

Proyecto Fin de Máster Ingeniería Industrial

Evaluación del impacto de la implantación de vehículos autónomos y conectados en un entorno urbano

Autor: Andrea García Vázquez

Tutor: Luis Miguel Romero Pérez, María Teresa Aranda Romero.

Dpto. Ingeniería y Ciencia de los Materiales y del Transporte
Escuela Técnica Superior de Ingeniería
Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023



Proyecto Fin de Máster
Ingeniería Industrial

Evaluación del impacto de la implantación de vehículos autónomos y conectados en un entorno urbano

Autor:

Andrea García Vázquez

Tutor:

Luis Miguel Romero-Pérez

María Teresa Aranda Romero

Dpto. de Ingeniería y Ciencia de los Materiales y del Transporte

Escuela Técnica Superior de Ingeniería

Universidad de Sevilla

Sevilla, 2023

Proyecto Fin de Máster: Evaluación del impacto de la implantación de vehículos autónomos y conectados en un entorno urbano

Autor: Andrea García Vázquez

Tutor: Luis Miguel Romero-Pérez

María Teresa Aranda Romero

El tribunal nombrado para juzgar el Proyecto arriba indicado, compuesto por los siguientes miembros:

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2023

El Secretario del Tribunal

A mi familia

A mis maestros

Agradecimientos

Agradecer todo el conocimiento que mi tutor me ha brindado con tiempo y paciencia, además de la consciencia, dedicación y cariño que ha hecho aparecer en mí sobre el tema a tratar. Agradecer también a mis padres por su apoyo y motivación constante, gracias a ellos me he convertido en la persona que tanto deseaba ser.

Andrea García Vázquez

Sevilla, 2023

Resumen

En este documento se presenta el caso de estudio sobre la influencia que tiene la penetración de la conducción autónoma en una red urbana de carreteras. Como escenario sobre el que realizar las pruebas se tiene una parte de la red vial de Sevilla. A partir del software Vissim, se realizan simulaciones que corresponden a distintos porcentajes de penetración de vehículos autónomos para así obtener, para cada uno de los escenarios, parámetros como el retraso sufrido, la velocidad, el flujo y la densidad comparando así las diferentes situaciones. De esta forma, se evalúa la influencia de los vehículos autónomos en la mejora de situaciones de congestión, la cual finalmente resulta ser bastante leve. La levedad de la mejora es debida a la influencia de las fases semafóricas y señalización de la carretera, concluyendo que, para obtener un aprovechamiento total de este tipo de conducción, habría que adaptar las carreteras de forma que los vehículos se autogestionaran la conducción entre ellos sin necesidad de un elemento externo que rija sus tiempos.

Abstract

This paper presents a case study on the influence of the penetration of autonomous driving on an urban road network. A part of the road network in Seville is used as a test scenario. Using Vissim software, simulations are carried out corresponding to different percentages of autonomous vehicle penetration in order to obtain, for each of the scenarios, parameters such as the delay suffered, speed, flow and density, thus comparing the different situations. In this way, the influence of autonomous vehicles on the improvement of congestion situations is evaluated, which in the end turns out to be quite slight. The slightness of the improvement is due to the influence of traffic light phases and road signs, concluding that, in order to take full advantage of this type of driving, the roads would have to be adapted so that the vehicles self-manage their own driving without the need for an external element to control their times.

Índice

Agradecimientos	x
Resumen	xii
Abstract	xiv
Índice	xvii
Índice de Figuras	xx
1 Introducción	11
2 El coche autónomo	13
3 Tipos de simulación	15
3.1 <i>Microsimulación</i>	16
3.2 <i>Macrosimulación</i>	16
3.3 <i>Principales distinciones</i>	18
3.4 <i>Principios de equilibrio en el proceso de asignación</i>	19
3.4.1 Tipos de equilibrio dinámico	20
4 Fundamentos de la microsimulación del tráfico en VISSIM	21
4.1 <i>Introducción a las microsimulaciones de Vissim</i>	21
4.2 <i>Simulación del modelo de asignación dinámica</i>	22
4.2.1 Características de la asignación dinámica	22
4.2.1.1 Iteraciones durante la simulación	23
4.2.1.2 Intervalos de evaluación durante la simulación	23
4.2.1.3 Smoothing factor	24
4.2.1.4 Elección de rutas	24
4.2.1.5 Distribución seguida por Kirchoff	25
4.2.1.6 Distribución seguida por el modelo de asignación por equilibrio	26

4.2.1.7	Redistribución de los volúmenes según los costes	26
4.3	<i>Caracterización del coche autónomo en VISSIM</i>	27
5	Desarrollo de escenarios de aplicación Práctica en Vissim: Red de Sevilla con Vehículos Autónomos	30
5.1	<i>Simulación de la red urbana analizada mediante VISSIM</i>	30
5.2	<i>Implementación de la asignación dinámica</i>	34
5.2.1	Establecimiento de los parámetros base	34
5.2.1.1	Matrices	34
5.2.1.2	Costes	35
5.2.1.3	Búsqueda de caminos.	37
5.2.1.4	Selección de caminos	38
5.2.1.5	Criterio de convergencia	40
5.2.1.6	Guía de las rutas	41
6	Diagramas macroscópicos fundamentales, mfd	42
6.1	<i>Diagrama fundamental para tráfico estacionario</i>	42
6.2	<i>Historia de los Diagramas Fundamentales</i>	44
6.3	<i>Diagramas MFD</i>	46
6.4	<i>Asignación dinámica para MFD's</i>	46
6.4.1	Modelos de representación de los MFD	47
6.4.1.1	Modelo de espacio discreto	47
6.4.1.2	Modelo de espacio continuo	48
6.5	<i>Creación de los MFD a partir de la simulación</i>	49
7	Evaluación de Simulaciones en Vissim: Análisis de Resultados	51
7.1	<i>Diagramas MFD flujo-densidad</i>	51
7.1.1	Comparación de resultados.	56
7.2	<i>Diagramas MFD velocidad-densidad</i>	59
7.2.1	Comparación de resultados.	64
7.3	<i>Evaluación de los retrasos tras la implementación del coche autónomo.</i>	66
8	Conclusiones y líneas futuras	67
9	Referencias	71

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1 Representación de la red de calzadas de la simulación	12
Figura 3-1 Representación de los centroides de cada zona de viaje	17
Figura 3-2 Impacto del nivel de detalle y tamaño de la red del modelo DTA en el tiempo de compilación para alcanzar el equilibrio. [6]	19
Figura 4-1 Recomendación para el modelado de vehículos autónomos en Vissim [10].	28
Figura 5-1 Especificación de nodo para asignación dinámica.	31
Figura 5-2 Conjunto de nodos establecidos en la simulación.	31
Figura 5-3 Conjunto de zonas definidas en la simulación.	32
Figura 5-4 Matriz de coches base para el inicio de la simulación.	32
Figura 5-5 Matriz de coches objeto de estudio en la simulación.	33
Figura 5-6 Red de carreteras a estudiar.	33
Figura 5-7 Porcentaje de los tipos de vehículos que forman la demanda.	34
Figura 5-8 Selección parámetros de los archivos en el DynamicAssignment.	35
Figura 5-9 Selección de las ponderaciones en el costo.	36
Figura 5-10 Selección parámetros del costo en el Dynamic Assignment.	37
Figura 5-11 Selección parámetros de búsqueda de caminos en el Dynamic Assignment.	38
Figura 5-12 Establecimiento de parámetros de selección de caminos en el Dynamic Assignment.	40
Figura 5-13 Selección del criterio de convergencia en el Dynamic Assignment.	41
Figura 5-14 Selección parámetros de la ruta en el Dynamic Assignment..	41
Figura 6-1 Vistas del diagrama fundamental [13]	43
Figura 6-2 Diagrama fundamental con rangos separados para situación estable e inestable. [15]	44
Figura 6-3 (a) Modelo de depósito, (b) o-MFD, (c) Velocidad-Acumulación MFD [18]	46
Figura 6-4 (a) Posibles rutas válidas a nivel de región, (b) Posibles rutas válidas a nivel de arcos [20]	47
Figura 6-5 Representación del modelo de espacio continuo	49
Figura 7-1 Gráfica flujo-densidad para un 0% de penetración.	51
Figura 7-2 Gráfica flujo-densidad para un 10% de penetración.	52
Figura 7-3 Gráfica flujo-densidad para un 20% de penetración.	52
Figura 7-4 Gráfica flujo-densidad para un 30% de penetración.	53
Figura 7-5 Gráfica flujo-densidad para un 40% de penetración.	53
Figura 7-6 Gráfica flujo-densidad para un 50% de penetración.	54
Figura 7-7 Gráfica flujo-densidad para un 60% de penetración.	54
Figura 7-8 Gráfica flujo-densidad para un 70% de penetración.	55

Figura 7-9 Gráfica flujo-densidad para un 80% de penetración.	55
Figura 7-10 Gráfica flujo-densidad para un 90% de penetración.	56
Figura 7-11 Gráfica flujo-densidad para un 100% de penetración.	56
Figura 7-12 Gráfica flujo-densidad comparando penetración del 0%, 50% y 100%.	57
Figura 7-13 MFD que relaciona la acumulación y el flujo saliente de una ciudad [26]	58
Figura 7-14 Gráfica velocidad-densidad para un 0% de penetración.	59
Figura 7-15 Gráfica velocidad-densidad para un 10% de penetración.	59
Figura 7-16 Gráfica velocidad-densidad para un 20% de penetración.	60
Figura 7-17 Gráfica velocidad-densidad para un 30% de penetración.	60
Figura 7-18 Gráfica velocidad-densidad para un 40% de penetración.	61
Figura 7-19 Gráfica velocidad-densidad para un 50% de penetración.	61
Figura 7-20 Gráfica velocidad-densidad para un 60% de penetración.	62
Figura 7-21 Gráfica velocidad-densidad para un 70% de penetración.	62
Figura 7-22 Gráfica velocidad-densidad para un 80% de penetración.	63
Figura 7-23 Gráfica velocidad-densidad para un 90% de penetración.	63
Figura 7-24 Gráfica velocidad-densidad para un 100% de penetración.	64
Figura 7-25 Gráfica velocidad-densidad comparando penetración del 0%, 50% y 100%.	64
Figura 7-26 Gráfica demora-% penetración de vehículos autónomos.	66

1 INTRODUCCIÓN

En el 3200-3700 a.c aparece la rueda, la cual da comienzo a una nueva sociedad que se empieza a desarrollar en el ámbito del transporte. Este ámbito ha sufrido una gran evolución a lo largo de la historia, así es que nuevos medios de transporte han aparecido a lo largo de los últimos años, desde el carro hasta el ferrocarril, el coche o la aviación. El primer vehículo autopropulsado tiene su origen en 1886 creado por Nicolas-Joseph Cugnot; posteriormente, en 1896 aparece el primer camión de la mano de Gottlieb Daimler y Wilhelm Maybach. A día de hoy, el vehículo privado parece poseer una evolución ya estabilizada. Son muchas las personas que piensan que dentro de poco una gran revolución en la forma del transporte individual va a cambiar de forma radical la manera en que hoy en día lo concebimos, otras en cambio, creen que habrá cambios en la misma pero que su desarrollo se contemplará paulatinamente.

Pese a que ha sido un rápido y notorio desarrollo el de este ámbito, mayores son las expectativas que se han depositado en él. Desde vehículos voladores, coches que consiguen alcanzar velocidades impensables o incluso medios de transporte gestionados sin necesidad del factor humano, las ideas que han ido apareciendo son tan creativas que sólo se puede pensar en aplicarlas en escenarios ficticios, excepto esta última.

Una clara evolución que se está comenzando a tratar es el vehículo conectado, el cual es capaz no sólo de intercambiar información sobre el estado del tráfico, sino también de recoger y enviar información sobre la situación vial siendo consciente de la congestión, accidentes o mejores rutas alternativas que se dan en la red de carreteras. Con diversos fines como habilitar la conducción a personas discapacitadas, perder menos tiempo en traslados o evitar accidentes se comienza a plantear la idea de desarrollar un vehículo autónomo, la evolución del vehículo conectado. El afán de lograr un transporte más sostenible lleva a todos los ingenieros de transporte del mundo a investigar sobre este tipo de conducción. Está claro que debido a la complejidad de la conducción y de su introducción en las carreteras su implementación no será inmediata, son muchos los dilemas tanto técnicos como éticos que se han de zanjar previamente.

Debido a la problemática del asunto se está dejando a las grandes multinacionales que gestionen el desarrollo de ambos tipos de vehículos, algo peligroso ya que se les está dando la oportunidad de controlar el tráfico de las ciudades. De esta forma cuando un viajero le pregunte a una empresa privada qué recorrido tomar para llegar a su destino, ésta podrá beneficiarse guiándole en función de sus propios intereses.

Como bien es sabido estos vehículos que se desenvuelven en las carreteras sin necesidad del factor humano poseen un menor margen de error, se relacionan de manera instantánea con el entorno. Esto conlleva a tiempos de viaje más efímeros, menores distracciones basadas en errores humanos que puedan llevar a desenlaces desastrosos, mayor eficiencia en la selección de rutas y, con gran relevancia en el asunto, reducción de la congestión en las carreteras.

A continuación, en el presente documento se expone un estudio para evaluar la influencia de la conducción autónoma en las calzadas. Para llevarlo a cabo se toma como escenario base la red de carreteras de Sevilla que se

2 EL COCHE AUTÓNOMO

El inicio de este tipo de vehículos se sitúa en el Instituto de Investigación Mecánica de Kubaba (Japón) donde se llevó a cabo el primer vehículo autónomo con velocidades de hasta 30 *km/h*.

Este tipo de vehículo se caracteriza por reconocer el entorno en el que se mueve, determinando los riesgos existentes y planificando su ruta sin necesidad de ningún tipo de intervención del ser humano. De esta forma, su conducción no cuenta con los errores en los periodos de percepción y de reacción que se dan en la conducción tradicional, dando lugar a unos tiempos de viaje mucho más cortos. Estas características permiten esbozar una idea sobre una mayor fluidez en el tráfico y, por consecuencia, una menor contaminación atmosférica en un futuro cercano.

Desde la aparición de dicho vehículo todo han sido avances en la materia, Google lleva acumulados 1,1 millones de *km* de distancia de prueba hasta abril de 2014 con su modelo de coche autónomo. A dicha empresa se han unido otras como Volvo, con su modelo de conducción en enjambre, y BMW, con sus sistemas de conducción semiautónoma. A estos avances tecnológicos se une la gran acogida a nivel institucional, gracias a lo cual aumenta el número de permisos institucionales y legales por parte de la Administración para llevar a cabo pruebas sobre el funcionamiento de dichos vehículos. Mismamente en EE.UU. muchos estados han permitido ya la conducción autónoma de vehículos de carga, habiendo la posibilidad de expedir permisos de conducción necesarios para habilitársela a quien lo desee.

Como puede verse en [1], el tráfico influye en la contaminación y es causante de una gran parte de muertes de la población, éste y muchos otros aspectos hacen que cada día se vea más claro un futuro basado en la conducción autónoma. De todos modos, para obtener cambios en la situación de las carreteras, hay que llevar a cabo modificaciones en las vías que todavía no han tenido lugar.

Básicamente el vehículo autónomo es aquel que, mediante el uso de sensores y de la lógica, es capaz de recibir señales del entorno que le rodea y con dicha información generar respuestas. Las diferentes tecnologías empleadas hoy en día son, por ejemplo, la navegación a través de cámara empleada por Tesla (constituida por 8 cámaras, 12 sensores de ultrasonido de apoyo y un radar delantero) o la usada por Google, Ford o Toyota denominada el “LIDAR”, un emisor de rayos rotatorio que se encarga de reconstruir el entorno 360 grados alrededor del vehículo.

Lo llamativo de las características de este medio de transporte es el hecho de poder recibir señales del entorno y actuar con rapidez. Esto da lugar a la posibilidad de acelerar el tiempo de reacción del mismo ante las fases semafóricas o ante las distancias a mantener entre vehículos, las cuales se ven reducidas ya que eliminando el error humano el coche autónomo es capaz de mantener la mínima distancia de reacción posible ante otro vehículo. [2]

Con el fin de definir el papel del conductor que está al mando de un vehículo autónomo, clarificar dudas sobre la

aplicación de la reglamentación y ser capaces de explicar más fácilmente la conducción autónoma, el estándar

[3] establece los distintos niveles de automatización de la conducción siguientes:

- Nivel 0, Automatización Nula: toda la tarea de conducción es realizada por el conductor pese a ser asistido por Sistemas de Seguridad Activos.
- Nivel 1, Asistencia a la Conducción: el sistema lleva a cabo las subtareas de control lateral o longitudinal, pero no las dos a la vez. El conductor ha de tener el control total del vehículo y estar pendiente de la situación en todo momento
- Nivel 2, Automatización Parcial de la Conducción: el sistema realiza las subtareas de control tanto longitudinales como laterales. Puede controlar de manera simultánea velocidad y dirección. Sin embargo, el conductor sigue siendo el responsable de la conducción.
- Nivel 3, Automatización Condicional de la Conducción: el control de las subtareas y la monitorización y respuesta ante cambios en el entorno los realiza el sistema. Bajo la premisa de que el conductor esté preparado para tomar las riendas cuando sea necesario, el vehículo es capaz de llevar a cabo tareas de conducción de manera autónoma.
- Nivel 4, Alta Automatización de la Conducción: se distingue del nivel anterior en que el sistema, además, responde en caso de fallo en ciertas situaciones. Excluyendo ciertas limitaciones por las condiciones geográficas, no se espera que el usuario intervenga.
- Nivel 5, Total Automatización de la Conducción: el vehículo toma el control bajo cualquier circunstancia, sin necesidad de contemplar un entorno específico. No requiere intervención humana.

En este estudio el nivel de autonomía que se contempla es el 5, los coches autónomos definidos poseen una total automatización de la conducción.

3 TIPOS DE SIMULACIÓN

A la hora de analizar el tráfico de una red de carreteras cabe destacar dos formas de llevarlo a cabo, mediante modelos de simulación micro o macroscópica.

La microsimulación permite llevar a cabo creaciones detalladas y realistas de múltiples escenarios hipotéticos. Es posible llevar a cabo simulaciones sin uso de la programación, obteniendo una visión detallada del tráfico y obteniendo una fácil percepción de las ventajas y desventajas de distintos escenarios. Esta permite de manera sencilla estimar los efectos del vehículo autónomo en la red, siendo éstos evaluados bajo condiciones realistas. Finalmente, es una herramienta perfecta para recrear distintas situaciones que pueden acontecer en la realidad, teniendo en cuenta cualquier medio de transporte y siendo posible evaluar los resultados de una manera visual. Este software es capaz de reproducir a relativa gran escala la evaluación del tráfico en la zona estudiada, simulando el comportamiento de cada conductor individual lleva a cabo en cada escenario establecido. Lo que le distingue del resto es que aquí los vehículos no tienen por qué mostrar un comportamiento uniforme, sino que mediante la asignación de valores a una serie de parámetros es posible caracterizar diferentes tipos de conductores. De esta forma es posible representar situaciones comunes y realistas no planificadas como por ejemplo problemas de tráfico complejos, impacto de las características de los aparcamientos o incidentes en la red. En resumen, se centra en un comportamiento de los vehículos más individual mediante modelos que entran más en detalle. De esta forma el modelado de cada vehículo se lleva a cabo de manera propia, teniendo en cuenta parámetros como lo son la velocidad, la distancia de seguimiento, la aceleración o su comportamiento. Así se tiene como resultado una visión más precisa y realista. [4] Para esta opción se requiere un almacenamiento de datos mayor, lo que implica una mayor potencia computacional. Este tipo de simulación ha sido el seleccionado para realizar el estudio, mediante la herramienta de microsimulación Vissim.

Otra alternativa para este tipo de análisis sería utilizar simulaciones macroscópicas. Por ejemplo, la empresa PTV, propietaria de Vissim, ofrece Vissum para los estudios macroscópicos. Otra opción sería TransCAD, de la empresa norteamericana Caliper. Este tipo de software es usado para contemplar zonas de gran extensión. Se modelan los viajes empleando todos los modos disponibles. Por lo general, los tiempos de ejecución son mucho más breves que los de la microsimulación. El comportamiento se basa en lo recopilado mediante encuestas, y cuando hablamos de la demanda de los viajeros, se establece como viajes personales basados en datos del centro demográfico. Básicamente se centra en un comportamiento de los vehículos más colectivo, usando modelos matemáticos simplificados para mostrar el flujo de tráfico. Las ecuaciones que estos modelos emplean relacionan la velocidad con la densidad del tráfico al mismo tiempo que, tanto la velocidad media como la distancia de tráfico, (parámetros macroscópicos) son el medio de estudio del flujo en toda la red.

3.1 Microsimulación

Se trata de un modelado del comportamiento de los vehículos que se lleva a cabo de manera particular. Cada vehículo sigue sus propias reglas de comportamiento ya que actúa de manera autónoma, estas reglas siguen los principios de las leyes de movimiento y conservación del momento. Mediante ecuaciones diferenciales que relacionan las variables de posición, velocidad y aceleración, y se predicen los futuros movimientos que llevarán a cabo los vehículos. También se simulan situaciones relacionadas con los cambios de carriles, las decisiones de los conductores en las intersecciones o la interacción entre los vehículos, todas ellas mediante el conocimiento sobre el comportamiento humano y las observaciones empíricas.

Una gran cantidad de datos han de ser proporcionados en un principio para definir el comportamiento de la conducción en este tipo de modelado tan detallado, como límites de velocidad, señales y demanda de tráfico además de la infraestructura de la red. De esta forma se obtienen resultados específicos que permiten llevar a cabo un análisis más profundo de la congestión, los tiempos de viaje o la capacidad de la red. Otra ventaja de este tipo de simulación es la facilidad para llevar a cabo la evaluación de diferentes infraestructuras o estrategias seguidas.

En función de los objetivos de la simulación se tienen distintos modelos matemáticos que se pueden emplear, aquí se nombran algunos ejemplos:

- Modelo de comportamiento de vehículos: simula el seguimiento entre los vehículos además del comportamiento que se da en los conductores, todo ello mediante ecuaciones diferenciales que describen para cada vehículo magnitudes como la velocidad, la aceleración y su posición. La variable fundamental de estos modelos es la distancia con el vehículo precedente. Hay una gran cantidad de modelos de car-following, puede verse una recopilación de ellos y un recorrido histórico de su evolución en [5]. Vissim implementa mucho de ellos, y por defecto recomienda los modelos de Widemann 74 y 99. En
- Modelo de demanda: con este modelo se obtiene el número de vehículos que acceden a la carretera, lo hace mediante datos históricos entre otros factores de tráfico. (matriz)
- Modelo de red: gracias a él se obtiene cómo se comportan los vehículos en la red. Tiene en cuenta geometrías de la infraestructura como son las intersecciones, anchos de carriles, señalizaciones y fases semafóricas.

El software Vissim, que emplea la microsimulación, utiliza todos estos modelos. Con el modelo de demanda se obtiene la matriz O-D, mediante el modelo de comportamiento de los vehículos establece la forma que éstos tienen de desenvolverse en la carretera y, finalmente, con el modelo de red implementa las características de la infraestructura de la red en el modelo.

3.2 Macrosimulación

Los modelos que se siguen en la macrosimulación dan como resultado las llamadas variables macroscópicas. Estas

variables macroscópicas que se utilizan son la intensidad o flujo de vehículo por hora y tiempos de viaje, densidad de tráfico; a partir de ellos se puede obtener la capacidad de la red y la velocidad media. Se obtienen a partir de una descripción del flujo de la red, describiendo el tráfico como un fluido, proporcionando magnitudes medias y olvidando el nivel de partícula o vehículo de la microsimulación.

La macrosimulación comienza por establecer las dimensiones espaciales. Para ello primero identificamos el área de estudio a tratar, a continuación, se lleva a cabo una zonificación de ésta y finalmente se modela la red de transporte. La zonificación conlleva una simplificación del área de transporte a través del establecimiento de unos centroides que concentran todos los viajes de la misma zona de transporte. Como se puede ver en la Figura 3-1:



Figura 3-1 Representación de los centroides de cada zona de viaje

En la misma imagen y representados en color amarillo aparecen los conectores. Éstos tienen la función de conectar todos los centroides a la red de transporte, dando lugar a caminos entre los orígenes y destinos si la red es conexas. La zonificación se puede llevar a cabo agrupando zonas de orígenes y destinos con el mismo código postal o de la misma sección censal, por ejemplo. A mayor número de zonas más complejidad se halla en el modelo.

El modelo clásico de cuatro etapas caracteriza este tipo de simulación. Éste se basa en una demanda analizada mediante las etapas de generación-atracción, distribución y reparto modal. A partir de estas se obtiene la matriz de origen y destino que se carga en la oferta, donde se encuentra la etapa de asignación. La etapa de asignación tiene como finalidad distribuir la demanda sobre la red a partir de la demanda de viajes, la red de transporte y el comportamiento de los vehículos. A través de la asignación se busca llegar al equilibrio del tráfico, en el cual los vehículos se distribuyen en la red de transporte de forma que se obtengan los costes mínimos.

El modelo empleado puede ser determinista, en el que se supone que los viajeros siempre escogen el viaje más corto, o estocástico, en el cual los usuarios pretenden escoger de nuevo los viajes de menor tiempo, pero con un margen de error debido a sus errores de percepción o estimación de los costes de las diferentes alternativas. El que

se emplea generalmente es el determinista, pues al abarcar una red tan grande la simplificación no afecta de manera notable a los resultados y permite una solución más sencilla, y estático, ya que da lugar a una estabilidad de los patrones de flujo.

Como es sabido los tiempos de viaje se obtienen como suma de los tiempos de los arcos, los cuales se obtienen como una función denominada “función de demora”, siendo la más usada de todas las funciones tipo “BPR”. Estas funciones son propias de la macrosimulación, pues muestran la influencia de las predicciones de los viajeros:

$$\frac{t}{t_0} = f\left(\frac{v}{c}, \alpha\right) = 1 + \alpha \left(\frac{v}{c}\right)^\beta$$

Donde:

t : tiempo real de viaje (s)

t_0 : tiempo de flujo libre, en el que el viajero es el único usuario en la red (s)

v : volumen de tráfico en la red (veh/h)

c : capacidad de la red (veh/h)

α, β : coeficientes.

De esta forma se obtiene una relación adimensionalizada entre el tiempo que se tarda en recorrer un arco y el flujo de vehículos que lo atraviesa. Esta da lugar al tiempo real que tarda el usuario en llevar a cabo el viaje frente a un tiempo ideal de un viaje sin tráfico, el denominado tiempo en flujo libre. De esta forma se obtiene el tiempo perdido en el viaje por congestión, error que influye sobre las predicciones de este modelo.

3.3 Principales distinciones

Finalmente, se llega a la conclusión de que la microsimulación se centra más en el usuario individual mientras que la macrosimulación trabaja con todo el conjunto de la red de carreteras. Como se puede ver en la Figura 3-2, un mayor nivel de detalle junto con una amplia área de estudio, dan lugar al mayor tiempo de computación para llegar al equilibrio. El mayor grado de detalle lo tiene la microsimulación, que es la que puede alcanzar los tiempos de ejecución mayores. Por otro lado, se puede observar cómo mediante la macrosimulación se pueden tratar grandes áreas de estudio sin requerir un tiempo demasiado elevado en alcanzar el equilibrio.

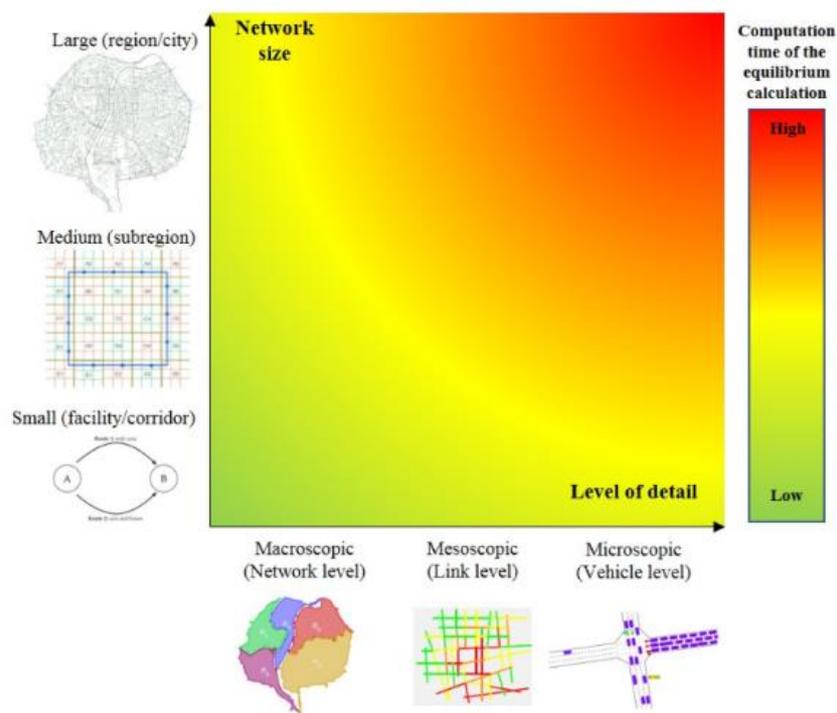


Figura 3-2 Impacto del nivel de detalle y tamaño de la red del modelo DTA en el tiempo de compilación para alcanzar el equilibrio. [6]

3.4 Principios de equilibrio en el proceso de asignación

La asignación por equilibrio se basa en modelos donde las demandas de las matrices O-D están fijas. Los modelos de equilibrio tienen su comienzo en 1920, cuando en [7] se explica el comportamiento del tráfico en condiciones de congestión. A partir de ahí se establece un modelo de asignación por equilibrio para tráfico determinista, el cual se basa en:

- La red de transporte consiste en nodos (n) que representan los orígenes y destinos del tráfico y en arcos (a) que representan la red de carreteras.
- El número de vehículos (v) que hay en un arco (a) es v_a .
- El coste del viaje se obtiene a través de una función denominada $c_a(Q)$, donde Q es el vector que representa el flujo de la red.
- Modelo de funciones de costes del comportamiento dependiente del tiempo florain and hearn 2008.

Este equilibrio establecido por Knight es el equilibrio del usuario o de Wardrop y se caracteriza por viajeros que ajustan sucesivamente su selección de caminos hasta estabilizar el coste y flujo de las rutas. El principio de selección de rutas de Wardrop es, como ya se ha mencionado, igual que el de Knight y se aceptó para lograr la división del

flujo de vehículos y así dar lugar a una descongestión de las carreteras. Como se regula en [8], los viajeros han de encontrar el camino más corto desde su origen a su destino y se llega al equilibrio cuando no hay posibilidad de acortar su camino mediante la selección de cualquier otra ruta alternativa.

El equilibrio de Wardrop puede ser estático o dinámico. Mientras que el estático es el que se emplea en la macrosimulación, es el dinámico el que se da en micro y por tanto el que se emplea en este estudio.

3.4.1 Tipos de equilibrio dinámico

En función del objetivo de la solución éste se divide en:

- Equilibrio dinámico del usuario (DUE): donde cada usuario trata de reducir su propio coste de viaje. Dentro de éste se encuentran el “Equilibrio dinámico del usuario reactivo” (RDUE), el cual reduce los costes instantáneos del viaje del usuario, y el “Equilibrio dinámico del usuario predictivo” (PDUE), en el que cada usuario intenta minimizar su coste de viaje esperado.
- Sistema dinámico óptimo (DSO): en el que los usuarios son guiados con la finalidad de reducir el coste total de todos los viajes que se llevan a cabo en la red.

El modelo que se sigue en este estudio es el RDUE, ya que cada usuario busca reducir su propio tiempo y coste de viaje a partir del coste instantáneo del viaje realizado.

4 FUNDAMENTOS DE LA MICROSIMULACIÓN DEL TRÁFICO EN VISSIM

4.1 Introducción a las microsimulaciones de Vissim

La modelización de la red de tráfico de Sevilla se lleva a cabo mediante microsimulación, a través del software VISSIM. Una simulación microscópica tiene un carácter dinámico desde su concepto inicial. Las magnitudes del tráfico van variando a lo largo de todo el periodo simulado, los vehículos van realizando sus viajes distribuidos en dicho periodo. Sin embargo, existen dos posibilidades para la definición de las rutas de los vehículos, que dan lugar a dos aproximaciones diferentes a la simulación microscópica: a) las simulaciones que podrían denominarse simulaciones de rutas y flujos predeterminadas, y b) las simulaciones con asignaciones dinámicas. El estudio realizado se lleva a cabo mediante asignación dinámica. Un modelo de asignación de tráfico permite que el proceso de selección de rutas de los vehículos dependa de la congestión existente, y no que recaiga toda la responsabilidad de la distribución de los vehículos sobre la red en el modelador, que en una microsimulación del tipo a) debe proporcionar la información completa de la distribución de flujos. La asignación dinámica permite modelar cambios en la demanda durante el periodo de simulación y los vehículos cargan el modelo de una forma más realista que en las asignaciones estáticas propias de los modelos macroscópicos.

Por una parte, en las simulaciones microscópicas alternativas en VISSIM, las del tipo a) definido anteriormente, el modelador debe conocer de antemano todo el comportamiento de la red y de la demanda. Estas simulaciones pueden ser útiles para modelos de muy pequeña escala, a nivel de una o dos intersecciones, para obtener por ejemplo estimaciones de capacidad y longitudes de colas. Sin embargo, este tipo de modelado no resulta interesante para la temática a tratar, pues gran parte de la posible mejora en la red por la introducción de vehículos autónomos vendrá dada, previsiblemente, por cambios en las rutas debido a diferencias en los niveles de congestión. Utilizando estos modelos, el resultado está predeterminado desde el principio, por lo que no cuenta con la capacidad predictiva requerida en este estudio. En este trabajo no se van a utilizar estas simulaciones de rutas y flujos predeterminados. Para aprender sobre ellas se recomienda la consulta del trabajo [9].

Por el otro lado se tiene la asignación dinámica; en este tipo de modelado se lleva a cabo una simulación en la cual tanto la ruta a seguir por el vehículo como el volumen de viajes va a ir evolucionando a lo largo de una serie de iteraciones hasta finalmente alcanzar la convergencia. Inicialmente se establecen los orígenes y los destinos del transporte a tratar, los cuales llegan y salen de “parking lots” que son puntos distinguidos dentro de unas áreas. En la primera iteración los vehículos escogen el camino de menor longitud para llegar a su destino, según avanza la

simulación Vissim calcula las mejores rutas al mismo tiempo que van apareciendo unas nuevas. De esta manera continúan las iteraciones hasta encontrar los caminos óptimos dentro de los todos los posibles, se sabe que se alcanza dicho punto cuando se produce la convergencia de los tiempos de viaje.

Este software permite llevar a cabo la representación de escenarios realistas de tráfico, ya que emplea un modelo de comportamiento realista de los conductores. Para ello tiene en cuenta la distancia de seguridad, la anticipación de señales, interacción con otros vehículos y los cambios de carriles, el comportamiento de peatones, ciclistas y de los vehículos en las intersecciones. Esta herramienta permite un análisis de la red de tráfico representada, valorando la velocidad media, la congestión, la capacidad de la red y los tiempos de viaje.

4.2 Simulación del modelo de asignación dinámica

Como ya se ha explicado, se trata de un algoritmo iterativo cuyos resultados van variando hasta alcanzar la convergencia especificada con el fin de encontrar las rutas y el volumen de demanda óptimo para aminorar lo máximo posible el tiempo de viaje o, en general, los costes de los vehículos. La convergencia que se busca obtener se logra a partir de iteraciones configuradas en base a una serie de parámetros, dichos datos han de ser fijados inicialmente de la siguiente forma:

1. Crear la matriz OD que se desea emplear y seleccionarla para este tipo de modelo.
2. Parametrizar costes, búsqueda y selección de los caminos.
3. Especificar el criterio de convergencia.
4. Simular habiendo establecido el número de iteraciones a llevar a cabo.

4.2.1 Características de la asignación dinámica

A continuación, se explican una serie de parámetros que definen de qué forma se lleva a cabo la convergencia del modelo por asignación dinámica. Un esquema del proceso iterativo puede verse en la ilustración 5-1:

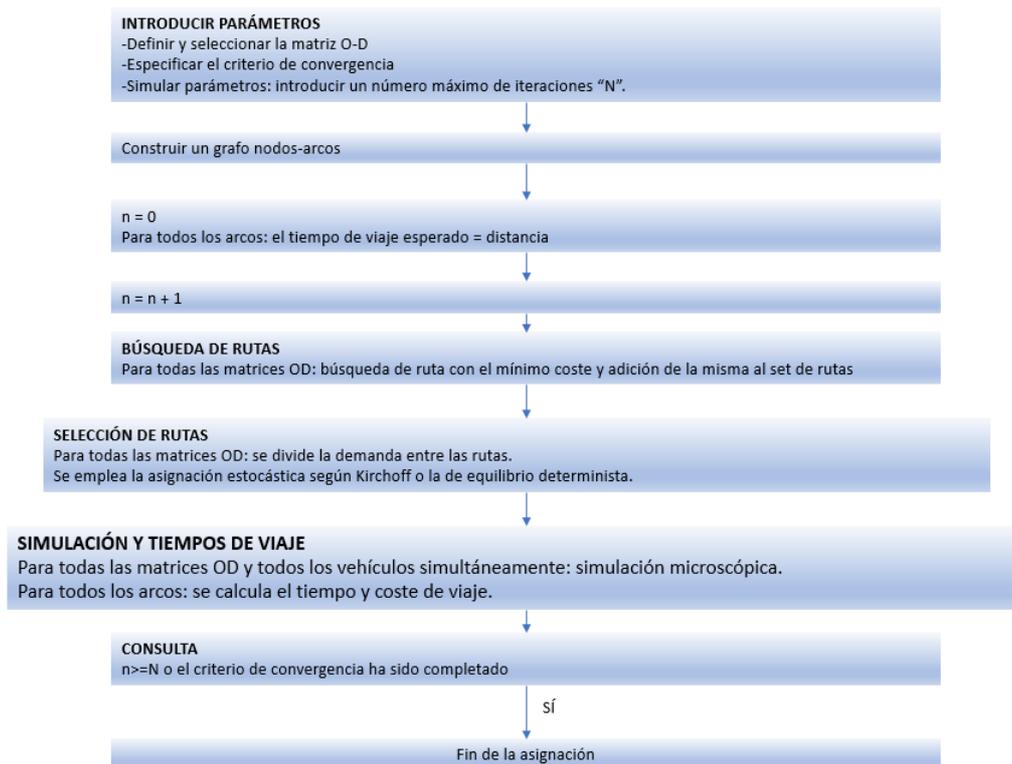


Ilustración 4-1 Proceso iterativo de la asignación dinámica

4.2.1.1 Iteraciones durante la simulación

Una vez los parámetros iniciales son establecidos, se crea un grafo abstracto sobre el que se realizarán los cálculos de tiempos en rutas denominado grafo nodos-ejes. En la primera iteración ($n=0$) no se cuenta con tiempo en rutas de anteriores iteraciones y por tanto utiliza la distancia para calcular rutas, que equivale a suponer una velocidad constante en todo el escenario. A partir de ahí comienzan las distintas iteraciones siguiendo los pasos siguientes:

1. Búsqueda y gestión de caminos, Route search: para todos los pares Origen-Destino de la matriz OD se busca la ruta con el mínimo coste y se añade a la lista. Vissim va manteniendo dicha lista para ser reutilizada iteración a iteración. Para ello genera los archivos “.meg”.
2. Mecanismo de Elección de ruta, Route choice: para toda la matriz OD se divide la demanda entre todas las rutas según el criterio de asignación determinista o Kirchoff.
3. Simulación y tiempos de viaje: simultáneamente para toda la matriz OD se lleva a cabo una simulación microscópica para todos los ejes calculando el tiempo de viaje y coste. Para visualizar los costes genera los archivos “.bew”.
4. Termina el proceso cuando éste converge. La convergencia se alcanza cuando ningún usuario puede reducir el coste de su viaje.

4.2.1.2 Intervalos de evaluación durante la simulación

Para determinar los tiempos de viaje, se calcula una media de los tiempos recogidos durante un intervalo

predeterminado. Estos intervalos de tiempo son periodos en los que se divide la simulación, al finalizar cada uno a partir de esa evaluación con sus datos correspondientes obtenidos sobre el tiempo de viaje es cuando se establecen los nuevos caminos que poco a poco buscan ser los óptimos. Se debe establecer un intervalo de tiempo en el que el tráfico vaya a cambiar de manera significativa.

4.2.1.3 Smoothing factor

Para la estimación de los tiempos en las diferentes rutas se utilizan tiempos observados en las iteraciones anteriores. Existe la posibilidad de elegir el peso que se le quiere asignar a cada una, es decir, se puede dar más importancia a las nuevas iteraciones, supuestamente más cerca de la convergencia y por tanto de los tiempos de la solución real. Este proceso se lleva a cabo gracias al establecimiento del denominado “smoothing factor”. Vissim recomienda diferentes valores a dicho parámetro según el método a elegir para el reparto de flujos entre las rutas (asignación estocástica o Kirchoff, o el modelo de asignación por equilibrio UE). Por otro lado, el tiempo de una ruta se puede determinar en base a los tiempos de iteraciones anteriores de los viajeros que la siguieron o como suma de los tiempos que, en las iteraciones anteriores, se necesitaba para recorrer cada uno de los arcos que la componen.

4.2.1.4 Elección de rutas

En la asignación dinámica como se ha explicado anteriormente, los caminos han de estar definidos con un “parking lot” de origen y otro de destino. Es posible una gran cantidad de combinaciones de ejes que den lugar a distintos caminos para llegar de una zona a otra. Vissim ha de detectar todas las rutas posibles para llegar de un punto de origen a uno de llegada y llevar a cabo una selección discreta (ya que dicha selección puede ser calculada por un conjunto de alternativas discretas). La evaluación de los caminos identificados se calcula obteniendo los costes generalizados para el tiempo de viaje, la distancia y los costes financieros para todos los ejes. De esta forma el coste generalizado de la ruta se obtiene mediante la suma de los costes de los ejes que la componen.

$$C_r = \sum_{a \in R} C_a$$

Donde:

C : costes generalizados

R : un camino

a : un eje contenido en R

Siendo el beneficio el inverso de este, de forma que:

$$U_j = \frac{1}{C_j}$$

Donde:

U_j : el beneficio del camino j

C_j : el coste generalizado del camino j

Pese a que la primera simulación usa la longitud de la ruta, las siguientes iteraciones para llevar a cabo la búsqueda de los mejores caminos se basan en estos costes generalizados, como dichos costes varían en función del tipo de coche, cada uno de éstos puede tener su camino idóneo. En estas iteraciones posteriores en las que Vissim no usa más dicha longitud, añade un factor ficticio de tiempo de viaje de 0,1s para ejes no usados aún por los vehículos, de esta forma el programa encarrila las iteraciones hacia el estudio de nuevas rutas. Debido a ese factor, cualquier ruta puede aparecer, incluso alguna que contenga ejes que den lugar a desvíos innecesarios que aumenten el tiempo de viaje, las cuales se eliminan para no tenerlas en cuenta en las próximas iteraciones.

De esta manera la probabilidad de que un camino sea seleccionado se determina a través de la siguiente ecuación:

$$p(R_j) = \frac{e^{\mu U_j}}{\sum e^{\mu U_j}}$$

Donde:

U_j : es el beneficio de la ruta j

$P(R_j)$: es la probabilidad de selección de j

μ : el parámetro de sensibilidad del modelo denominado “Logit scaling factor” para la selección del “parking lot” de destino. Dicho parámetro determina cuán fuerte la distribución responde a los diferentes beneficios.

4.2.1.5 Distribución seguida por Kirchoff

La función lógica que aplica Kirchoff es la siguiente:

$$p(R_j) = \frac{U_j^k}{\sum_i U_i^k}$$

Donde:

U_j : el beneficio del camino j

$P(R_j)$: la probabilidad de que j sea seleccionado

k: el parámetro de sensibilidad del modelo

Para Kirchoff, el ratio de beneficio determina la distribución de éstos, por eso se da una pequeña variación en el tráfico que se le asigna entre las rutas de mayor tiempo de viaje mientras que las que poseen un tiempo más corto poseen una gran diferencia de tráfico asignado entre unas y otras. De esta manera en dos caminos que duren 100 y 105 minutos la diferencia del volumen de flujo asignado entre ellos será pequeña, en caminos de 10 y 15 minutos

la diferencia será mayor. Este es el modelo que se emplea en la simulación del estudio.

4.2.1.6 Distribución seguida por el modelo de asignación por equilibrio

Este modelo distribuye la demanda según los costes, llevando los flujos de las rutas más costosas a las más baratas, de esta forma el número de rutas caras se ve reducido. De esta forma la selección de caminos se lleva a cabo mediante la probabilidad $p_{s,n,v}^j$.

Donde:

j : la ruta considerada

s : la iteración del proceso de asignación dinámica

n : intervalo de tiempo en el que se divide la iteración

v : tipo de vehículo

4.2.1.7 Redistribución de los volúmenes según los costes

Sabiendo que:

$$c_s^j = c_{s,n,v}^j$$

j : ruta inicial

$$c_s^- = \frac{1}{|J|} \sum_{j \in J} c_s^j$$

Es el promedio de costes, siendo J el número de caminos.

La demanda entre las diferentes rutas se realiza en la siguiente dirección:

$$d_s = (d_s^j)_{j \in J}$$

De esta forma teniendo en cuenta:

$$d_s^j = c_s^j - c_s^-$$

Sabiendo que c_s^- hace alusión al promedio de los costes se cumple que:

$$\sum_{p \in P} d_s^p = 0$$

El volumen es distribuido de las rutas que son más costosas al resto. Cada vez el volumen que se distribuye es menor, esto lo sabemos ya que se sigue la función:

$$\alpha_{tot} = \frac{1}{s_{it}}$$

Siendo s_{it} el índice de la iteración actual el cual se ve incrementado al final de cada iteración, siguiendo las

siguientes condiciones:

- Se ha llevado a cabo una asignación dinámica y las matrices han sido diferenciadas.
- Se ha escogido el modelo de asignación por equilibrio.

Si lo que se busca es dar un valor de α_{tot} para cada iteración, se debe escalar el vector d_s calculando un nuevo vector n_s de la siguiente manera:

$$n_s^j = 2 \times \frac{d_s^j}{\sum_{j \in J} |d_s^j|}$$

A partir de las siguientes condiciones, se indican los caminos con coste mayor que el promedio, los que deben perder flujo.

$$\sum_{j \in J, d_s^j > 0} n_s^j = 1$$

Por otra parte, se indican los caminos que ganarán flujo:

$$\sum_{j \in J, d_s^j < 0} n_s^j = -1$$

Cabe destacar que el flujo de los caminos no puede ser negativo, por lo que no se le puede quitar más demanda de la que tiene:

$$\alpha_{m\acute{a}x} = \acute{m}ax_{j \in J} \left\{ \frac{f^j}{n_s^j} \forall n_s^j < 0 \right\}$$

En el caso de que $\alpha_{m\acute{a}x} = 0$ indica que el flujo del camino más costoso ya se ha hecho 0.

4.3 Caracterización del coche autónomo en VISSIM

Los parámetros sobre los que se actúa son los relativos al seguimiento de vehículos, estos definen cómo se comporta la interacción entre vehículos longitudinalmente. Los parámetros que incluye son; la distancia de anticipación y retroceso, la distancia de seguimiento y el tiempo de adelanto además de la desaceleración y aceleración del vehículo.

VISSIM posee dos modelos de seguimiento para el vehículo no autónomo:

- Widemann 74, que es una mejora del modelo de seguimiento de Rainer Widemann 1974 usado para modelar zonas de confluencia y tráfico urbano.
- Widemann 99, que contiene un número mayor de parámetros ajustables cuyo uso se dedica al tráfico en autopistas.

A partir de estos modelos VISSIM crea su tipo de vehículo autónomo, modificando una serie de parámetros de los mismos. Teniendo en cuenta factores como que la interacción lateral de los vehículos se define por parámetros relativos a los cambios de carriles y al comportamiento lateral PTV proporciona un modelado de la nueva conducción en Vissim. La siguiente tabla resume los rangos recomendados para los cambios del comportamiento del vehículo normal al autónomo.

	Connected and Autonomous Vehicle Behavior	Recommended Model Adjustment
1	Keep smaller standstill distances	W74: change W74ax parameter, W99: change CC0 parameter
2	Keep smaller distances at non-zero speed	W74: change W74ax, W74bxAdd, and W74bxMult parameters; W99: change CC0, CC1, and CC2 parameters
3	Accelerate faster and smoothly from standstill	W74: change acceleration functions, W99: change acceleration functions and CC8, CC9 parameters
4	Keep constant speed with no or smaller oscillation at free flow	COM Interface or External Driver Model/Driving Simulator Interface
5	Follow other vehicles with smaller oscillation distance oscillation	W74: reduce W74bxMult or set it to 0, W99: change CC2 parameter
6	Form platoons of vehicles	COM Interface or External Driver Model/Driving Simulator Interface
7	Following vehicles react on green signal at the same time as the first vehicle in the queue	COM Interface or External Driver Model/Driving Simulator Interface
8	Communicate with other AVs, i.e. broken down vehicle and others avoid it	COM Interface or External Driver Model/Driving Simulator Interface
9	Communicate with the infrastructure, i.e. vehicles adjusting speed profile to reach a green light at signals	COM Interface or External Driver Model/Driving Simulator Interface
10	Perform more co-operative lane change as lane changes could occur at a higher speed co-operatively	Switch to cooperative lane change, change maximum speed difference, and change maximum collision time
11	Smaller lateral distances to vehicles or objects in the same lane or on adjacent lanes	Same lane – change default behavior when overtaking on the same lane and define exceptions for vehicle classes
12	Exclusive AV lanes, with and without platoons	Define blocked vehicle classes for lanes, or define vehicle routes for vehicle classes, use COM for platooning

Figura 4-1 Recomendación para el modelado de vehículos autónomos en Vissim [10].

Debido a que únicamente se puede realizar cambios sobre el comportamiento de la conducción, sólo se llevan a cabo modificaciones sobre los que están en amarillo.

El modelo Widdeman 99 posee tres variaciones sobre la conducción de los coches autónomos:

- Conservativa: consta de una amplia distancia de seguridad y una aceleración y deceleración más calmada que las de los vehículos no autónomos.
- Inmediata: se basa en la toma de decisiones óptimas y rápidas. El vehículo responde fácilmente a los cambios del entorno, sin embargo, aún se ve influido por las normas de tráfico y seguridad.
- Agresiva: consta de una menor distancia de seguridad y una aceleración y deceleración más agresiva que los vehículos no autónomos.

En este estudio se escoge una conducción autónoma agresiva, pues de esta forma se explotan las características más trascendentes de dichos coches y se pueden obtener resultados más notorios.

Las características que distinguen la conducción autónoma de la influenciada por el factor humano en VISSIM son finalmente las siguientes:

- Distancia de parada.
- Tiempo de avance.
- Distancia de seguimiento entre vehículos.
- Umbral para la conducción en modo seguimiento.
- Dependencia de la velocidad de oscilación.

Como se puede observar en [11].

Pese a esta caracterización para aprovechar realmente la explotación de este tipo de vehículos hay que modificar la infraestructura de las carreteras y la legislación entre otros factores. Esto es debido a que tienen una gran influencia sobre la conducción autónoma, de ellos dependerá que finalmente se implemente o no la misma. Es por eso que el hecho de que los vehículos autónomos se integren en el tráfico diario dependerá de:

- Condiciones reglamentarias del gobierno entorno al tráfico
- Diseño de la infraestructura y prioridades en el control de operaciones
- Mejoras en las capacidades de los vehículos
- Capacidades del comportamiento de los conductores

5 DESARROLLO DE ESCENARIOS DE APLICACIÓN

PRÁCTICA EN VISSIM:

RED DE SEVILLA CON VEHÍCULOS AUTÓNOMOS

5.1 Simulación de la red urbana analizada mediante VISSIM

Para llevar a cabo el estudio de la influencia de la penetración de los coches autónomos se escoge una porción de la red urbana de la ciudad de Sevilla como escenario. En VISSIM se definen una serie de parámetros, los establecidos por el usuario y los creados por el software a partir de los anteriores.

Parámetros definidos por el usuario:

- **Nodos:** son puntos, principalmente intersecciones en los que se toman las decisiones de giros e incorporación a nuevas vías. Vissim le da varios usos a su herramienta de “Nodos”. Su uso original, que todavía sigue vigente en la mayoría de simulaciones, es para definir pequeños puntos de especial interés en los que se requiere recoger información sobre demoras, longitudes de cola, emisiones, etc. Con la incorporación de los algoritmos de asignación dinámica PTV añadió un nuevo uso al nodo, el de formar parte del esqueleto básico de la red abstracta como vértices. Para indicar su uso en la asignación dinámica hay que especificarlo en el momento de su creación

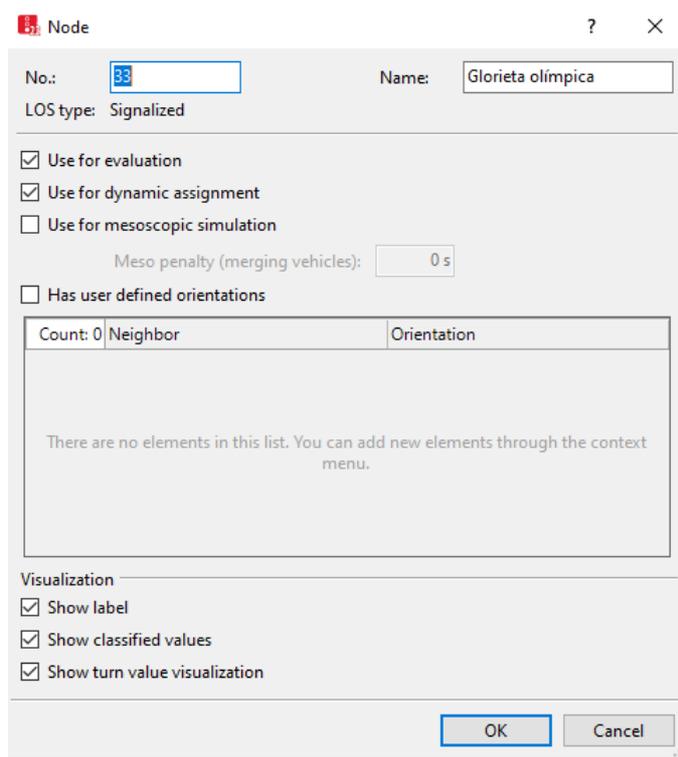


Figura 5-1 Especificación de nodo para asignación dinámica.

En el “Node list” es dónde se especifica que su uso será para asignación dinámica. En la Figura 5-2 se muestra una lista de algunos de los nodos del modelo a estudiar:

Count	No	Nom	UseForEval	UseForDynAssign	UseForMeso	Tipo	MesoPenalMerg	ShowTurnValVisual	TurnValVisualSize
1	1	San Jeronimo	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Polígono	0,00	<input checked="" type="checkbox"/>	70,000
2	2	Alamillo	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Polígono	0,00	<input checked="" type="checkbox"/>	70,000
3	3	Barqueta	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Polígono	0,00	<input checked="" type="checkbox"/>	70,000
4	4	Torneo	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Polígono	0,00	<input checked="" type="checkbox"/>	70,000
5	5	Feria	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Polígono	0,00	<input checked="" type="checkbox"/>	70,000
6	6	Maria Auxiliadora	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Polígono	0,00	<input checked="" type="checkbox"/>	70,000
7	7	Calle Samaniego	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Polígono	0,00	<input checked="" type="checkbox"/>	70,000
8	8	Alcalde Manuel del Valle	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Polígono	0,00	<input checked="" type="checkbox"/>	70,000
9	9	Ctra Carmona	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Polígono	0,00	<input checked="" type="checkbox"/>	70,000
10	10	RUN gota leche	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Polígono	0,00	<input checked="" type="checkbox"/>	70,000
11	11	Pino Montano	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Polígono	0,00	<input checked="" type="checkbox"/>	70,000
12	12	Nuevo Torneo	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Polígono	0,00	<input checked="" type="checkbox"/>	70,000
13	13	Parque Doñana	<input type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Polígono	0,00	<input checked="" type="checkbox"/>	70,000

Figura 5-2 Conjunto de nodos establecidos en la simulación.

- Zonas y Parking lots: las zonas establecen los orígenes y destinos. Los Parking lots establecen la conexión entre las distintas zonas y los arcos con los que conectan, para ello hay que definir la zona con la que conectan, indicar su función como conectores y la velocidad deseada en estos puntos de unión. A continuación, se muestra la lista que recoge los orígenes y destinos que se emplean en el modelo:

Zones / Parking lots		
Count: 14	No	Nom
1	1	Torneo
2	2	Barqueta
3	3	Alamillo
4	4	San Jeronimo
5	5	San Lazaro
6	6	Nuevo Torneo
7	7	Parque Doñana
8	8	RUN gota leche In
9	9	Pino Montano
10	10	Carretera Carmona
11	11	Alcalde Manuel del Valle
12	12	Calle Samaniego
13	13	María Auxiliadora
14	14	Calle Feria

Figura 5-3 Conjunto de zonas definidas en la simulación.

- Matrices: son matrices origen-destino. En ellas las columnas hacen alusión a los destinos mientras que las filas se componen de los orígenes y los valores que contienen se refieren a la demanda. En este trabajo se tienen dos matrices, una inicial (llamada “coches warm”) con una demanda de vehículos que se iniciará previamente para dar lugar a una red de carreteras con una demanda en marcha antes de introducir la matriz que será objeto de estudio (a la que se le denomina “coches”). A continuación, se muestra una parte de ambas:

Matrix Editor (Matriz '2: Coches warm')							
14 x 14	Nombre		1	2	3	4	5
		Total	Torneo	Barqueta	Alamillo	San Jeronimo	San Lazaro
1	Torneo	418,00	0,00	15,00	28,00	51,00	17,00
2	Barqueta	102,00	15,00	0,00	0,00	3,00	4,00
3	Alamillo	386,00	36,00	0,00	0,00	14,00	19,00
4	San Jeronimo	116,00	39,00	5,00	17,00	0,00	0,00
5	San Lazaro	117,00	12,00	6,00	10,00	0,00	0,00
6	Nuevo Torneo	118,00	12,00	6,00	22,00	0,00	0,00
7	Parque Doñana	67,00	10,00	5,00	9,00	4,00	5,00
8	RUN gota leche In	384,00	45,00	21,00	235,00	9,00	23,00
9	Pino Montano	65,00	10,00	5,00	9,00	4,00	5,00
10	Carretera Carmona	159,00	19,00	9,00	17,00	8,00	10,00
11	Alcalde Manuel del Valle	285,00	50,00	24,00	44,00	20,00	26,00
12	Calle Samaniego	24,00	5,00	2,00	4,00	2,00	3,00
13	María Auxiliadora	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14	Calle Feria	67,00	6,00	3,00	5,00	1,00	6,00

Figura 5-4 Matriz de coches base para el inicio de la simulación.

Matrix Editor (Matriz '1: Coches')						
14 x 14		1	2	3	4	5
Nombre	Total	Torneo	Barqueta	Alamillo	San Jeronimo	San Lazaro
		1550,00	598,00	2401,00	699,00	700,00
1 Torneo	2501,00	0,00	91,00	168,00	308,00	99,00
2 Barqueta	599,00	87,00	0,00	0,00	17,00	22,00
3 Alamillo	2301,00	214,00	0,00	0,00	86,00	111,00
4 San Jeronimo	701,00	236,00	28,00	104,00	0,00	0,00
5 San Lazaro	699,00	70,00	33,00	62,00	0,00	0,00
6 Nuevo Torneo	700,00	74,00	35,00	130,00	0,00	0,00
7 Parque Doñana	400,00	60,00	28,00	52,00	24,00	31,00
8 RUN gota leche In	2300,00	268,00	127,00	1411,00	54,00	139,00
9 Pino Montano	401,00	62,00	29,00	54,00	25,00	32,00
10 Carretera Carmona	949,00	114,00	54,00	100,00	46,00	59,00
11 Alcalde Manuel del Valle	1700,00	299,00	142,00	262,00	120,00	154,00
12 Calle Samaniego	150,00	29,00	14,00	26,00	12,00	15,00
13 Maria Auxiliadora	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
14 Calle Feria	400,00	37,00	17,00	32,00	7,00	38,00

Figura 5-5 Matriz de coches objeto de estudio en la simulación.

Parámetros definidos automáticamente por VISSIM:

- Giros: secuencia de interacciones entre los arcos y conectores. Pueden aparecer giros no relacionados, en enlaces ferroviarios o enlaces exclusivos de tránsito que son erróneos y hay que eliminar.
- Arcos: conectan diferentes nodos.
- Caminos: se trata de una secuencia de arcos que va desde un origen a un destino. Las matrices OD poseen múltiples caminos.

De esta forma se obtiene la siguiente red de carreteras, sobre la cual se llevan a cabo las simulaciones:

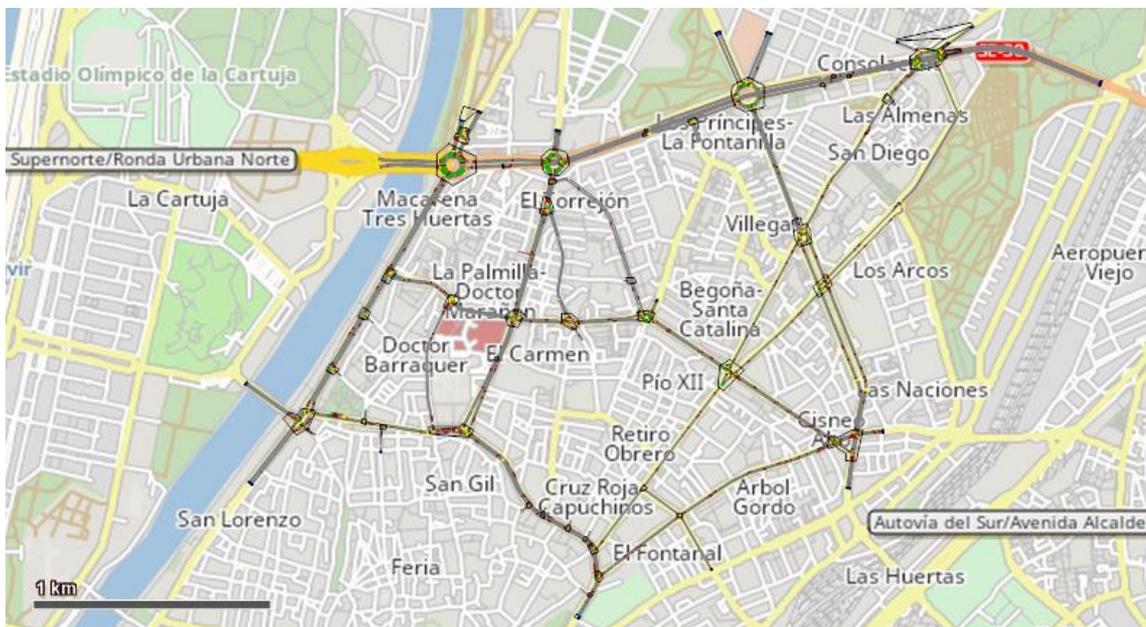


Figura 5-6 Red de carreteras a estudiar.

5.2 Implementación de la asignación dinámica

Como se ha establecido previamente, dicho estudio se lleva a cabo bajo la caracterización de la asignación dinámica. Mediante ella se corre una primera simulación en la que los vehículos escogen simplemente los caminos más cortos, se obtienen como resultado los primeros caminos y costes oficiales, con esto en la segunda simulación los vehículos buscarán llegar a su destino con el camino obtenido que posea el menor de los costes. El modelo de asignación dinámica puede tener como objetivo la reducción del coste total de todos los usuarios de la red de carreteras basada en la optimización dinámica del sistema (DSO) o del propio coste individual del usuario a través del equilibrio dinámico del usuario (DUE) [12]. Este último es el que se tiene en cuenta para el estudio.

5.2.1 Establecimiento de los parámetros base

En la ventana de Asignación Dinámica se encuentra la posibilidad de modificar una serie de parámetros que caracterizarán el modelo de asignación dinámica a emplear. De esta forma se tiene:

5.2.1.1 Matrices

Se establecen las matrices que se emplean en el modelo y que definimos previamente, en la parte de “Vehicle Composition” se escoge la composición del tipo de vehículos de los cuales se compone la matriz seleccionada. Para ello, se pueden definir una serie de “Vehicle compositions” en cada cual se establece el porcentaje de los distintos tipos de vehículos de los cuales se busca que se componga la red. En este caso se juega con los porcentajes en función de la penetración del vehículo autónomo. A continuación, se muestra uno de los grupos que se han definido:

Count: 5	No	Nom
1	1	Default
2	2	50/50

Count: 2	VehType	DesSpeedDistr	RelFlow
1	100: Car	60: 60 km/h	50,000
2	110: Coche Autonomo	60: 60 km/h	50,001

Figura 5-7 Porcentaje de los tipos de vehículos que forman la demanda.

En este grupo se tiene un 50% de coches normales y un 50% de coches autónomos, por lo cual al seleccionarlo para la matriz en cuestión esta será la composición de su demanda.

También hay que establecer el “Evaluation Interval” intervalos de tiempo para los que se obtienen los caminos y costes como resultados. Los datos finales se guardan en archivos “.bew” para costes y “.meg” para caminos.

A continuación, se muestra cómo se han definido las características de las matrices que se emplearon en este estudio:

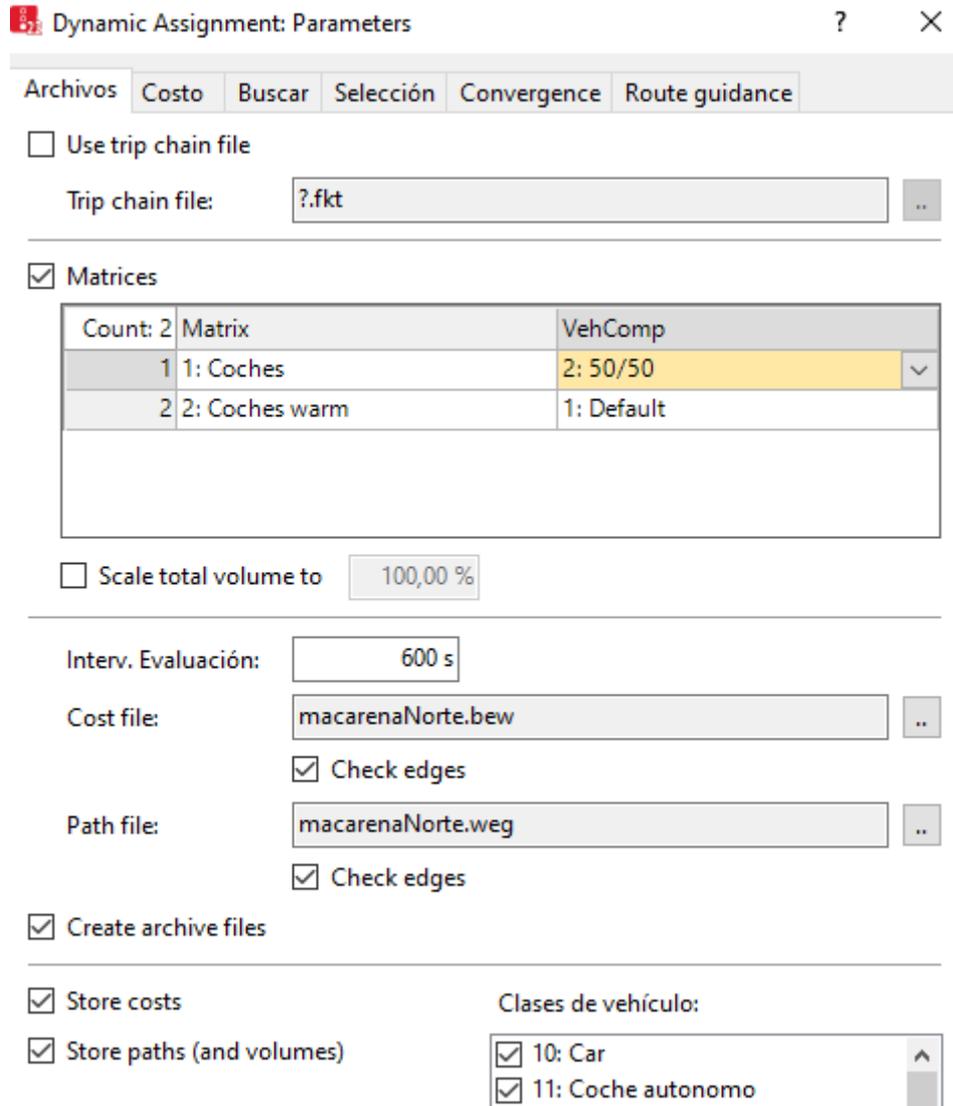


Figura 5-8 Selección parámetros de los archivos en el DynamicAssignment.

5.2.1.2 Costes

La caracterización de los costes es muy importante, pues en ellos se basa la selección de los caminos por los vehículos en las distintas iteraciones. No se trata únicamente de costes financieros, sino que se compone de un conjunto de factores influyentes que se describe a través de la siguiente fórmula:

$$C = \alpha \times \text{Tiempo} + \beta \times \text{Distancia} + \gamma \times \text{Coste Financiero} + \sum \text{Sobrecargos}$$

Como se puede observar el coste es una suma de la influencia que tienen sobre el mismo tanto el tiempo de viaje, la distancia, el propio coste financiero como las sobrecargas. Cada uno de estos parámetros, así como las sobrecargas, se multiplica por una ponderación establecida por el usuario. Estas ponderaciones se establecen en el apartado de "Cost coefficients" dentro del tipo de vehículo. Los escogidos para la simulación a llevar a cabo son los

siguientes:

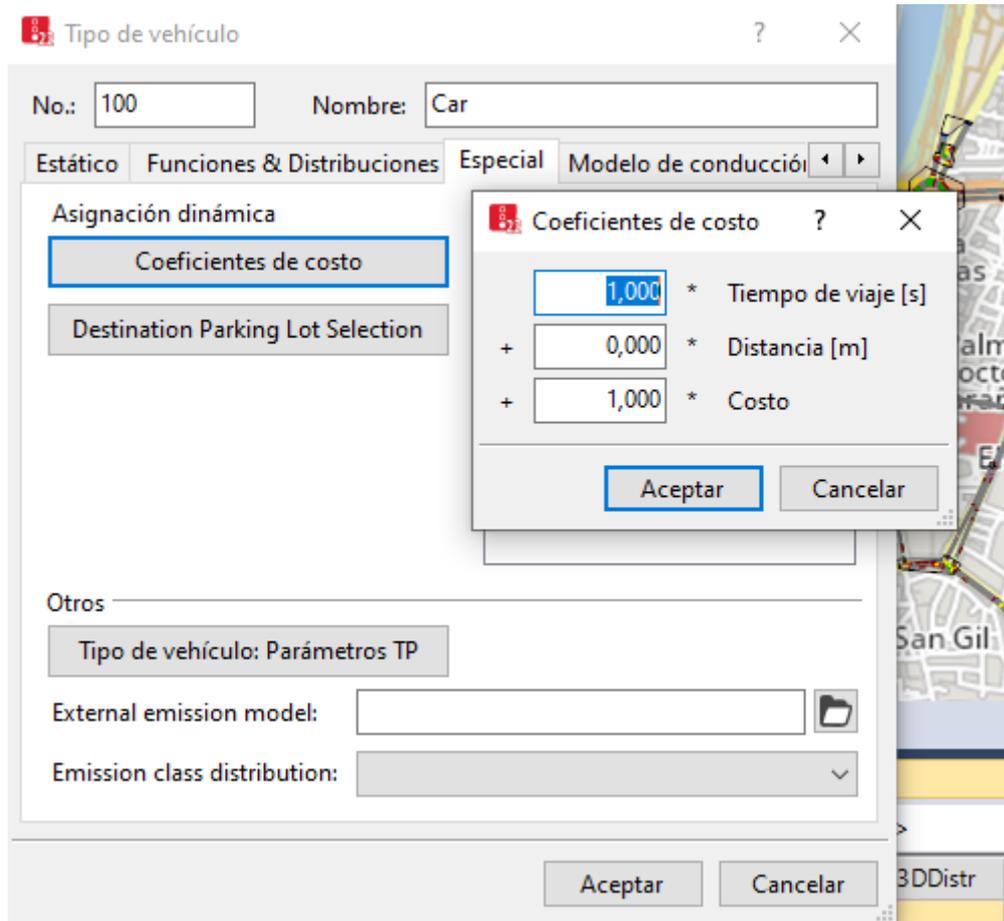


Figura 5-9 Selección de las ponderaciones en el costo.

Seguidamente, se escoge el intervalo de tiempo deseado dentro de la asignación dinámica, para el cual se ha establecido el mismo intervalo de la simulación anterior. Además, para el cálculo de los costes según Kirchoff se escoge un tiempo de viaje medio, y no la suma de todos los tiempos de viaje medidos en los arcos. El “smoothing factor” también ha de ser evaluado y en este caso se le da un valor de 0,1, esto pondera el tiempo de viaje esperado en la siguiente iteración siguiendo con la siguiente fórmula:

$$T_i^{n,k} = (1 - \alpha) \times T_i^{n-1,k} + \alpha \times TO_i^{n,k}$$

Donde:

- k : correspondiente al intervalo.
- n : correspondiente al número de iteración.
- i : correspondiente al arco.
- $TO_i^{n,k}$: media del tiempo de viaje en el arco i para el intervalo k en la iteración n .

- $T_i^{n,k}$: tiempo de viaje suavizado en el arco i para el intervalo k en la iteración n .
- α : la constante estándar que suaviza el tiempo de viaje.

En la siguiente imagen se muestran las características recogidas para este parámetro en la asignación dinámica:

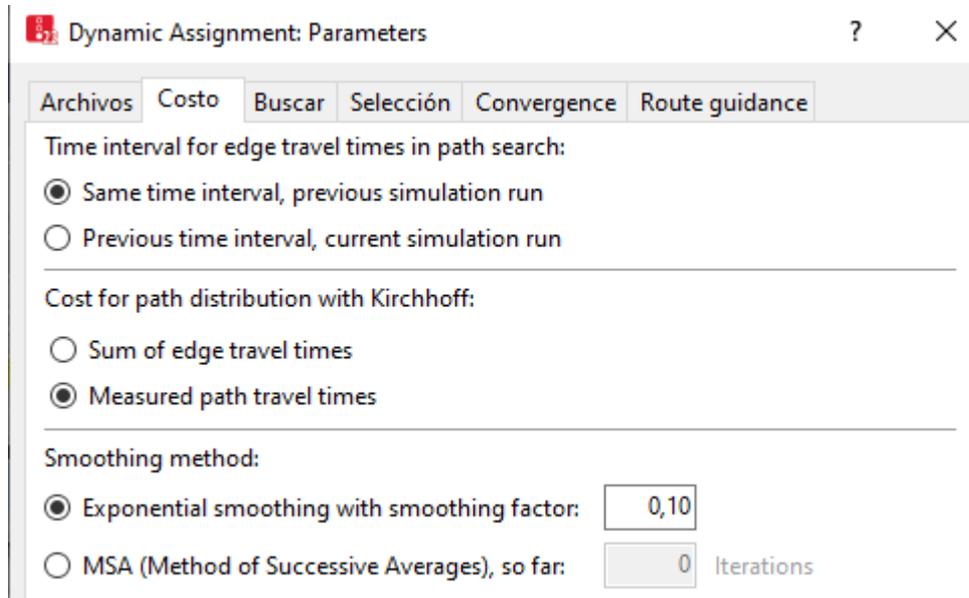


Figura 5-10 Selección parámetros del costo en el Dynamic Assignment.

5.2.1.3 Búsqueda de caminos.

El modo de actuar la simulación con respecto la búsqueda de caminos hasta lograr la convergencia también se puede modificar. En lo que respecta a la búsqueda de caminos para cada iteración, existe la posibilidad de buscar siempre nuevos caminos, también se puede buscar caminos alternativos a los ya existentes y tenerlos también en cuenta, incluso es posible mantener aquellos caminos que en la matriz alcancen un volumen nulo. Sobre la selección de los caminos también se puede actuar, y es que se puede escoger entre que los coches tomen una única decisión al principio sobre qué camino escoger o, por el contrario, puedan ir cambiando su ruta en cada nodo.

Para este estudio se ha optado, en el tipo de caminos a buscar y tener en cuenta, los nuevos encontrados. Por otra parte, lo que interesa es una única decisión inicial sobre la ruta a escoger como se muestra en la siguiente imagen:

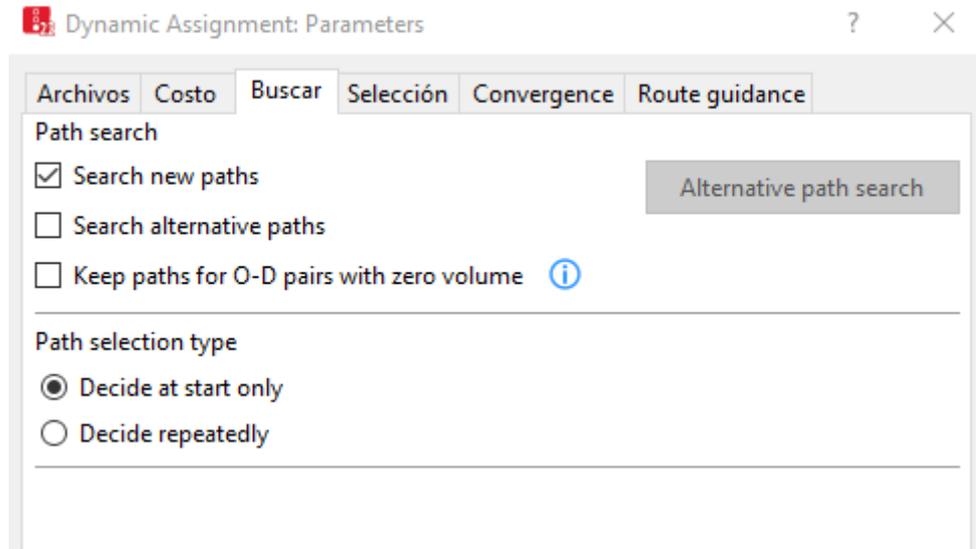


Figura 5-11 Selección parámetros de búsqueda de caminos en el Dynamic Assignment.

5.2.1.4 Selección de caminos

Como se ha introducido anteriormente, los vehículos necesitan saber la zona a la que van y qué camino deben escoger. En el caso de que en vez de zonas se tengan en cuenta “parking lots”, la selección de los mismos se basa no sólo en el coste de llegar hasta ellos sino de otras muchas penalizaciones que se registran en la siguiente ecuación:

$$U = \alpha \times ParkFee + \beta \times Attraction + \lambda \times DistFromDestM + \delta \times GenCost + \epsilon \times Avail$$

Donde:

- ParkFee: hace alusión a la tarifa que se ha de pagar por aparcar en dicho parking.
- Attraction: el nivel de atracción de dicho parking.
- DistFromDestM: es la distancia a la que se encuentra el parking del destino al que se desea llegar.
- GenCost: se refiere al coste del viaje desde el origen hasta el parking.
- Avail: considera la disponibilidad de sitios en el parking.

Todos estos factores van acompañados de la ponderación que el usuario le quiera dar. En este estudio no se ha ponderado ninguno de estos factores, puesto que los parkings no son de interés en esta investigación, la cual se enfoca en la congestión de las redes.

La selección del lugar de destino se basa en una función que establece la probabilidad de escoger un destino determinado. Dicha función es la que se expresa a continuación:

$$p(R_j) = \frac{e^{k \times U_j}}{\sum e^{k \times U_i}}$$

Donde:

- k : es el “Logit Scaling Factor”, el cual describe la sensibilidad de la función. Cuanto mayor sea el valor de k , mayor será la preferencia de la alta utilidad del sitio de destino por parte de los vehículos.
- U : es el “Logit Lower Limit”, aumenta la selección de los destinos que permanecen.

Además, existe la posibilidad de evitar pérdidas de tiempo ajustando la preselección de los caminos. Se puede evitar caminos que contemplen tiempos mayores a uno establecido, limitar el número de caminos sobre el que se actúa o, como se lleva a cabo en este trabajo, evitar aquellos caminos con un coste un 50% mayor al que posee la mejor ruta.

Existen tres modelos de selección de caminos distintos. El primero, “Use Volume (old)” se caracteriza por no llevar a cabo nuevas búsquedas de caminos y la probabilidad de la selección de los mismos es en base a los caminos establecidos en un principio.

El segundo, es la asignación estocástica de Kirchoff que se rige por la función de utilidad que es igual al inverso del coste ponderado que se definió al principio del capítulo:

$$U_j = \frac{1}{Cost_j}$$

A partir de dicha utilidad se obtiene la probabilidad, teniendo en cuenta el exponente de sensibilidad de Kirchoff (k) de la siguiente forma:

$$P(R_j) = \frac{U_j^k}{\sum U^k}$$

Éste es el modelo que se escoge para el estudio, con un exponente de sensibilidad igual a 7. Esto es debido a que buscamos que la redistribución del flujo se haga rápidamente abarcando volúmenes amplios.

Finalmente se tiene el modelo de “Equilibrium Assignment”, el cual redistribuye la demanda de forma proporcional con respecto a los costes. De esta manera el volumen de los caminos más costosos se reduce, al mismo tiempo que aumenta el de los de menos coste.

En este estudio se ha caracterizado de la siguiente manera la selección de caminos:

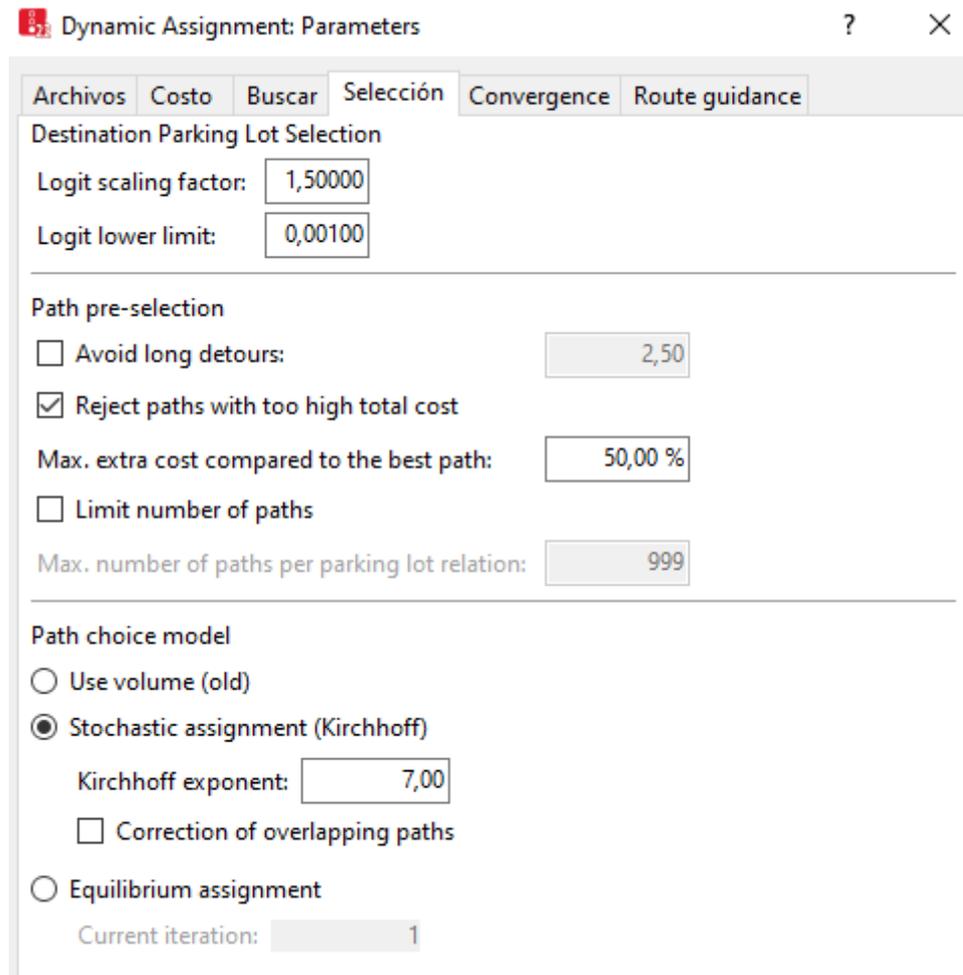


Figura 5-12 Establecimiento de parámetros de selección de caminos en el Dynamic Assignment.

5.2.1.5 Criterio de convergencia

Estos criterios establecen el porcentaje que puede variar el tiempo de recorrido entre arcos o caminos con respecto a la simulación anterior. Para este trabajo se ha impuesto una variación del 15% en su tiempo de recorrido, además un 95% de estos arcos y caminos se ha de mantener para la próxima iteración. Estas condiciones se han establecido para arcos de más de 20m de longitud.

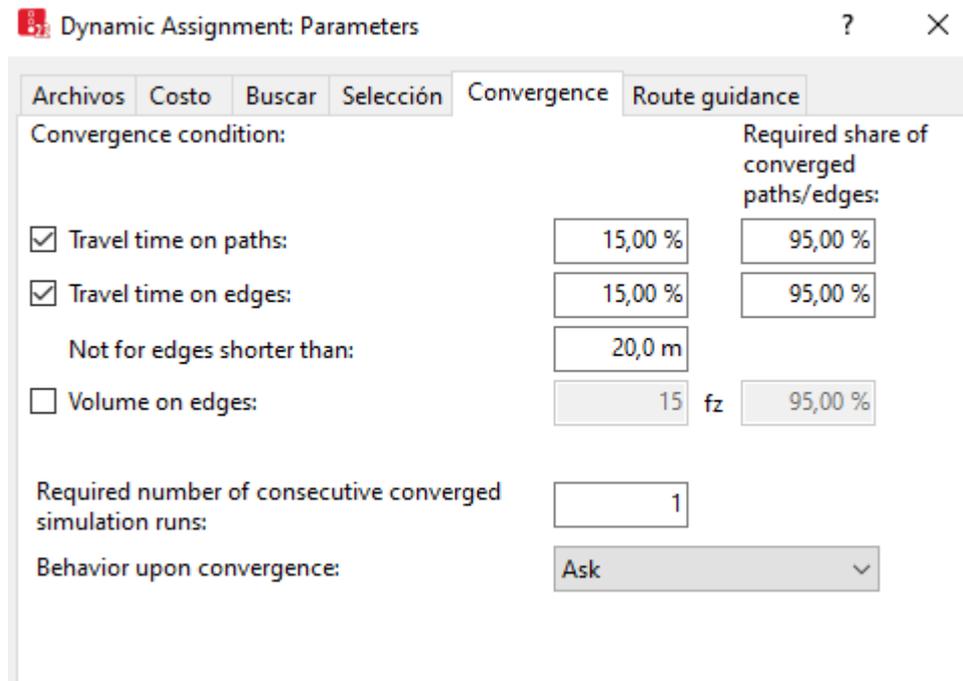


Figura 5-13 Selección del criterio de convergencia en el Dynamic Assignment.

5.2.1.6 Guía de las rutas

En el Dynamic assignment dentro de “Route Guidance” es dónde estableces las rutas, el intervalo que marca cada cuánto ocurre una búsqueda de un nuevo camino y el offset que establece el retraso con el que le llega la información al vehículo. En este caso la información le llega al vehículo de manera instantánea y la búsqueda de un nuevo camino se lleva a cabo cada 999999s.

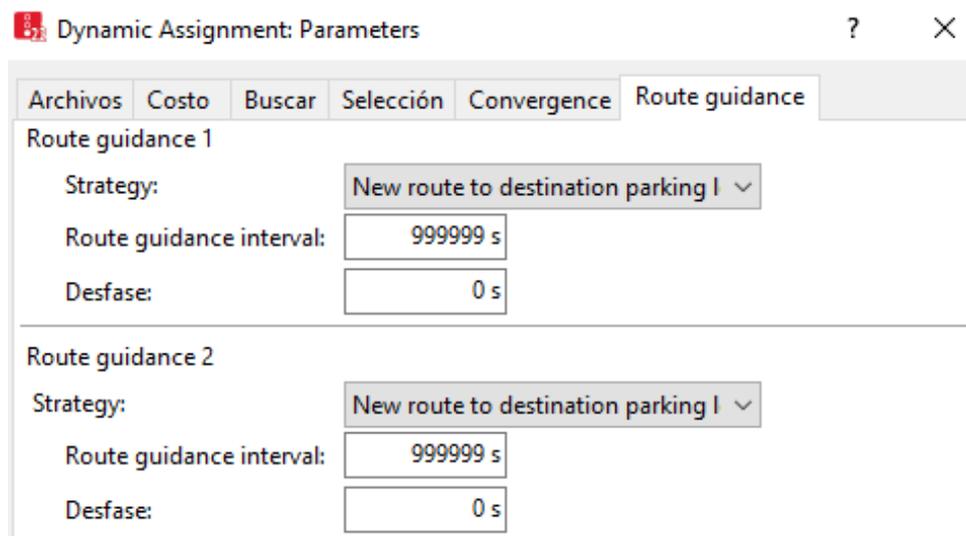


Figura 5-14 Selección parámetros de la ruta en el Dynamic Assignment..

6 DIAGRAMAS MACROSCÓPICOS

FUNDAMENTALES, MFD

Los MFD (Macroscopic Fundamental Diagrams) son un tipo de gráficos de dispersión muy usado en la ingeniería del transporte para estudiar el comportamiento del tráfico global de una red, su nivel de congestión y el comportamiento de los usuarios ante determinadas medidas o políticas de movilidad.

6.1 Diagrama fundamental para tráfico estacionario

En un principio con el fin de representar la relación entre el flujo, la densidad y la velocidad de los vehículos en una carretera nace el Diagrama Fundamental. Gracias a ellos existe la capacidad de analizar la capacidad y eficiencia de la infraestructura además de estudiar cómo se comporta el tráfico en base a diferentes situaciones. Los parámetros en los que se basan estos gráficos son los siguientes:

- Flujo: son los vehículos por hora que pasan por una sección de la carretera en un intervalo de tiempo dado. Se mide en *veh/h*.
- Densidad: es la cantidad de vehículos por unidad de longitud relativa a un segmento de la vía. Se mide en *veh/km*.
- Velocidad: expresa los kilómetros por hora de los vehículos que atraviesan una vía. Se mide en *km/h*.

A continuación, se muestra un ejemplo de MFD:

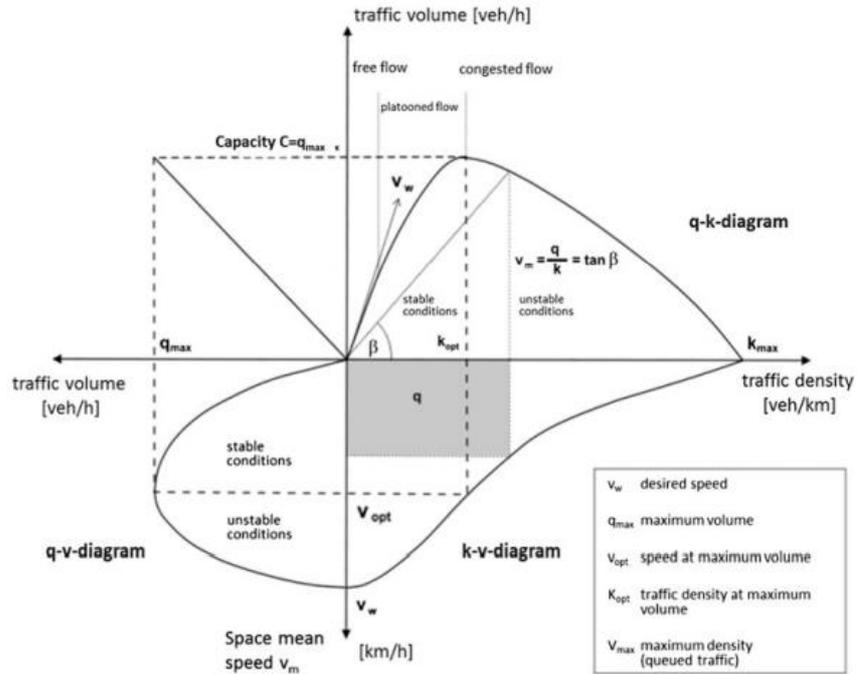


Figura 6-1 Vistas del diagrama fundamental [13]

En esta representación se muestran de manera conjunta tres diagramas de los que se obtiene información sobre el flujo de tráfico. Se tienen el diagrama volumen-velocidad, volumen-densidad y densidad-velocidad. En dichos diagramas destaca el punto $q_{máx}$, que separa las condiciones de circulación estables de las inestables debido a un exceso de congestión. En este gráfico se muestra un paso de un tráfico estable a inestable continuo, pero los estudios empíricos establecen que no es lo que sucede en la realidad, sino que la transición del rango estable al inestable a causa de perturbaciones y una gran carga de tráfico está asociada a una caída en el volumen del mismo. A continuación, se muestran los diagramas fundamentales con rangos distinguidos para tráfico estable e inestable para carreteras de uno y dos carriles según [14]:

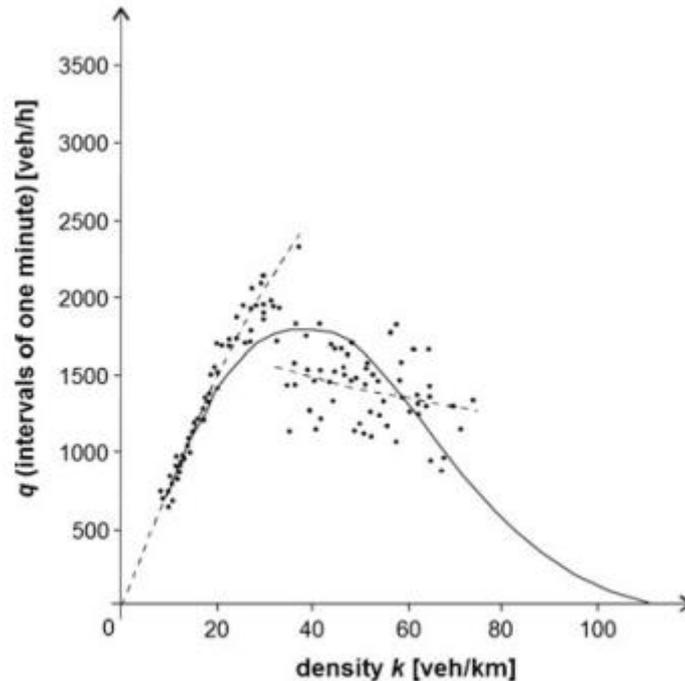


Figura 6-2 Diagrama fundamental con rangos separados para situación estable e inestable. [15]

Teniendo esto en cuenta, May y Keller establecieron tres formas de tráfico:

- Tráfico libre con altas velocidades y bajas densidades y volúmenes.
- Tráfico medio restringido hasta la gama de los volúmenes máximos de tráfico, con densidad de tráfico y velocidad óptima
- Tráfico totalmente restringido con altas densidades de tráfico y bajas velocidades y volúmenes. [15]

6.2 Historia de los Diagramas Fundamentales

Las primeras explotaciones de estos gráficos para ahondar en el comportamiento del tráfico en las carreteras se sitúan en Canadá. Greenshields desarrolló su primer modelo en 1930 para establecer la relación entre velocidad, densidad y flujo. El uso de estos diagramas no cesó, pues en 1950 Lighthill y Whitham llevaron a cabo el desarrollo de la teoría de flujo de tráfico. Además, cabe destacar cuando en 1990 Daganzo y Newell realizaron una gran contribución al desarrollo de estos diagramas mediante la implementación de diversos modelos y conceptos sobre la gestión del tráfico en redes más complejas.

La problemática que abarca el uso de este tipo de diagramas es que sólo contempla arcos, de esta manera sólo se obtiene un estudio sobre situaciones individualizadas de los mismos, pero no uno que contemple las relaciones entre ellos. A partir de este pensamiento aparece la idea de algo verdaderamente útil, contemplar el comportamiento de toda una red de carreteras de manera global, ahí es cuando surgen los MFD. Estos gráficos abarcan toda una red de carreteras, teniendo en cuenta no sólo todos los arcos que contempla el escenario, sino también las relaciones entre ellos de manera global.

Varios modelos se han desarrollado a lo largo de los años para representar y así estudiar el flujo de una red, hoy en día el más empleado es mediante la representación de los Macroscopic Fundamental Diagrams. Los MFD tienen su origen en [16] y [17], donde la media de los flujos de estos viene dada por la siguiente ecuación:

$$Q = Q(n)$$

Siendo n el número de vehículos dentro de la red, independiente de las decisiones tomadas en el viaje, orígenes y destinos. A partir de esto, el MFD obtenido no vale para llevar a cabo modelos de planificación tradicionales. Para conocer parámetros de los viajes de interés, hay que conocer el o-MFD, esto es, el MFD de salida. Siguiendo la forma:

$$o(n) = Q(n) \frac{L}{l}$$

Donde:

L : es la longitud total de la red.

l : es la longitud del viaje, prácticamente idéntica para todos los viajeros.

De esta forma se pueden obtener el número de viajes completos en un tiempo dado, que se asumen normalmente iguales entre todos los viajeros.

El modelo más simple para el tráfico dinámico es el llamado “Bathtub”, el cual viene descrito por las siguientes igualdades:

$$n'(t) = \lambda(t) - o(n)$$

$$n(0) = n_0$$

Donde:

- $\lambda(t)$: es la demanda de flujo entrante en un tiempo t .
- n_0 : hace alusión a las condiciones iniciales del tráfico.

El modelo Bathtub es el que se representa en la Figura 3-3 (a). La representación de un típico diagrama o-MFD a partir de éste viene dada en la Figura 3-3 (b), gráfico limitado por la acumulación máxima n_j y por la máxima capacidad de depósito de los vehículos η . Finalmente, en la Figura 3-3 (c) se tiene el MFD que relaciona la velocidad y acumulación.

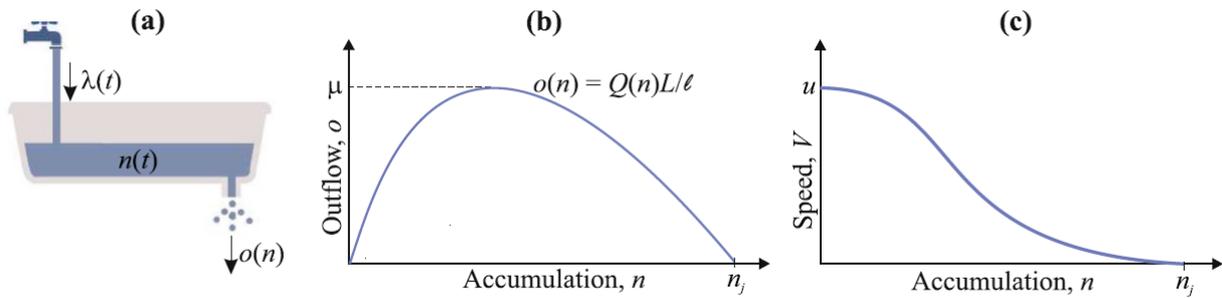


Figura 6-3 (a) Modelo de depósito, (b) o-MFD, (c) Velocidad-Acumulación MFD [18]

6.3 Diagramas MFD

Estos gráficos muestran la relación que se da entre la densidad de tráfico (generalmente expresada en el eje X) y el flujo (el cual viene dado por el eje Y). El primer término hace referencia a la cuantía de vehículos en una misma carretera para un momento dado, mientras que el segundo expresa cuántos vehículos atraviesan una sección de la carretera durante un periodo de tiempo.

Para llevar a cabo la representación de un MFD hace falta en primer lugar una recopilación de datos que se puede llevar a cabo mediante sensores, cámaras o incluso simulaciones de vehículos sobre una red de carreteras para así mostrar los datos finalmente en un diagrama de dispersión. A partir de dicho diagrama se obtiene la representación mediante el ajuste de una curva matemática.

En este estudio en concreto los datos que se han utilizado se han recopilado mediante simulaciones en VISSIM. Este software, el cual se emplea para simular el tráfico, permite obtener los datos que se necesitan para la creación de los MFD's. Así es que se obtiene la velocidad, el flujo y la densidad de los vehículos para distintos grados de penetración de los coches autónomos mediante una sucesión de simulaciones las cuales iteran hasta obtener la convergencia de unos datos finales.

Estos diagramas son una herramienta de gran importancia para los ingenieros del transporte, puesto que gracias a ellos se puede evaluar la influencia de distintos parámetros como el clima, la hora del día o los tipos de vehículos en las carreteras. Además, permiten obtener una visión de los resultados que se obtendrían tras modificar la infraestructura de la carretera, hacer modificaciones sobre los peajes o sobre las fases semafóricas entre otros.

6.4 Asignación dinámica para MFD's

La asignación dinámica (DTA) es el modelo a nivel de arcos más importante dentro de la planificación de la infraestructura urbana. Ésta se puede llevar a cabo mediante sistemas óptimos (SO) o equilibrio del usuario (UE). Éste último es el que se aplica en esta investigación.

6.4.1 Modelos de representación de los MFD

Una vez se comprueba la utilidad de este tipo de diagramas para la aplicación de los modelos DTA, con el fin de representar de forma macroscópica la red, se especifican los dos modos de representación de los gráficos. La red sujeta al estudio se puede estudiar bajo las condiciones de un espacio continuo o de uno discreto. Este último, sobre el cual se ahonda más, es el seleccionado para este estudio.

6.4.1.1 Modelo de espacio discreto

Para este modelo se parte de la base de que el flujo entrante no puede exceder al de salida, de la siguiente forma:

$$\lambda(t) \leq S(n(t))$$

Por consiguiente, los arcos de cada región tienen el mismo flujo de congestión, así si la demanda excede dicho flujo se creará una cola de vehículos a la entrada de la región global.

Los orígenes del espacio discreto en DTA tienen lugar en [19]. En este estudio se aplica a un DTA un MFD a partir de una red heterogénea que a su vez se encuentra dividida en una serie de regiones homogéneas. A partir de esta base se calcula de forma numérica el equilibrio estocástico del equilibrio del usuario (DSUE). En él, son un conjunto de regiones que se dan desde el inicio hasta el fin de la ruta lo que define a cada camino.

La Figura 6-4(a) muestra los distintos caminos posibles de la región 1 a la 4. Para conseguir el camino más corto, crea un algoritmo que establece una secuencia, en función del menor tiempo de viaje, de los arcos. Para ello usa una gráfica como la que se tiene en la Figura 6-4 (b) y la velocidad de cada arco obtenida a partir de la media que proporciona un MFD obteniendo así una probabilidad de selección basada en un modelo discreto lógico multimodal para cada camino.

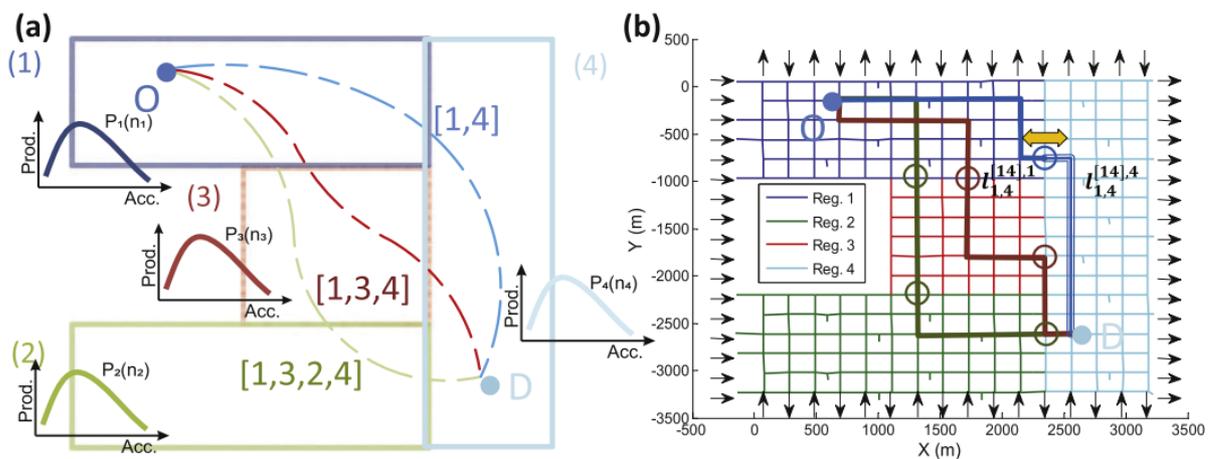


Figura 6-4 (a) Posibles rutas válidas a nivel de región, (b) Posibles rutas válidas a nivel de arcos [20]

En este modelo se fija un número de iteraciones, basadas en el tiempo de viaje medido al inicio, que llevará a una

convergencia hacia el equilibrio del tráfico mediante medidas sucesivas. Cabe destacar que un modelo no iterativo exageraría la congestión y no alcanzaría en ningún momento las condiciones de equilibrio.

Siguiendo con el estudio de [19] nace [21]. Éste lleva su trabajo a un sistema dinámico de rutas en el cual cada región está dividida en una serie de subregiones donde las rutas son redefinidas no como secuencias de arcos, sino como secuencias de subregiones. En este caso se da lugar a dos modelos de MFD, uno a nivel de región y otro a nivel de subregión. En [19] se pueden observar 3 aproximaciones distintas:

- Estableciendo condiciones PDUE a nivel de subregión.
- Estableciendo DSO condiciones a nivel de subregión.
- Dando información sobre la guía de rutas (RG) basada, a partir de comandos guía de las rutas aplicados a nivel de subregión, en información obtenida en condiciones DSO a nivel de región.

En este modelo la matemática a resolver es la siguiente:

- Métodos numéricos para cada MFD: se centra en resolver a través de Euler la siguiente igualdad:

$$(t + \Delta y) = \eta(t) + \Delta t(\lambda(t) - o(n))$$

- El equilibrio de la red: calculado a través de modelos de asignación dinámica a través de funciones de arco de flujo saliente como se puede ver en [22] y [23].

6.4.1.2 Modelo de espacio continuo

Este modelo es el indicado en el caso de que, como se puede ver en [24], la distancia entre tramos de la carretera sea tan pequeña que no se aprecie en comparación con el tamaño de la región. La aplicación de la asignación dinámica bajo este modelo tiene un comportamiento matemáticamente similar al del flujo peatonal. Este hecho se puede comprobar en [25], donde un flujo de doble dimensión de la infraestructura peatonal se establece como un dominio continuo ΩCR^2 . A continuación, se muestra una figura que lo representa:

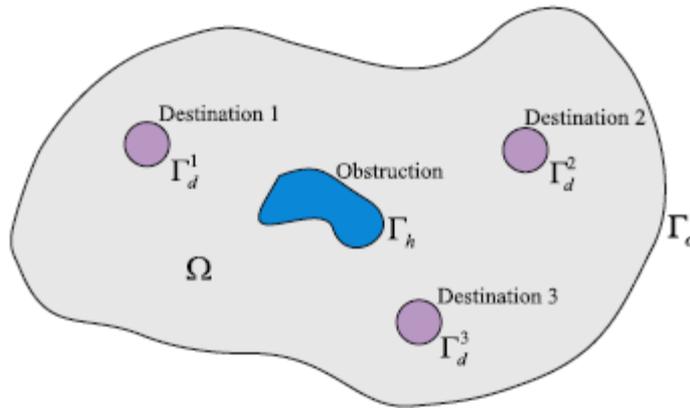


Figura 6-5 Representación del modelo de espacio continuo

Donde:

- τ_o : hace referencia a la facilidad del paso.
- τ_h : es el límite rígido de cualquier obstrucción en el que ningún viajero puede entrar o salir con facilidad para caminar.
- τ_d^i : representa el límite de cada área destino i .

6.5 Creación de los MFD a partir de la simulación

Se llevan a cabo varias simulaciones en las que se varía el porcentaje de penetración desde el 0% hasta el 100% de los vehículos autónomos en las carreteras. Para cada porcentaje se simulan situaciones en las que la demanda cambia, esto se hace para tener en cuenta todos los tipos de demanda de tráfico en las carreteras a lo largo del día. Para contemplar las distintas demandas se decrementan e incrementan los datos la matriz inicial establecida en VISSIM desde un 2% hasta un 1,6%. De esta forma se estudia la influencia de los distintos grados de penetración de la conducción autónoma en el tráfico a cualquier hora del día.

A partir de dichas simulaciones se obtienen una serie de resultados, para obtener la representación de los MFD (Macroscopic Fundamental Diagram) se han tenido en cuenta los siguientes datos suministrados por el software para unos intervalos de tiempo de 600s:

- Densidad: hace alusión a la cantidad de coches que se dan en un tramo de la carretera en un momento dado. Se mide en veh/km .
- Velocidad: es el promedio de la velocidad a la que circulan los vehículos en la red, se ve influida por la congestión, intersecciones y señales de tráfico. Se mide en km/h .
- Flujo: hace referencia a la cantidad de vehículos que transitan por una sección durante un periodo de tiempo dado. Se mide en veh/h .

Estos resultados se relacionan a partir de las siguientes fórmulas:

$$q^w = \frac{\sum_i q_i \times l_i}{\sum_i l_i}$$

$$k^w = \frac{\sum_i k_i \times l_i}{\sum_i l_i}$$

Donde:

- l_i : longitud de i , donde i hace referencia a un tramo de carretera entre intersecciones.
- q_i : flujo en i .
- k_i : densidad en i .
- q^w : producción de viajes.
- k^w : número de vehículos por unidad de longitud de la carretera.

Es en función de estas ecuaciones que se consiguen los puntos necesarios para realizar los gráficos de dispersión. Estos gráficos, también llamados MFD, permiten estudiar las características de la red tras la introducción de la conducción autónoma.

7 EVALUACIÓN DE SIMULACIONES EN VISSIM: ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 Diagramas MFD flujo-densidad

A continuación, se muestran los MFD que comparan el flujo y la densidad del tráfico. Se evalúan 11 escenarios que contemplan desde el 0% de penetración de conducción autónoma en la red vial hasta el 100% de la misma. De esta forma se observan los cambios que van apareciendo en la relación flujo-densidad conforme aumenta el porcentaje de coches autónomos en la red.

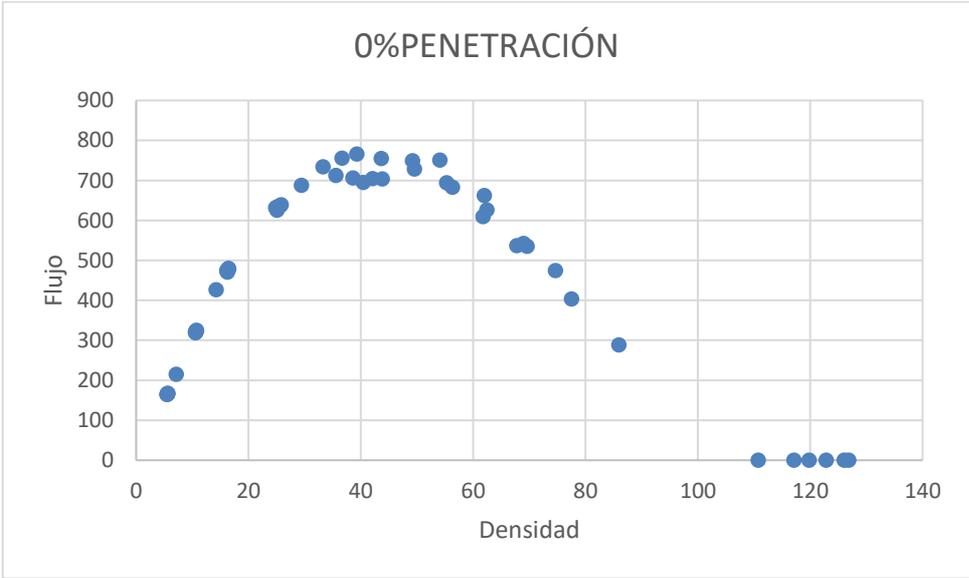


Figura 7-1 Gráfica flujo-densidad para un 0% de penetración.

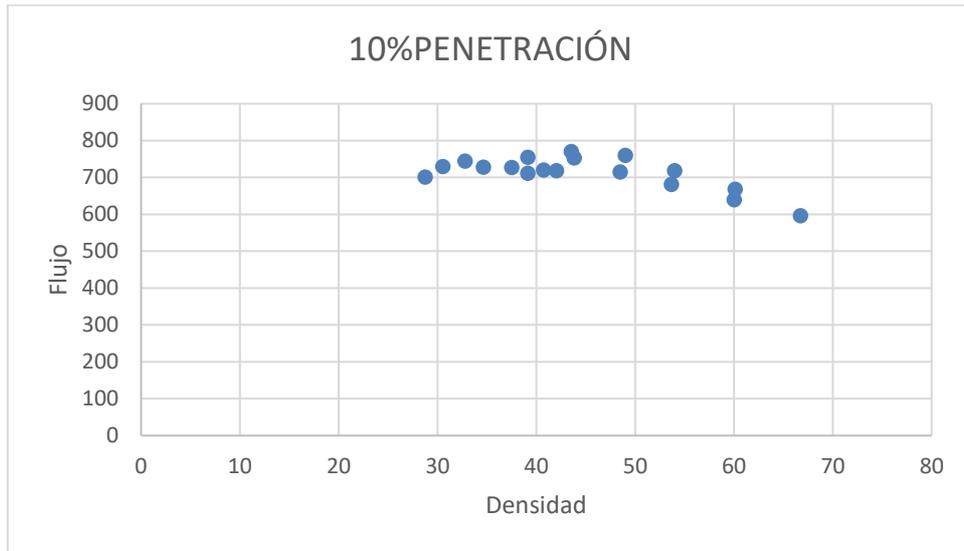


Figura 7-2 Gráfica flujo-densidad para un 10% de penetración.

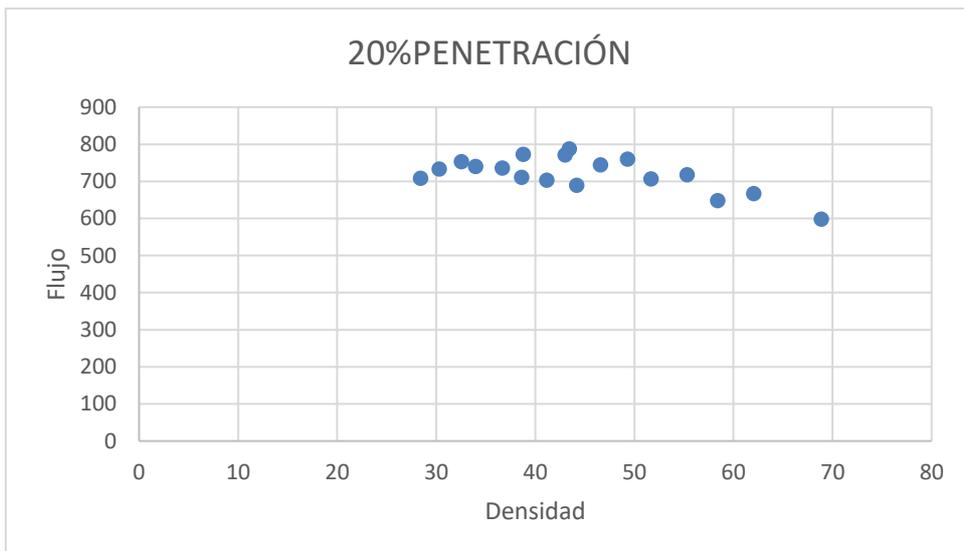


Figura 7-3 Gráfica flujo-densidad para un 20% de penetración.

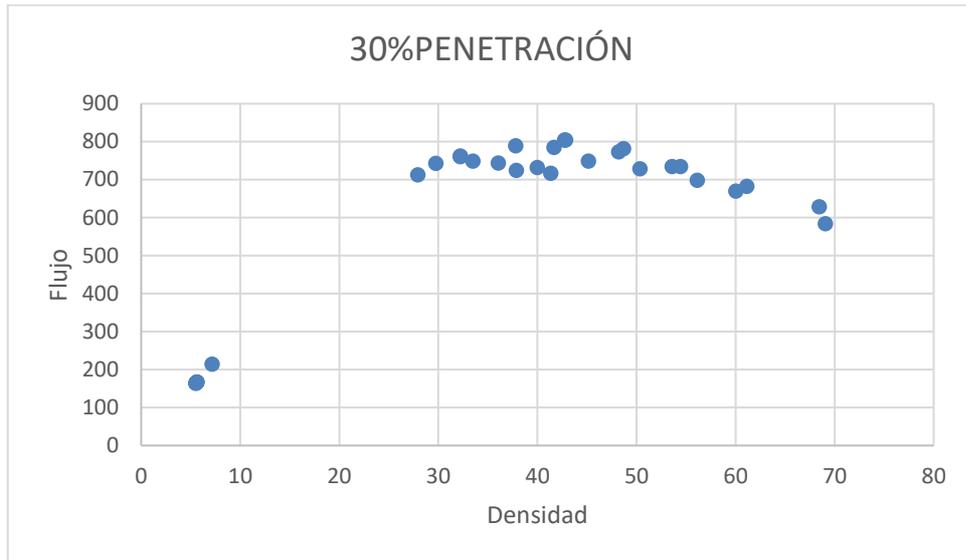


Figura 7-4 Gráfica flujo-densidad para un 30% de penetración.

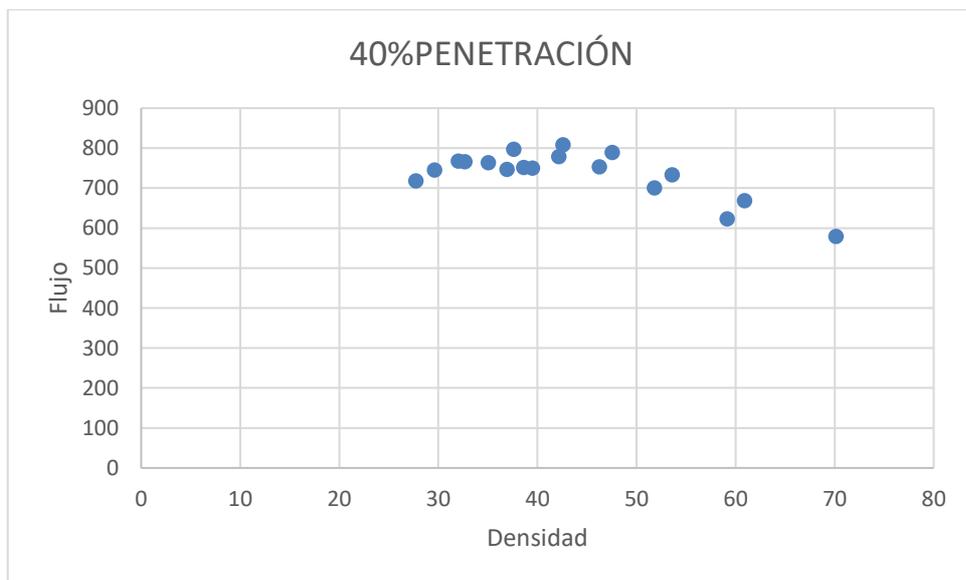


Figura 7-5 Gráfica flujo-densidad para un 40% de penetración.

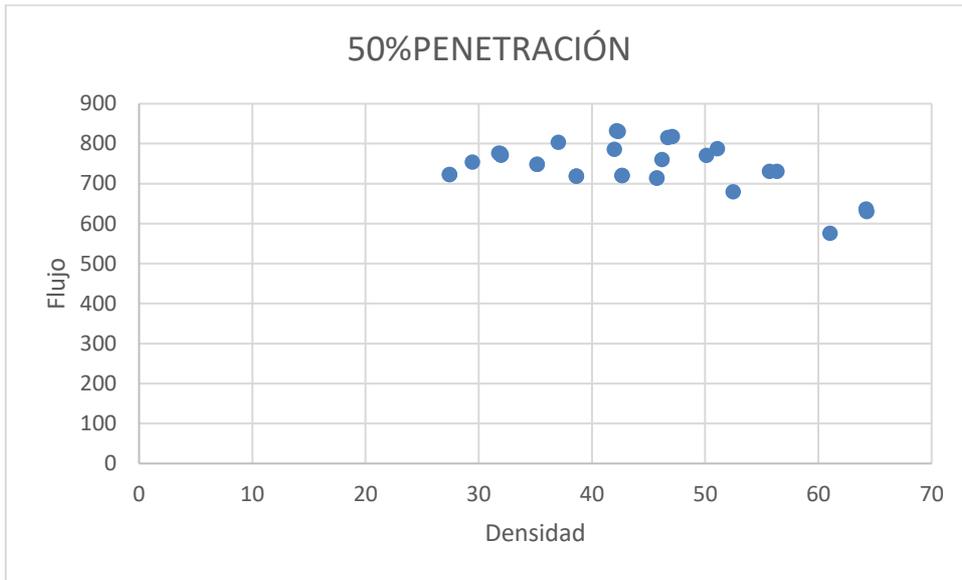


Figura 7-6 Gráfica flujo-densidad para un 50% de penetración.

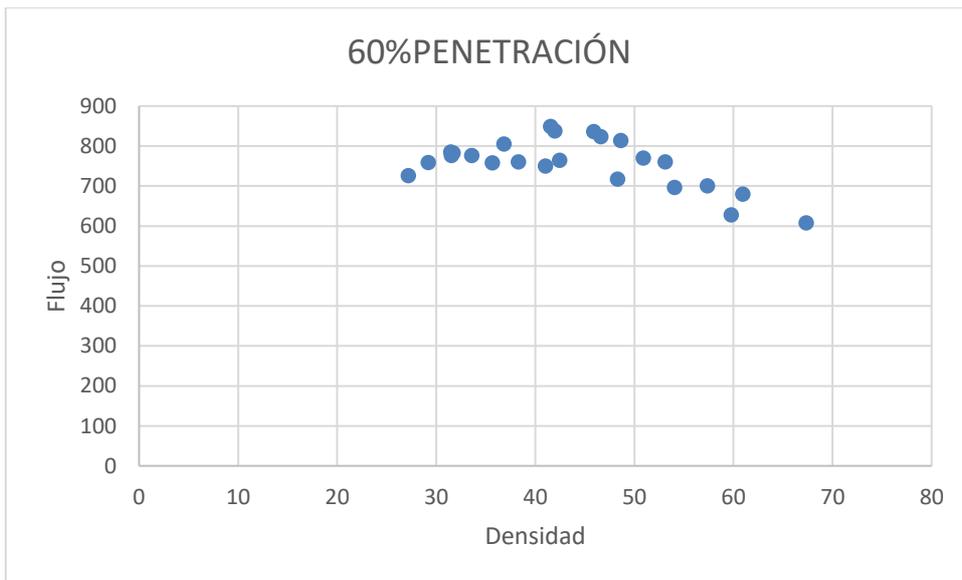


Figura 7-7 Gráfica flujo-densidad para un 60% de penetración.

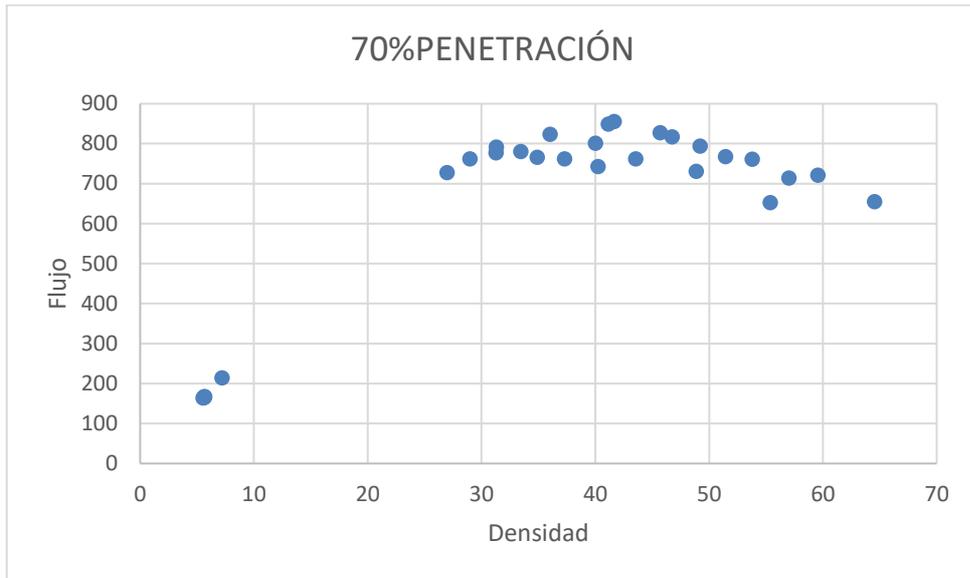


Figura 7-8 Gráfica flujo-densidad para un 70% de penetración.

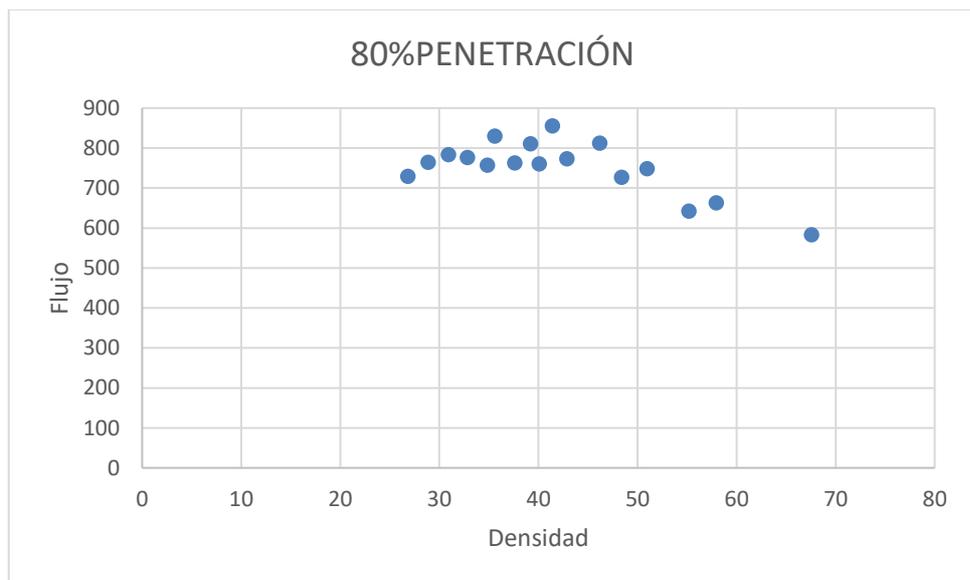


Figura 7-9 Gráfica flujo-densidad para un 80% de penetración.

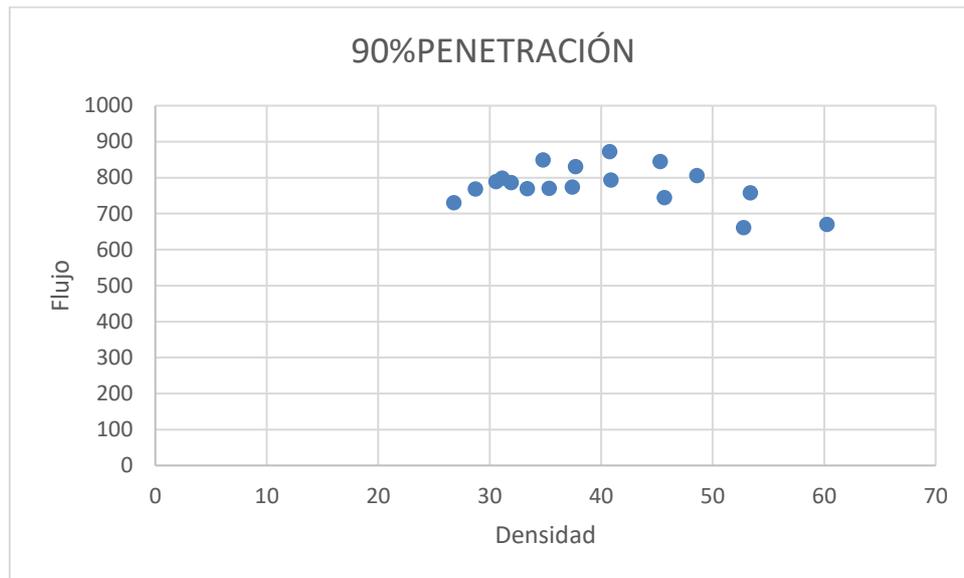


Figura 7-10 Gráfica flujo-densidad para un 90% de penetración.

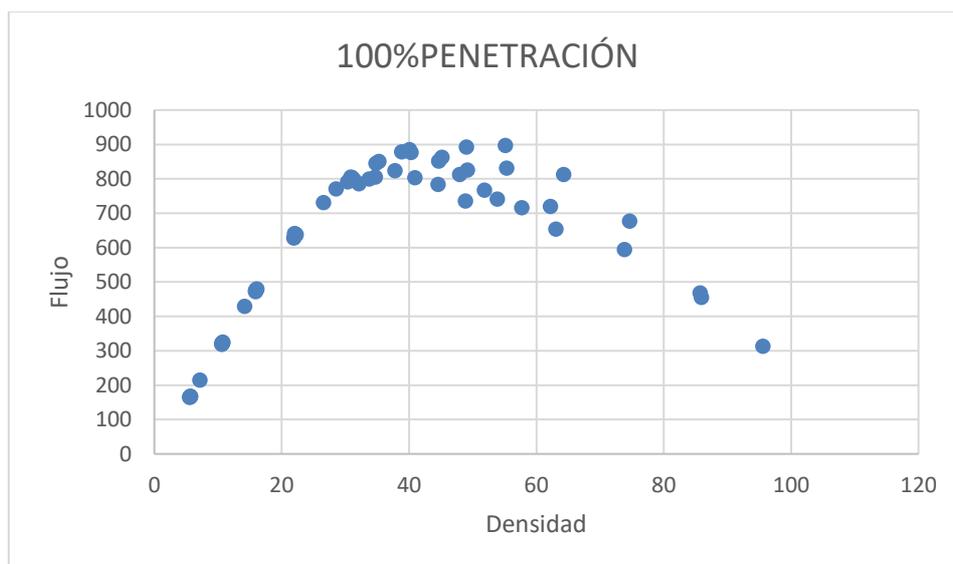


Figura 7-11 Gráfica flujo-densidad para un 100% de penetración.

7.1.1 Comparación de resultados.

Seguidamente se muestra una gráfica que contempla los datos recogidos relativos a un 0%, 50% y 100% de penetración. En la Figura 7-12, de forma general, se puede observar cómo conforme aumenta la densidad el flujo incrementa a su vez hacia un máximo (punto en el que comienza la congestión de las vías) a partir del cual comienza su disminución. Este fenómeno se debe a que en un primer periodo dentro de una carretera el volumen de vehículos que circula por ella puede aumentar hasta completar la capacidad de la misma, cuando esto sucede se dice que se

alcanza la congestión de la vía. El segundo periodo es en el que se produce la descongestión, la carretera va ganando capacidad y el flujo decrementa, esta variación del flujo se da de manera más lenta que en el primer periodo.

Comparando los tres de forma individual se ve cómo un 0% de penetración da lugar a los valores más bajos de flujo en todo momento, por lo que se tiene un pésimo aprovechamiento de la capacidad de las vías teniendo un flujo máximo igual a $755,7 \text{ veh/h}$. Con un 50% ya es posible apreciar un aumento de los valores del volumen de vehículos por hora, el punto máximo alcanza los $784,7 \text{ veh/h}$. Es cuando se llega a una conducción autónoma del 100% cuando se observan los máximos valores del flujo respecto la densidad, no sólo consta de los mayores valores durante toda la variación de la densidad, sino que su máximo se encuentra en un $897,77 \text{ veh/h}$.

Mientras que la diferencia del volumen de vehículos por unidad de tiempo de 0% a 50% es solamente de 29 veh/h , el incremento de la penetración del 50% al 100% tiene unos efectos notables, dando lugar a un aumento del flujo de más de 100 veh/h .

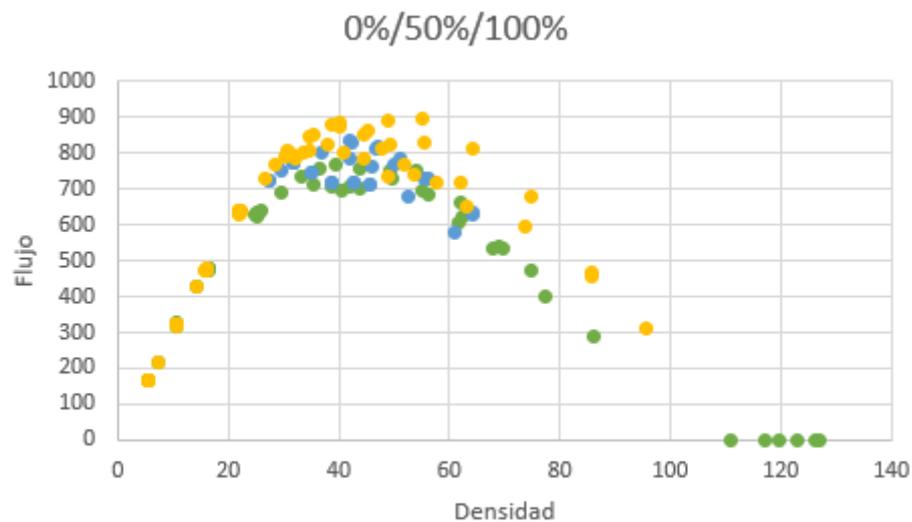


Figura 7-12 Gráfica flujo-densidad comparando penetración del 0%, 50% y 100%.

Donde:

- Puntos amarillos: hacen referencia al 100% de penetración.
- Puntos azules: hacen referencia al 50% de penetración.
- Puntos verdes: hacen referencia al 0% de penetración.

A continuación, se emplea una serie de puntos específicos para evaluar la variación de los resultados de los tres escenarios planteados en la Figura 7-12. Dichos puntos se pueden ver en la Figura 7-13 :

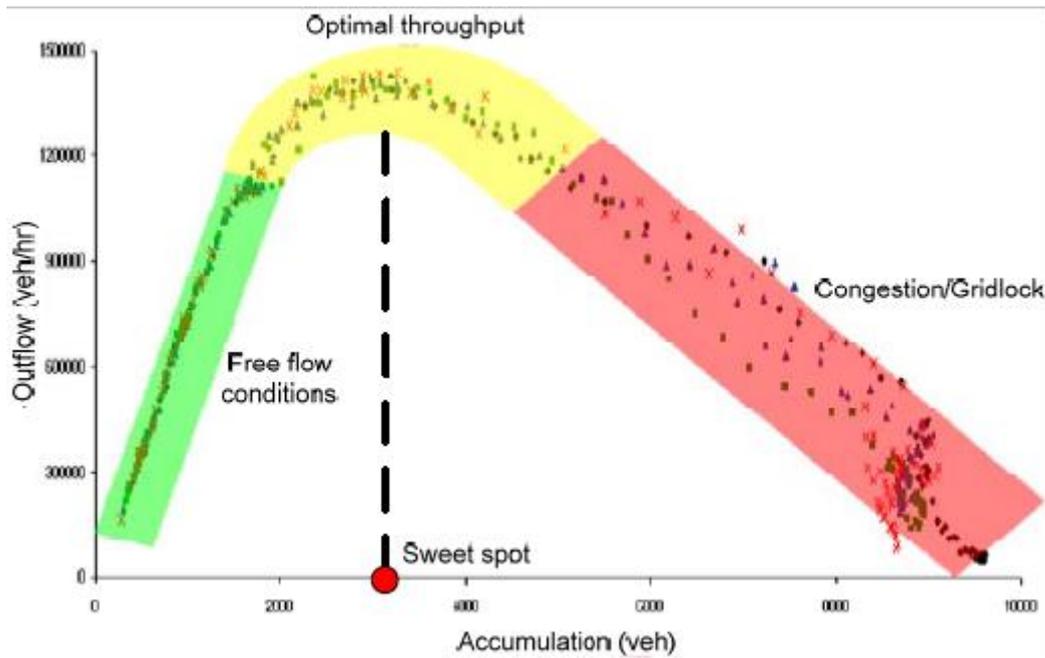


Figura 7-13 MFD que relaciona la acumulación y el flujo saliente de una ciudad [26]

Donde:

- Optimal throughput: es el punto óptimo en el que se obtiene el mayor flujo de vehículos en la red.
- Sweet spot: es el punto en el que se da la máxima densidad sin presencia de congestión.
- Congestion/Gridlock: momento de conducción inestable en el que se alcanza la congestión y los vehículos comienzan a pararse.
- Free Flow conditions: momento en el que el flujo de vehículos se transporta de forma estable.

Tanto el Optimal Throughput como el Sweet spot marcan el paso de la zona de conducción estable a la inestable. Como se ve en la Figura 7-12 conforme aumenta el porcentaje de penetración estos dos puntos se van desplazando más hacia la derecha. De esta forma mientras que para un 0% el cambio de la situación estable a la inestable se da con una densidad de 40 y un flujo de 780, con un 100% éste cambio en la estabilidad se da con una densidad de 57 y un flujo de 900. Esta mejora no es muy notoria como se puede observar, esto es debido a que la implementación de la conducción autónoma no contempla su completo aprovechamiento. Mediante una remodelación de la infraestructura ferroviaria, un cambio de la normativa y en la señalización darían lugar a un mejor aprovechamiento del vehículo autónomo en las carreteras.

7.2 Diagramas MFD velocidad-densidad

A continuación, se muestran los MFD que comparan la velocidad y la densidad del tráfico para los distintos grados de penetración.

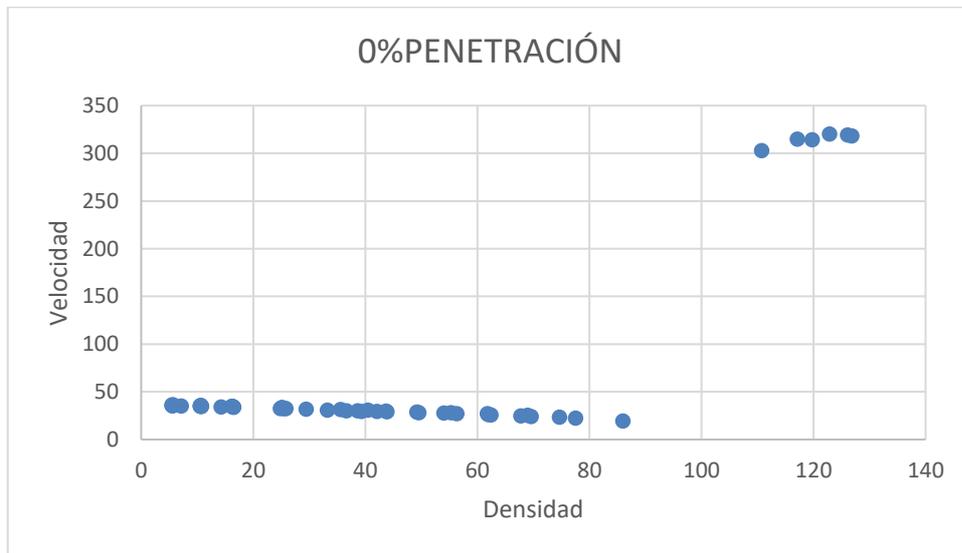


Figura 7-14 Gráfica velocidad-densidad para un 0% de penetración.

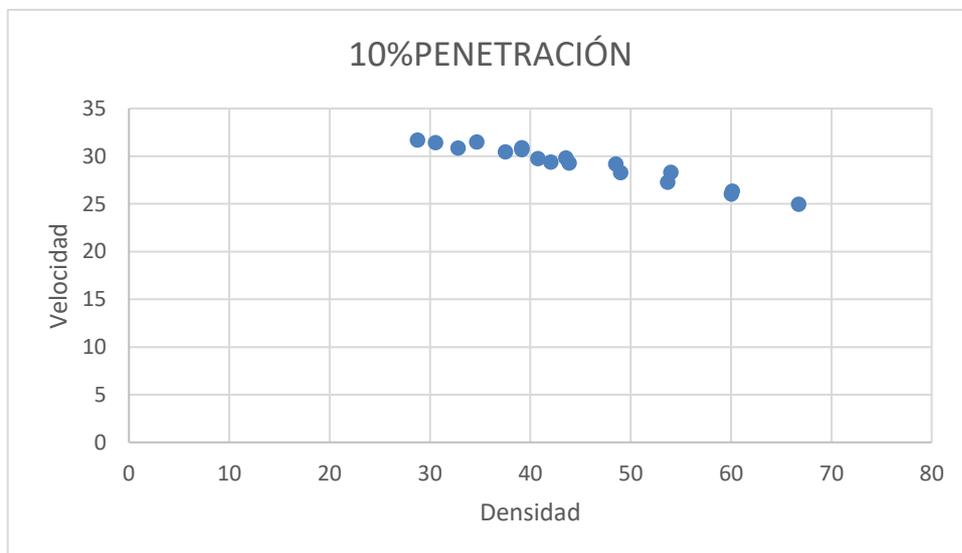


Figura 7-15 Gráfica velocidad-densidad para un 10% de penetración.

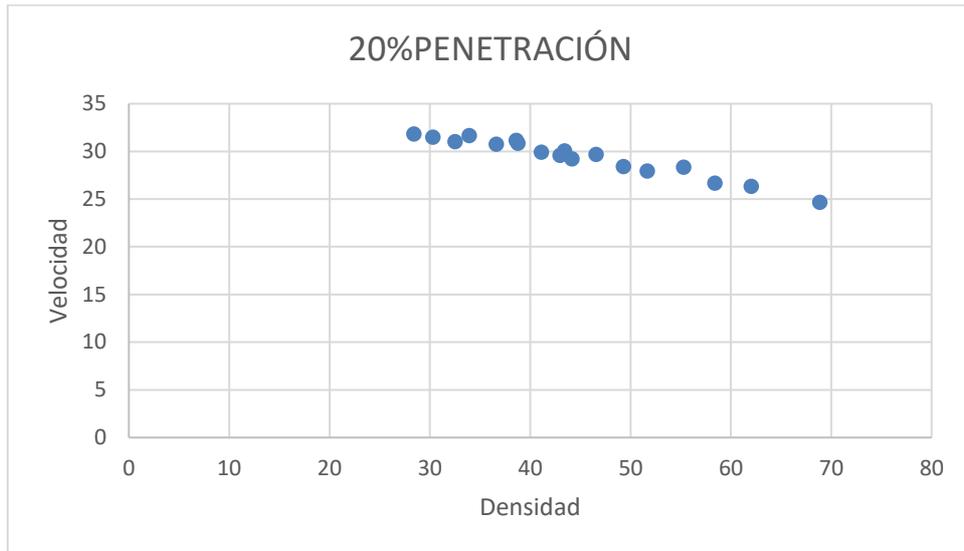


Figura 7-16 Gráfica velocidad-densidad para un 20% de penetración.

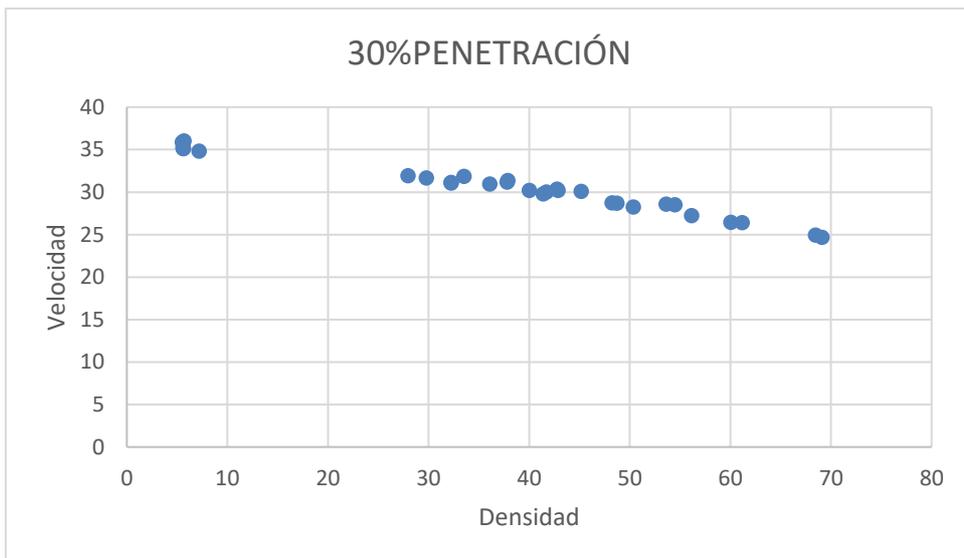


Figura 7-17 Gráfica velocidad-densidad para un 30% de penetración.

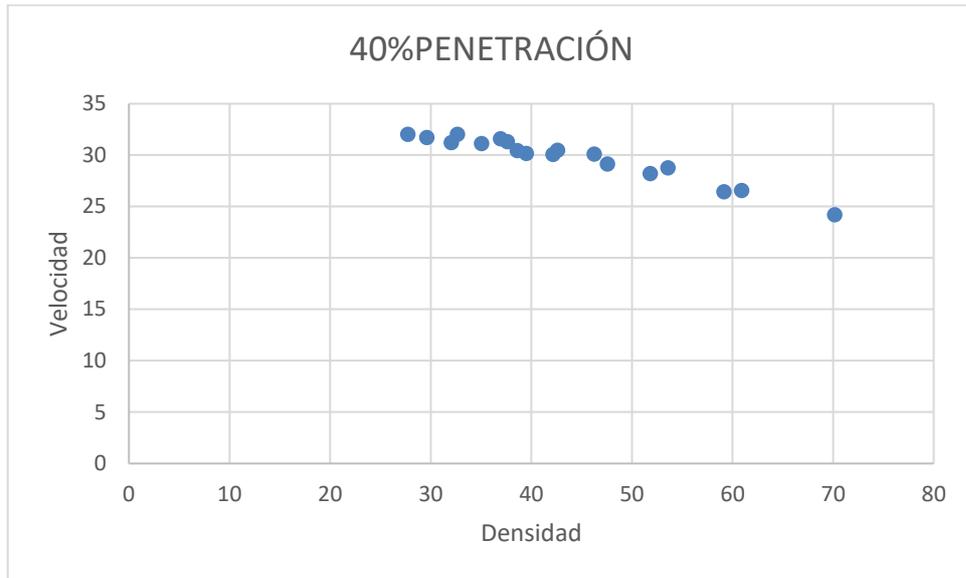


Figura 7-18 Gráfica velocidad-densidad para un 40% de penetración.

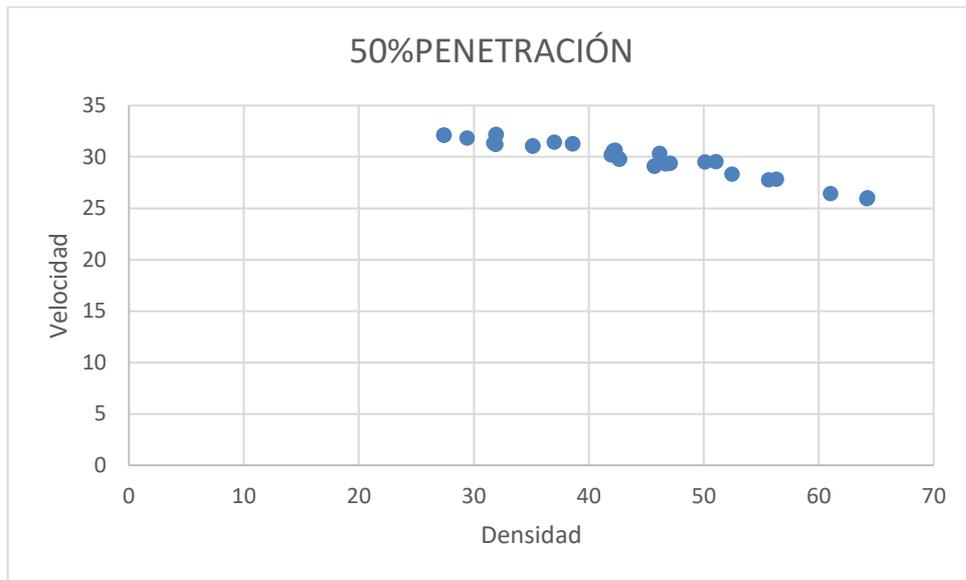


Figura 7-19 Gráfica velocidad-densidad para un 50% de penetración.

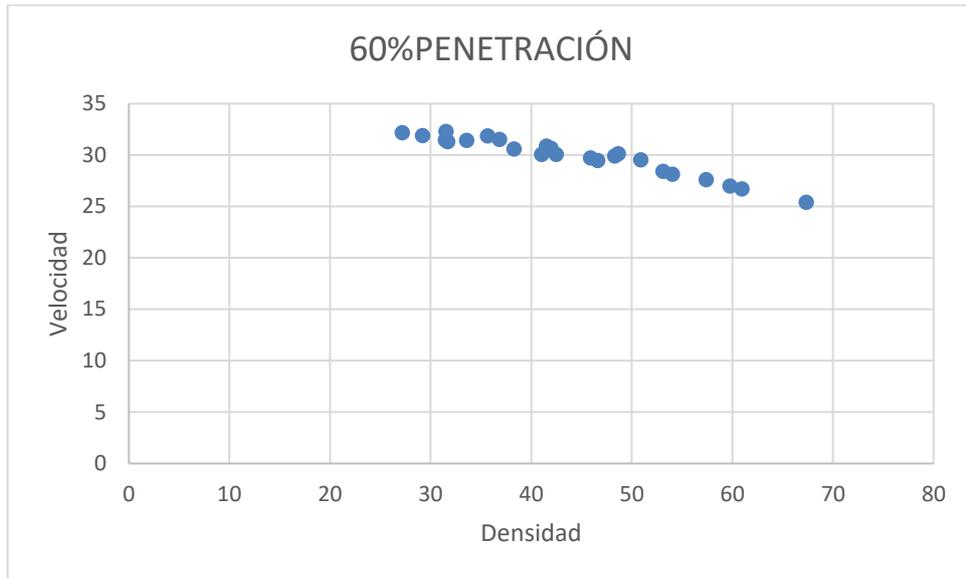


Figura 7-20 Gráfica velocidad-densidad para un 60% de penetración.

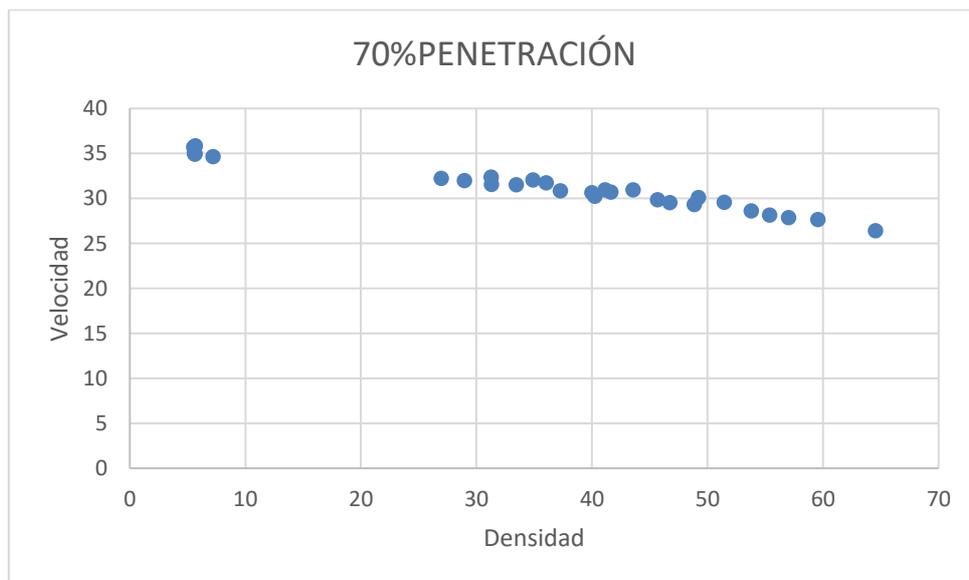


Figura 7-21 Gráfica velocidad-densidad para un 70% de penetración.

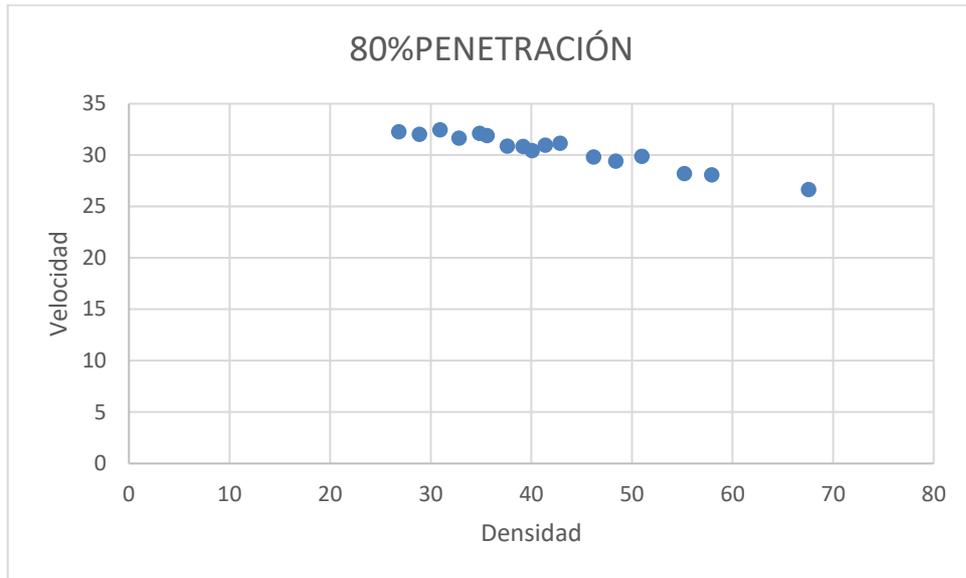


Figura 7-22 Gráfica velocidad-densidad para un 80% de penetración.

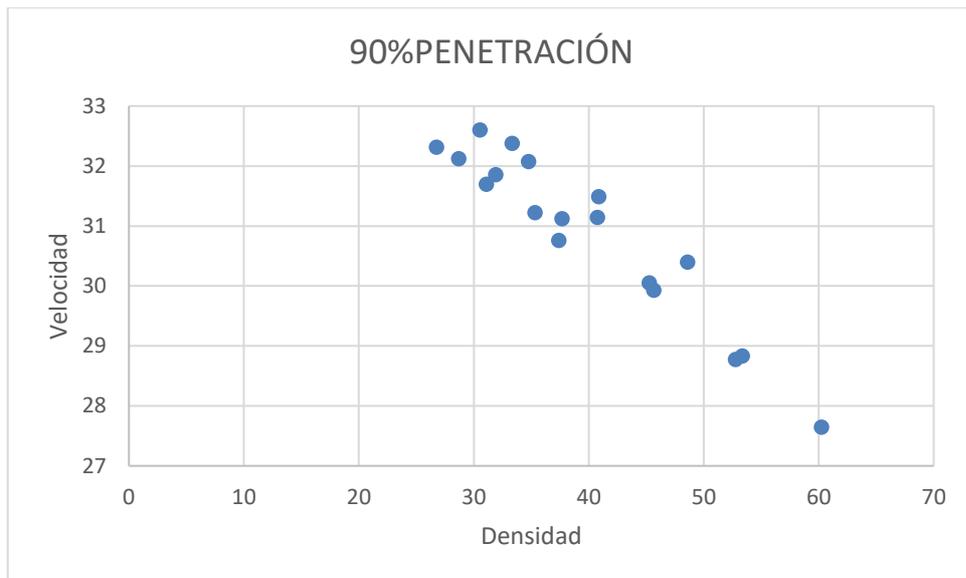


Figura 7-23 Gráfica velocidad-densidad para un 90% de penetración.

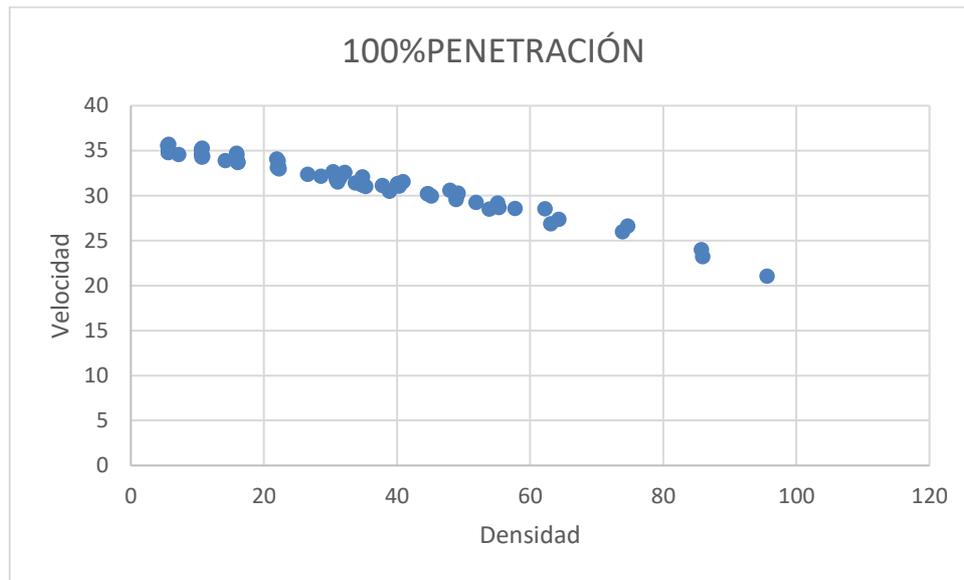


Figura 7-24 Gráfica velocidad-densidad para un 100% de penetración.

7.2.1 Comparación de resultados.

Seguidamente se muestra una gráfica que contempla los datos recogidos relativos a un 0%, 50% y 100% de penetración:

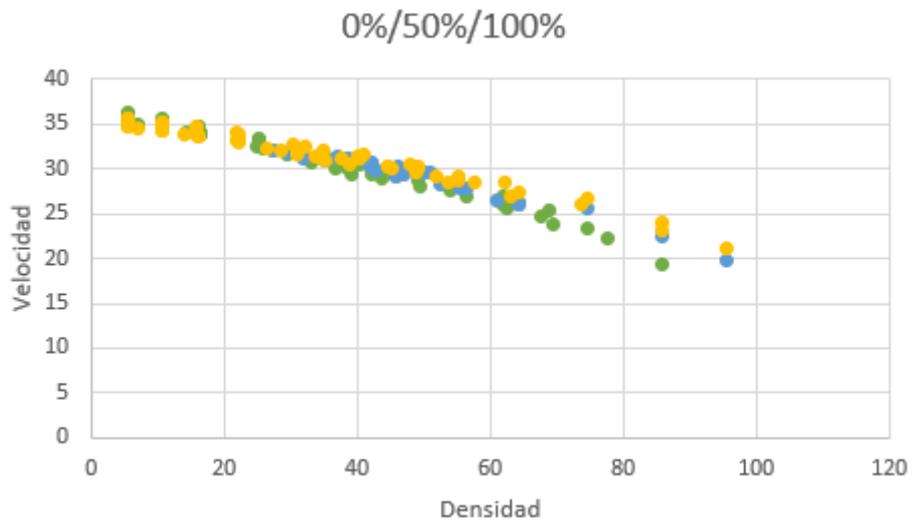


Figura 7-25 Gráfica velocidad-densidad comparando penetración del 0%, 50% y 100%.

Donde:

- Puntos amarillos: hacen referencia al 100% de penetración.
- Puntos azules: hacen referencia al 50% de penetración.
- Puntos verdes: hacen referencia al 0% de penetración.

Como se puede observar para los tres casos, a mayor densidad de vehículos en la red más complicada se hace la conducción debido a la falta de capacidad en la carretera y por lo tanto se obtiene una menor velocidad en la circulación.

Es clave en este estudio comparar los tres gráficos para ver la influencia que tiene la conducción autónoma en las carreteras. Mientras que con un 0% se nota la mayor disminución de velocidad con respecto al aumento de densidad del flujo de coches en la carretera, se observa que esta reducción no es tan llamativa en los otros dos casos. Pese a que el 50% da lugar a unas velocidades bastante aceptables conforme incrementa el volumen de vehículos, es con el 100% de penetración con el que se tiene los mejores resultados.

De esta forma se muestra cómo las características de este tipo de conducción como son el mantenimiento de una menor distancia de seguridad entre coches, relación constante con el entorno o la rápida reacción ante cambios en la carretera dan lugar a una conducción más fluida, incluso en horas punta cuando el volumen de vehículos en las carreteras comienza a ser mucho mayor.

Como bien se puede observar con un 100% de penetración se obtiene un mayor aprovechamiento de las carreteras, pero no el suficiente. Los valores de velocidad que se alcanzan con altas densidades son del rango de unos 25 km/h una velocidad que, además de ser todavía demasiado reducida por lo que no será nunca la solución a la congestión en las carreteras, da lugar (para una densidad de 86 veh/km) a un incremento en la velocidad de tan sólo el 26% con respecto al 0% de penetración. Esto es debido a que, pese a la inclusión total de vehículos autónomos, estos no pueden explotar al máximo sus características por las condiciones a las que están sometidos a la hora de circular por las vías. La normativa legal, los semáforos, señalizaciones o incluso la infraestructura de las vías hacen que este tipo de vehículos se vea obligado a sufrir una serie de penalizaciones temporales innecesarias. Para un aprovechamiento total de los mismos una modificación general de la infraestructura ferroviaria y de las señalizaciones sería necesaria, ya que el hecho de cambiar completamente el modelo de conducción, lo ya establecido se queda obsoleto y se requeriría otra reglamentación actualizada que se adaptara a su presencia y obtuviera el máximo rendimiento de la red.

7.3 Evaluación de los retrasos tras la implementación del coche autónomo.

Los coches autónomos cuentan con una serie de características que pueden dar lugar a una disminución del retraso en sus viajes. El hecho de que tengan una capacidad de procesamiento de datos real da lugar a un intervalo de tiempo más corto a la hora de tomar decisiones, son capaces de relacionarse en todo momento con el entorno ya que están equipados con sensores avanzados, pueden comunicarse entre sí para obtener información sobre la vía y así evitar retrasos innecesarios, poseen algoritmos de planificación eficientes que crean la posibilidad de una optimización de ciertas maniobras, además de estar continuamente actualizados por estar constantemente conectados a la red.

En este estudio se lleva a cabo una simulación en VISSIM para una demanda dada con distintos porcentajes de penetración del coche autónomo ya caracterizado por el software. Para cada penetración se obtiene un “DELAY TOTAL” el cual hace alusión al tiempo total en el cual un vehículo se mantiene en una sección, incluyendo el tiempo de desplazamiento y de espera en colas, obteniendo así todos los retrasos que sufre el vehículo.

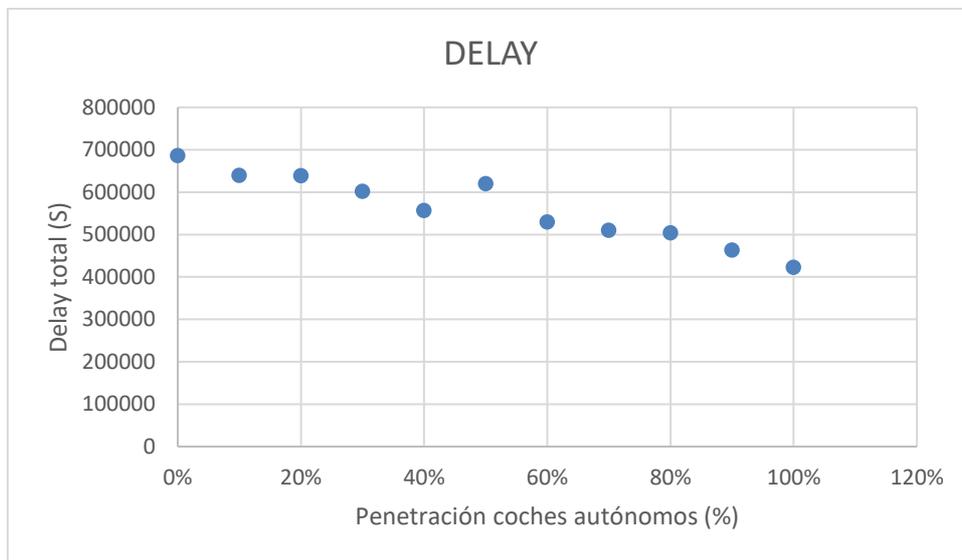


Figura 7-26 Gráfica demora-% penetración de vehículos autónomos.

Así a partir de la gráfica anterior que relaciona retraso y penetración, se puede observar cómo cuanto mayor es el número de coches autónomos en la red menor es el retraso que experimentan los vehículos. Esta variación es de gran importancia ya que, cuanto menores sean los retrasos que los vehículos sufren en las carreteras, menor será el tiempo que invierten en ellas expulsando gases contaminantes a la atmósfera, de esta forma se obtiene una mejor calidad del aire y una disminución de la contaminación del medio ambiente. Esta variación no es muy llamativa debido a la influencia de las fases semafóricas, ya que para un aprovechamiento total de las características de la conducción autónoma habría que adaptar las infraestructuras.

8 CONCLUSIONES Y LÍNEAS FUTURAS

Tras la comparación de los resultados obtenidos en el presente estudio para los distintos porcentajes de penetración se alcanzan unas conclusiones bastante sorprendentes. La realidad es que la introducción de la conducción autónoma en la red sirve para minimizar retrasos, tiempos de viaje y aliviar la congestión, dando lugar a unos niveles de contaminación mucho menores al reducir el tiempo que el viajero invierte en la carretera parado o en largas rutas innecesarias. Pese a esto, los niveles de mejoría son muy leves, no son significativamente apreciables. Además, la evolución comienza a apreciarse cuando la penetración de los vehículos autónomos es alta, en torno al 80%, y es realmente útil cuando alcanza un 100%.

El hecho de que la conducción no influida por el factor humano no explote su máximo aprovechamiento es debido a que la infraestructura de las carreteras no se encuentra adaptada a este tipo de solución. Para lograr una completa explotación de estos vehículos habría que terminar con las fases semafóricas, ya que estas perjudican la productividad en la reducción de tiempos muertos de los vehículos. Los semáforos, cuya aparición en las ciudades supuso un hito para la seguridad en sus calles guiando al tráfico y ordenándolo, son los que mayoritariamente marcan los tiempos de viaje en las carreteras urbanas. En una infraestructura ideal en la que no existiera ningún tipo de señalización o semáforos, y exclusiva para vehículos inteligentes, estos tendrían la oportunidad de autogestionarse, manteniéndose en contacto tanto los unos con los otros como con el entorno para regularse, ordenarse y lograr una menor pérdida del tiempo en paradas innecesarias. Es este cambio radical de las vías tal y como las conocemos el que crea el dilema ético de dar o no el completo control de las carreteras a los vehículos, apartando el factor humano de la gestión en este ámbito.

El estudio abarca una red de carreteras de la provincia de Sevilla, en ella, todos los arcos se consideran con las mismas características, igual capacidad, mismo flujo, idéntica estructura, algo que no es real. Cada arco posee su propia estructura y ocupación, no todos son igual de llamativos a la hora de cruzarlos. Es debido a esto que una futura ampliación del estudio podría centrarse en dividir las zonas, dividir los arcos en jerarquías y crear un MFD para cada uno. De esta forma se podría evaluar si el hecho de tratar a todos los arcos en la red de la misma forma es una buena simplificación a considerar o si, por el contrario, hay una gran variación de los resultados y una caracterización de los arcos que se abarcan es estrictamente necesaria.

Como bien es sabido, una reducción de retrasos, tiempos muertos en la carretera y tiempos de viaje dan lugar a una mejora de las condiciones del medio ambiente mediante una reducción en la contaminación ocasionada por los gases que los vehículos emiten a la atmósfera. Pese a que es una conclusión obvia, sería interesante medir el grado en el que la contaminación disminuye gracias a la implementación de este tipo de conducción. Una extensión de este trabajo podría ser emplear una herramienta en los nodos que unen los arcos de la red que se estudia para medir

las emisiones contaminantes, de esta manera se podría ver la mejora ambiental que se consigue con el aumento de la conducción autónoma en las carreteras.

En este trabajo solo se ha considerado el vehículo autónomo y su efecto en el tráfico general como un nuevo tipo de vehículo que irrumpe en el sistema de transporte, con características propias que mejoran la conducción humana. Sin embargo, no se han considerado los importantes cambios que su irrupción en los viajes produciría en la demanda de viajes. La demanda de este trabajo se ha considerado constante en todos los escenarios, sin cambios derivados por la aparición del nuevo modo y los cambios de conducta de los usuarios.

Uno de los beneficios más directos es el de la reducción de los tiempos de viaje empleados por los ciudadanos en sus desplazamientos diarios. Sin embargo, esta reducción de tiempos puede tener implicaciones importantes en la sociedad. Atendiendo al concepto de la constante de Marchetti [27] y la hipótesis de Zahavi [28] sobre la relativa estabilidad del presupuesto de tiempo de viaje, los ahorros de tiempo derivados de la mejora de la eficiencia del sistema de transporte pueden tener repercusiones en el urbanismo, pues los patrones urbanísticos pueden variar si los viajeros deciden invertir dichos ahorros de tiempo por desplazamientos recurrentes a mayores distancias, favoreciendo modelos de reordenación del territorio más dispersos y en general menos sostenibles, o por el contrario, si deciden realizar un mayor número de viajes, pueden tener un efecto de incremento de demanda de viajes en una forma de *tráfico inducido*.

Tampoco se ha considerado otro tipo de fenómenos que, cuando la tecnología del vehículo autónomo y la legislación que los regule estén lo suficientemente maduras, pueden aparecer. Por ejemplo, el paradigma de la posesión de vehículos en propiedad, que en la sociedad actual se ha visto como símbolo de estatus e independencia, puede cambiar radicalmente, [29]. Sin la sensación de conducir, y sin la necesidad de aparcar y cuidar el coche, la sociedad puede abandonar la identificación enraizada en la mente del urbanita desde la segunda mitad del siglo XX de “vehículo privado” y “libertad”. Ya se han identificado cambios de actitud en la juventud, que definen su estatus con otro tipo de posesiones, especialmente tecnológicas, y retrasan la edad de obtención del carnet de conducir [29]. Así, un posible escenario futuro es la de empresas operadoras de vehículos autónomos, que se encarguen además de su mantenimiento, y un servicio de alquiler de viajes a dichos vehículos, exclusivos o compartidos, de una forma similar a un taxi pero sin conductores (con las previsibles mejoras tecnológicas en la reserva y en el pago de dicho viaje que harán más atractivo el servicio, pero que no afectan a su eficiencia en el tráfico urbano). Esto puede llevar a una reducción del número de vehículos en la red. Otra mejora posible al sistema podría venir con la reducción de la necesidad de aparcamientos. El ratio *tiempo de uso / tiempo aparcado* del vehículo se incrementará notablemente, lo que supondría un aumento adicional y directo de la capacidad de las vías. Para llevar a cabo una simulación que evalúe este escenario debería haber un estudio de prognosis del nuevo reparto modal con vehículos autónomos operando como una especie de servicio público puerta a puerta. Para abordar dicha simulación de una forma más o menos realista son necesarios una serie de modelos para estimar el cambio en el reparto modal, el fenómeno de inducción de tráfico, y en definitiva, la evolución de la demanda de movilidad cuya complejidad y elevado coste los hacen totalmente inasumibles en un trabajo académico de este tipo.

También se ha dejado para investigaciones futuras el estudio del incremento de eficiencia y capacidad de las vías en intersecciones inteligentes no semaforizadas. En Vissim quizás sean fáciles de modelar simplemente eliminando las fases semaforicas y cambiando los parámetros de conducta en las intersecciones, pero se requiere un análisis más profundo para su aplicación.

No se han modelado modos de conducción cooperativa que permiten el aumento de capacidad de las vías, como el platooning a nivel urbano. Es de suponer un aumento adicional de la capacidad, aunque la complejidad urbana y la multiplicidad de rutas e intersecciones harán complicado su funcionamiento óptimo en una aplicación futura real.

Por otro lado, el mecanismo de elección de ruta, por parte de los viajeros, es clave para definir la eficiencia y la congestión del sistema de transporte. Cada uno de los actores que utilizan el sistema de transporte puede atender a un criterio diferente, siendo el más aceptado que cada usuario tienda a obtener su máximo beneficio, que equivale en este caso a minimizar su tiempo de viaje. Al tomar cada viajero sus decisiones (de forma individualizada) se establece un equilibrio en el sistema de transporte, que bajo estas hipótesis se denomina “equilibrio del usuario”, tratado en este trabajo. El usuario tradicional del vehículo privado se aleja de la hipótesis habitual de viajero inteligente (i.e. usuario perfecto conocedor del sistema de transporte y de las consecuencias de sus decisiones); el viajero real actual puede estimar de forma errónea los tiempos de viaje correspondientes a las diferentes rutas alternativas para su viaje, siendo posiblemente más optimista para la ruta más conocida por él y pesimista para el resto. Para modelar su comportamiento real es conveniente introducir errores de percepción en sus estimaciones de los tiempos de viaje de cada alternativa, utilizando modelos estocásticos en lugar de deterministas.

En contraposición a esta tendencia “estocástica”, un vehículo conectado con información en tiempo real sí puede asemejarse a un viajero inteligente con conocimiento pleno del sistema; este agente adoptará la mejor opción, de entre todas las alternativas disponibles, atendiendo a un criterio a determinar que llevará al sistema de transporte hacia un estado de equilibrio.

Desde el punto de vista del planificador o gestor del sistema de transporte, y también desde el punto de vista del bien común o social, el equilibrio que idealmente debería alcanzarse es el equilibrio del sistema, en el que todos los viajeros se ponen de acuerdo para optimizar el funcionamiento del sistema de transporte persiguiendo que el tiempo de viaje medio sea mínimo. Los individuos, por propia iniciativa, tenderán a su propio beneficio y difícilmente un individuo va a retardar la llegada a su destino escogiendo una ruta más duradera con la finalidad de que el tiempo de los demás sea menor. Es necesario incentivar a los viajeros para que adopten dichas rutas; tradicionalmente este incentivo/desincentivo ha sido ejercido por los peajes. Los vehículos autónomos conectados entre sí y con un sistema que proporcione información del tráfico actualizada en tiempo real serán una oportunidad para implementar políticas de movilidad que acerquen el equilibrio al óptimo del sistema. Una posibilidad sería mediante un sistema inteligente de peajes dinámicos. La idea de la implantación de un sistema de peajes como herramienta para obtener una internalización de las externalidades del transporte, a menudo no percibidas como coste, está ya muy extendida en el ámbito de la planificación del transporte [30], con multitud de implementaciones actuales, como las llevadas a cabo en Singapur, Hong Kong, países nórdicos, Milán o Londres. Se puede desarrollar un sistema central urbano

que ponga un precio a cada ruta evaluando las externalidades que produce teniendo en cuenta el tráfico en tiempo real. Los usuarios seguirían teniendo la libertad de elegir ruta, pero con una configuración adecuada del sistema dinámico los equilibrios que se darían tenderían al óptimo del sistema. Para implementar una solución de este tipo en Vissim, sería necesario la programación de un módulo que implementara el proceso de asignación de rutas para cada vehículo.

En definitiva, muchas son las posibilidades que se ofrecen para modelar la ciudad del futuro con calles pobladas de vehículos autónomos. En este trabajo fin de máster se ha llevado a cabo la considerada más realista de estas simulaciones para un entorno urbano, y se han sentado las bases para avanzar en otras mediante el uso del software Vissim y la asignación dinámica.

9 REFERENCIAS

- [1] Litman, «Developing Indicators for Sustainable and Livable Transport Planning.,» 2013.
- [2] 2020. [En línea]. Available: <https://www.atriainnovation.com/coche-autonomo/>.
- [3] «SAE J3016,» 2021.
- [4] «PTV Group,» [En línea]. Available: <https://www.ptvgroup.com/es/soluciones/productos/ptv-visum/>.
- [5] F. Kessels, Traffic Flow Modelling, 2018.
- [6] M. Ameli, «Heuristic Methods for Calculating Dynamic Traffic Assignment. Dynamique vibrations.,» 2019.
- [7] F. Knight, «Some fallacies in the interpretation of social cost,» *The Quarterly Journal of Economics*, vol. 38, n° 4, 1924.
- [8] J. Wardrop, «Some theoretical aspects of road traffic research.,» *Proceedings of the Institute of Civil Engineers, Part II*, pp. 325-378, 1952.
- [9] S. Garrido Pulido, «Microsimulación De Tráfico Para Evaluar El Impacto De La Ampliación Del Metrocentro En Sevilla,» TFM, Universidad de Sevilla, 2023.
- [10] Stanek, «Measuring Autonomous Vehicle Impacts on Congested Networks Using,» 2016.
- [11] P. David Stanek, «Measuring Autonomous Vehicle Impacts on Cogested Networks Using Simulation,» 2017.
- [12] Geroliminis, «Properties of a well-defined macroscopic fundamental diagram,» 2010.
- [13] F. f. S.-. u. Verkehrswesen, «HBS,» 2001.
- [14] M. a. Keller, «Evaluation of single- and two-regime traffic flow models.,» 1868.
- [15] Friedrich, Extreme events, critical infrastructures, human vulnerability and strategic planning: Emerging research issues, 2016.
- [16] Daganzo, «Urban gridlock: macroscopic modeling and mitigation approaches.,» *Transportation Research part B: Methodological* 41., 2007.
- [17] G. Daganzo, «An analytical approximation of the macroscopic fundamental diagram of urban traffic.,» *Transp. Res. Part B* 42., 2008.

- [18] A. R. y L. J.A., «Dynamic traffic assignment using the macroscopic fundamental diagram: A review of vehicular and pedestrian flow models,» *Transport. Res. Part B*, vol. 137, pp. 99-118, 2020.
- [19] M. G. Yildirimoglu, «Approximating dynamic equilibrium conditions with macroscopic fundamental diagrams.,» *Transp. Res. Part B* 70, 2014.
- [20] I. Chabini, «Discrete dynamic shortest path problems in transportation applications: complexity and algorithms with optimal run time.,» *Transp. Res. Rec. 1645*, 170–175, 1998.
- [21] M. R. M. G. N. Yildirimoglu, «Equilibrium analysis and route guidance in large-scale networks with mfd dynamics.,» *Transp. Res. Part C* 59, 404–420, 2015.
- [22] D. N. G. Merchant, «A model and an algorithm for the dynamic traffic assignment problems.,» *Transp. Sci.* 12 (3), 183–199, 1978.
- [23] M. M. M. Carey, «An exit-flow model used in dynamic traffic assignment.,» *Comput. Oper. Res.* 31 (10), 1583–1602., 2004.
- [24] L. Romero y F. Benitez, «Traffic flow continuum modeling by hypersingular boundary integral equations.,» *Int. J. Numer. Methods Eng.*, vol. 82 , n° 1, p. 47–63., 2010.
- [25] R. Hughes, «A continuum theory for the flow of pedestrians.,» *Transp. Res. Part B* 36 (6), 507–535, 2002.
- [26] D. Geroliminis, «Macroscopic modeling of traffic in cities,» 2007.
- [27] C. Marchetti, «Anthropological Invariants in Travel Behavior, Technological Forecasting and Social Change, 47:75-88.,» Internal Publication, International Institute for Applied Systems Analysis, Austria. <http://www.cesaremarchetti.org/archive/electrioni>, 1994.
- [28] Y. Zahavi, «Travel time budgets and mobility in urban areas.,» Report prepared for the U.S. Department of Transportation, Washington, D.C. and Ministry of Transport, Federal Republic of Germany, Bonn. , http://www.surveyarchive.org/Zahavi/TravelTime_Bud, 1974.
- [29] L. Schiller y J.Kenworthy, *An Introduction to Sustainable Transportation : Policy , Planning and Implementation*, 2^a ed., Routledge, 2018.
- [30] C. Valdes, A. Monzón y F. G. Benitez, «Sustainable urban transportation strategies: Searching for synergies.,» *KSCE Journal of Civil Engineering*, vol. 20, n° 3, pp. 1066-1075, 2016.