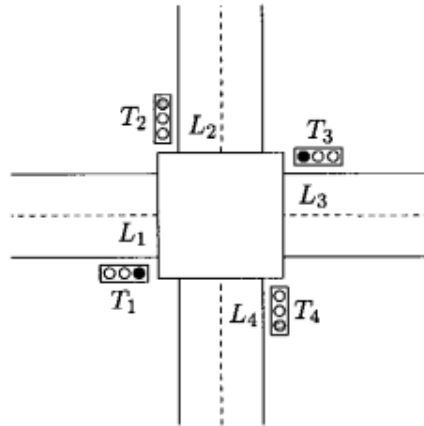


Figura 5.1: Intersección Modelada como Sistema de Colas. [40]

Este comportamiento puede representarse mediante modelos clásicos de la teoría de colas, como el sistema $M/M/1$ o $M/M/c$, donde:

- M indica que las llegadas al sistema, siguen una distribución de Poisson.
- M indica que los tiempos de servicio siguen una distribución exponencial, lo que en este contexto, representa el tiempo que un vehículo ocupa la vía hasta que puede avanzar.
- 1 o c representa el número de servidores, en este caso, número de carriles habilitados para avanzar en una determinada fase del semáforo.

5.2.1. Parámetros del Sistema de Colas

- λ : Tasa media de llegada de vehículos, vehículos por segundo.
- μ : Tasa media de servicio, vehículos que pueden pasar por segundo.
- c : Número de carriles habilitados en la intersección.
- $\rho = \frac{\lambda}{c\mu}$: Factor de utilización del sistema.

El modelo es estable si $\rho < 1$, es decir, si el sistema puede atender en promedio a más vehículos de los que llegan.

5.2.2. Representación de Parámetros del Sistema

Estos parámetros se evidencian en la siguiente representación 5.2 esquemática de un sistema de colas en una intersección regulada por un semáforo. Los vehículos, λ , representan la tasa de los que llegan al sistema y se acumulan

Capítulo 5. Modelo Matemático

esperando hasta que el semáforo cambia de estado, formando una cola. El semáforo actúa como servidor, regulando el flujo de salida y permitiendo el paso de los vehículos con una tasa de servicio μ , que es la velocidad a la que los vehículos pueden abandonar el sistema, cruzar la intersección, cuando tienen el semáforo en verde.

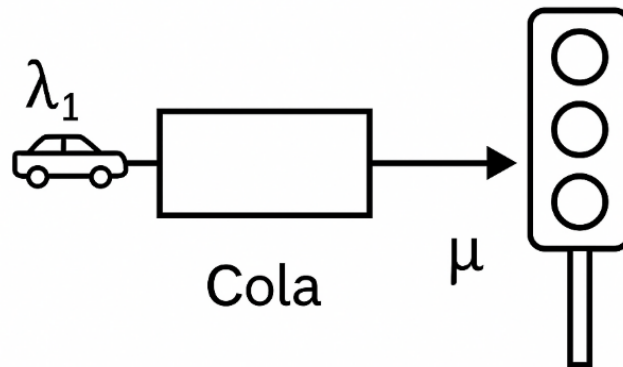


Figura 5.2: Sistema de Colas en Intersección. Elaboración Propia.

Cabe destacar que el sistema de colas adoptado en las intersecciones reguladas por semáforos sigue una política de servicio de tipo FIFO, First-In, First-Out, ya que los vehículos cruzan la intersección en el mismo orden en que llegaron, sin posibilidad de adelantar ni reorganizar la cola.

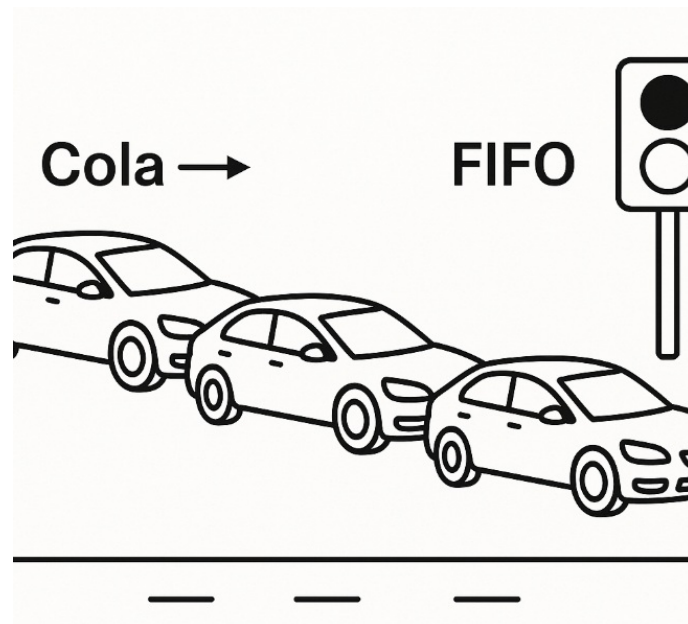


Figura 5.3: Teoría de Colas FIFO. Elaboración Propia.

5.3. Representación Formal del Estado del Sistema

5.2.3. Métricas Derivadas del Modelo $M/M/1$

Para el caso que nos ocupa, tenemos una simulación de un único carril por sentido en cada calle, lo que en términos de teoría de colas se modela como un sistema en el que cada calle, se comporta como un único servidor.

- Tiempo medio en el sistema,

$$W = \frac{1}{\mu - \lambda}$$

- Longitud media de la cola,

$$L_q = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)}$$

- Tiempo medio de espera en cola,

$$W_q = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)}$$

En simulaciones más complejas, el modelo puede extenderse a $M/M/c$ para reflejar múltiples carriles en paralelo. La formulación matemática anterior permite analizar el rendimiento esperado bajo ciertas tasas de llegada y servicio.

5.3. Representación Formal del Estado del Sistema

Formalmente, el estado del sistema en un instante de tiempo t se puede representar mediante un conjunto de variables de estado.

$$S(t) = \{V_1(t), V_2(t), \dots, V_n(t), T(t)\}$$

- $V_i(t)$ representa el estado del vehículo i en el instante t , e incluye los siguientes elementos.
 - Tipo de Vehículo.
 - Dirección y Sentido en la Red Vial.
 - Velocidad.
 - Tiempo de Entrada.
 - Estado, en circulación, finalizado. Si ha finalizado, aparece el

tiempo de salida y si está en circulación, aparece en la interfaz gráfica N/A.

- $T(t)$ representa el estado de todos los semáforos en el sistema, cada uno con su color actual (rojo, verde, ámbar) y tiempo restante para cambiar de fase.

Esta representación permite una gestión eficiente del sistema en cada paso de simulación, ya que los cambios de estado ocurren únicamente cuando se ejecutan eventos definidos en la cola de prioridad.

5.4. Gestión de Eventos

El motor de simulación implementa una estructura de planificación de eventos mediante una cola de prioridad, donde cada evento está asociado a un instante de tiempo futuro. Esta cola está ordenada cronológicamente para garantizar que los eventos se ejecuten en el orden correcto.

Cada evento se modela como una tupla:

$$E = (\text{tiempo}, \text{tipo}, \text{datos})$$

- **Tiempo:** Instante en el que debe ejecutarse el evento.
- **Tipo:** Puede ser `arrival`, `change`, `intersection` o `exit`.
- **Datos:** Diccionario con información específica del evento, como el tipo de vehículo, calle de entrada o dirección de circulación.

Los eventos se insertan en la cola utilizando la biblioteca `heapq`, que garantiza una complejidad eficiente en la gestión temporal.

Ejemplo de Evento de Llegada

```
Event(t, 'arrival', {'type': 'coche', 'street': 'Serrano',  
                    'dir': 'NS'})
```

Este evento representa la llegada de un coche a la calle Serrano en dirección norte-sur, en el instante t .

Durante la simulación, el motor extrae el evento con menor tiempo de la cola y actualiza el estado del sistema.

Capítulo 6

Prototipo de Simulación

En este capítulo se presenta el prototipo de simulación desarrollado para este Trabajo de Fin de Grado. El modelo ha sido diseñado con el objetivo de reproducir el comportamiento y las condiciones del tráfico urbano, analizar en profundidad aspectos como el flujo vehicular y la variabilidad de los tiempos de trayecto.

6.1. Supuestos del Modelo

- **Un Solo Carril por Sentido:** Cada vía cuenta con un único carril por dirección, lo cual implica que no existen maniobras de adelantamiento ni carriles adicionales de giro.
- **Llegadas de Vehículos Independientes:** La llegada de vehículos se modela como un proceso de Poisson, lo que implica que las llegadas son aleatorias e independientes entre sí.
- **Tiempos de Servicio Exponenciales:** El tiempo que tarda un vehículo en atravesar una intersección, una vez que puede avanzar, sigue una distribución exponencial con una tasa media constante.

6.2. Ejemplo de Ejecución

Al ejecutar el programa principal `main.py`, se inicia la simulación y se abre la ventana principal del simulador 6.1. Para ello, se debe ejecutar el siguiente comando `python main.py`.

Capítulo 6. Prototipo de Simulación

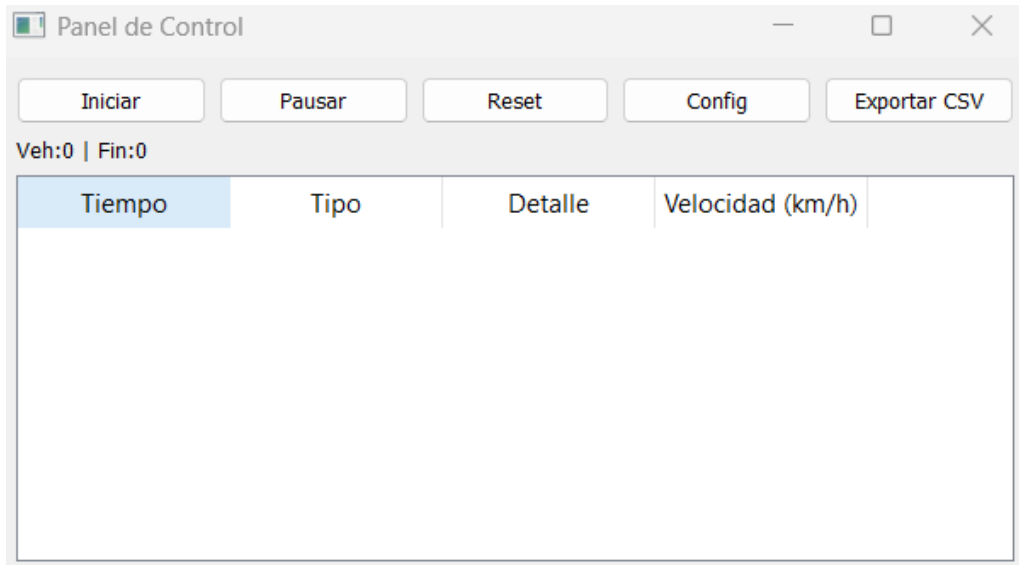


Figura 6.1: Ventana del Simulador.

Una vez lanzado el simulador 6.1, se muestra la interfaz gráfica desde la cual se puede iniciar, pausar o reiniciar la simulación, así como exportar los resultados.

Asimismo, con el botón **Config** es posible acceder a una ventana de Configuración 6.2, donde se pueden modificar parámetros globales como el tiempo de simulación, el número de carriles y elegir si visualizar el mapa en tiempo real mientras se ejecuta la simulación o no.

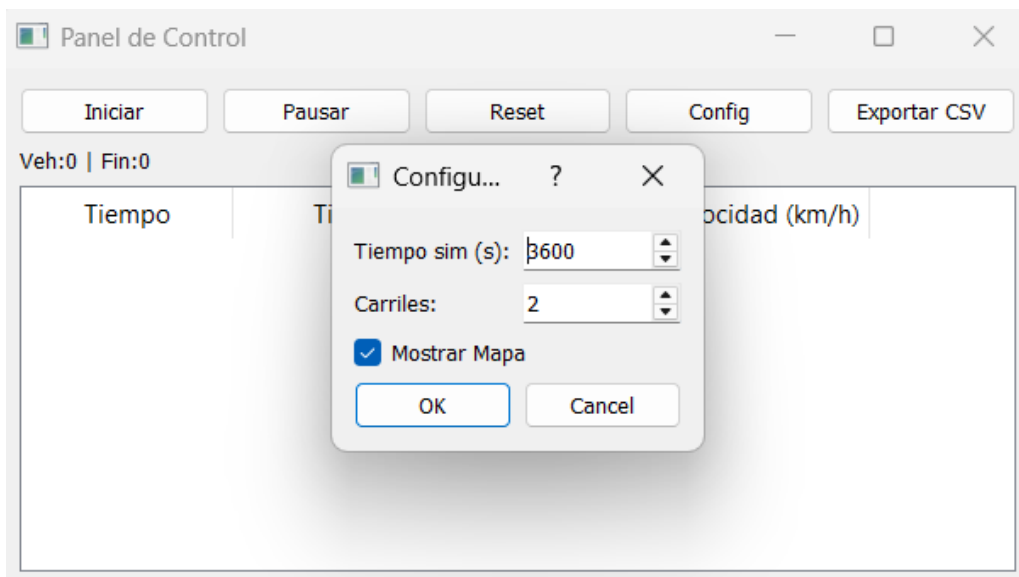


Figura 6.2: Ventana del Simulador con Config.

6.2. Ejemplo de Ejecución

Una vez hemos establecido los parámetros que se muestran en la figura superior, iniciamos la simulación.

La ventana principal del simulador, muestra un panel de control con información detallada sobre los eventos que se producen durante la ejecución.

En el panel de control 6.3, se registra el momento en que ocurre cada evento, el tipo de evento, una descripción que incluye el tipo de vehículo, la calle de entrada y de salida implicadas y la dirección de circulación, así como la velocidad en kilómetros por hora.

Esta información permite llevar un seguimiento detallado del desarrollo de la simulación y resulta útil para la posterior extracción de métricas y formulación de hipótesis que faciliten el análisis del comportamiento del sistema.

Veh:440 Fin:30 Iteraciones:545				
	Tiempo	Tipo	Detalle	Velocidad (km/h)
1	301.4	arrival	{'type': 'coche', 'street': 'Alcalá_Alcalá_Alcalá', 'dir': 'EW'}	43.2
2	301.9	arrival	{'type': 'moto', 'street': 'Ayala_Ayala_Ayala', 'dir': 'EW'}	54.0
3	302.2	arrival	{'type': 'coche', 'street': 'Ortega y Gasset_Ortega_Ortega', 'dir': 'EW'}	43.2
4	303.3	arrival	{'type': 'moto', 'street': 'Serrano_Goya_Alcalá', 'dir': 'NS'}	54.0
5	303.7	arrival	{'type': 'moto', 'street': 'Serrano_Ayala_Goya', 'dir': 'NS'}	54.0
6	304.5	arrival	{'type': 'coche', 'street': 'Serrano_Serrano_Ortega', 'dir': 'NS'}	43.2
7	305.8	arrival	{'type': 'coche', 'street': 'Serrano_Ortega_Ayala', 'dir': 'NS'}	43.2
8	305.8	arrival	{'type': 'coche', 'street': 'Ayala_Ayala_Ayala', 'dir': 'EW'}	43.2
9	306.0	arrival	{'type': 'moto', 'street': 'Goya_Goya_Goya', 'dir': 'EW'}	54.0
10	307.1	arrival	{'type': 'coche', 'street': 'Serrano_Goya_Alcalá', 'dir': 'NS'}	43.2
11	308.1	arrival	{'type': 'autocar', 'street': 'Serrano_Ayala_Goya', 'dir': 'NS'}	28.8
12	308.4	arrival	{'type': 'coche', 'street': 'Serrano_Ayala_Goya', 'dir': 'NS'}	43.2
13	310.0	arrival	{'type': 'coche', 'street': 'Goya_Goya_Goya', 'dir': 'EW'}	43.2
14	310.1	arrival	{'type': 'moto', 'street': 'Ortega y Gasset_Ortega_Ortega', 'dir': 'EW'}	54.0
15	311.4	arrival	{'type': 'furgoneta', 'street': 'Serrano_Goya_Alcalá', 'dir': 'NS'}	36.0
16	323.0	arrival	{'type': 'furgoneta', 'street': 'Serrano_Serrano_Ortega', 'dir': 'NS'}	36.0
17	323.3	arrival	{'type': 'furgoneta', 'street': 'Goya_Goya_Goya', 'dir': 'EW'}	36.0
18	323.7	arrival	{'type': 'furgoneta', 'street': 'Serrano_Ortega_Ayala', 'dir': 'NS'}	36.0
19	324.0	arrival	{'type': 'moto', 'street': 'Alcalá_Alcalá_Alcalá', 'dir': 'EW'}	54.0
20	329.2	arrival	{'type': 'moto', 'street': 'Serrano_Ortega_Ayala', 'dir': 'NS'}	54.0
21	330	cambio	{'intersection': 'Serrano'}	-
22	330	cambio	{'intersection': 'Alcalá'}	-
23	330	cambio	{'intersection': 'Ortega'}	-
24	330	cambio	{'intersection': 'Ayala'}	-

Figura 6.3: Panel de Control con Registro de Eventos.

Los parámetros asociados a cada vehículo son los que se muestran a continuación.

- **Tiempo de Ejecución:** Instante en que ocurre un evento dentro del escenario simulado.

Capítulo 6. Prototipo de Simulación

- **Tipo de Evento:** Se puede corresponder con una *arrival*, llegada de un vehículo, un *cambio*, cambio del estado de un semáforo o con una *intersección*, relacionado con los puntos de cruce.
- **Tipo de Vehículo:** Se indica el tipo de vehículo involucrado en el evento. Las posibles categorías son *moto*, *coche*, *furgoneta* o *autobús*.
- **Origen y Destino:** Representan los nombres de las calles de entrada y de salida asociadas al recorrido del vehículo.
- **Dirección de Circulación:** Orientación en la que se desplaza el vehículo. Puede tomar los valores, Norte-Sur (*NS*), Sur-Norte (*SN*), Este-Oeste (*EW*) y Oeste-Este (*WE*).
- **Velocidad Actual:** Velocidad a la que circula el vehículo en el momento del evento, expresada en kilómetros por hora (km/h).

Se muestran 8 eventos en la figura 6.4, en los que se aprecian los parámetros mencionados con mayor detalle.

	Tiempo	Tipo	Detalle	Velocidad (km/h)
1	301.4	arrival	{'type': 'coche', 'street': 'Alcalá_Alcalá_Alcalá', 'dir': 'EW'}	43.2
2	301.9	arrival	{'type': 'moto', 'street': 'Ayala_Ayala_Ayala', 'dir': 'EW'}	54.0
3	302.2	arrival	{'type': 'coche', 'street': 'Ortega y Gasset_Ortega_Ortega', 'dir': 'EW'}	43.2
4	303.3	arrival	{'type': 'moto', 'street': 'Serrano_Goya_Alcalá', 'dir': 'NS'}	54.0
5	303.7	arrival	{'type': 'moto', 'street': 'Serrano_Ayala_Goya', 'dir': 'NS'}	54.0
6	304.5	arrival	{'type': 'coche', 'street': 'Serrano_Serrano_Ortega', 'dir': 'NS'}	43.2
7	305.8	arrival	{'type': 'coche', 'street': 'Serrano_Ortega_Ayala', 'dir': 'NS'}	43.2
8	305.8	arrival	{'type': 'coche', 'street': 'Ayala_Ayala_Ayala', 'dir': 'EW'}	43.2

Figura 6.4: Panel de Control con Registro de Eventos.

Igualmente, cabe destacar que debajo de los botones anteriormente mencionados, se muestra la velocidad media de los vehículos que circulan por la red vial así como el número de vehículos que han finalizado su trayecto junto con el número de iteraciones del simulador 6.5.

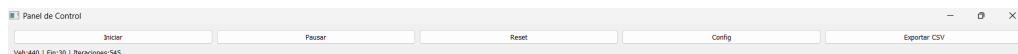


Figura 6.5: Panel de Control con Registro de Eventos.

Conocer estas métricas permite analizar el rendimiento del sistema, detectar cuellos de botella y valorar la eficacia de la configuración vial.

6.2. Ejemplo de Ejecución

Si escogemos la opción de visualizar el mapa, este se actualiza en tiempo real conforme avanza la simulación y muestra una representación dinámica del entorno vial simulado permitiendo observar la circulación de los vehículos y el estado de los semáforos en cada intersección.

En dicha representación 6.6, se puede observar una red de calles principales dispuestas vertical y horizontalmente, junto con varias intersecciones etiquetadas que son, Serrano, Ortega y Gasset, Ayala, Goya y Alcalá.

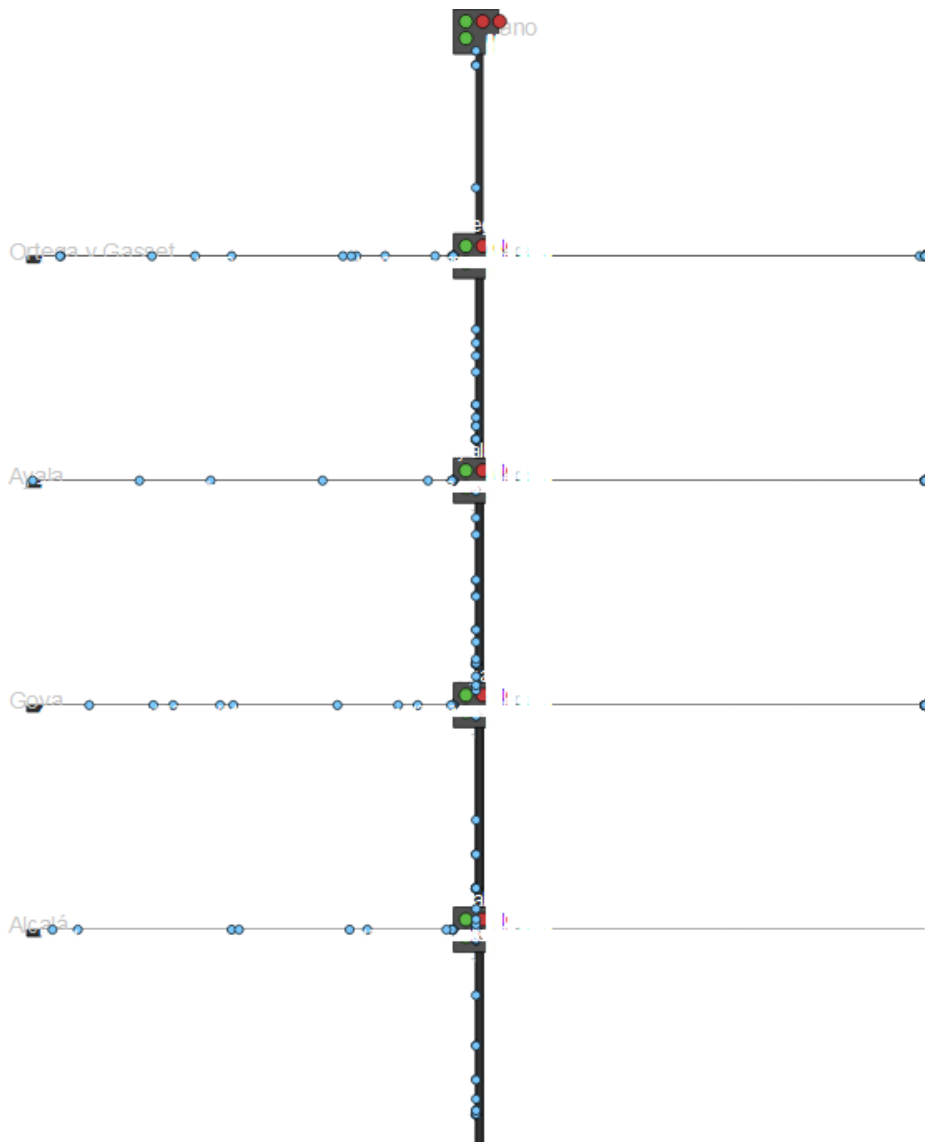


Figura 6.6: Representación del Entorno Vial Simulado.

Capítulo 6. Prototipo de Simulación

Cada intersección está equipada con semáforos que cambian de estado, rojo, verde y ámbar, según un ciclo de tiempos configurado previamente.

Los vehículos aparecen como pequeños círculos azules que se desplazan a lo largo de las calles, representando el flujo de tráfico en tiempo real.

La dirección de circulación está indicada mediante etiquetas de texto, y cada tramo de calle refleja la configuración de carriles establecida por el usuario. Esta vista permite al usuario observar el comportamiento de la simulación de forma visual e intuitiva.

6.3. Arquitectura del Código

A continuación, se detalla el diseño interno del simulador, centrándonos en la estructura y funcionamiento del código fuente.

6.3.1. Bibliotecas Utilizadas

Para el desarrollo del prototipo se ha hecho uso de las siguientes bibliotecas en el entorno de programación Python [42].

1. **random**: Proporciona funciones para generar números aleatorios. Se usa para simular la llegada de vehículos y otros eventos aleatorios en la simulación [43].
2. **numpy**: Biblioteca para cálculos numéricos eficientes. En este simulador se utiliza, por ejemplo, para generar valores a partir de distribuciones estadísticas como la exponencial [44].
3. **collections.defaultdict**: Estructura del módulo `collections` que permite crear diccionarios con un valor por defecto, útil para representar redes de calles donde cada nodo puede tener múltiples conexiones [45].
4. **csv**: Permite leer y escribir archivos en formato CSV. Se utiliza para exportar los resultados de la simulación en un formato compatible con hojas de cálculo [46].
5. **heapq**: Implementa colas de prioridad basadas en montículos, heaps. Es fundamental en la gestión del calendario de eventos en simulaciones discretas [47].
6. **uuid**: Permite generar identificadores únicos universales. Se usa para asignar una identificación única a cada vehículo simulado [48].

7. **PyQt5**: Biblioteca para crear interfaces gráficas de usuario, GUI, en Python. En este simulador se utiliza para mostrar ventanas, botones, gráficos y vistas interactivas del tráfico [49].
8. **PlantUML**: Herramienta para generar diagramas UML a partir de texto. Se utiliza en la documentación expuesta a continuación del simulador para representar clases, relaciones y estructuras del código [50].
9. **sys**: Permite acceder a funciones y variables del intérprete de Python, como los argumentos de línea de comandos. Se usa, por ejemplo, para iniciar la aplicación gráfica [51].

6.3.2. Clases Principales

A continuación se presentan las clases principales que conforman el simulador, en la tabla 6.1. Se detalla brevemente la funcionalidad de cada una de ellas. Además, se incluye un diagrama UML que ayuda a contextualizar la arquitectura y facilita la comprensión general del sistema y cómo interactúan sus componentes.

Capítulo 6. Prototipo de Simulación

Funcionalidades de las Clases

Clase	Funcionalidad
SimulationEngine	Gestiona el ciclo completo de la simulación: tiempo, eventos, entidades y estadísticas. Es el núcleo del sistema.
Event	Representa un evento que ocurre en un instante determinado, como la llegada de un vehículo o el cambio de un semáforo.
Vehicle	Modela un vehículo individual, incluyendo su tipo, velocidad, tiempos de entrada y salida, y posición actual.
Street	Representa una calle. Incluye atributos como nombre, longitud, dirección, carriles y vehículos en tránsito.
Intersection	Define un cruce de calles. Contiene información sobre su posición, semáforos y fases de tráfico.
TrafficLight	Controla el estado del tráfico en una intersección. Tiene estados cíclicos, rojo, verde y ámbar, con duraciones definidas.
ControlWindow	Ventana principal de la interfaz gráfica. Permite controlar la simulación y visualizar métricas y eventos.
MapWindow	Muestra el entorno gráfico de la red vial. Dibuja calles, intersecciones, vehículos y semáforos en tiempo real.
ConfigDialog	Cuadro de diálogo para ajustar parámetros de configuración como el tiempo de simulación y número de carriles.

Cuadro 6.1: Clases Principales del Simulador y Funcionalidades.

El diagrama UML de la figura 6.7, muestra la estructura de clases del simulador de tráfico. La clase principal `SimulationEngine`, coordina la simulación y se relaciona con entidades como `Street`, `Intersection`, `Vehicle`, `Event` y `TrafficLight`.

`Street` representa las calles, incluyendo su longitud, dirección y conexiones entre intersecciones. `Intersection` define los cruces y su semaforización. `Vehicle` modela vehículos individuales con velocidad y tiempo de entrada y salida. `Event` permite gestionar acciones que ocurren en momentos específicos y `TrafficLight` regula el flujo en las intersecciones.

6.3. Arquitectura del Código

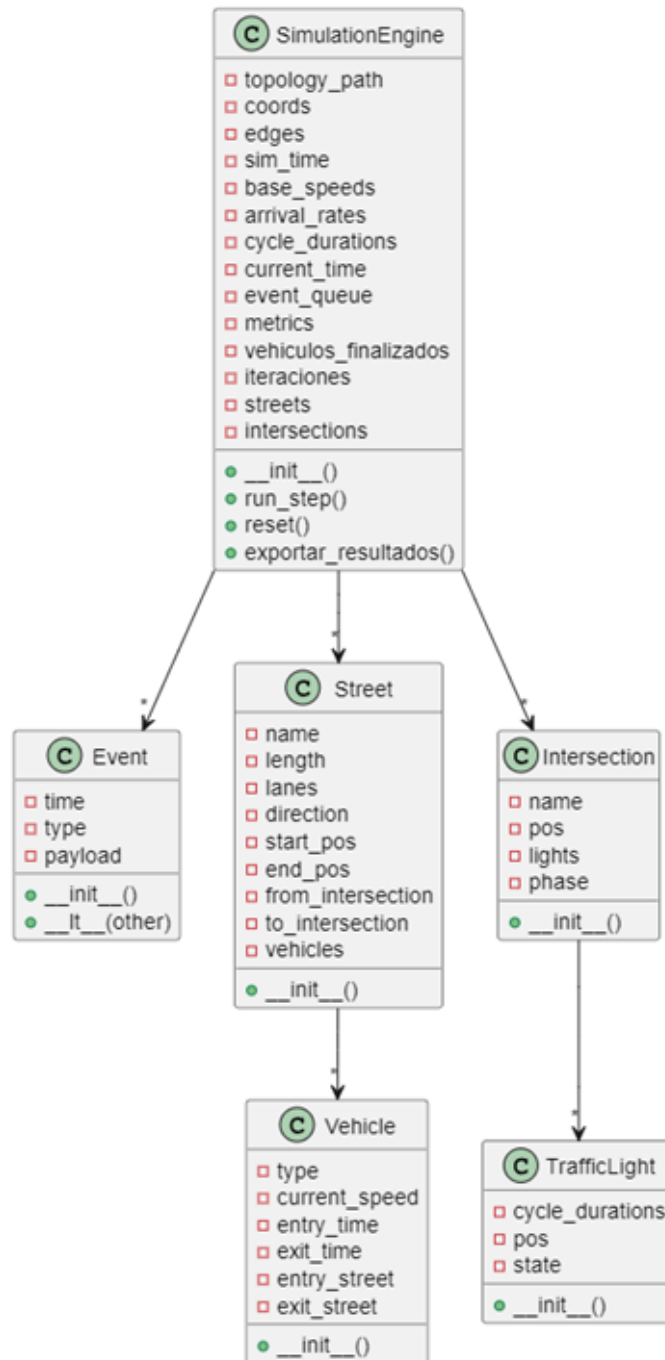


Figura 6.7: Diagrama UML de Clases Simulador.

6.3.3. Modelado Probabilístico y Generación de Eventos

Durante la simulación del tráfico, varios aspectos han sido definidos utilizando fundamentos de probabilidad y generación de eventos aleatorios.

A continuación se describe cómo se han modelado estas decisiones.

Distribución de Llegadas de Vehículos

Las llegadas de vehículos a las calles del sistema se han modelado mediante una distribución exponencial, que se basa en los siguientes supuestos.

1. Se utiliza una distribución exponencial para modelar el tiempo entre llegadas de vehículos.
2. Esta distribución asume que las llegadas son independientes entre sí y ocurren de manera continua a lo largo del tiempo, lo cual es característico de un proceso estocástico de Poisson.
3. La tasa de llegada λ para cada tipo de vehículo está definida en el diccionario `ARRIVAL_RATES`.

```
ARRIVAL_RATES = {  
    'moto': 0.05,  
    'coche': 0.1,  
    'furgoneta': 0.02,  
    'autobús': 0.01  
}
```

Por tanto, la probabilidad de que el siguiente vehículo sea un coche, es proporcional a su tasa de llegada 0.1, que comparada con la suma total de tasas, nos da el siguiente resultado.

$$P(\text{Coche}) = \frac{0,1}{0,05 + 0,1 + 0,02 + 0,01} = \frac{0,1}{0,18} \approx 55,5\%$$

Esto significa que aproximadamente el 55% de los vehículos generados serán coches, seguidos de motos, furgonetas y autobuses según las tasas indicadas.

Generación de Eventos

Los eventos se generan y almacenan en una *cola de prioridad*, heap. Cada evento contiene los siguientes elementos.

- **Tiempo de Ocurrencia.** Calculado mediante una distribución exponencial en el caso de llegadas, o una duración fija en el caso de los semáforos.
- **Tipo de Evento.** Puede ser `arrival`, llegada de un vehículo o `cambio`, cambio de semáforo.
- **Datos Asociados.** Representados mediante un diccionario que puede incluir información como el tipo de vehículo, la calle de entrada, la dirección de circulación, entre otros.

Listing 6.1: Generación de Eventos de Llegada

```
for vt, rate in self.arrival_rates.items():
    t = np.random.exponential(1/rate)
    heapq.heappush(self.event_queue,
                  Event(t, 'arrival', {'type': vt, 'street': key, 'dir': street
                                      .direction}))
```

Este código mostrado en el listado 6.1, genera eventos de llegada de vehículos con tiempos distribuidos exponencialmente según su tasa de aparición, y los inserta en la cola de prioridad.

Aquí, `t` representa el instante de llegada generado por una distribución exponencial, `type` indica el tipo de vehículo, `street` es la calle de entrada y `dir` la dirección del flujo vial.

Todos los eventos son gestionados cronológicamente mediante la estructura `heapq`, que permite mantener una cola de prioridad eficiente para su ejecución.

6.3.4. Interfaz Gráfica

La Interfaz Gráfica implementada en Python, ha sido desarrollada utilizando la biblioteca `PyQt5` [49], lo que permite una interacción visual con el usuario.

Esta interfaz está formada por los componentes que se detallan a continuación.

1. **Ventana Principal.** Incluye los botones de control mencionados anteriormente.
2. **Widgets de Control.** Contiene los botones Iniciar, Pausar, Reset, Config y Exportar CSV.
3. **Ventana de Configuración.** Permite modificar parámetros como el tiempo total de simulación, el número de carriles y la visibilidad del mapa.

Capítulo 6. Prototipo de Simulación

4. **Panel de Métricas.** Muestra información actualizada sobre el número de vehículos en circulación, los que han finalizado su trayecto y el número de iteraciones ejecutadas.
5. **Tabla de Eventos de Estado.** Registra en tiempo real los eventos generados por el simulador, incluyendo tiempo de ocurrencia, el tipo de evento, detalles del vehículo y velocidad.
6. **Mapa de Tráfico.** Representación visual interactiva de la red vial. Se muestran calles, intersecciones, semáforos y vehículos en movimiento.

En la figura 6.8, se muestra la interfaz gráfica del simulador dividida en dos paneles principales.

1. En el panel izquierdo, se representa en tiempo real, la red vial con calles, intersecciones, semáforos y vehículos en movimiento.
2. En el panel derecho, se ofrece una tabla de control y métricas, donde se listan los eventos generados, sus tiempos de ocurrencia y parámetros asociados.

Esta visualización permite monitorear en tiempo real, el comportamiento del sistema y facilita el análisis de los eventos y métricas.

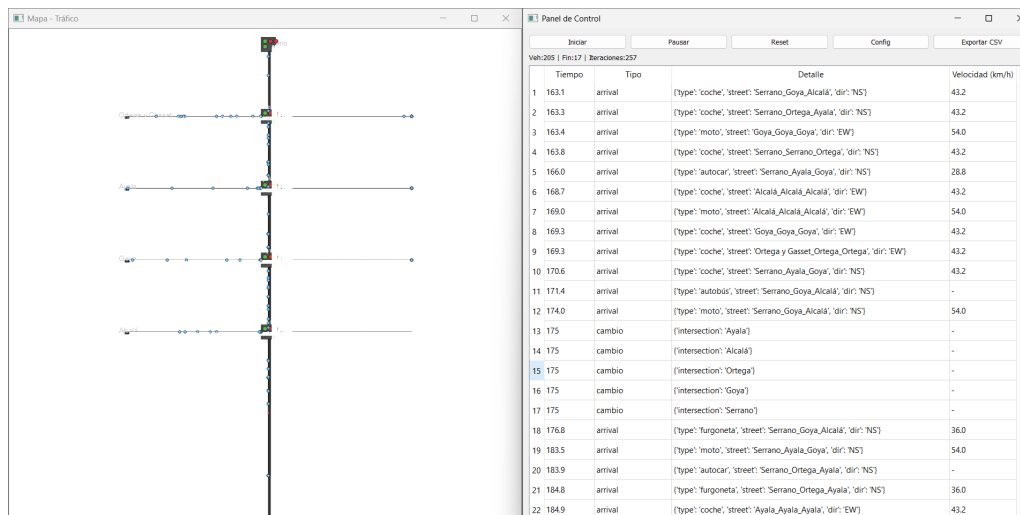


Figura 6.8: Visualización Interfaz Gráfica y Componentes.

6.3.5. Generación de Archivos CSV

El prototipo incluye la funcionalidad de exportar los datos generados durante la simulación 6.9, en formato CSV, comma-separated value, en el que se registran

6.4. Limitaciones del Prototipo

los datos asociados a los vehículos.

Este archivo se actualiza y se sobrescribe al mismo tiempo que la simulación y permite el análisis posterior mediante el uso de lenguajes de programación orientados al análisis de datos como R [52], facilitando así la evaluación del rendimiento del sistema y la elaboración de estadísticas relevantes.

En el capítulo 7, se detalla el uso de R como entorno principal para dicho análisis.

```
1 Tipo de vehiculo,Calle de entrada,Calle de salida,Tiempo de entrada,Tiempo de salida,Tiempo total,Velocidad
2 moto,Alcala,N/A,66.33,119.58,53.25,54.0
3 coche,Alcala,N/A,14.89,125.21,110.32,43.2
4 coche,Alcala,N/A,17.66,125.21,107.54,43.2
5 coche,Alcala,N/A,46.35,125.21,78.86,43.2
6 coche,Alcala,N/A,57.15,125.21,68.06,43.2
7 coche,Alcala,N/A,60.21,127.0,66.79,43.2
8 furgoneta,Alcala,N/A,31.12,132.29,101.17,36.0
9 autobus,Alcala,N/A,8.57,142.86,134.29,28.8
10 coche,Alcala,N/A,76.02,142.86,66.84,43.2
11 coche,Alcala,N/A,76.08,142.86,66.78,43.2
12 moto,Alcala,N/A,111.31,239.04,127.73,54.0
13 moto,Alcala,N/A,112.86,239.04,126.18,54.0
14 moto,Alcala,N/A,117.01,239.04,122.03,54.0
```

Figura 6.9: Contenido CSV Exportado tras la Simulación.

6.4. Limitaciones del Prototipo

- **No se modela el comportamiento individual del conductor:** No se consideran decisiones humanas como frenado o aceleración ante la congestión.
- **Ausencia de Múltiples Carriles o Prioridad de Giro:** Las intersecciones no contemplan configuraciones complejas como carriles de giro, semáforos direccionales o normas de prioridad.
- **Simplificación de la Red Vial:** Aunque se ha tomado como referencia una zona urbana real, la estructura vial ha sido simplificada para facilitar el modelado y la visualización.

Estas simplificaciones permiten obtener un prototipo funcional que reproduce adecuadamente ciertos fenómenos del tráfico urbano, si bien dejan abierta la posibilidad de incorporar mejoras en futuras versiones para acercar el modelo a un entorno más realista.

Capítulo 7

Resultados de la Simulación

En este capítulo se analizarán los resultados obtenidos de las simulaciones del prototipo desarrollado. El objetivo principal es examinar el comportamiento del sistema bajo diferentes condiciones a través de representaciones gráficas que permitan observar de forma clara la evolución y dinámica del flujo vehicular simulado.

Las visualizaciones incluidas en este capítulo facilitarán la interpretación de los resultados y permitirán identificar posibles tendencias, patrones significativos y comportamientos destacados del sistema, que nos ayudará a evaluar la validez del modelo implementado.

7.1. Visualización

La visualización constituye una herramienta fundamental en el análisis contemporáneo de la información, ya que permite representar grandes volúmenes de datos de manera comprensible y eficiente para el usuario final.

En el presente capítulo se profundizará en la relevancia e importancia de la visualización para la interpretación y la identificación de patrones en el contexto de nuestra simulación. Asimismo, se presentarán los gráficos generados a partir de dicha simulación, los cuales ofrecen una representación visual de los resultados obtenidos.

7.2. Entorno de Simulación

Para la obtención de resultados de la simulación, se ha utilizado *R* [52], lenguaje ampliamente utilizado en el análisis estadístico y procesamiento de datos, junto con *RStudio* [53], su entorno de desarrollo integrado, IDE, por sus siglas en inglés, Integrated Development Environment.

7.3. Caso de Simulación

Los gráficos generados que se muestran a continuación, parten de una simulación con trescientas seis iteraciones. En total, se registraron 317 vehículos a lo largo de un tiempo de simulación de 3.600 segundos durante los cuales, 17 vehículos terminaron su trayecto. Para aumentar la fiabilidad en el análisis y reducir el sesgo asociado a una única ejecución, se realizaron 10 réplicas independientes de la simulación. Estas muestras permiten captar la variabilidad inherente al sistema y obtener estimaciones más representativas del comportamiento medio y de los intervalos de confianza de las métricas analizadas.

7.3.1. Distribución por Tipo de Vehículo

La tabla 7.1 muestra la distribución de los vehículos simulados según su tipo, diferenciando entre aquellos que lograron completar su trayecto y el total de vehículos generados a lo largo de la simulación junto con la proporción que representan del total.

Cuadro 7.1: Distribución por Tipos de Vehículo.

Tipo	Completados	Total	Proporción (%)
Moto	3	56	17.6
Coche	10	186	58.8
Furgoneta	3	56	17.6
Autobús	1	19	5.9
Total	17	317	100

Se observa que, de los 317 vehículos simulados, solo 17 consiguieron finalizar su trayecto antes de que concluyera el tiempo total de simulación, 3.600 segundos, lo que representa aproximadamente un 5,4% del total de vehículos, tal y como se muestra en la figura 7.1.

7.3. Caso de Simulación

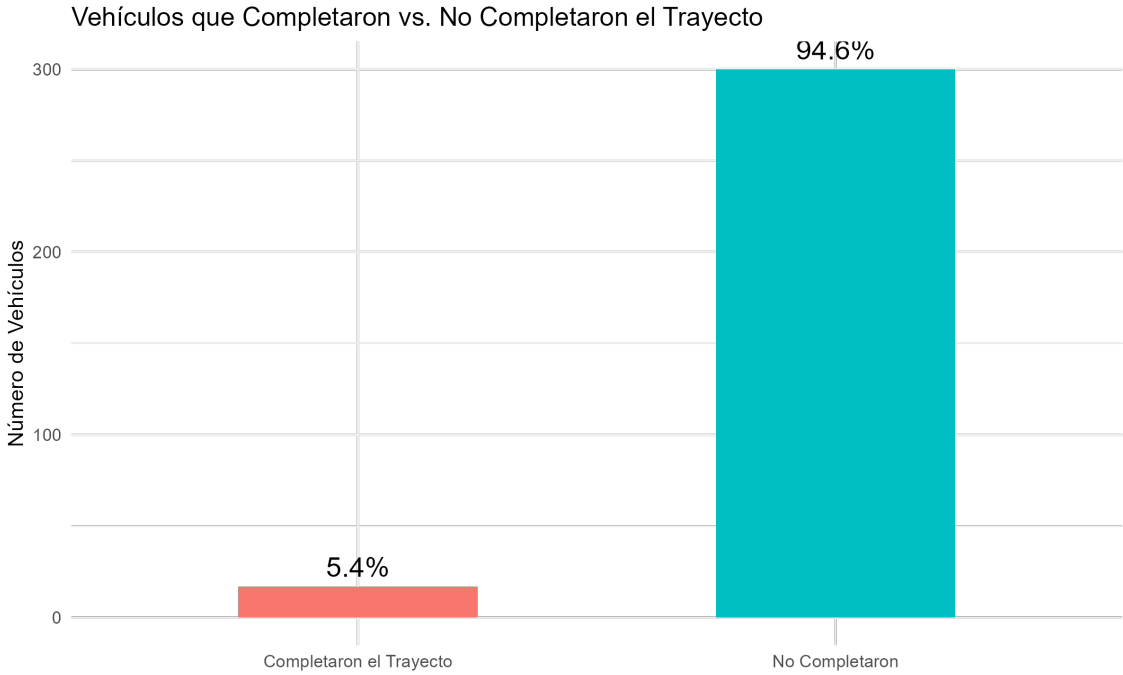


Figura 7.1: Diagrama de Barras de Vehículos en Curso o Finalizados. Elaboración Propia.

Al analizar detenidamente la tabla 7.1 que clasifica los trayectos por tipo de vehículo, se evidencia que los coches constituyen el grupo más numeroso.

Capítulo 7. Resultados de la Simulación

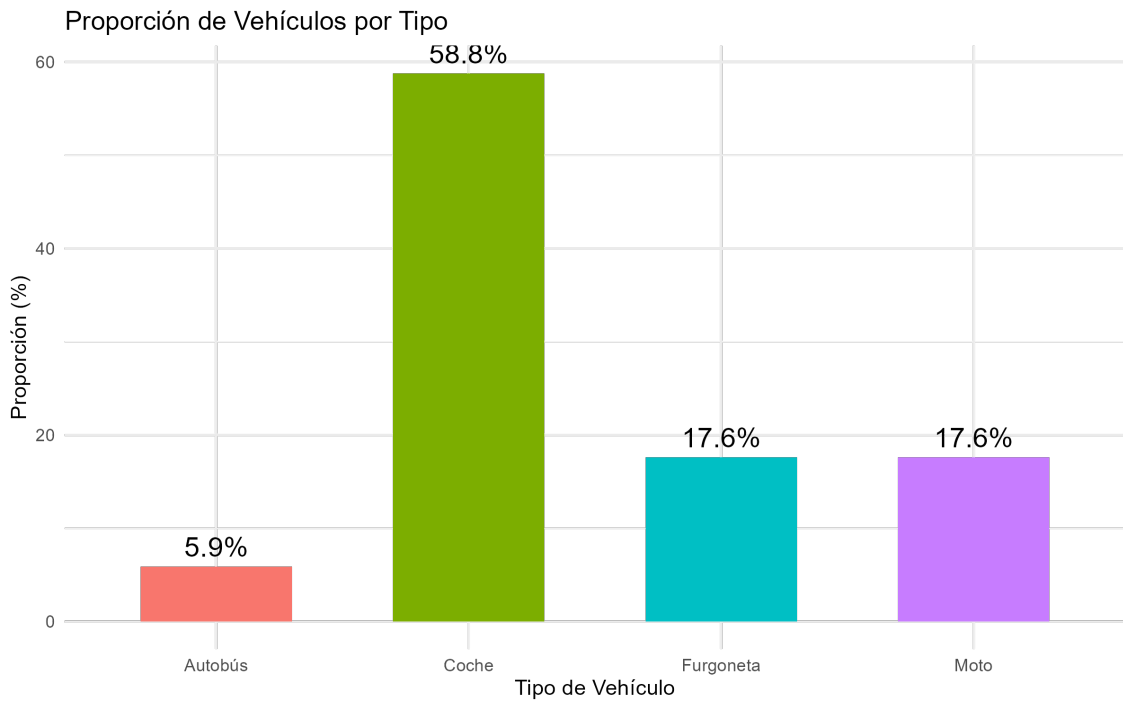


Figura 7.2: Diagrama de Barras por Tipo de Vehículo. Elaboración Propia.

En la figura 7.2, observamos que los coches configuran el 58.8% del conjunto total de vehículos, superando holgadamente tanto a los autobuses como a las motos, que constituyen un 17.6% del total, respectivamente.

A efectos de clarificar las conclusiones de nuestro estudio de forma gráfica, realizamos una representación mediante un diagrama de barras que muestra el número total de vehículos, por tipo, que participan en la simulación y cuantos de estos, completaron el trayecto. Véase figura 7.3.

7.3. Caso de Simulación

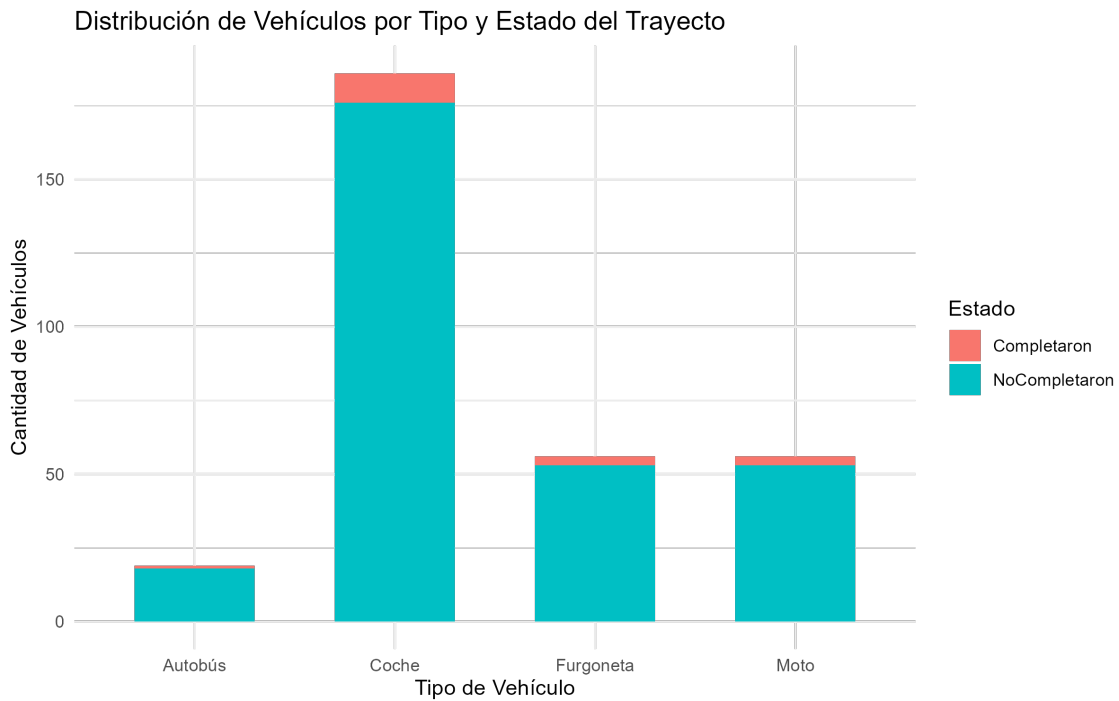


Figura 7.3: Diagrama de Barras por Tipo de Vehículo y Estado del Trayecto. Elaboración Propia.

Si prestamos de nuevo atención a la tabla 7.1, 10 de los 17 vehículos que completaron su trayecto, eran coches, 3 de los 17 eran motos y furgonetas respectivamente y 1 de 17, era autobús. Esto sugiere que, independientemente del tipo de vehículo que entra a formar parte de la simulación, solo un pequeño porcentaje logró completar el trayecto, lo que puede indicar una mayor exposición a la congestión o a tiempos de tránsito más prolongados.

Si analizamos la velocidad de los vehículos por tipo, la moto es el vehículo que más velocidad adquiere durante la simulación tal y como se observa en la tabla que se muestra a continuación, 7.2 y de manera gráfica en la figura 7.4.

Cuadro 7.2: Velocidad por Tipo de Vehículo.

Tipo	Velocidad (km/h)
Moto	54.0
Coche	43.2
Furgoneta	36.0
Autobús	28.8

Capítulo 7. Resultados de la Simulación

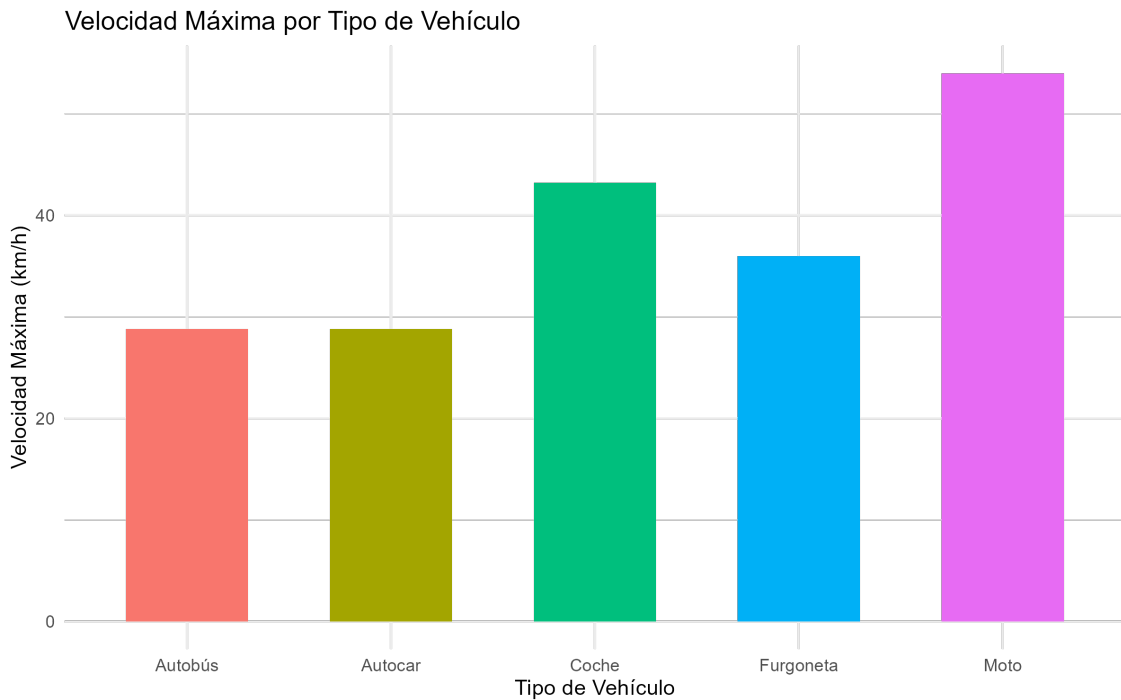


Figura 7.4: Diagrama de Barras Velocidad por Tipo de Vehículo. Elaboración Propia.

7.3.2. Entrada y Salida de Vehículos

Una métrica a considerar para la posterior extracción de conclusiones, es la entrada y salida de vehículos de manera constante durante el periodo de simulación. El número varía y es importante graficarlo. A continuación, se muestra la evolución en el número de vehículos a lo largo de una simulación. Véase la figura 7.5.

En este caso, para ver la evolución y el mantenimiento o abandono de los vehículos en la red, he considerado conveniente que el escenario de simulación contara con un tiempo de simulación muy superior al utilizado inicialmente para el resto de métricas.

Para este nuevo escenario, observamos que el número de vehículos que abandonan la red es directamente proporcional al tiempo, es decir, a medida que avanza el tiempo, el número de vehículos que abandonan la red, aumenta considerablemente. Esto es apreciable en la siguiente gráfica que se adjunta a continuación.

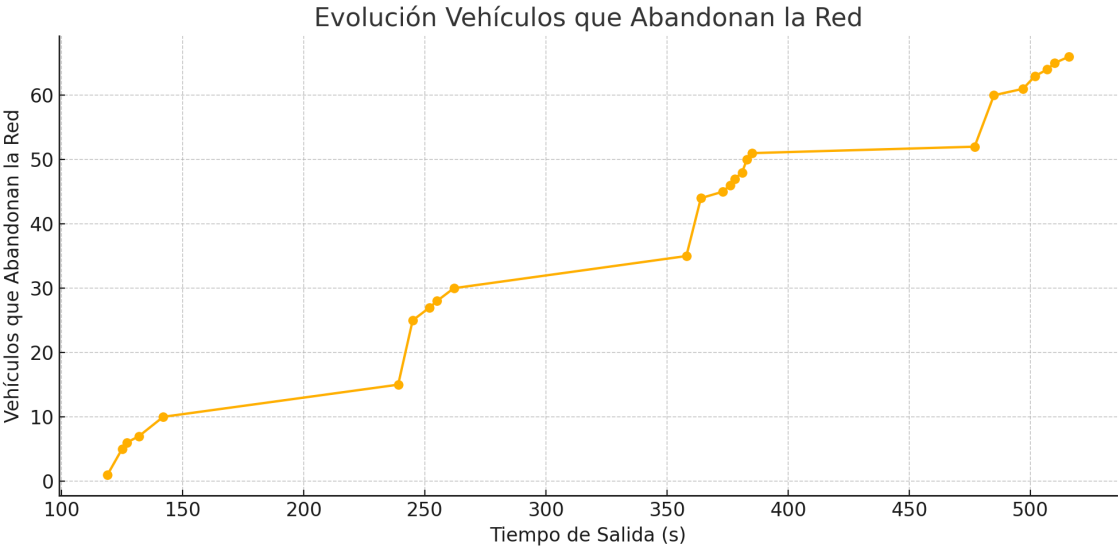


Figura 7.5: Evolución Vehículos que Abandonan la Red. Elaboración Propia.

Por otro lado, observamos que de los 886 vehículos presentes al inicio de la simulación, 60 abandonan la red y los restantes, se mantienen. Véase la figura 7.6.

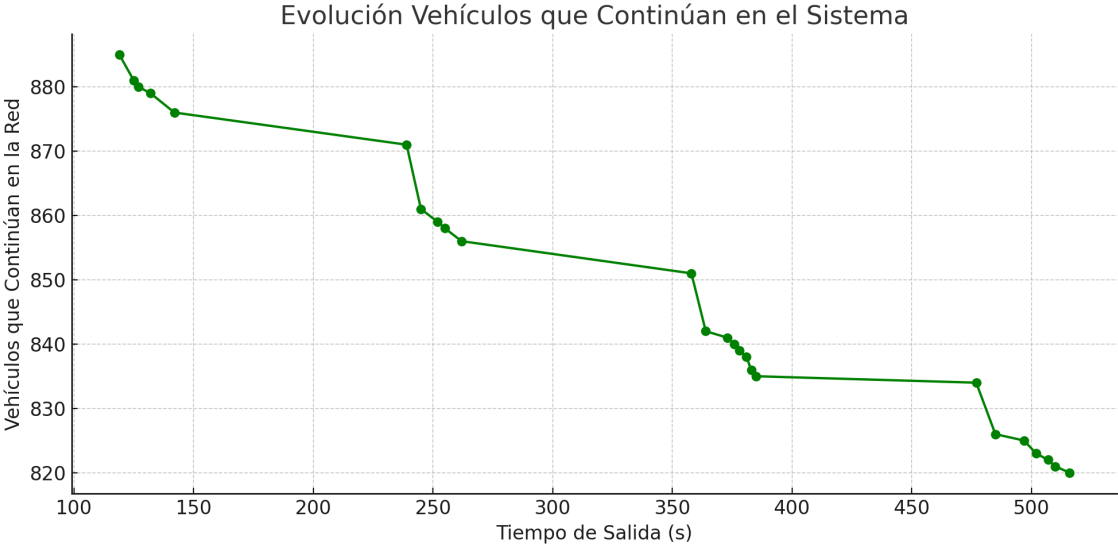


Figura 7.6: Evolución Vehículos que se Mantienen en la Red. Elaboración Propia.

7.3.3. Tiempos de Trayecto

En nuestra simulación, tenemos en cuenta los tiempos de entrada y salida del sistema. Para sacar las métricas, del CSV que se exporta de nuestro sistema,

Capítulo 7. Resultados de la Simulación

miramos aquellas filas de vehículos donde el tiempo de salida es distinto de NA dado que indica que el vehículo aún no ha salido del sistema en el momento de exportar los datos.

Cuadro 7.3: Estadísticas del Tiempo de Trayecto por Tipo de Vehículo.

Tipo	Media (s)	Mediana (s)	Desviación Típica (s)
Autobús	131.40	123.04	32.39
Coche	105.26	107.24	31.67
Furgoneta	107.96	90.13	40.35
Moto	83.90	72.95	29.33

Como se observa en la tabla 7.3, hemos calculado la media, la mediana y la desviación típica de los tiempos de trayecto por tipo de vehículo. El análisis conjunto de los tiempos de trayecto revela diferencias significativas en el comportamiento de los distintos tipos de vehículos simulados.

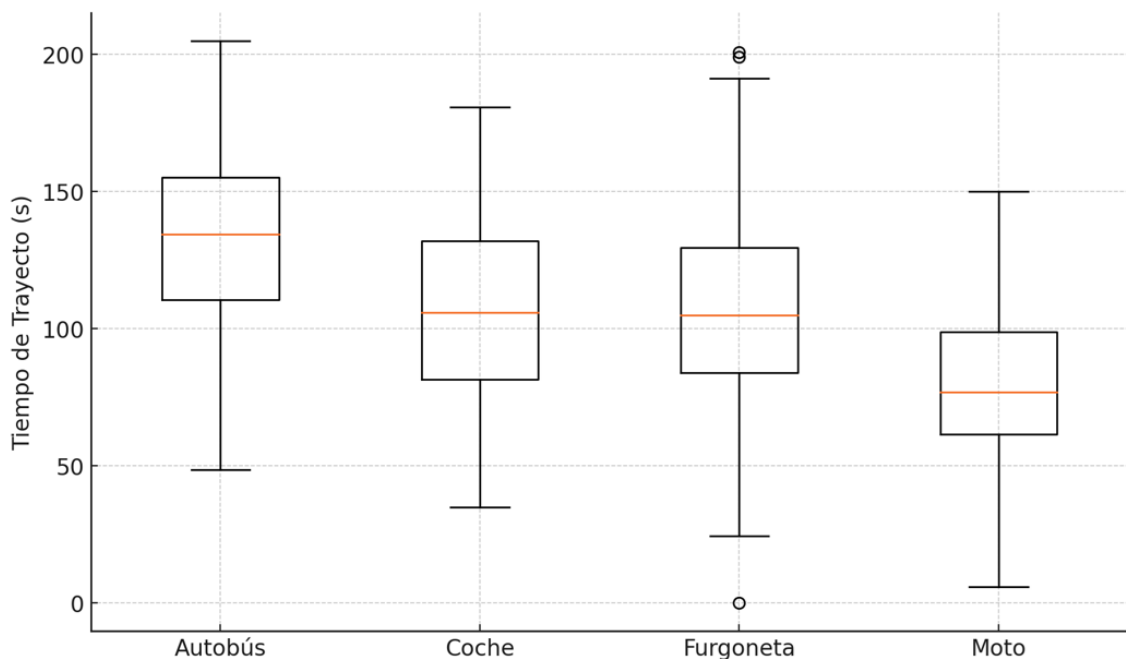


Figura 7.7: Diagrama de Caja del Tiempo Trayecto por Tipo Vehículo. Elaboración Propia.

En base a los resultados reflejados en la tabla 7.3 y en el diagrama de caja 7.7, analizamos los tiempos de trayecto por tipo de vehículo.

■ **Autobús**

- Presenta el tiempo medio y la mediana más altos, lo que indica que es el vehículo más lento en promedio.
- Muestra una alta dispersión en los tiempos, reflejada en una caja y bigotes más amplios.
- Aparecen varios puntos atípicos, outliers, por encima del bigote superior, lo que sugiere trayectos excepcionalmente largos, posiblemente por paradas o congestiones.

■ **Coche**

- Tiene un tiempo medio intermedio y una mediana cercana al centro de la distribución.
- Su rango intercuartílico es más estrecho, lo que indica mayor regularidad en los tiempos de trayecto.
- No se observan outliers, lo cual sugiere un comportamiento más predecible.

■ **Furgoneta**

- Aunque su mediana no es tan elevada como la de otros vehículos, muestra una gran variabilidad, similar al autobús.
- Se detectan valores atípicos tanto altos como bajos, lo que refleja una amplia dispersión en el desempeño.
- El comportamiento del trayecto es menos consistente en comparación con coches y motos.

■ **Moto**

- Es el vehículo con la media y mediana más bajas, lo que lo convierte en el más rápido en promedio.
- Tiene la menor variabilidad, lo que indica trayectos constantes.
- Aunque hay algunos outliers, la mayoría de los valores están agrupados en torno a la mediana.

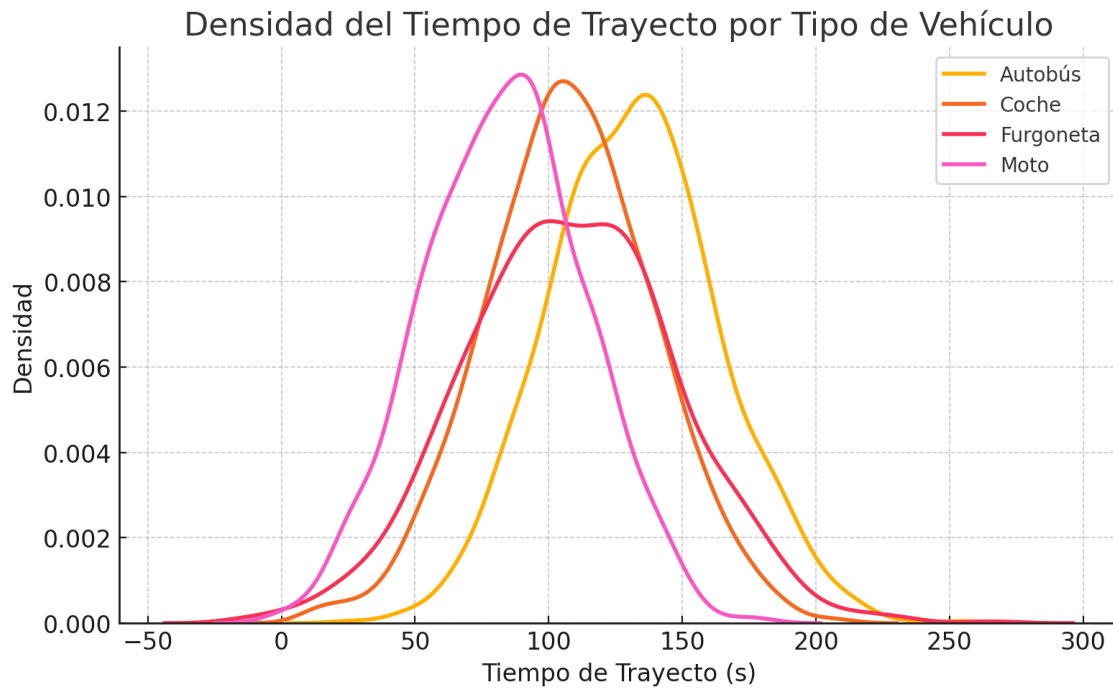


Figura 7.8: Densidad Tiempo Trayecto por Tipo de Vehículo. Elaboración Propia.

Análisis Estadístico de los Resultados

La gráfica 7.8 de densidad, ilustra la distribución de los tiempos de trayecto por tipo de vehículo, evidenciando diferencias claras en frecuencia y dispersión.

Valores más bajos tanto de varianza como de desviación típica indican una menor dispersión de los datos, lo que implica que estos se encuentran más próximos a la media. En consecuencia, se puede concluir que las observaciones son más consistentes y exactas en torno al valor promedio.

Las motos destacan por una curva estrecha y centrada en valores bajos, lo que refleja trayectos más cortos y consistentes. Esta observación se ve respaldada estadísticamente por la tabla 7.3, donde presentan la desviación típica más baja, 29,33 s, y la menor varianza, 859,29 s², lo que confirma su comportamiento homogéneo y eficiente dentro del sistema simulado.

En el extremo opuesto, las furgonetas muestran una curva más ancha y dispersa en la gráfica, coherente con su varianza de $1628,10 \text{ s}^2$, la más alta entre los grupos, lo que sugiere una mayor variabilidad en los tiempos de trayecto, indicativa de un comportamiento menos predecible en sus trayectos. Los coches y autobuses ocupan posiciones intermedias tanto en la gráfica como en los indicadores estadísticos, con desviaciones típicas ligeramente superiores a 31 segundos y varianzas que rondan los 1000 s^2 , reflejando trayectos más largos y algo menos consistentes.

7.4. Conclusiones del Estudio

Tras la realización del estudio, se concluye que un alto porcentaje de los vehículos no completaron su trayecto. De las categorías por tipo de vehículo estudiadas, el coche es el que mayor tasa de finalización de trayecto tiene al ser el vehículo más numeroso. El retraso en la finalización del trayecto se debe a retenciones y congestión del tráfico al versar nuestro objeto de estudio sobre la zona centro de Madrid que es la que presenta mayor afluencia de tráfico.

Con respecto a la velocidad, la moto es el vehículo que circula con tasas más elevadas. Esto es debido a que en momentos de retenciones, este vehículo es capaz de esquivar al resto. En contraste, el autobús es el vehículo que presenta la velocidad media más baja en los trayectos simulados.

En conjunto, los resultados obtenidos permiten concluir que el modelo desarrollado refleja con un alto grado de fidelidad el comportamiento del tráfico urbano en condiciones reales. Las métricas muestran consistencia y coherencia con los fenómenos observables en entornos de alta densidad vehicular, como el centro de Madrid.

La baja dispersión en ciertos tipos de vehículos y la variabilidad en otros se alinean con el comportamiento esperado según su tipología y capacidad de maniobra. Por tanto, se puede afirmar que el estudio no solo ha proporcionado resultados exactos y representativos, sino que también valida la eficacia del modelo como herramienta fidedigna para el análisis y la simulación del flujo vehicular en contextos urbanos complejos.

Capítulo 8

Conclusiones

Este capítulo presenta una valoración y evaluación general de los objetivos planteados al inicio del trabajo, destacando el grado en que han sido alcanzados. Se proponen líneas futuras que permitirían ampliar y mejorar el modelo desarrollado. También se incluye una evaluación personal y se analiza el impacto del trabajo en relación con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) [55], especialmente en el ámbito de la movilidad urbana sostenible.

8.1. Evaluación de los Objetivos

La evaluación de los objetivos planteados al inicio de este Trabajo de Fin de Grado permite concluir que estos han sido, en líneas generales, satisfactoriamente alcanzados. El objetivo principal, desarrollar una simulación del flujo vehicular para analizar el comportamiento del tráfico, se ha alcanzado plenamente. Se ha construido un modelo computacional basado en eventos discretos que representa fielmente la dinámica urbana de circulación.

En cuanto a los objetivos específicos, también se puede afirmar que se han logrado con éxito, en su totalidad. Se han desarrollado los diferentes modelos sobre los cuales se sustenta el modelo computacional, del que se ha diseñado el prototipo y posteriormente programado, se han ejecutado experimentos de simulación y por último se han visualizado los resultados y analizado métricas para la extracción de conclusiones, mediante herramientas estadísticas como R [52].

Además, se han observado patrones relevantes, como la superior capacidad de finalización de trayectos por parte de los vehículos más ágiles, las motos, o la baja eficiencia del sistema en condiciones de alta densidad vehicular, hallazgos que ofrecen una base útil para la toma de decisiones en planificación urbana.

Por tanto, puede considerarse que la evaluación de los objetivos confirma la coherencia entre la propuesta inicial y los resultados obtenidos, consolidando así la validez del trabajo realizado.

8.2. Líneas Futuras

Una vez completado el desarrollo del simulador de tráfico urbano, se abren diversas oportunidades para su ampliación y perfeccionamiento en futuras versiones.

- **Modelado del Comportamiento Individual del Conductor:** Para superar la actual limitación que impide simular decisiones humanas como el frenado o la aceleración ante la congestión, se proponen incorporar lógicas de comportamiento individual para los vehículos. Esto incluiría la posibilidad de que reaccionen dinámicamente al entorno, permitiendo maniobras como cambios de velocidad, giros o aceleraciones progresivas según las condiciones del tráfico.
- **Introducción de Múltiples Carriles y Reglas de Prioridad:** Se planea incluir múltiples carriles por sentido, carriles de giro, semáforos direccionales y normas de prioridad. Esto permitiría simular con mayor precisión situaciones de cruces y adelantamientos.
- **Integración de Datos de Tráfico:** Otra mejora significativa consistiría en la incorporación e integración de fuentes externas de datos, como sensores urbanos, cámaras de tráfico o bases de datos abiertas. Esto permitiría calibrar y validar el modelo con datos reales, haciendo que los resultados obtenidos sean más fiables y útiles para el análisis urbano.
- **Incorporación de Algoritmos de Aprendizaje Automático:** Finalmente, se contempla la inclusión de algoritmos inteligentes que optimicen dinámicamente la gestión del tráfico. Por ejemplo, semáforos adaptativos capaces de aprender del flujo de vehículos en tiempo real, o sistemas de predicción de congestión que anticipen situaciones críticas.

8.3. Evaluación Personal

La realización de este Trabajo de Fin de Grado ha supuesto un desafío técnico de gran envergadura en el que he adquirido competencias que considero fundamentales para mi futuro profesional.

A lo largo de este proceso, he tenido la oportunidad de adentrarme en dos áreas que me apasionan profundamente, la estadística y el análisis de da-

tos. Ambas disciplinas, cuando se combinan, permiten abordar y dar respuesta a numerosos problemas reales de gran relevancia en la actualidad, como es el caso de la movilidad urbana y la gestión del tráfico.

El desarrollo de este proyecto, me ha permitido consolidar y aplicar conocimientos teóricos en un contexto práctico, desarrollando un simulador fundamentado en modelos estadísticos y matemáticos.

La parte de programación, ha constituido la fase más extensa y exigente. En primer lugar, se definieron con detalle las funcionalidades del sistema. A continuación, se abordó su implementación, prestando especial atención al modelado de eventos discretos, a la lógica de simulación y al diseño de una interfaz gráfica.

Esta experiencia me ha permitido adquirir no solo nuevas competencias técnicas, sino también mejorar en aspectos como la autonomía, la organización, la resolución de problemas y la capacidad de análisis.

Cabe destacar que este TFG ha requerido una dedicación constante, siendo exigente en tiempo, esfuerzo y atención. En este proceso, el apoyo de mi tutor ha sido fundamental, ya que ha sabido guiarme en momentos clave, aportando ideas, correcciones y motivación que han resultado determinantes para la correcta evolución y finalización del proyecto.

8.4. Análisis de Impacto

En el marco de la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, resulta fundamental que los proyectos tecnológicos y científicos se alineen con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS) definidos por las Naciones Unidas.

En este sentido, el Trabajo de Fin de Grado desarrollado busca no solo ofrecer una solución técnica para la simulación del tráfico urbano, sino también contribuir al avance hacia ciudades más sostenibles, eficientes y respetuosas con el medio ambiente. A continuación, se expone cómo este proyecto se relaciona con algunos de los ODS establecidos.

- **ODS 9 – Industria, Innovación e Infraestructura.** El simulador contribuye al diseño y evaluación de infraestructuras viales más eficientes y seguras, fomentando la innovación mediante el uso de modelos matemáticos y herramientas tecnológicas para la toma de decisiones urbanas.

Capítulo 8. Conclusiones

- **ODS 11 – Ciudades y Comunidades Sostenibles.** El objetivo principal del simulador es modelar el tráfico urbano para mejorar la movilidad, reducir la congestión y, por tanto, el impacto ambiental. Esto apoya directamente la planificación de ciudades más sostenibles.
- **ODS 13 – Acción por el Clima.** Al optimizar el flujo vehicular y permitir analizar escenarios de tráfico, se favorecen decisiones que pueden reducir las emisiones de CO₂, contribuyendo a la lucha contra el cambio climático.
- **ODS 12 – Producción y Consumo Responsables.** Permite simular escenarios para evaluar el impacto de diferentes tipos de vehículos, promoviendo un uso más eficiente de los recursos en sistemas de transporte.
- **ODS 4 – Educación de Calidad.** El proyecto también tiene un valor educativo al servir como herramienta didáctica para estudiantes de ingeniería fomentando el aprendizaje práctico de simulación y programación.



Figura 8.1: Objetivos ODS Agenda 2030 [55]

Bibliografía

- [1] Comunidad de Madrid, *Comparativa del Volumen Diario de Vehículos por Tipo de Vía en la Red*, <https://www.comunidad.madrid/servicios/transporte/estudio-intensidad-media-diaria-vehiculos-imd>.
- [2] Repsol, *Tecnología e Innovación en Smart Cities, 2023*. dirección: <https://www.repsol.com/es/energia-futuro/tecnologia-innovacion/smart-cities/index.cshtml>.
- [3] UPM, *Máster en Planificación y Gestión de Infraestructuras*. dirección: <https://caminos.upm.es/master-en-planificacion-y-gestion-de-infraestructuras/>.
- [4] Comunidad de Madrid, *Mapa Cinturones Viales de Madrid*. https://datos.madrid.es/FWProjects/egob/Catalogo/Transporte/Trafico/Ficheros/2021_cinturones_Madrid.jpg.
- [5] D. R. Harris, *The Origins and Spread of Agriculture and Pastoralism in Eurasia*. Smithsonian Institution Press, 2012.
- [6] K. Bailey, *Social Simulation: A Tool for the Social Sciences*. Routledge, 2000.
- [7] P. P. Perla, *The Art of Wargaming: A Guide for Professionals and Hobbyists*. Naval Institute Press, 1990.
- [8] H. Reubenstein, «Simulation and Modeling in the Military», *Simulation*, págs. 195-200, 1975.
- [9] Leonardo Da Vinci, *Boceto Máquina Voladora, Ornitóptero*, https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:Leonardo_Design_for_a_Flying_Machine,_c._1488.jpg.
- [10] B. F. Gore, *Principles of Modeling and Simulation: A Multidisciplinary Approach*. Wiley-Interscience, 2007.
- [11] C. W. Reynolds, *A Historical Perspective on Simulation in Science and Art*. Springer, 2011.
- [12] P. Walsh, «The Role of Simulation in Pre-modern Scientific Inquiry», *Journal of Simulation History*, 2000.
- [13] *Simulador Médico Computarizado para Entrenamiento Clínico*. <https://www.apsf.org/es/article/la-evolucion-y-el-papel-de-la-simulacion-en-la-ensenanza-de-la-medicina/>.

- [14] J. Banks, J. S. C. II, B. L. Nelson y D. M. Nicol, *Discrete-Event System Simulation*, 4.^a ed. Prentice Hall, 2005.
- [15] L. Leemis y S. Park, *Discrete-Event Simulation: A First Course*. Richmond: Pearson, 2004.
- [16] J. C. R. Pabón, S. S. N. Vanegas y G. M. V. Ríos, «Simulación y Programación del Sistema que rige el Péndulo Compuesto», 2020, <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7300382>.
- [17] *Evolución Oscilaciones Péndulo Simple*, http://www.sc.ehu.es/sbweb/fisica3/oscilaciones/pendulo/pendulo_1.html.
- [18] J. F. A. González, A. C. Heredia y D. A. M. Galván, *Introducción a la Teoría de Colas*, Curso de Probabilidad, Departamento de Matemáticas, Universidad de Guanajuato. Profesor: Joaquín Ortega Sánchez, 2017.
- [19] K. Tocher, «The Simulation of Queuing Systems with GPSS», *The Computer Journal*, 1961.
- [20] H. M. Markowitz, «SIMSCRIPT: A Simulation Programming Language», *Prentice Hall*, 1963.
- [21] C. D. Pegden y R. E. Sadowski, «SLAM: Simulation Language for Alternative Modeling», *Simulation*, 1983.
- [22] C. D. Pegden, R. E. Shannon y R. P. Sadowski, *Introduction to Simulation using SIMAN*. McGraw-Hill, 1990.
- [23] D. Krajzewicz, J. Erdmann, M. Behrisch y L. Bieker, «Recent Development and Applications of SUMO. Simulation of Urban Mobility», 2012.
- [24] Aimsun, *Aimsun Next Traffic Modeling Software*, 2025. dirección: <https://www.aimsun.com>.
- [25] PTV VISSIM *Microsimulation Software*, 2025. dirección: <https://www.ptvgroup.com/en/solutions/products/ptv-vissim>.
- [26] S. Developers, *SimPy: Discrete Event Simulation for Python*, 2025. dirección: <https://simpy.readthedocs.io>.
- [27] I. Ucar, B. Smeets y A. Azcorra, *Simmer: Discrete-Event Simulation for R*. 2019.
- [28] F. d'Informàtica de Barcelona. «Simulació: Un recurs de la Informàtica». (2025), dirección: <https://www.fib.upc.edu/retro-informatica/avui/simulacio.html>.

- [29] J. A. Sokolowski y C. M. Banks, eds., *Principles of Modeling and Simulation: A Multidisciplinary Approach*. Hoboken, NJ, 2009.
- [30] A. M. Law y W. D. Kelton, *Simulation Modeling and Analysis*, 5th. McGraw-Hill, 2015, Modelos Probabilísticos aplicados a Simulación.
- [31] J. Frey, *Modelización de Sistemas de Colas*. Springer, 2022.
- [32] R. G. Sargent, *Toward Good Simulation Practice: Modelación, Validación y Verificación*. 2020.
- [33] O. Jones, R. Maillardet y A. Robinson, *Introduction to Scientific Programming and Simulation Using R*, 2.^a ed. 2014.
- [34] M. Hofert y M. Mächler, *Parallel and Other Simulations in R Made Easy: An End-to-End Study*. feb. de 2016, vol. 69.
- [35] E. Babulak y M. Wang, *Discrete Event Simulation*. University of the South Pacific, 2010.
- [36] G. Pelz, *Mechatronic Systems: Modelling and Simulation with HDLs*. John Wiley & Sons, 2003.
- [37] M. Treiber, A. Hennecke y D. Helbing, «Congested Traffic States in Empirical Observations and Microscopic Simulations», 2000. dirección: <https://arxiv.org/abs/cond-mat/0002177>.
- [38] A. Gemino e Y. Wand, «Complexity and Clarity in Conceptual Modeling: Comparison of Mandatory and Optional Properties», *Data & Knowledge Engineering*, 2005. dirección: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0169023X04002332>.
- [39] Wikipedia, *Modelo Conceptual*. dirección: https://es.wikipedia.org/wiki/Modelo_conceptual.
- [40] M. G. Restrepo y E. J. S. Abalo, «Aplicación de Teoría de Colas en los Semáforos para Mejorar la Movilidad en la Carrera de la Ciudad de Pereira», Tesis doct., Universidad Tecnológica de Pereira, Facultad de Ingeniería Industrial, 2010.
- [41] J. Pérez-Martín, *Colas de Prioridad*, Informe Técnico con Implementación en C++ de Estructuras de Colas de Prioridad. <https://github.com/jssprz/priority-queues.git>, abr. de 2019.
- [42] P. S. Foundation, *Python 3.10.6 Documentation*, <https://www.python.org>, Versión del Entorno de Desarrollo, 2022.
- [43] P. S. Foundation, *random - Generate Pseudo-Random Numbers*, <https://docs.python.org/3/library/random.html>, 2022.

- [44] C. R. Harris, K. J. Millman y S. J. e. a. van der Walt, *NumPy 1.24.2*, <https://numpy.org/>, Biblioteca de Álgebra y Cálculo Numérico, 2023.
- [45] P. S. Foundation, *collections — Container Datatypes*, <https://docs.python.org/3/library/collections.html#collections.defaultdict>, 2022.
- [46] P. S. Foundation, *csv — CSV File Reading and Writing*, <https://docs.python.org/3/library/csv.html>, Módulo Estándar de Python, 2022.
- [47] P. S. Foundation, *heapq — Heap Queue Algorithm*, <https://docs.python.org/3/library/heapq.html>, 2022.
- [48] P. S. Foundation, *uuid — UUID Objects According to RFC 4122*, <https://docs.python.org/3/library/uuid.html>, 2022.
- [49] R. C. Limited, *PyQt5 Reference Guide*, Disponible en: <https://www.riverbankcomputing.com/software/pyqt/>, 2023.
- [50] P. Developers, *PlantUML Documentation*, <https://plantuml.com/>, Herramienta para Diagramas UML, 2023.
- [51] P. S. Foundation, *sys — System-Specific Parameters and Functions*, <https://docs.python.org/3/library/sys.html>, 2022.
- [52] R. C. Team, *R: A Language and Environment for Statistical Computing*, <https://www.R-project.org/>, R Foundation for Statistical Computing, 2025.
- [53] R. Team, *RStudio: Integrated Development Environment for R*, Disponible en: <https://posit.co/download/rstudio-desktop/>, Posit Software, PBC, 2023.
- [54] Dirección General de Tráfico. (2025), dirección: <https://www.dgt.es/muevete-con-seguridad/conoce-las-normas-de-traffic/>.
- [55] Organización de las Naciones Unidas, *La Asamblea General adopta la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible*, <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/2015/09/la-asamblea-general-adopta-la-agenda-2030-para-el-desarrollo-sostenible/>, 2015.

Anexos

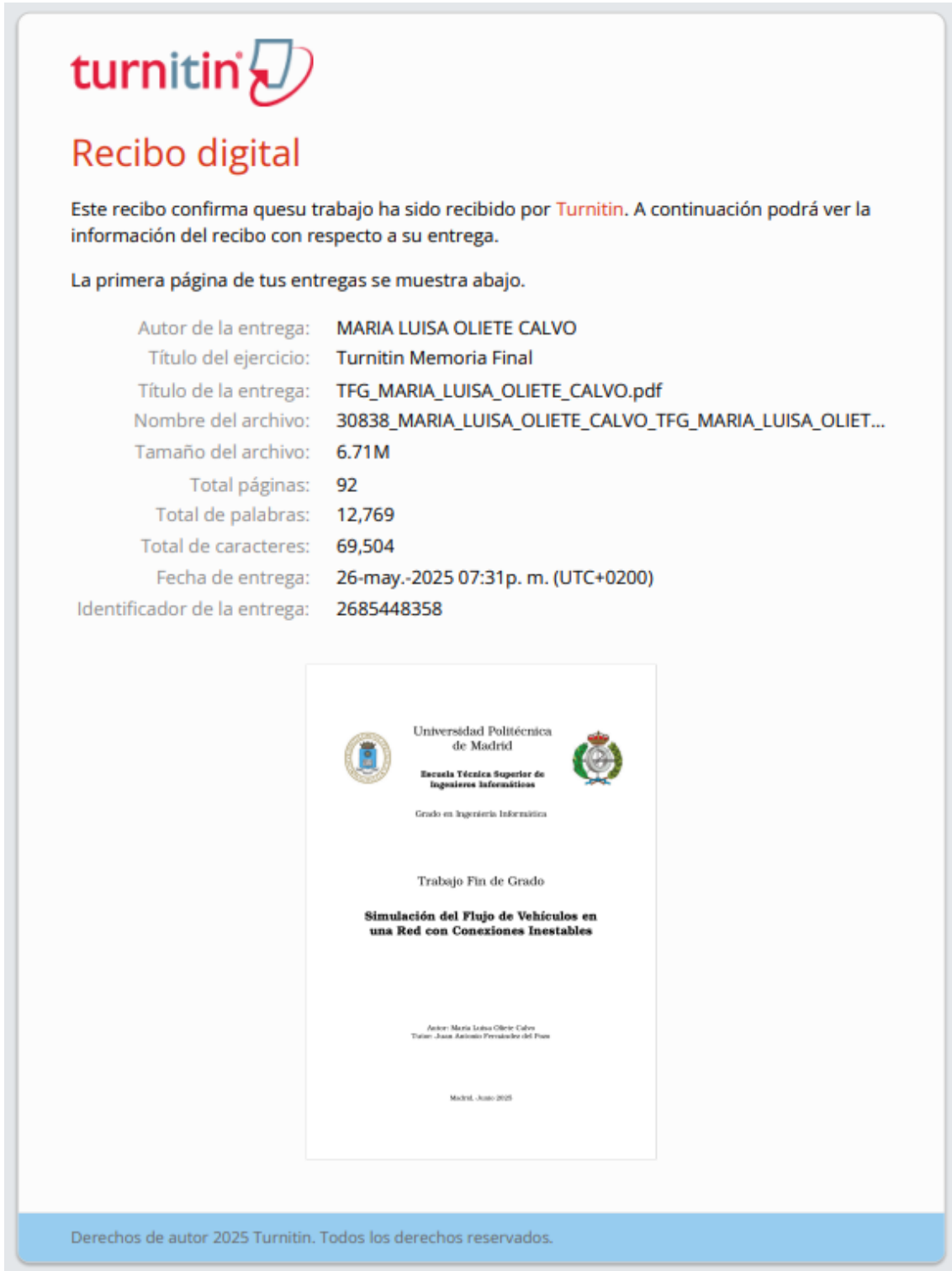
Capítulo A

Informe de Originalidad

Se ha realizado una evaluación de originalidad del presente Trabajo de Fin de Grado mediante la herramienta Turnitin.

El análisis ha generado el documento con ID de Informe 2685448358. El resultado obtenido fue un 4% de coincidencia, lo que indica un nivel muy bajo de similitud con respecto a fuentes existentes y, por tanto, un alto grado de originalidad del contenido presentado.

Capítulo A. Informe de Originalidad




turnitin

Recibo digital

Este recibo confirma que su trabajo ha sido recibido por Turnitin. A continuación podrá ver la información del recibo con respecto a su entrega.

La primera página de tus entregas se muestra abajo.

Autor de la entrega:	MARIA LUISA OLIETE CALVO
Título del ejercicio:	Turnitin Memoria Final
Título de la entrega:	TFG_MARIA_LUISA_OLIETE_CALVO.pdf
Nombre del archivo:	30838_MARIA_LUISA_OLIETE_CALVO_TFG_MARIA_LUISA_OLIET...
Tamaño del archivo:	6.71M
Total páginas:	92
Total de palabras:	12,769
Total de caracteres:	69,504
Fecha de entrega:	26-may.-2025 07:31p. m. (UTC+0200)
Identificador de la entrega:	2685448358



Universidad Politécnica de Madrid

Escuela Técnica Superior de Ingenieros Informáticos

Grado en Ingeniería Informática

Trabajo Fin de Grado

Simulación del Flujo de Vehículos en una Red con Conexiones Inestables


Autor: María Luisa Oliete Calvo
Tutor: Juan Antonio Peralbo del Pozo

Madrid, Junio 2025

Derechos de autor 2025 Turnitin. Todos los derechos reservados.

Figura A.1: Captura Porcentaje Coincidencia Turnitin.

Este documento esta firmado por



Firmante	CN=tfgm.fi.upm.es, OU=CCFI, O=ETS Ingenieros Informaticos - UPM, C=ES
Fecha/Hora	Mon Jun 02 21:31:45 CEST 2025
Emisor del Certificado	EMAILADDRESS=camanager@etsiinf.upm.es, CN=CA ETS Ingenieros Informaticos, O=ETS Ingenieros Informaticos - UPM, C=ES
Numero de Serie	561
Metodo	urn:adobe.com:Adobe.PPKLite:adbe.pkcs7.sha1 (Adobe Signature)