Máster en Ingeniería de Sistemas y Control

MODELADO Y CONTROL DE LAS COLAS DE VEHICULOS EN VIAS DE ALTA CAPACIDAD

Autor:

Miguel Ortiz Alonso

Directores:

Matilde Santos Peñas

Manuel Romana García

Septiembre 2023

Máster en Ingeniería de Sistemas y Control

MODELADO Y CONTROL DE LAS COLAS DE VEHICULOS EN VIAS DE ALTA CAPACIDAD

Autor:

Miguel Ortiz Alonso

Directores:

Matilde Santos Peñas

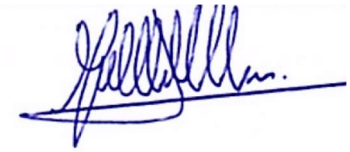
Manuel Romana García

Septiembre 2023

AUTORIZACION

Autorizamos a la Universidad Complutense y a la UNED a difundir y utilizar con fines académicos, no comerciales y mencionando expresamente a sus autores, tanto la memoria de este Trabajo Fin de Máster, como el código, la documentación y/o el prototipo desarrollado.

Firmado: Miguel Ortiz Alonso



Firma del alumno

AGRADECIMIENTOS

A la Dra. Matilde Santos y al Dr. Manuel Romana por su apoyo, consejos, recomendaciones y aportaciones durante la realización de este TFM.

A la Dra. Mariló Martín-Gasulla, de la empresa PTV, por su soporte a la hora de formarme y poder sacar el máximo partido al software de simulación Vissim.

A mi pareja, Marta, por su paciencia y comprensión durante los meses en los que este trabajo se ha desarrollado.

A todos vosotros, gracias.

RESUMEN

El transporte por carretera juega un rol clave en las comunicaciones de un país. Dentro de la red principal de carreteras, las autopistas y autovías son elementos claves de esa red y los que mayor nivel de tráfico soportan. Entre los diversos usuarios de esas vías, destacan los vehículos de tipo turismo y los vehículos pesados, éstos últimos de especial importancia puesto que el 95% del transporte por mercancías se realiza por carretera, gran parte por este tipo de vías. Estos vehículos pesados son a menudo más lentos y menos dinámicos que los turismos, y su presencia puede modificar el discurrir del flujo del tráfico, sobre todo ante escenarios con intensidades altas y en situaciones en las que dichos vehículos se desplacen lateralmente. Esto puede producir que se resienta el nivel de servicio de la vía.

Paralelamente, la aparición de nuevos sistemas interconectados y el IoT está abriendo un nuevo paradigma en lo referente a la automatización de la conducción y las posibilidades para su control. La motivación del presente trabajo es estudiar la formación de colas causadas por interferencias en el tráfico en vías de alta capacidad causadas por un cambio en la sección transversal de la vía y/o por vehículos pesados y lentos, para después poder aplicar acciones de control, mitigación y prevención para evitarlas o minimizarlas.

Para ello, en primer lugar, se ha modelado un tramo de autopista con un ramal de incorporación y una reducción del número de carriles en el entorno de simulación microscópico con el software PTV Vissim. Para su definición se han considerado dos distribuciones del tráfico, una correspondiente a una intensidad por debajo de la capacidad de la vía y otra de tráfico saturado, con distintas clases de vehículos en lo referente a tipología y grado de automatización y definiendo sus características conductuales dentro del modelo.

Seguidamente, se han estudiado comparativamente la efectividad de siete sistemas de control del tráfico, cinco basados en técnicas tradicionales (calzada extra gestionada, gestión de carriles, gestión de accesos, límite de velocidad variable, sistema de restricción de vehículos pesados lentos) y dos en la integración vehículo-infraestructura (control dinámico de la distancia entre vehículos, enjambres de vehículos interconectados).

El análisis de los resultados de la simulación de los diferentes escenarios y estrategias de control permiten concluir que cada uno de ellos tiene efectividad en escenarios distintos, tanto en lo referente a volumen y composición del tráfico como a la geometría de la vía, pudiendo evaluar comparativamente la efectividad de cada una de ellas, en qué momento muestran su mayor capacidad de control y discernir de qué forma se pueden coordinar y/o complementar.

PALABRAS CLAVE:

Modelado, Carreteras, Cuellos de Botella, Vehículos Pesados, Control, Tráfico, IoT, Integración Vehículo-Infraestructura, Automatización de la Conducción.

ABSTRACT

Road transport plays a key role in the communications of a country. Within the main road network, motorways and highways are key elements of that network and those that support the highest level of traffic. Among the various users of this road, passenger cars and heavy goods vehicles stand out, the latter of special importance since 95% of merchandise transport is carried out by road, much of it on this type of road. These heavy goods vehicles are often slower and less dynamic than passenger cars, and their presence can modify the flow of traffic, especially in scenarios with high intensity and in situations in which these vehicles move laterally. This can cause the service level of the road to suffer.

At the same time, the appearance of new interconnected systems and the IoT is opening a new paradigm in terms of driving automation and the possibilities for its control. The motivation of this work is to study the formation of queues caused by traffic interference on high-capacity roads, caused by a change in the cross section of the road and/or by heavy and slow vehicles, to apply control actions, mitigation, and prevention to avoid or minimize them.

To do this, first of all, a highway section with an incorporation branch and a reduction in the number of lanes has been modeled in the microscopic simulation environment with the PTV Vissim software. For its definition, two traffic distributions have been considered, one corresponding to an intensity below the capacity of the road and the other to saturated traffic, with different classes of vehicles in terms of typology and degree of automation and defining their behavioral characteristics within of the model.

Next, the effectiveness of seven traffic control systems, five based on traditional techniques(managed extra lane, lane management, Ramp Metering, Variable Speed Limit, slow heavy goods vehicles restriction system) and two on Vehicle-Infrastructure Integration (dynamic control of the distance between vehicles, swarms of interconnected vehicles).

The analysis of the results of the simulation of the different scenarios and control strategies allows us to conclude that each of them is effective in different scenarios, both in terms of volume and composition of traffic and the geometry of the road, being able to comparatively evaluate the effectiveness of each of them, when they show their greatest capacity for control and discern how they can be coordinated and/or complemented.

KEYWORDS:

Model, Highway, Bottleneck, Heavy Goods Vehicles, Queues, Control, IoT, Vehicle-Infrastructure Integration, Driving Automation.

INDICE

Autorización……5

Agradecimientos……7

Resumen……9

Índice……11

Lista de Figuras ……13

Lista de Tablas……16

Lista de Acrónimos……17

1. Introducción……19
   1.1. Motivación……19
   1.2. Objetivos del presente trabajo……23
   1.3. Estructura del trabajo……24
   1.4. Publicaciones derivadas……24

2. Estado del Arte……25
   2.1. Comportamiento del tráfico y modelos propuestos para su representación……25
   2.2. Formación de colas en flujos de tráfico debido a interferencias en éste……29
   2.3. Posibilidades del control en la prevención de colas y cuellos de botella……37
   2.4. Tecnologías V2V, V2X y enjambres de vehículos interconectados……47

3. Enfoque al Problema. Definición del modelo de Simulación……55
   3.1. Modelos de simulación del tráfico……55
   3.2. Modelo de tráfico seleccionado……57
   3.3. Software de simulación……58
   3.4. Modelado del trazado……59
   3.5. Escenarios reales……59
   3.6. Geometría de la vía……62
   3.7. Simulación del tráfico……63
   3.8. Modelo de simulación……64

4. Estrategias de Control del Tráfico……71
   4.1. Calzada extra……71
   4.2. Gestión de carriles……74
   4.3. Ramp Metering……76
   4.4. Variable Speed Limit……77
   4.5. Sistema de restricción de vehículos pesados lentos……81
   4.6. Resultados……82

4.7. Conclusiones y valoración comparativa……..99

5. Nuevas tecnologías: vehículo autónomo y conectado……103
5.1. Control dinámico de la distancia entre los vehículos……104
5.2. Swarms de vehículos interconectados. Platooning……109
5.3. Resultados……..110
5.4. Conclusiones y valoración comparativa……116

6. Conclusiones y Trabajos Futuros……119
6.1. Trabajos futuros……121

Referencias……126

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Intensidad Media Diaria del tráfico en 2020 (MITMA, 2023)…..……..20
Figura 2: Intensidad Media Diaria del tráfico de vehículos pesados en 2020 (MITMA, 2023).……..21
Figura 3: Interconectividad V2V y V2X, ejemplo ilustrativo (MACSF, 2020)……22
Figura 4: Interconectividad V2V y V2X, ejemplo ilustrativo en autopista (USDOT, 2019)……..22
Figura 5: Interconectividad V2V y V2X, ejemplo ilustrativo en autopista (Durrani, 2016)…….……..26
Figura 6: Gráfica de las reacciones del conductor en función de la presencia de otros vehículos (PTV, 2023)……..27
Figura 7: Esquema de un modelo de tráfico en autopistas de dos carriles (Wang, 2019)……..……28
Figura 8: FD tras toma de datos (Dervisoglu, 2019)…..……..30
Figura 9: FD tras linealización en condiciones de flujo libre (Dervisoglu, 2019)…..……..30
Figura 10: FD tras linealización en condiciones de congestión (Dervisoglu, 2019)…..……30
Figura 11:Ejemplo de estimación de capacidad con el Método de Van Aerde (Asgharzadeh, 2018)…..……32
Figura 12:Explicación y fases del fenómeno de breakdown (Kerner, 2000)…….……34
Figura 13: Fundamental Diagram triangular y caso de aplicación en incorporaciones a la autopista (Laval, 2005)……35
Figura 14: Fundamental Diagram triangular y caso de aplicación en una cola causada por un vehículo más lento (Laval, 2007)……36
Figura 15: Características microscópicas del flujo sincronizado (Kerner, 2011).……..36
Figura 16: Esquema básico de un lazo de control del tráfico (Kotsialos, 2001)……38
Figura 17: Formación de un cuello de botella móvil (Carlson, 2010).……40
Figura 18: Formación de un cuello de botella móvil y aproximación a su control por MTFC (Carlson, 2010)……..*40*
Figura 19: Esquema de un compensador en cascada por adelanto de fase (Zhu, 2015)……41
Figura 20: Ajuste de un compensador en cascada por adelanto de fase (Zhu, 2015)…….……42
Figura 21: Funcionamiento de un compensador en cascada por adelanto de fase (Zhu, 2015)……42
Figura 22: Esquema de control predictivo del tráfico (MPC) (Van der Berg, 2007)…….……..43
Figura 23: Ejemplo de control predictivo en vías urbanas y accesos (Van der Berg, 2007).……43
Figura 24: Receding-Horizon Parametized, variante del MPC (Zegueye, 2012)…..……44
Figura 25: Ejemplo de aplicación de RHP-MPC en la autopista A12, Holanda (Zegeye, 2012)……44
Figura 26: Funcionamiento de un controlador basado en Reinforced Learning para un sistema VSL (Li, 2017)……45
Figura 27: Ejemplo de aplicación de control con Reinforced Learning (Li, 2017)……46
Figura 28: Ejemplo de aplicación de control con Reinforced Learning (Wu, 2020)……46
Figura 29: Ejemplo de aplicación de control con Reinforced Learning (Wu, 2020)……47
Figura 30: Ejemplo de integración V2V y V2X en la circulación de un platoon (Bayezit, 2014)……..49
Figura 31: Equipamiento y control por bloques del vehículo presentado en el GCDC 2011 (Bayezit, 2014)……..49
Figura 32: Efecto estabilizador de los vehículos autónomos en el conjunto del tráfico rodado (Wu, 2018)……52
Figura 33: Aumento de la capacidad de la vía, por carril, en función del grado de penetración de vehículos autónomos (Salas, 2019)……..52

Figura 34: Grafo dinámico de control del convoy de vehículos autónomos conectados (Marjovi, 2015)...53
Figura 35: Salida de Madrid por la A-6 a la altura del Hipódromo de La Zarzuela (Google Maps, 2023)…60
Figura 36: Tramo de la AP-6 en el acceso Sur a los Túneles de Guadarrama (Google Maps, 2023)……..61
Figura 37: Tramo de la AP-7 entorno a la Salida 35, Vilaseca-Salou (Google Maps, 2023)……61
Figura 38: Carril de incorporación tipo paralelo según Norma 3.1 I-C (MITMA, 2016)……62
Figura 39: Disminución del número de carriles por la derecha según Norma 3.1 I-C (MITMA, 2016)……..63
Figura 40: Modelo de vía en PTV Vissim……64
Figura 41: Detalle del trazado en PTV Vissim . Tronco principal……64
Figura 42: Detalle del trazado en PTV Vissim. Carril extra……65
Figura 43: Detalle del trazado en PTV Vissim . Ramal de incorporación……65
Figura 44: Detalle del trazado en PTV Vissim . Confluencia de carriles……65
Figura 45: Detalle del trazado en PTV Vissim . Tramo final……65
Figura 46: Detalle del parámetro "Lane Change Distance" en PTV Vissim……66
Figura 47: Detalle de la configuración "Following" y "Car following model" en PTV Vissim……67
Figura 48: Detalle de la configuración "Lane change" y "Lateral" para "Right-side rule (motorized)" en PTV Vissim……67
Figura 49: Detalle de la configuración "Lane change" y "Lateral" para "Freeway (free lane selection)" en PTV Vissim……68
Figura 50: Partial routes generadas para la gestión del carril extra en PTV Vissim……72
Figura 51: Secuencia de gestión de la calzada extra..……72
Figura 52: Secuencia de gestión del carril extra en VisVAP……73
Figura 53: Ejemplos de carriles anti-atascos (DGT, 2016)……74
Figura 54: Secuencia de gestión de los carriles del tronco de la autopista……75
Figura 55: Secuencia de gestión de los carriles del tronco de la autopista en VisVAP……75
Figura 56: Ejemplos de señalización variable (Fixalia, 2023)……76
Figura 57: Esquema de funcionamiento de un sistema de Ramp Metering (Ghanbartehrani, 2020)……76
Figura 58: Detalle de la configuración de un Ramp Metering en PTV Vissim……77
Figura 59: Ejemplo de señalización de velocidad variable (Servei Català de Trànsit, 2017)……78
Figura 60: Disposición de los detectores de lazo del sistema VSL……78
Figura 61: Secuencia de gestión de la velocidad máxima permitida en la sección de estudio. Sistema VSL……79
Figura 62: Secuencia del sistema de velocidad variable desarrollado en VisVAP……80
Figura 63: Script para restricción de vehículos pesados……81
Figura 64: Detalle las opciones de "Evaluation" dentro de un Link en PTV Vissim……82
Figura 64: Detalle las opciones de Evaluation dentro de un Link en PTV Vissim……83
Figura 65: Simulación con tráfico no saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim……84
Figura 66: Simulación con tráfico saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim……85
Figura 67: Simulación con tráfico no saturado y L=350 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim……85
Figura 68: Simulación con tráfico saturado y L=350 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim……87
Figura 69: Efecto de la adición de un carril extra gestionado en una simulación con tráfico saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim……88
Figura 70: Comparativa entre proporciones de descargo por parte del carril extra gestionado en una simulación con tráfico saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim……89

Figura 71: Efecto de la gestión de carriles del tronco en una simulación con tráfico no saturado y L=350 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim……90
Figura 72: Efecto del Remp Metering en una simulación con tráfico no saturado y L=350 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim……92
Figura 73: Efecto del Remp Metering en una simulación con tráfico no saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim……92
Figura 74: Efecto del Remp Metering en una simulación con tráfico saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim……93
Figura 75: Efecto del sistema Variable Speed Limit en una simulación con tráfico no saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim……94
Figura 76: Efecto del sistema Variable Speed Limit en una simulación con tráfico saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim……95
Figura 77: Comparativa de la efectividad del sistema Variable Speed Limit con diferentes parámetros de decisión en la ganancia de velocidad en una simulación con tráfico no saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim……96
Figura 78: Efecto del sistema de restricción a vehículos pesados en una simulación con tráfico no saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim……97
Figura 79: Efecto del sistema de restricción a vehículos pesados en una simulación con tráfico saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim……98
Figura 80: Efecto del sistema de restricción a vehículos pesados en una simulación con tráfico saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim……99
Figura 81: Reacciones del conductor en función de la presencia de otros vehículos (PTV, 2023)……105
Figura 82: Configuración de los parámetros de Car following según un modelo de Wiedemann 99……106
Figura 83: Interfaz para configuración de parámetros del modelo Wiedemann 99. De izquierda a derecha, configuración de CC0, CC1 y CC2……107
Figura 84: Niveles de conducción autónoma (SAE, 2019)……108
Figura 85: Parámetros de configuración de platoons en Vissim……109
Figura 86: Efecto del sistema de control de distancia en una simulación con tráfico no saturado y L=500 m……111
Figura 87: Efecto del sistema de control de distancia en una simulación con tráfico no saturado y L=350 m……112
Figura 88: Efecto del sistema de control de distancia en una simulación con tráfico saturado y L=500 m……113
Figura 89: Efecto del platooning en una simulación con tráfico no saturado y L=500 m……114
Figura 90: Efecto del platooning en una simulación con tráfico no saturado y L=350 m……114
Figura 91: Efecto del platooning en una simulación con tráfico saturado y L=500 m……115
Figura 92: Efectividad de los sistemas de control evaluados en una sección con L=500 m entre pérdidas de carril……120

LISTA DE TABLAS

Tabla 1: Comparativa cualitativa de los distintos métodos de cálculo de la capacidad de la vía (Asgharzadeh, 2018)……33
Tabla 2: Parámetros objetivos de un modelo IDM heterogéneo (Yang, 2013)…….51
Tabla 3: Comparativa entre distintos modelos de simulación del tráfico (Martín Gasulla, 2011)…..55
Tabla 4: Sección Transversal según Norma 3.1 I-C (MITMA, 2016)..62
Tabla 5: Tráfico registrado en 2020 en los tramos tomados como referencia (MITMA, 2020)……63
Tabla 6: Detalle de la composición del tráfico por tipología de vehículo y velocidad prefijada……68
Tabla 7: Detalle de la distribución horaria de vehículos para los dos puntos de trabajo elegidos……69
Tabla 8: Resultados de las estrategias de control planteadas con tráfico no saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim……..100
Tabla 9: Resultados de las estrategias de control planteadas con tráfico no saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim……..101
Tabla 10: Parámetros de configuración de un modelo Wiedeman 99 (PTV, 2023)……..104
Tabla 11: Resultados de las estrategias de control basadas en VII con tráfico no saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim……116
Tabla 12: Resultados de las estrategias de control basadas en VII con tráfico no saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim……117

LISTA DE ACRONIMOS

ATDM: Active Traffic and Demand Management
CA: Collision Avoidance
CC: Cruise Control
FD: Fundamental Diagram
GHR: Gazis-Herman-Rothery
GPS: Global Position System
HCM: Highway Capacity Manual
HGV: Heavy Goods Vehicle
IC: Instrucción de Carreteras
IDM: Intelligent Driver Model
IMD: Intensidad Media Diaria
ITS: Intelligent Transportation Systems
IoT: Internet of Things
KdV: Kortewerg-de-Vries
MITMA: Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana
mKdV: Modified Kortewerg-de-Vries
MFTC: Mainstream Traffic Flow Control
MPC: Model Predictive Control
OV: Optimal Velocity
QL: Qualitas Learning
RHP: Receding-Horizon Parametized
RM: Ramp Metering
RG: Route Guidance
V2V: Vehicle-to-Vehicle
V2X: Vehicle-to-X
VAO: Vehiculos Alta Ocupación
VII: Vehicle-Infraestructure Integration
VSL: Variable Speed Limit

1. INTRODUCCION

El presente Trabajo Final de Máster aborda la problemática de los cuellos de botella en vías de alta capacidad causados por vehículos lentos en fase de adelantamiento o debido a una reducción del número de carriles. Para ello, se plantea el modelado y análisis de esas situaciones y se propone un sistema de control que sea capaz de identificarlas, prevenirlas y mitigarlas.

1.1 Motivación.

España posee 17.021 km de vías de alta capacidad, autovías y autopistas, cubriendo la mayor parte de recorridos principales interurbanos a lo largo de la geografía, así como numerosas rondas de circunvalación periurbana. No se escapa a cualquier usuario, conductor o no, que el tráfico por ellas es elevado: son vías de circulación ampliamente utilizadas para desplazamientos laborales, lúdicos y, también, para el transporte de mercancías.

En lo que refiere a ese último punto, entorno al 95% del transporte por mercancías en territorio nacional se realiza por carretera, tal y como se puede observar en las estadísticas publicadas en *Libro Blanco del transporte* (2011), por lo que el uso de los vehículos pesados de la infraestructura viaria presenta una serie de aspectos a considerar tanto en fase de planeamiento, proyecto, ejecución y explotación de ésta.

Considerando el amplio uso de los vehículos pesados, a menudo más lentos y menos dinámicos que los turismos y ciclos con los que habitualmente comparten las vías, su presencia puede modificar el discurrir del flujo del tráfico. En carreteras convencionales de un carril por sentido se pueden producir largas colas de vehículos de todo tipo esperando a adelantar a los pesados, con los riesgos que conlleva esa operación al invadir el carril destinado al sentido opuesto de circulación. Por el contrario, en vías de alta capacidad, con dos o más carriles reservados a cada sentido y con una separación física entre ellos, los problemas se concentran en el discurrir de éstos en intensidades altas y en los movimientos de adelantamiento entre ellos, pudiendo producir que se resienta el nivel de servicio de la vía.

Analizando los datos ofrecidos por el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA) referente al tráfico registrado en el año 2020, se observa una correlación entre los tramos de la red principal que más tráfico soportan con aquellos que presentan un porcentaje mayor de vehículos pesados en tránsito, coincidiendo en síntesis además con los principales itinerarios de la red: autovías/autopistas radiales con origen en Madrid (A-1 a A-6) y autopistas transversales y periféricas (AP-7 Autopista del Mediterráneo, AP-8 Autopista del Cantábrico, AP-9 Autopista del Atlántico, AP-68 Autopista Vasco-Aragonesa y A-31 Autovía de Alicante).

Todas estas vías presentan unas características comunes: son vías de alta capacidad, cubren itinerarios de largo alcance entre grandes capitales y nudos logísticos (lo que implica que numerosos camiones se acumulen en su recorrido) y tienen al menos dos carriles por sentido. En estos tramos, y principalmente por la acumulación de vehículos en tránsito, es común la creación de cuellos de botella en las siguientes casuísticas:

- Tramos de 2 carriles por sentido en los que los vehículos se adelantan entre ellos.

- Tramos de 2 carriles en los que, por afección en la vía, los vehículos deben abandonar el carril derecho, invadiendo el carril izquierdo reservado para adelantar.

- Salidas o incorporaciones, en los que el flujo de vehículos que circulan por el carril derecho deben adaptarse al discurrir de aquellos que quieren salir o entrar de la vía, reduciendo su velocidad o facilitando su incorporación respectivamente, lo que puede precisar de un movimiento transversal al carril izquierdo.

- Tramos de más de 2 carriles en los que se reduce uno, pasando de derecha a izquierda en movimientos transversales que van adaptándose a las condiciones del tráfico en la medida de lo posible, si bien afectan el flujo de vehículos que circulan por su izquierda.

Todas estas casuísticas se ven amplificadas cuando hay una gran diferencia de velocidad entre los vehículos que discurren por la vía, lo que incluye, de hecho y en la gran mayoría de las ocasiones, a los vehículos pesados.

En la *Figura 1* se muestra un mapa del tráfico en España, con datos del año 2020, facilitado por el Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda Urbana (MITMA), en el que se pueden ver las Intensidades Medias Diarias (IMD) d ellos principales itinerarios del país. En colores rojizos, se pueden ver los tramos con una IMD superior a los 50.000 veh/día:



Figura 1: Intensidad Media Diaria del tráfico en 2020 (MITMA, 2023).

Adicionalmente, para analizar más en detalle la influencia de esos vehículos pesados, el MITMA ofrece los mismos datos para vehículos pesados. Se aprecia en la *Figura 2* que los grandes corredores radiales y transversales son los que acumulan la mayor parte del tráfico pesado, coincidiendo los tramos de mayor intensidad (colores azul y morado) sobre los mismos que soportaban un mayor tránsito combinado de vehículos (ligeros y pesados).



Figura 2: Intensidad Media Diaria del tráfico de vehículos pesados en 2020 (MITMA, 2023).

Paralelamente, el mundo se encuentra en estos momentos inmerso en la denominada Cuarta Revolución Industrial, la Industria 4.0, que se basa en la desaparición de las clásicas fronteras ente las esferas física, digital y biológica mediante su fusión y agregación. Si se traslada este concepto a la Ingeniería del Transporte, nos encontramos paradigma en el que convergen las teorías y modelos clásicos de la ingeniería del tráfico con la automatización, el internet de las cosas (IoT) y los servicios en la nube. Conceptos como vehículo autónomo, enjambres de vehículos (V2V, Vehicle-to-Vehicle), agregación de sensores, realidad aumentada, infoentretenimiento, integración del vehículo en el entorno (C-V2X, Cellular Vehicle-to-Everything) o las carreteras conectadas se abren paso bajo el cobijo de las posibilidades que ofrecen los últimos avances tecnológicos. Esa interconexión molecular, el intercambio de datos y servicios y la mejora de la experiencia de conducción (nivel de servicio y seguridad) es un paradigma que tiende al infinito y abre un enorme mundo de posibilidades conforme más elementos se unen a la red (*Figura 3*):



Figura 3: Interconectividad V2V y V2X, ejemplo ilustrativo (MACSF, 2020)

Como posibles aplicaciones de estas nuevas tecnologías, en concreto aquellas que interconectan vehículos entre sí (V2V) y con la infraestructura (V2X), podríamos encontrar el mejorar la seguridad vial, aliviar la congestión del tráfico, aumentar la eficiencia energía de los vehículos y, en general, mejorar el grado de satisfacción del conjunto de los usuarios de la vía.

Particularizando para el caso de una vía de alta capacidad, autovía o autopista, esa integración V2V y V2X permitiría el agregar vehículos en enjambres colaborativos que, en asociación con los datos integrados provenientes de la infraestructura (estaciones de aforo, sensores de velocidad, cámaras, etc.), pudiesen circular de forma asistida, semi-autónoma o , incluso y si la legislación en ese momento y lugar lo permitiese, autónoma, tal y como se representa en la *Figura 4*.

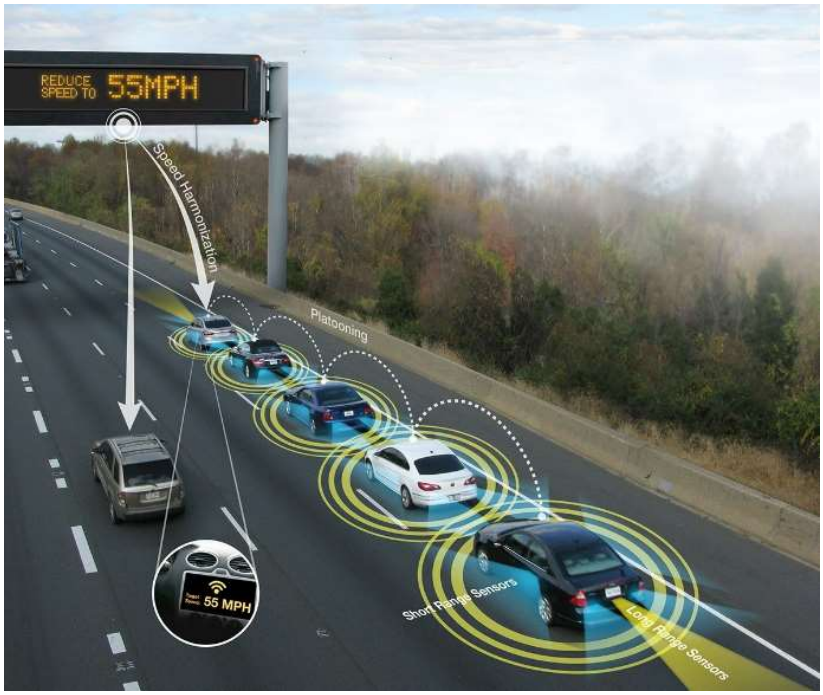


Figura 4: Interconectividad V2V y V2X, ejemplo ilustrativo en autopista (USDOT, 2019)

Llegados a este punto, estas nuevas tecnologías V2V y V2X se vislumbran como una posible solución a la problemática inicialmente planteada de los cuellos de botella creados por vehículos lentos, pues la formación de enjambres mediante la tecnología V2V en colaboración con el intercambio de información con la vía en lo referente a su configuración y estado permitiría anticipar posibles situaciones de alteración del flujo del tráfico adaptando la morfología y la dinámica de estos enjambres.

Para poder prevenir esos cuellos de botella, los enjambres interconectados deben ser capaces de, con la información obtenida de sus miembros, de otros enjambres y de la infraestructura, identificar las posibles situaciones en las que la vía se encuentra cera de su saturación. Una vez lo hagan, deberán actuar sobre unos determinados parámetros del flujo de tráfico para evitar llegar a ese punto y, así, evitar también las colas causadas por los cuellos de botella (Echeto et al., 2022).

Esa identificación debe ser modelada y parametrizada para posteriormente establecer una estrategia de actuación fundamentada, por lo que abre un campo de trabajo que se pretende abordar en el presente documento.

1.2 Objetivos del presente trabajo.

Tanto la formación de colas como los enjambres de vehículos conectados, conceptos básicos de la casuística explicada, son campos previamente estudiados, pero con posibilidad de ser ampliados e interrelacionados dentro del objetivo primero del presente trabajo, el abordar la problemática de los cuellos de botella en vías de alta capacidad causados por vehículos lentos en fase de adelantamiento o debido a una reducción del número de carriles.

Por ello, los objetivos específicos que se marcan son los siguientes:

- Análisis conceptual del comportamiento del tráfico y los escenarios bajo los que se producen la formación de colas de vehículos.

- Análisis de la posibilidades del control en la prevención de colas y cuellos de botella.

- Evaluación de las posibilidades que las nuevas tecnologías basadas en los sistemas interconectados y el IoT ofrecen sobre el control del flujo del tráfico.

- Planteamiento de un modelo con flujo de tráfico libre y distintas configuraciones de intensidad, velocidad y forma sobre el que identificar las principales variables a considerar en el formación de colas causadas por vehículos lentos y las posibles variables a manipular para la prevención y apaciguamiento de éstas.

- Análisis de las condiciones de esas variables bajo las cuales se forman las colas en función de las distintas casuísticas posibles.

- Planteamiento de la acción de control sobre las variables manipuladas que mejor se adapten al objetivo de control, tanto mediante el uso de sistemas de control tradicionales como aquellos basados en sistemas interconectados.

Todo ésto se va a implementar usando un software de simulación microscópica del tráfico, el programa Vissim de la empresa alemán PTV, tal y como se desarrolla en los capítulos 3, 4 y 5 del presente trabajo.

1.3 Estructura del trabajo.

El presente trabajo se divide en 6 capítulos de los cuales el primero es éste que se expone.

A lo largo del capítulo 2 se realiza un estudio del estado del arte acerca de los comportamientos dinámicos de los vehículos ante las diferentes fases del tráfico, las distintas opciones respecto al modelado del tráfico, las aproximaciones al control del tráfico que otros autores han seguido y las opciones que los sistemas interconectados y el IoT han aportado a la automatización del transporte, con especial énfasis en los aspectos de control del flujo).

En el capítulo 3 se plantea la creación de un modelo microscópico de tráfico correspondiente a un tramo de autopista con una incorporación y una pérdida de carril en el tronco simulando dos distribuciones de tráfico que buscan ser presentativas para el estudio de la capacidad máxima de ese tramo. Éste se realiza usando el software PTV Vissim.

Los capítulos 4 y 5 se centran en el desarrollo de sistemas de control del tráfico, el primero de ellos dedicado a sistemas de control tradicionales (calzada extra gestionada, gestión de carriles, *Ramp Metering*, *Variable Speed Limit* y restricciones a vehículos pesados) y el siguiente a sistemas interconectados (control dinámico de la distancia entre vehículos y *swarms* de vehículos interconectados). A continuación, se presentan los resultados obtenidos en base a su aplicación en el modelo desarrollado, se analizan los resultados obtenidos y se estudian comparativamente entre ellos.

Para acabar, en el capítulo 6 se exponen las conclusiones obtenidas, se plantea el uso de todos ellos a través de una estrategia de control superior agregada y se formulan las distintas opciones de cara a continuar este trabajo.

1.4 Publicaciones derivadas.

JJAA 2023, XLIV Jornadas de Automática

Autores: Miguel Ortiz, Matilde Santos and Romana Manuel

Título: Primera aproximación al modelado y control de tráfico

Fechas, Lugar: Universidad de Zaragoza, Zaragoza, España, 6-8/09/2023.

Publicación: Libro de Actas XLIV Jornadas de Automática. Universidade da Coruña. Servizo de Publicacións, 2023.

2. ESTADO DEL ARTE

Como se ha explicado, la motivación del presente trabajo es estudiar la formación de colas causadas por interferencias en el tráfico en vías de alta capacidad, generalmente causadas por vehículos pesados y lentos, para después poder aplicar acciones de control, mitigación y prevención para evitarlas o minimizarlas.

Antes de comenzar con el modelado y la extracción de datos para el planteamiento del controlador, es importante realizar un estudio pausado de cómo se han ido abordando los distintos aspectos que intervienen en el flujo de tráfico en una vía de alta capacidad para saber cómo se comporta en condiciones normales (flujo libre y car-following), cómo lo hace cuando aparece una interferencia (en nuestro caso una cola causada por un cuello de botella) y qué aproximaciones se han realizado a la gestión del fujo aprovechando las distintas técnicas de control y las nuevas tecnologías de interconexión y colaboración (V2V y V2X).

2.1 Comportamiento del tráfico y modelos propuestos para su representación.

2.1.1 Comportamiento del tráfico en flujo libre y car-following.

La conducción de un vehículo es una tarea compleja que requiere de gran pericia por parte del usuario. No sólo debe conocer el vehículo que conduce (sus características, comportamiento y limitaciones), sino que tiene que adaptar su uso a la vía en la que circula (no es lo mismo el centro de una población que una autopista de trazado recto y plano con 4 carriles por sentido, igual que no es lo mismo la conducción diurna y la nocturna, en seco o con nieve) y al tráfico existente (número de vehículos con los que comparte la vía y tipología de éstos).

En cualquier caso, sí que se pueden delimitar unos principios básicos que rigen el transcurrir del flujo del tránsito y el comportamiento de los conductores en las distintas vías en lo referente a cómo adaptar su circulación a las condiciones del flujo y de la vía. El mecanismo es sencillo e intuitivo para cualquier conductor que pueda leer este texto: al circular con su vehículo, el conductor actúa sobre dos variables para posicionarse en el espacio y tiempo, la dirección (un vector en el plano horizontal, 2D) y la velocidad de avance. Partiendo de esta premisa básica, todos los conductores decidirán su dirección y velocidad siempre que la vía (con sus limitaciones físicas y normativas) y el tráfico se lo permita. En esas condiciones se puede hablar de tráfico en flujo libre.

Sin embargo, hay situaciones en las que el conductor no puede elegir cómo discurrir por la vía sino que debe adaptarse a las condiciones existentes. En el caso de que la restricción venga por el tráfico, es decir, que el conductor quisiese circular a mayor velocidad pero la presencia de otro u otros usuarios de la vía se lo impidiese, éste debería adaptar su conducción a la del vehículo anterior, pudiendo entonces decir que el tráfico ha entrado en un modelo de car-following, es decir, las decisiones del conductor dependen en síntesis de las del conductor que le precede (y probablemente, las de éste, también de las del precedido). Esa situación es la antesala a la formación de una cola, el germen de un atasco o cuello de botella y, cuando el agente causante es un elemento en movimiento, se llega a la problemática que mueve el presente trabajo, un cuello de botella móvil causado por un vehículo lento.

Centrándonos en los modelos de car-following, un modelo muy recurrente a la hora de explicar ese comportamiento básico de los conductores ante la desaparición del flujo libre es el planteado por Rainer Wiedemann en 1974 /y modificado en 1999). Wiedeman explicó los distintos escenarios del tráfico en función de la distancia de un vehículo con el precedente, asociando a cada escenario un comportamiento o reacción por parte del conductor como compromiso entre seguridad y circulación, tsl y como se puede ver en la *Figura 5*:

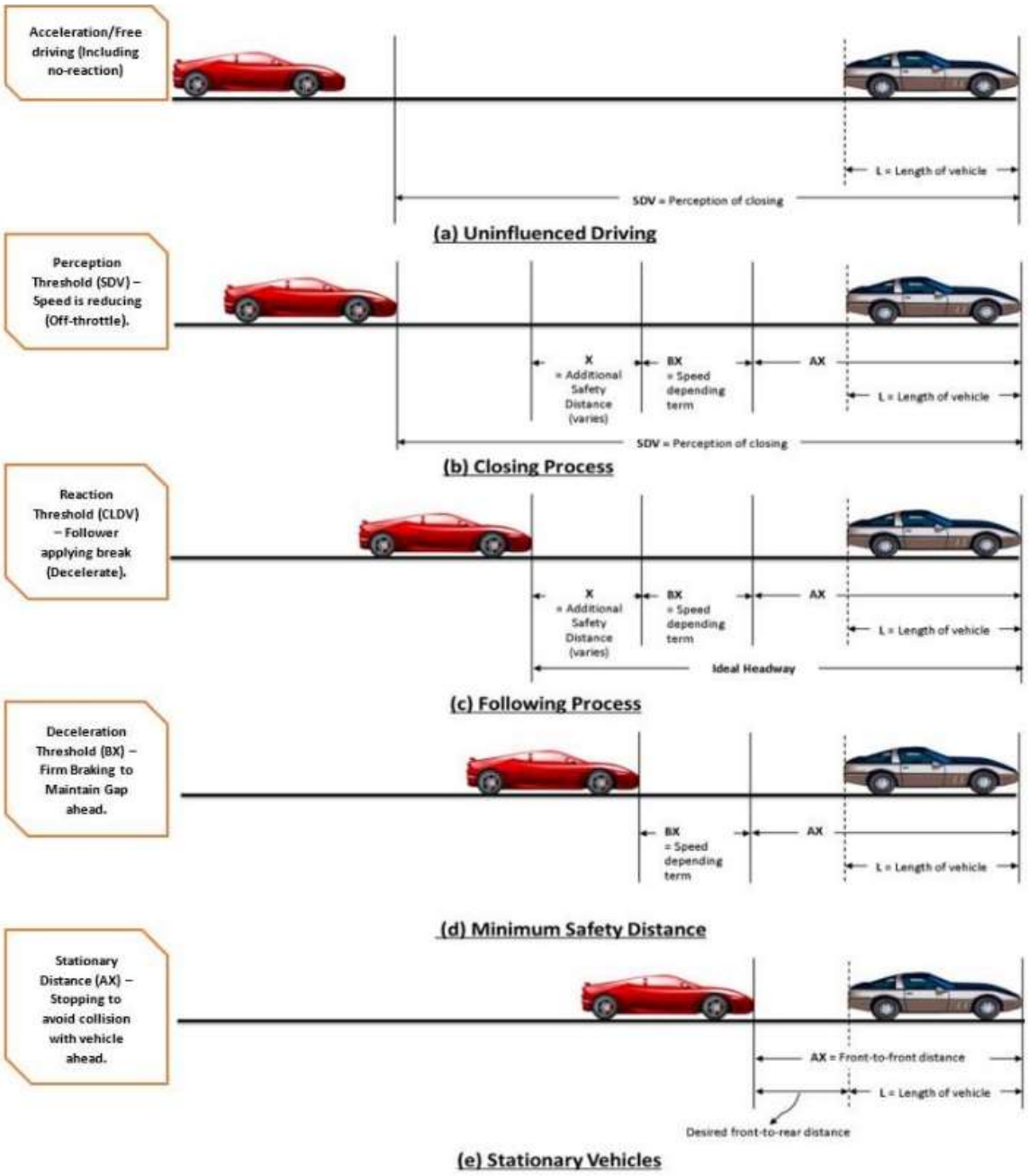


Figura 5: Reacciones del conductor en función de la presencia de otros vehículos (Durrani, 2016).

Si esto mismo se representase en un gráfico con ambas variables, distancia y diferencia de velocidad entre vehículos, se podría llegar a un gráfico (*Figura 6*) sobre el que situar las 5 reacciones predecibles del conductor ante la presencia de otros vehículos e, incluso, aventurar una secuencia a través de ellas según se acerca al vehículo precedente y le sigue, lo que podría deberse bien al discurrir de un conjunto de vehículos en un enjambre, bien a la formación de una cola si eso implicase una disminución de la velocidad del conjunto.

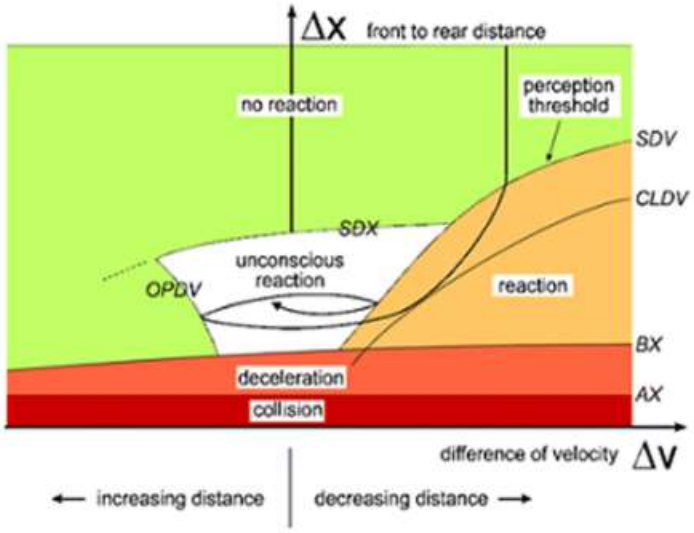


Figura 6: Gráfica de las reacciones del conductor en función de la presencia de otros vehículos (PTV, 2023)

Es ese segundo caso que se menciona el que aplicaría en este trabajo, pues existe una relación entre los límites de esas regiones con la velocidad a la que se circula (predecible y medible) y el conductor que se estudia (impredecible, en función de su agresividad) (Higgs et al., 2011).

En base a esas variabilidades, es necesario una calibración del modelo que se use y, sobre todo, se debe determinar y cuantificar el efecto de lo que se ha denominado "agresividad" del conductor. Partiendo de la base de que el flujo de tráfico es mixto, vehículos ligeros y pesados, se pueden estudiar los datos macro obtenidos empíricamente para poder determinar qué distancias se guardan o qué diferencias de velocidades se producen entre consecutivos. De esa manera, se pude determinar que los vehículos pesados tienden a incrementar /disminuir sus velocidades de manera menos pronunciadas y que las distancias que guardan con otros usuarios es menor (o dicho de otra manera, son menos agresivos que lo que es un vehículo ligero tipo) o que los vehículos ligeros guardan mayor distancia con el vehículo precedente si este es un pesado, lo que obliga a estudiar por separado las distintas dinámicas en función del tipo de vehículo, la intensidad del tráfico y el tipo de vía considerada. Todas estas matizaciones pueden incorporarse al modelo de microsimulación que se utilice (Durrani et al., 2016).

Continuando con esas dinámicas, otros autores han observado que los conductores tranquilos o los experimentados tienen reacciones mucho más pausadas y reflexivas que promueven un flujo estable del tráfico, permitiendo un modelo de car-following en el que se formen de enjambres de vehículos estables (Yu et al., 2020). Esto apoyaría la teoría de los vehículos autónomos, en los que los enjambres que siguen a un *leader* en platooning disminuyen su reactividad ante los diferentes estímulos como la

velocidad del conjunto de los vehículos y las distancias a éstos en favor de un comportamiento estable y continuo, permitiendo condiciones de tráfico más fluidas y capaces.

Otra posible aproximación es asemejando el flujo de tráfico a una corriente de agua, en el que la formación de los atascos se puede regir por relaciones similares a las del agua y su presión hidrostática recogidas en las ecuaciones Kortewerg-de-Vries: aplicado al modelo de tráfico estas ecuaciones de equilibrio se pueden representar en función de dos variables, velocidad y sensibilidad (representada como la inversa de la distancia al vehículo precedente), cerca del punto crítico a partir del cual el tráfico se ve claramente afectado (Nagatani et al., 1998). Posteriores estudios han ampliado esos modelos KdV modificados para incluir el efecto de las variaciones en la intensidad del flujo de tráfico, con interrupciones en su nivel de servicio y cambios bruscos de velocidad propios de los atascos (Jiang at al. 2018). La ecuación KdV es, en síntesis, una ecuación en derivadas parciales que incluye los efectos de no linealidad y dispersión a la vez, teniendo la siguiente forma:

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \frac{\partial v}{\partial x} + \mu \cdot \frac{\partial^3 v}{\partial x^3} = 0 \qquad (1)$$

En cualquier caso, todos los anteriores estudios versaban sobre modelos de seguimiento que podemos denominar puros, es decir, acotados a un solo carril y en los que los vehículos se pueden aproximar, seguir, pero no adelantar. En el caso del presente trabajo, los vehículos discurren por una vía de más de un carril por sentido, por lo que sería interesante cómo evaluar cómo se comporta el flujo del tráfico en ese tipo de vías, en especial cómo los vehículos se cambian de carril y cómo se adelantan entre ellos.

Al igual que ocurría con las condiciones del tráfico en un solo carril, los cambios de carril y adelantamientos podrían estudiarse bajo modelos KdV modificados teniendo en cuenta la permeabilidad lateral y longitudinal del tráfico (Wang et al., 2013), así como las características del trazado lineal (Wang et al., 2019), pudiendo representar este comportamiento con un modelo nodal de 2 dimensiones como el mostrado en la *Figura 7*:

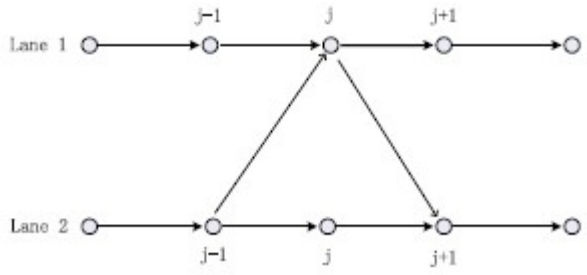


Figura 7: Esquema de un modelo de tráfico en autopistas de dos carriles (Wang, 2019).

2.1.2 Modelos microscópicos y macroscópicos

La mención a estos dos enfoques, car-following y KdV, sirve para introducir las dos aproximaciones posibles al modelado de los flujos de tráfico:

- Por un lado, están los modelos discretos como el *car-following* o el *cellular automata*, que consideran al flujo de tráfico como un sistema de n partículas (vehículos) independientes que interactúan entre sí desde un punto de equilibrio o próximo a éste. Estos modelos se denominan modelos microscópicos.

- Por otro lado, se encuentran los modelos macroscópicos, que son aquellos que consideran al tráfico como un todo uno, un medio continuo compuesto de n vehículos. Entre estos modelos se encuentran los basados en modelos hidrodinámicos (KdV y sus derivados), los basados en la dinámica de gases (Helbing et al., 1998) y otros modelos numéricos (Moussa et al., 2003).

Esos modelos macroscópicos son a priori mejores para explicar las transiciones entre las condiciones de tráfico fluido y los embotellamientos. La razón radica en que su fisonomía permite representar mejor la formación y propagación de las colas asemejándola al comportamiento de las ondas senoidales.

Además, el plantear macroscópicamente el problema de inicio permitiría poder ampliar el campo de trabajo con elementos complementarios, como pudiese ser el análisis no lineal para estudiar su estabilidad (Nagatani et al., 1998) o para si inclusión en sistemas inteligentes de gestión de transporte (Intelligent Transporrtation Systems, ITS) (Yu, 2004), las distintas características del flujo como cantidad o diferencia según carriles (Peng, 2012) o, incluso, aspectos de modelos microscópicos como el ya mencionado comportamiento del conductor (Peng, 2013).

Sin embargo, un enfoque microscópico del problema permitiría una mejor comprensión del comportamiento y la dinámica de cada uno de los elementos del flujo del tráfico y permitiría un mejor control y seguimiento de las acciones a tomar para la optimización de éste.

2.2 Formación de colas en flujos de tráfico debido a interferencias en éste.

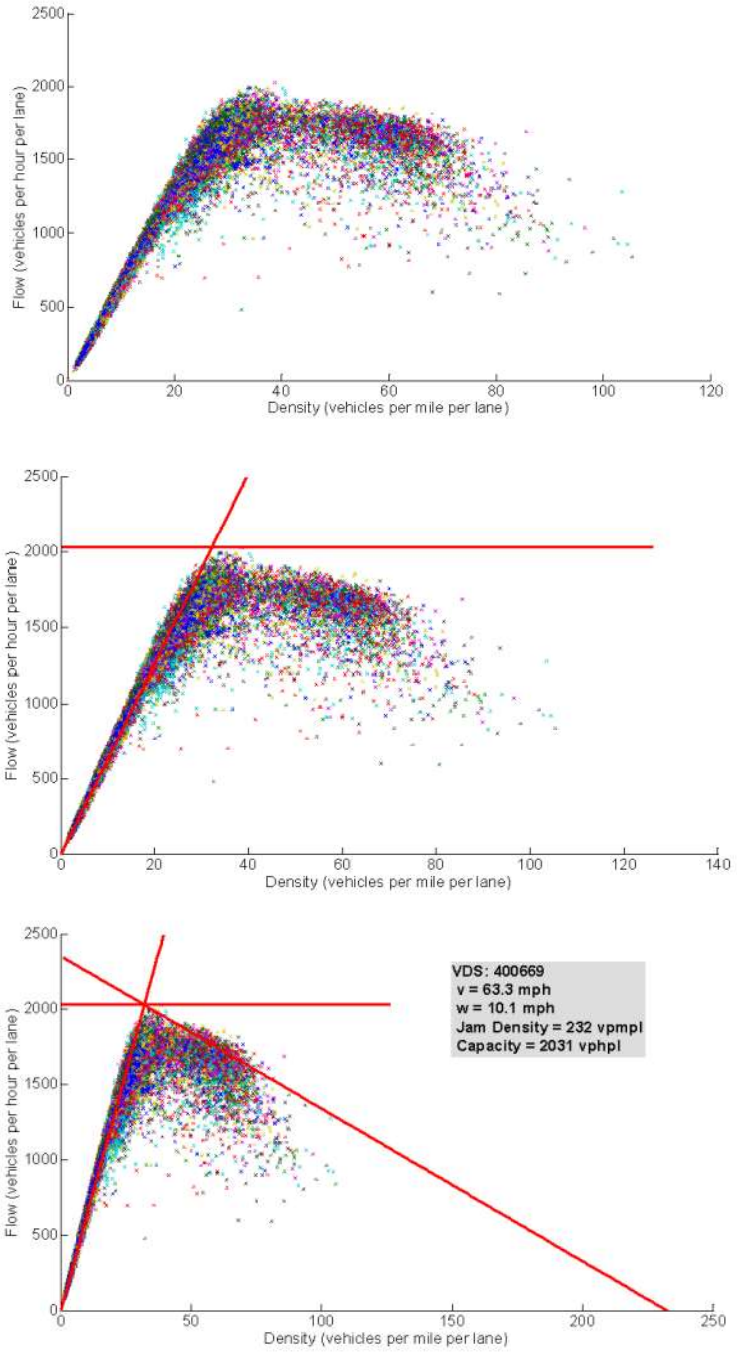
2.2.1 Los conceptos de capacidad, breakdown y formación de colas.

La formación de retenciones, colas al final, en vías de alta capacidad es uno de los grandes retos de la ingeniería del transporte. La capacidad y el nivel de servicio de estas vías guarda una estrecha relación con la velocidad y la densidad del flujo en cada sección de vía controlada, por lo que estas variables son a priori básicas para entender el comportamiento del tráfico. Para el estudio de estas propiedades, como se ha dicho antes, se suelen utilizar modelos macroscópicos.

La gran mayoría de esos modelos macroscópicos utilizan lo que se denomina un *Fundamental Diagram* (FD), que es un modelo o gráfica empírico obtenido por observación del tráfico de una sección de autopista, registrando una relación entre el flujo (intensidad, normalmente en vehículos por hora) y densidad (vehículos por distancia, normalmente millas o kilómetros).

Partiendo de dichas observaciones (basta con una estación de aforo), se pueden obtener diagramas mediante linealización de los resultados obtenidos, pudiendo diferenciar en esos casos si la vía se

encuentra con un flujo libre de vehículos o si se supera el umbral de *breakdown* a partir del cual se pasa a una situación de congestión, tras la cual se produce un flujo de salida de menor entidad que el de entrada, lo que se conoce como *capacity-drop* (Dervisoglu et al., 2009). Este proceso de identificación se aprecia en las *Figuras 8, 9 y 10*:



Figuras 8, 9 y 10: FD tras toma de dato (arriba)s y linealización en condiciones de flujo libre (centro) y congestión (abajo) (Dervisoglu, 2019).

Los mismos autores muestran un procedimiento de trabajo a tener en cuenta en la realización de estudios de este tipo:

- Representación o modelado de la vía a caracterizar, incluyendo características básicas del trazado, número de carriles, entradas y salidas y sistemas de medición de aforo, señalización variable o gestión del flujo presentes.

- Selección de los datos recopilados de firma que estos sean suficientes, representativos y que no presenten duplicidades entre ellos.

- División del trazado considerado en secciones homogéneas.

- Definición y calibración del modelo de tráfico para cada uno de las secciones definidas en base a los datos recogidos por las estaciones aforadoras. Puede optarse por un modelo de tipo *cell-transmission* o uno superior basado en un programa tipo METANET o PTV Vissim.

- Estudio de la variación de la capacidad de la vía y su relación con los fenómenos de *breakdown* y *capacity drop*.

Igualmente importante al momento de la formación es el conocer la capacidad de la vía, ya no sólo para el planeamiento de la infraestructura conforme a un determinado nivel de servicio, sino para su análisis y explotación adecuada durante su ciclo de vida. Por lo general, estos métodos se pueden dividir en dos grandes grupos, *Single Estimate Cacapicty Methods* y *Breakdown Probability Methods* (Asgharzadeh et al., 2018).

Los *Single Estimate Cacapicty Methods* se caracterizan por no considerar interpretaciones estocáticas del flujo del tráfico sino en desarrollar expresiones matemáticas directamente sobre datos registrados.

Entre de ellos, el más extendido y representativo es el método de Van Aerde, que utiliza los parámetros de marcha de los vehículos como son velocidad en flujo libre en el punto de estudio y la velocidad media y volumen de tráfico registrado en el periodo de estudio (*Figura 11*), junto con las consiguientes constantes definidas por la morfología de la vía. Dichos parámetros son recogidos en la siguiente expresión:

$$q_i = \frac{u_i}{c_1 + \frac{c_2}{\mathrm{FFS} - u_i} + c_3 u_i} \qquad (2)$$

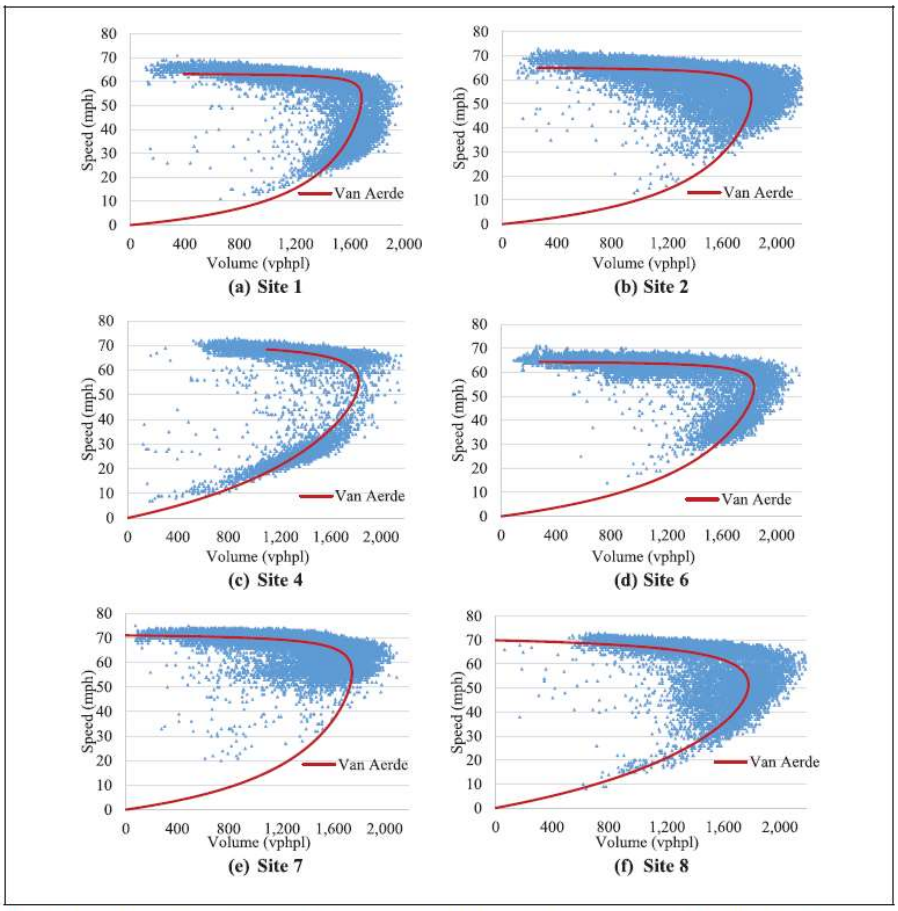


Figure 1. Speed-flow observations and Van Aerde application at (*a*) I-35 SB South of 67th Street, (*b*) I-35 SB South of 75th Street, (*c*) I-70 EB East of Blue Ridge, (*d*) I-70 WB East of Noland Road, (*e*) I-435 EB East of 104th Street, and (*f*) I-435 EB East of Holmes Road.

Figura 11:Ejemplo de estimación de capacidad con el Método de Van Aerde (Asgharzadeh, 2018).

Dentro de los *Breakdown Probability Methods*, por el contrario, se encuadran aquellos que tratan de identificar una situación de *breakdown* y, en base a su probabilidad de aparición, definen la capacidad teórica de la vía en ese punto.

En este segundo grupo se encuentra el método que enuncia el *Highway Capacity Manual* (HCM), que explica bastante bien este tipo de modelos. El HCM define la capacidad como "*el máximo flujo asociado con la aparición de cualquier fenómeno de breakdown, que suponen velocidades más bajas y densidades mayores en el cuello de botella*" y habla de la aleatoriedad de esa capacidad dentro de la congestión y de la dificultad de calcularla en cuellos de botella, incluyendo un método probabilístico para calcularla. Este método se basa en una coeficiente basado en la probabilidad de ocurrencia de un *breakdown*, completamente empírico (Lorenz et al., 2001), si bien precisa de una gran cantidad de datos previamente colectados para analizar las tres características que concurren y definen este fenómeno y así identificarlo:

1) En el 75% de las ocasiones, la velocidad media de los vehículos desciende por debajo del 75% de la velocidad media en flujo libre durante al menos 15 minutos.

2) Aguas abajo del cuello de botella, esta velocidad se recupera hasta llegar al 90% de la velocidad media en flujo libre.

En cualquier caso, parece claro que para distinguir entre un *breakdown* y una simple cola causada por un *closing-process* se necesitan datos aguas abajo del punto crítico identificado para determinar si el inicio de la congestión se ha producido antes o pasado éste, siendo este segundo caso uno de estudio más profundo.

La *Tabla 1* muestra una comparativa de los pros y contras de los métodos anteriormente enunciados:

Method	Advantages	Disadvantages
Van Aerde	• Easy application and fitting • Breakdown identification is not required • Capacity is not influenced by single observations • Does not require intensive computations	• Not quite effective on segments that do not capture the entire spectrum of congested/uncongested conditions • Does not consider breakdown observation for estimating capacity
PLM	• Estimates capacity based on a probability distribution function • Based on breakdown observations • Capacity influenced not by a single breakdown observation but by the entire breakdown data set	• Requires intensive data computation • Requires breakdown identification • Not applicable on sites with low number of breakdown observations
SFI	• Yields the optimum flow rate that corresponds to the volume with highest survival probability • Based on breakdown observations • The optimum flow is influenced not by a single breakdown observation but by the entire breakdown data set	• Requires intensive data computation • Requires breakdown identification • Estimated capacities are usually lower compared with other methods but higher than the HCM6 method
HCM6	• Estimates capacity with a single-point estimate based on the breakdown probability distribution • Based on breakdown observations • Considers the ratio (probability) of breakdown within various volume intervals	• Requires intensive data computation • Requires breakdown identification • Capacity is very sensitive to individual breakdown observation rather than to the whole breakdown data set • Not applicable on sites with a low number of breakdown observations • The estimated value is usually lower compared with other methods

Tabla 1: Comparativa cualitativa de los distintos métodos de cálculo de la capacidad de la vía (Asgharzadeh, 2018).

Centrados en el fenómeno de *breakdown*, queda patente la gran diferencia de intensidad del flujo de tráfico entre régimen congestionado y caudal de descarga aguas abajo del cuello de botella. Sin embargo, el entender cómo es el tráfico aguas arriba y cómo se llega a formar la congestión se antoja fundamental para conocer cómo será el flujo de descarga aguas debajo del cuello de botella, no tanto desde el punto de vista de su velocidad (el HCM ya especifica cómo se comportará) como de su intensidad.

De esta forma, se puede llegar a identificar al tráfico ya congestionado como una nueva fase del tráfico denominada *flujo sincronizado* que camina hacia la localización del cuello de botella de manera homogénea, mientras que aguas arriba de esa retención homogénea aparecen *atascos móviles e intermitentes* que van afectando al flujo entrante hasta llegar a esa fase de flujo sincronizado y lento a la

espera de pasar el cuello de botella, como se puede observar gráficamente en la *Figura 12* (Kerner, 2000). Haciendo un símil con el mundo hidráulico, esos atascos móviles serían una suerte de curva de remanso (efecto acordeón mediante) que pasaría de un flujo rápido a uno lento para, tras pasar el cuello de botella (compuerta), iniciar de nuevo una descarga en régimen rápido.

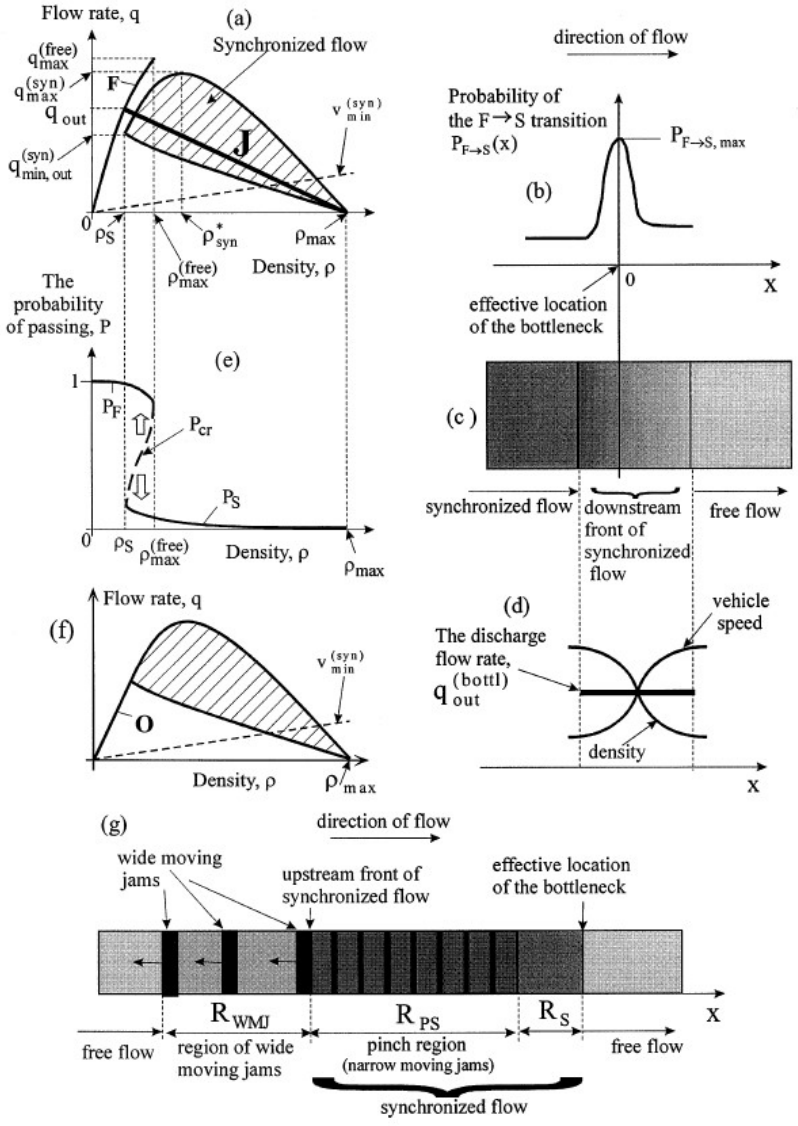


Figura 12:Explicación y fases del fenómeno de breakdown (Kerner, 2000).

Finalmente, un enfoque alternativo de este fenómeno pasaría por estudiar el flujo del tráfico en situaciones anteriores al *breakdown* para poder tomar una decisión de control sobre éste que evite que se produzca: determinando en cada momento al probabilidad de llegar al *breakdown*, se puede llegar a resultados como que si el tráfico de entrada en la congestión es un 20% superior al flujo de salida de ésta, la posibilidad de *breakdown* es de un 10%, pero si ambos flujos son iguales (*capacity-drop* nulo), la probabilidad es nula (Persaud et al., 1998).

2.2.2 Representación de microscópica y macroscópica de la capacidad de una autopista.

Hasta este punto del epígrafe se ha tratado en cómo es y cómo representar una situación en la que se forma un cuello de botella móvil, partiendo de datos empíricos para llegar a conceptos teóricos. Sin embargo, igual de importante que identificar y modelar los dos fenómenos que explican una congestión, el *breakdown* y el *capacity-drop*, es saber cómo se comportan y cómo actuar ante el problema así como conocer los distintos enfoques tanto mico como macroscópicos que existen para explicarlos.

Un primer enfoque microscópico a este problema se puede encontrar en los trabajos del Profesor Laval, cuya línea de investigación se ha centrado en el cálculo y comportamiento de la capacidad de las autopistas. Su trabajo ha permitido, a partir de modelado bajo rendimiento de los procesos estocásticos que regulan el flujo del tráfico obtener de forma simplificada pero realista expresiones para la capacidad del segmento de vía (Laval, 2006). Entre las situaciones formuladas, se incluyen las de flujo libre, la formación de colas individuales, pero de forma aislada, repetitiva o coincidente y, en un caso ulterior, la de vía congestionada.

Con esa línea de investigación, Laval estudió el efecto de los cambios de carril en la formación de cuellos de botella debidos a *clossing processes*, los cuales incluso se incrementan en número una vez formada la retención Para ese análisis, asemejó la onda de propagación de la retención a la forma triangular de un *Foundamental Diagram* básico como el de la *Figura 13*, incluyendo dicho comportamiento en un modelo microscópico híbrido junto con los cambios de carril tratados individualmente (Laval, 2005). Dicho modelo también tendría utilidad para explicar y entender los cuellos de botella causados en las incorporaciones a la vía.

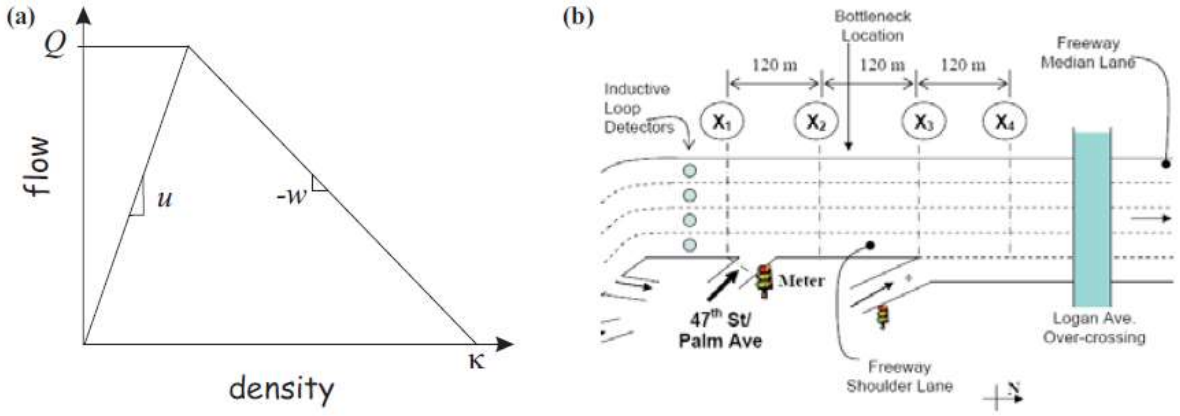


Figura 13: Foundamental Diagram triangular y caso de aplicación en incorporaciones a la autopista (Laval, 2005).

En trabajos posteriores, Laval se centró en estudiar más detenidamente el efecto *capacity-drop* causado por un subconjunto de vehículos obligados a reducir la velocidad debido al trazado en autopistas de varios carriles, suponiendo que no se producen cambios de carril. Para formularlo, comparó la velocidad deseada (discreta o continua) con la del vehículo precedente e introdujo los datos en un modelo estocástico para simular la perturbación a los vehículos ligeros según la teoría de ondas cinemáticas de

Newell, lo que permite modelar los cuellos de botella móviles dentro de un *Fundamental Diagram* como el de la *Figura 14* (Laval, 2007). En un trabajo posterior, se centró en estudiar por observación las oscilaciones de la velocidad promedio una vez dentro del cuello de botella, determinando que su amplitud y periodo depende de la geometría de la vía (Laval et al., 2014).

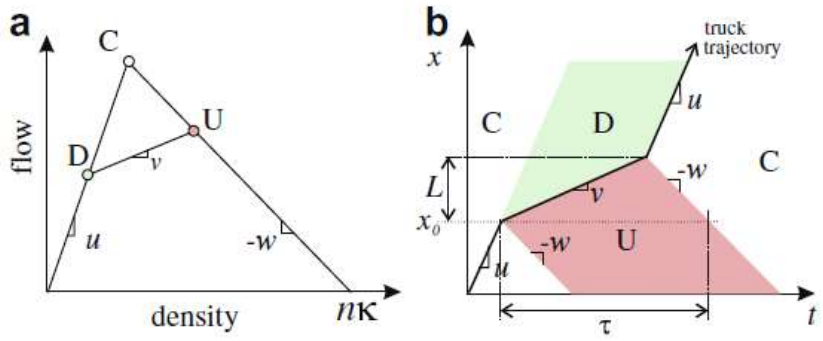


Figura 14: Fundamental Diagram triangular y caso de aplicación en una cola causada por un vehículo más lento (Laval, 2007).

Otro modelo microscópico es el planteado por el ya mencionado Kerner usando las tres fases del tráfico en un entorno de interrupción de éste, a saber, flujo libre, atascos móviles y flujo sincronizado. El modelo tiene en cuenta las reglas (aceleración, desaceleración, aleatorización y movimiento) del modelo de Nagel-Schreckenberg así como los efectos inducidos según el tráfico trifásico del propio Kerner: posibles cambios de carril a uno de mayor velocidad, comparación del gap del vehículo con el del flujo sincronizado y adaptación de la velocidad del vehículo con la del flujo sincronizado (Kerner et al., 2011). Todo ésto se aprecia en la *Figura 15*:

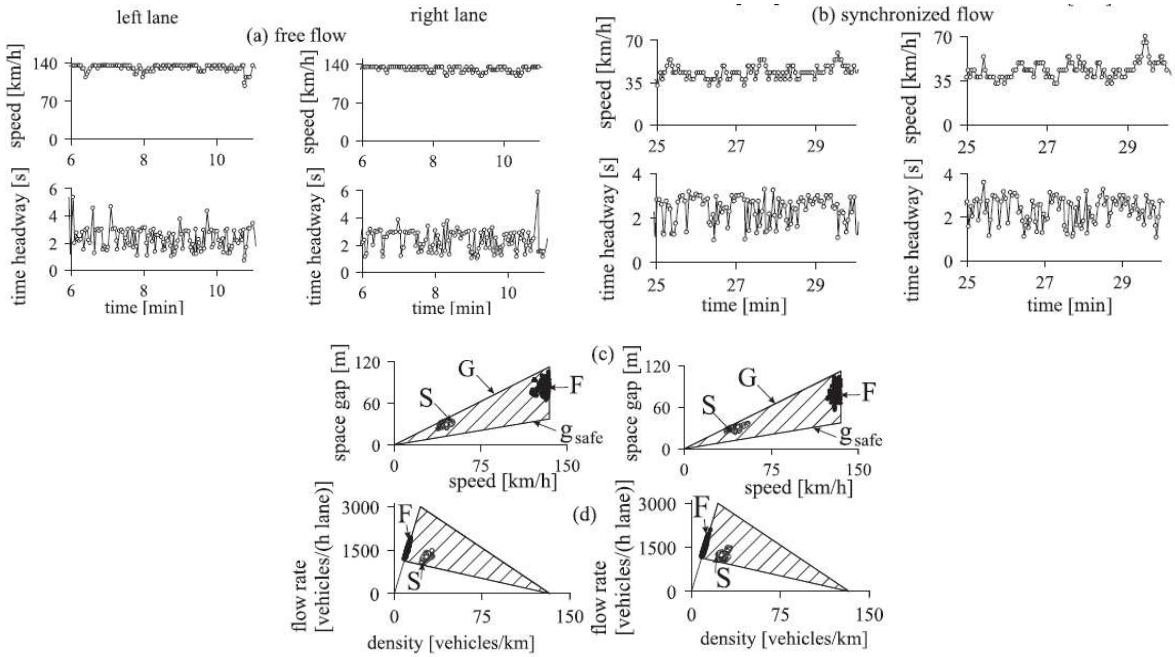


Figura 15: Características microscópicas del flujo sincronizado (Kerner, 2011).

En comparación, la mayoría de modelos macroscópicos que estudian las perturbaciones del tráfico y las congestiones móviles optan por trabajado sobre modelos hidrodinámicos KdV modificados.

Partiendo del modelo mKdV del estudio de Nagatani (Nagatani et al., 1998) enunciado en el anterior apartado, en el que proponía dos modelos simplificados (uno basado en diferencias parciales y otro discretizado, variaciones en escalones o celdas, *lattices*),.el mismo autor focalizaba su estudio en las transiciones mediante modelos *differential-difference* y *difference-difference* para las dos variables primarias tiempo-espacio consideradas (velocidad y sensibilidad dependen de ellas). De esa manera, podía explicar el proceso de formación de la congestión como un proceso kink-antikink (similar a las ondas que varían su amplitud y signo respectivamente) que se vuelve más inestable y produce mayor número de cambios de carril cerca del punto crítico (Nagatani, 1998).

Continuando dichos trabajos, ese estudio se modificó añadiendo la diferente densidad que el flujo de tráfico tiene entre los dos carriles y según se va alejando de la congestión, lo que permite modelar la formación de la cola teniendo en cuenta el comportamiento del conductor que intenta cambiar de carril para avanzar dentro de la congestión y tomar decisiones que homogenicen la densidad del flujo para estabilizarlo y hacerlo más fluido (Gupta et al., 2013).

Otro enfoque al problema partiendo de la ecuación KdV modificada es considerar que, conocido el modelo de velocidad óptima (OV, una variación del modelo microscópico de car-following centrada en este parámetro dinámico) que describe la circulación de cualquier vehículo, se puede explorar la opción de añadir el efecto del *platooning* o seguimiento entre vehículos en momentos previos a la formación de la congestión. Estudiando ese efecto, se observa que las colas de vehículos se comportan como ondas estacionarias de amplitud constante y que, cerca de los puntos máximo y mínimo, los parámetros de la trayectoria (velocidad incluida) varían en función de la sensibilidad de cada conductor (inversa de la distancia con el vehículo precedente) (Hattam, 2018).

2.3 Posibilidades del control en la prevención de colas y cuellos de botella.

2.3.1 Enfoques clásicos al control del tráfico.

Varios autores han explorado sistemas de gestión del tráfico que intentan mejorar la operativa diaria de las autopistas en términos de capacidad y de control de coste, incluyendo el *Active Traffic and Demand Management* (ATDM), el *Ramp Mettering* (RM), los *Variable Speed Limits* (VSL) o el *Route Guidance* (RG).

Todos ellos se plantean de una forma bastante similar desde el punto de vista de control, con un esquema básico de funcionamiento mostrado en la *Figura 16*: a partir de mediciones instantáneas de los parámetros del flujo de tráfico (generalmente, velocidad e intensidad, si bien según ha ido avanzando la tecnología se han podido introducir otras como la composición del flujo o la distancia entre vehículos), se elige una técnica de control (que en esencia equivale a elegir una o varias variables manipuladas) a fin de implementar una estrategia de control determinada (Kotsialos et al., 2001).

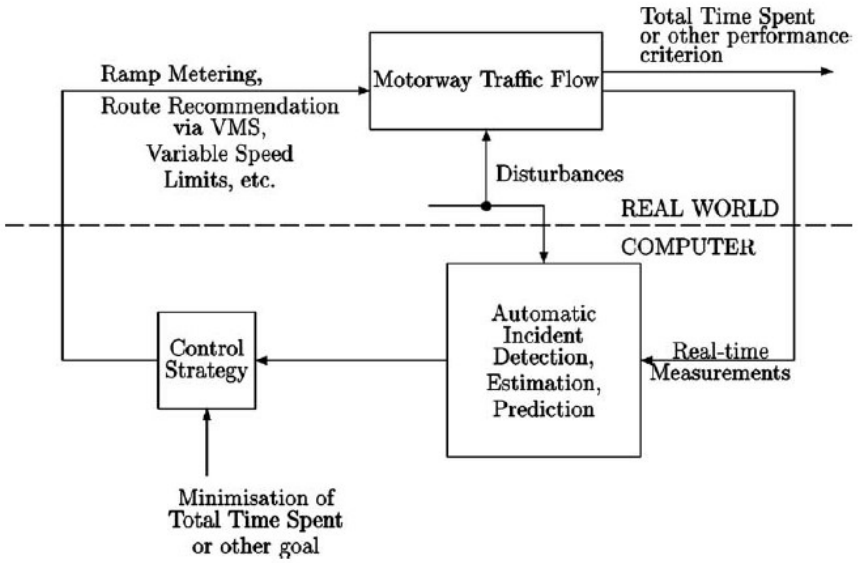


Figura 16: Esquema básico de un lazo de control del tráfico (Kotsialos, 2001).

Una primera clasificación y visión general, según esos mismos autores, de las posibles estrategias de control sería la siguiente:

- *Ramp Mettering*. Consiste en controlar el flujo de tráfico actuando directamente sobre la cantidad de vehículos que circulan en una sección, permitiendo ajustar su valor a la franja deseada en cada momento controlando entradas, salidas y arterias paralelas. Permite, asimismo, desde un control básico y prefijado de un único lazo de control a otras estrategias de control más avanzadas como el *feedforward* u otros basados en funciones iterativas de optimización.

- *Link Control Strategies*. Se trata del uso conjunto de varias técnicas de control del tráfico mediante el usa de señalización variable, incluyendo el VSL, el control de carriles (permitiendo o no los adelantamientos o cambios de carriles), los carriles reversibles o la señalización de incidentes.

- *Route Guidance*. De una manera primitiva, se enfocaba como un sistema de recomendación de itinerarios basado en mediciones de las distintas estaciones de aforo de la red, primero por una interpretación completamente manual de éstos, más tarde con su tratamiento informatizado. Más adelante, la irrupción de las nuevas tecnologías hizo el mundo interconectado y abrieron un nuevo paradigma de posibilidades agregando los datos de todos los dispositivos GPS (como tales o aquellos que posean un receptor de esa tecnología) de los usuarios, transformando dicha tecnología desde un enfoque macroscópico a uno microscópico, usuario a usuario.

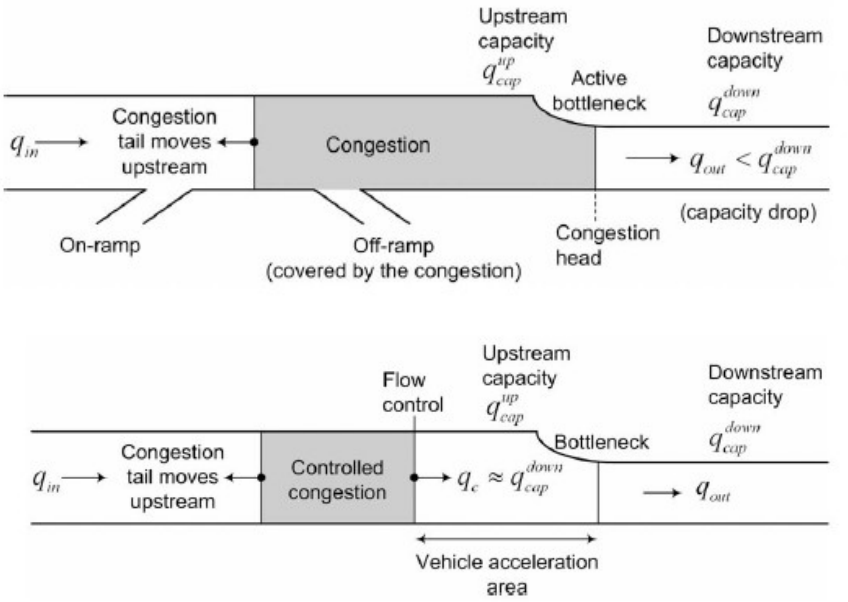
- *Integrated Network Traffic Control*. Es la conjunción de dos o más medidas de control de manera centralizada y coordinada, desterrando el concepto de independencia de variables a fin de favorecer las sinergias en las variables controladas.

De todos ellos, el de uso más extendido ha venido siendo, hasta la irrupción de las tecnologías móviles y la interconectividad, el VSL, que propone cambios en la velocidad máxima permitida en una sección de la vía en función de datos real-time de incidencias en la vía, tráfico o condiciones meteorológicas. Los beneficios de este sistema son dobles: por un lado, permite una mayor homogeneización del flujo del tráfico por reducción de la velocidad de los vehículos más rápidos, evitando los *closing processes* que mencionaba Wiedeman, lo que lo vuelve más estable y fluido, menos susceptible a perturbaciones; por otro, evita o mitiga la formación de *breakdowns* por el efecto que tiene sobre la disminución del flujo de tráfico entrante a una congestión. Partiendo de esta base, algunos autores han centrado sus trabajos en mejorar la eficiencia del flujo del tráfico mediante la aplicación de VSL, si bien se ha demostrado ser difícil por cuanto un sistema VSL es bastante reactivo (actúa con correcciones a posteriori sobre datos que ya han ocurrido) y simple para la gran heterogeneidad del tráfico, aunque otros han conseguido resultados más satisfactorios.

Algunos enfoques que han tratado de minimizar esas limitaciones han pasado por estudiar el efecto que el VSL causa sobre el conductor individual que tiende a no respetar la bajada de velocidad, reduciéndola en una buena parte, pues menosprecia el motivo por el cual se ha procedido con ella, lo que implica que el efecto que tenga a posteriori sea menor. Obteniendo pues la diferencia de velocidad instantánea entre el FD y el VSL, se podría modelar el impacto real de esa bajada de velocidad en la dinámica del flujo (Kotsialos et al., 2002).

Continuando con la incorporación del feedback real en los modelos macroscópicos, también se ha tratado de estudiar ese efecto en la dinámica del flujo mediante el uso de funciones afines (Carlson et al., 2010). Estos autores optaban por el desarrollo de un Mainstream Traffic Flow Control (MTFC) que regulase el flujo de es ubicaciones seleccionadas como pudiese ser aguas arriba del cuello de botella y no en él mismo para poder llegar a valores ordenados, controlados y de máxima eficiencia en éste, lo que implica que la caída de capacidad aguas debajo del cuello de botella es mayor que si no se controlase la congestión y que la congestión controlado es de menor longitud y posee mayor velocidad que la no controlada. El funcionamiento básico del MTFC es con señales lumínicas que habilitan el paso o no por los carriles de la autopista, regulando la capacidad máxima teórica de la vía, si bien igualmente permite el uso de VSL y/o *Ramp Mettering* para poder ampliar u optimizar su efecto de control. La base de dicho modelo MTFC se basa en funciones afines definidas por modelo dinámico empírico en el que se seleccionan valores de velocidad óptima en función de la relación velocidad/densidad del flujo, una constante de tiempo y un valor de anticipación predicho. Dichas funciones se ven modificadas igual empíricamente en función de si se le añade el uso de VSL o RM.

Los mismos autores (Carlson et al., 2010) estudiaban ese mismo año por separado los efectos del VSL y el *Ramp Mettering* incorporándolos a un modelo macroscópico de tráfico con objetivos de control de segundo orden sobre flujo y de enfrentamiento a cuellos de botella móviles teniendo en cuenta horizontes de colas y oscilaciones máximas admisibles. Esa dinámica del tráfico estudiada se aprecia en las *Figuras 17 y 18*.



Figuras 17 y 18: Formación de un cuello de botella móvil (arriba) y aproximación a su control por MTFC (abajo) (Carlson, 2010)..

Otra forma de enfocarlo ha sido el aplicar técnicas de control predictivo mediante la sustitución de los *Foundamental Diagrams* (FD) básicos por VSL, considerando la formación del tráfico tanto en el *bottleneck* como aguas arriba y aguas abajo, considerando la VSL como una variable de proceso más. De esa forma, mediante la modelización en METANET, se ha conseguido una estructura de control que puede identificar de forma precisa la forma de los flujos y actuar sobre la velocidad en consecuencia (Hadiuzzaman et al., 2013).

Sin embargo, como se ha indicado antes, la irrupción de nuevas tecnologías en el mundo del transporte como pueden ser el GPS o los servicios de navegación interconectados abrieron un nuevo paradigma de cómo combatir posibles retenciones. Por un lado, soluciones de *Route Guidance* (RG) son de probada efectividad para aquella incidencias de tipo no recurrente, como pueden ser las causadas por un incidente que forme un cuello de botella fijo y puntual (Wang et al., 2006), mientras que otras como la *Vehicle-Infraestructure Integration* (VII) van un paso más allá permitiendo optimizar el flujo de tráfico monitorizando y actuando sobre los propios vehículos individualmente, lo que abre un nuevo horizonte de posibilidades tanto a nivel microscópico como macroscópico: monitorizando las velocidades y las distancias entre cada uno de los vehículos se permite obtener una caracterización del flujo tal que se puede actuar sobre el grupo como uno sólo (macro) como sólo sobre un pequeño número de elementos de éste (micro) para obtener los resultados deseados en lo referente a flujo y capacidad presentes en la vía (Carlson et al., 2010). Este segundo concepto se desarrollará en el siguiente apartado.

2.3.2 Técnicas de control aplicadas a la gestión del tráfico.

En oposición a las técnicas tradicionales hasta ahora expuestas, existen aproximaciones al problema de las congestiones y cuellos de botella recurrente más complejas, introduciendo conceptos y técnicas de control.

Para autopistas de dos carriles, un control bastante sencillo consistiría en tomar las velocidades de los vehículos que circulan por los dos carriles como variables controladas de un proceso y mediante su lectura e inclusión en el modelo a modo de *feeedback* de control, utilizar un sistema VSL para optimizar la velocidad del flujo (Ge et al., 1013). En contraposición con el MTFC de Carlson, que se basaba en un control de la densidad del flujo, este método toma como variable controlada la velocidad óptima del flujo (OV) como lo hacían Lenz o el ya mencionado Hattam en sus modelos e incluye la consideración sobre las decisiones de cambio de carril en función de la velocidad de uno o de otro, algo que es bastante cercano a cómo un conductor piensa y decide en consecuencia mientras circula por este tipo de vías. Además el considerar esa diferencia entre carriles, puede llegar incluso a predecir el efecto contagio de la ralentización y congestión de un carril al contiguo.

Ya en el aspecto del control más puro, una interesante aproximación a ese control de la velocidad es la que se puede hacer mediante el uso de compensadores de fase en cascada para el ajuste de fase y la eliminación del efecto *overshoot* (Zhu et al., 2015). Este método consiste en acoplar un compensador a la función de transferencia del modelo que añada ceros o polos al sistema para reducir el error de estado estable, reducir el pico resonante y mejorar la respuesta del sistema al reducir el tiempo de subida. El compensador consiste en la adición de un par polo-cero (ver *Fórmula 3*), normalmente en el semiplano izquierdo (parte real negativa y posible componente imaginaria), siendo de adelanto si el polo es mayor que el cero, de retraso en caso contrario o pudiendo ser de ambos si se añade una dupla de polos-ceros que combinen el efecto. La implementación en el lazo de control se muestra en la *Figura 19*. En el caso del artículo mencionado, el equipo de Zhu comprobó empíricamente que el uso de un compensador de adelanto de fase era de gran utilidad para el control de las formación de congestiones, como se aprecia en las *Figuras 20 y 21*.

$$G_c(S) = \frac{(s-z)}{(s-p)} \qquad (3)$$

Fig. 3. Illustration of Bode diagram of the system.

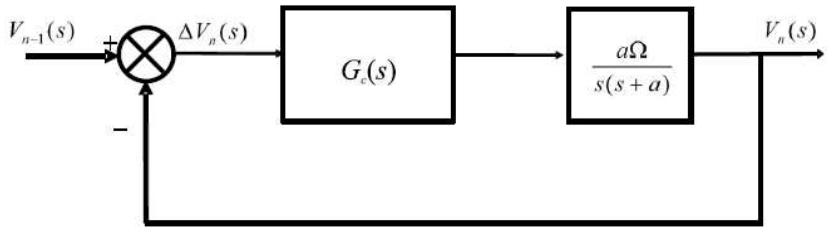


Fig. 4. Illustration of the unit feedback closed-loop system with a cascade compensator diagram $G_c(s)$.

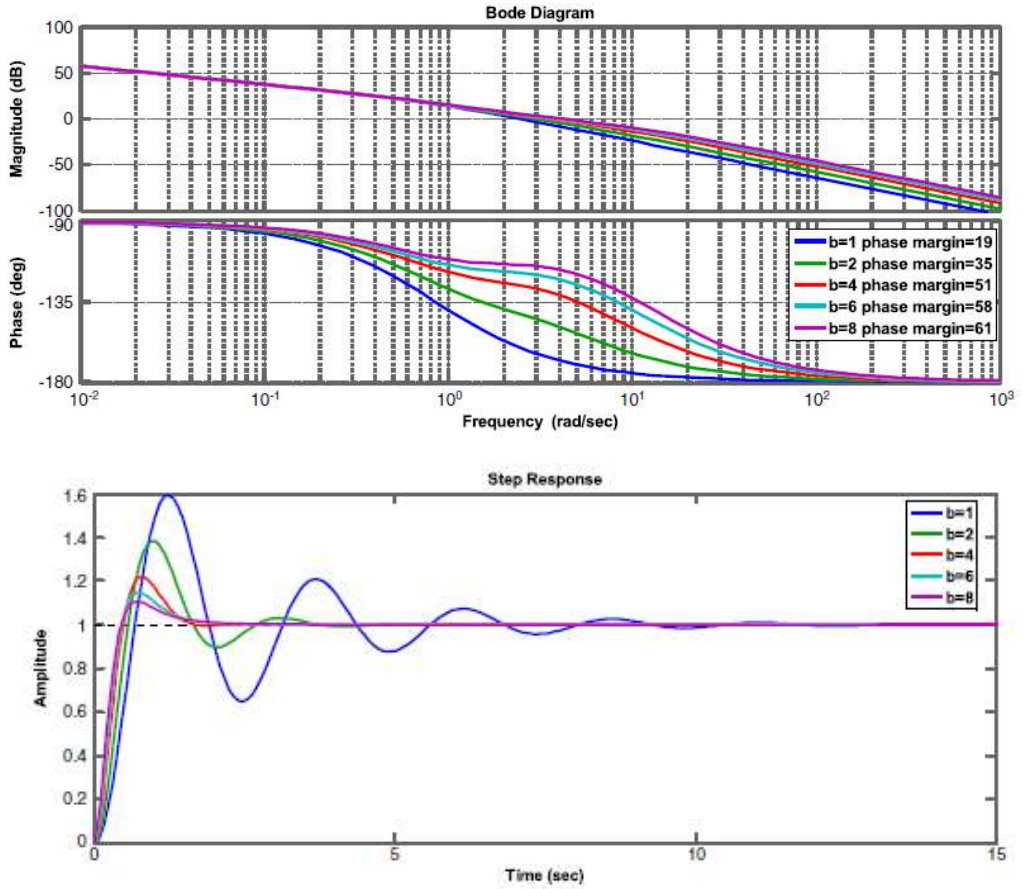


Fig. 7. Unit step responses of the phase-lead compensated system are corresponding to different parameters $b = 1.0, 2.0, 4.0, 6.0, 8.0$.

Figuras 19, 20 y 21: Esquema (pág. anterior), ajuste (pág. actual, arriba) y funcionamiento de un compensador en cascada por adelanto de fase (pág. actual, abajo) (Zhu, 2015).

Otra aproximación al control puede ser el uso de técnicas de control predictivo (*Model Predictive Control*, MPC) en el que las entradas de control óptimas se determinan en línea mediante la optimización numérica y un modelo de predicción en combinación con un enfoque de horizonte en retroceso. Dicha optimización se realiza en función de una función de coste a minimizar (*Fórmula 4*) que represente el *performance* de la red, pudiendo incluir restricciones en función del estado de la vía en ese momento y ver modificado los pesos de sus distintos componentes. En cada paso de control, MPC calcula una secuencia de control óptima sobre una horizonte dado mediante una técnica de optimización numérica a determinar: lineal, entera, mixta o no lineal (QPP o MIQP), mostrando un esquema de control como el de la *Figura 22*.

$$J_{total}(k_c) = \alpha_1 J_1(k_c) + \alpha_2 J_2(k_c) + \alpha_3 J_3(k_c) + \ldots \quad (4)$$

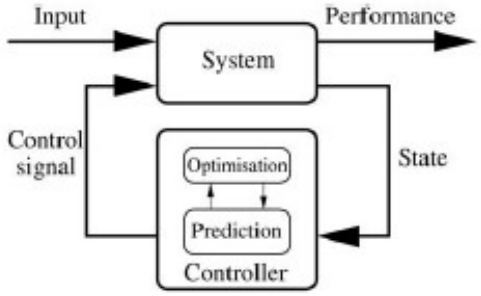


Figura 22: Esquema de control predictivo del tráfico (MPC) (Van der Berg, 2007)..

Como caso de aplicación de este MPC se puede considerar las redes que contienen tanto vías urbanas como autopistas. Estos dos tipos de carreteras están estrechamente relacionados: la congestión en la autopista a menudo causa embotellamientos en las vías urbanas y viceversa. Como consecuencia, las medidas de control adoptadas en una de las dos áreas pueden tener una influencia significativa en la otra área, tal y como se muestra en la *Figura 23*. Realizando la conexión entre las partes urbanas y de autopista de la red mediante el modelado de rampas de entrada y salida, se pueden fusionar los objetivos de control en ambos tipos de vía mediante una única función de coste que considere las acciones de control sobre los semáforos que regulen esas interconexiones (Van der Berg et al., 2007).

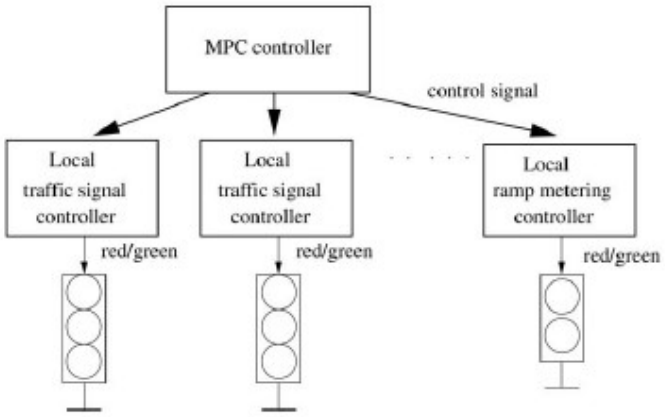


Figura 23: Ejemplo de control predictivo en vías urbanas y accesos (Van der Berg, 2007).

Igualmente, y centrados en la casuística de una vía de alta capacidad, se pueden aplicar modelos basados en un control predictivo de manera bastante efectiva, como es el caso del *Receding-Horizon Parametized* (RHP), una suerte de MPC que optimiza la capacidad de computación requerida para las iteraciones de optimización cambiando el sentido de ésta, es decir, de una situación óptima trata de parametrizar los inputs del sistema para llegar a la situación real (Zegeye et al., 2012). Éste se puede observar en la *Figura 24*:

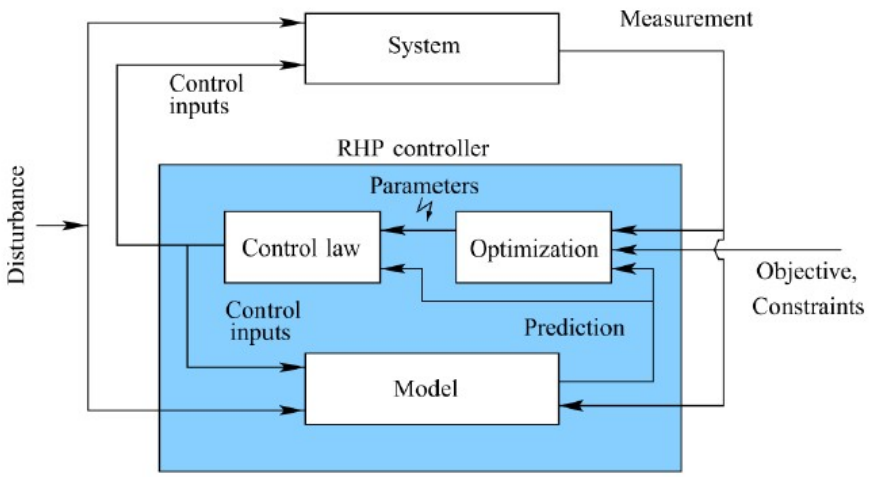


Figura 24: Receding-Horizon Parametized, variante del MPC (Zegeye, 2012).

En este caso mencionado, el RHP-MPC muestra su utilidad en dos aplicaciones de control de la velocidad mediante el uso de VSL y *Ramp Mettering* por separado, considerando las velocidades y densidades del flujo de tráfico en las distintas secciones consideradas. De esa manera y respectivamente, se puede maximizar densidad y velocidad del conjunto ya dentro de la autopista, por un lado, y el flujo de vehículos que pueden ingresar en cada una de las secciones sin perturbar los parámetros de ésta, por otro, como muestra el ejemplo de aplicación que Zegeye realizado sobre una autopista holandesa (*Figura 25*):

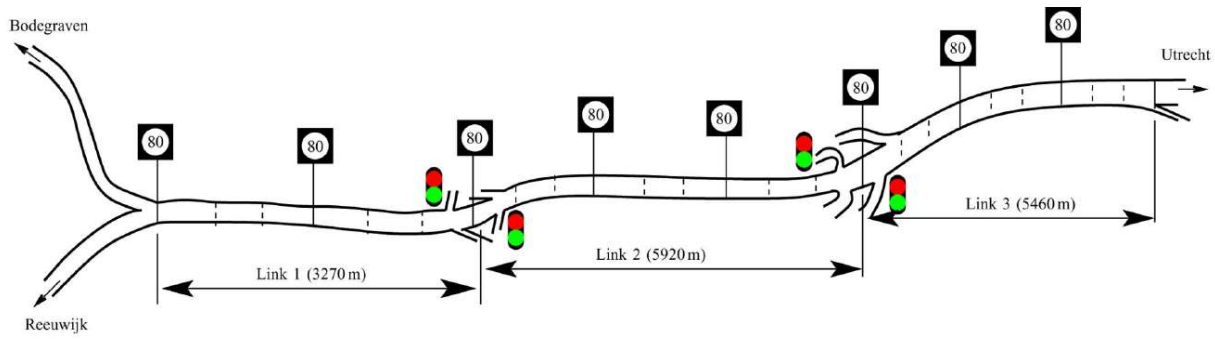


Figura 25: Ejemplo de aplicación de RHP-MPC en la autopista A12, Holanda (Zegeye, 2012).

Finalmente, otros autores han utilizado técnicas de *Reinforced Learning* o aprendizaje reforzado que consisten en determinar qué acciones debe escoger un agente de software en un entorno dado con el fin de maximizar alguna noción de recompensa o premio acumulado.

Aplicadas a la gestión del tráfico en vías de alta capacidad, pueden suponer un enfoque alternativo al presentado antes con el RHP-MCP de Zegeye, si bien siguen compartiendo como base de datos principalmente la velocidad y densidad del flujo en las secciones de estudio.

Un primer sistema podría ser la conjunción de VSL y *Ramp Mettering* en cascada para controlar las incorporaciones a una autopista (Li et al., 2017) como el mostrado en la *Figura 26*:

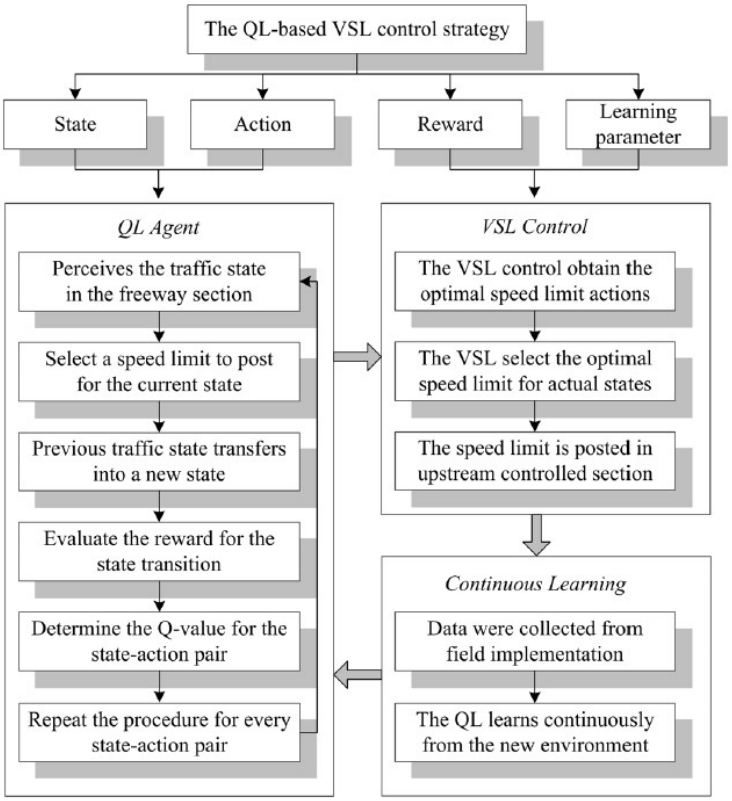


Figura 26: Funcionamiento de un controlador basado en Reinforced Learning para un sistema VSL (Li, 2017).

En este caso, un controlador primario mediría la densidad y caudal del flujo aguas debajo de la incorporación y evitaría que éste alcanzase el punto de *breakdown* mediante un sistema de *Ramp Metering* que actuase sobre la cantidad de vehículos que ingresasen en la vía; paralelamente, un segundo controlador en cascada recibiría la salida del primero para actuar sobre un sistema VSL a fin de controlar el flujo que le entra por el troncal de la vía a la sección de la incorporación, permitiendo modelarlo de tal manera que el RM pueda maximizar su efecto. El funcionamiento de su actuación se muestra en la *Figura 27*. En comparación con el RHP-MPC anterior, este sistema presenta una interacción entre el control por VSL y RM, no actuando en paralelo sino integradamente.

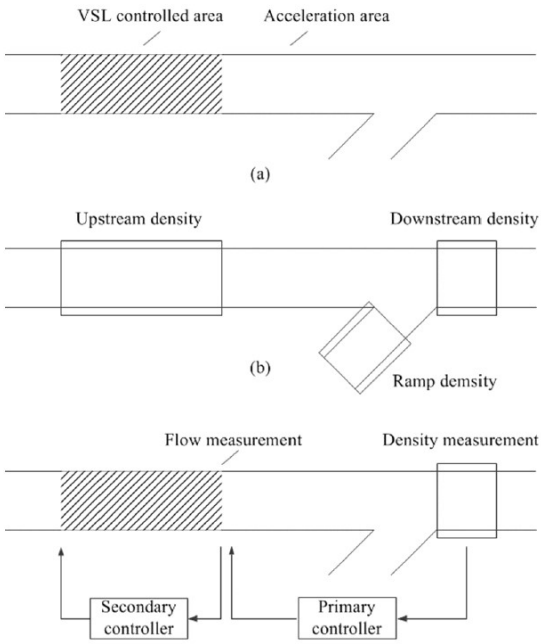


Figura 27: Ejemplo de aplicación de control con Reinforced Learning (Li, 2017).

Un concepto similar sería el control por VSL de una sección con una entrada y una salida a la autopista, similar a un trenzado (Wu et al., 2020). En este caso, el controlador QL (*Figura 29*) utilizaría los mismos inputs que en el caso anterior pero su acción de control sería única: su funcionamiento se basaría en, mediante detectores de lazo en el tronco principal y en el carril de acceso, ajustar el caudal y la densidad del flujo en la sección inmediatamente anterior a la incorporación para asegurar que el conjunto posea una permeabilidad suficiente para evitar las interferencias en las trayectorias de los vehículos que intervienen en el trenzado, como se muestra en el esquema de la *Figura 28* siguiente. Sobre ese concepto de permeabilidad se volverá en el siguiente apartado.

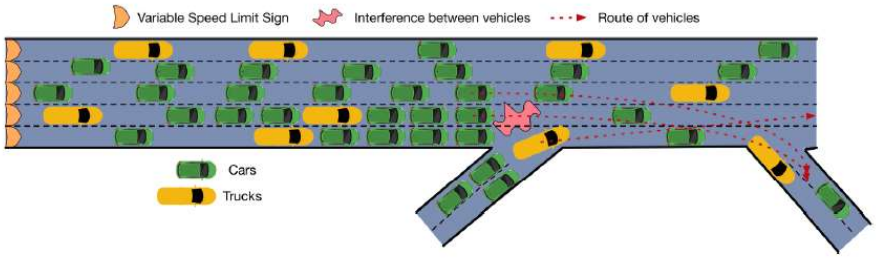


Fig. 2. The VSL control example considered in this paper.

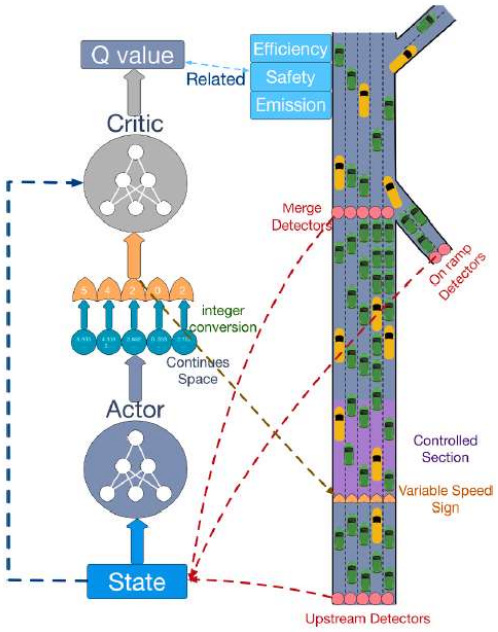


Fig. 3. The actor-critic architecture for DVSL.

Figuras 28 y 29: Ejemplo de aplicación de control con Reinforced Learning (Wu, 2020).

2.4 Tecnologías V2V, V2X y enjambres de vehículos interconectados.

2.4.1 Sistemas interconectados.

El desarrollo de la tecnología en lo referente a detalle, interconexión e interoperabilidad ha abierto un paradigma completamente nuevo con nuevas e infinitas formas de controlar los elementos del día a día, y claro está, su aplicación ha llegado al apoyo a la conducción, a su automatización y al diagnóstico y a la gestión del tráfico (rodado o no, si bien en este trabajo nos centramos en este primero).

Dentro de esas nuevas aplicaciones de la tecnología, se encuentran las *Vehicle-to-Vehicle* (V2V) y las *Vehicle-to-Infraestructure* (V2X), cada una haciendo referencia a los integrantes de la interconexión, entre vehículos o entre vehículo e infraestructura respectivamente.

Uniendo ambos conceptos se forma el de *Vehicle Infrastructure Integration* (VII), que se puede resumir en los siguientes puntos (Carlson et al., 2010):

- Los vehículos actúan como sensores móviles de posición (vía GPS o por sistemas alternativos móviles como el GPRS), velocidad y distancia entre vehículos.

- Los vehículos pueden comunicar entre ellos o con la infraestructura, tanto transmitiendo como recibiendo datos.

- Los mensajes que se intercambian contienen información en tiempo real del tráfico y alarmas y notificaciones. Igualmente, se pueden transmitir comandos de acción a los distintos vehículos en lo referente a velocidad máxima, distancia de separación mínima, cambios de carril, etc.

Las aplicaciones potenciales de este concepto de VII son enormes y se centran, principalmente, en la seguridad y la eficiencia. Un ejemplo práctico de este es la regulación de la velocidad de los vehículos que circulan por una sección de una autopista. Con las herramientas tradicionales de control de tráfico, un sistema VSL hubiese sido lo más cercano a poder establecer una restricción a este parámetro, si bien hubiese quedado sujeta al grado de obediencia que el conductor hiciese ante esa restricción; por el contrario, con el nuevo sistema VII, esa limitación puede establecerse de forma automática y no bypassable en todos los vehículos que forman el flujo. Más allá, incluso, no es necesario tener acceso a todos y cada uno de los vehículos del conjunto, sino que bastaría con hacerlo sobre un pequeño porcentaje de ellos que actuarían como líderes de pelotón fácticos en cada carril: el resto de vehículos deberían ajustar simplemente su velocidad a la velocidad a la del respectivo líder. Se crea así el concepto de enjambre o *swarm*.

Este concepto de *swarm* y su integración con la infraestructura es uno de los pilares de los sistemas inteligentes de transporte (*Intelligent Transport Systems*, ITS), que surgieron con el aumento de la congestión en las vías urbanas, e interurbanas, el aumento de la contaminación del aire en las ciudades y la pérdida de tiempo y dinero causada por este bajo rendimiento del tráfico. Pero más allá, el error humano está detrás del 90% de los accidentes de tráfico, por lo que los sistemas de asistencia al conductor y los ITS tienen como objetivo prevenir accidentes debidos a la falta de concentración y/o distracciones.

Un primer paso hacia esos ITS fue la experiencia general en el DARPA Urban Challenge 2007, que supuso la prueba de la viabilidad de vehículos de navegación autónoma en el tráfico urbano. Siguiendo esa línea, la Dutch Organization for Applied Scientific Research (TNO) organizó el Grand Cooperative Driving Challenge del año 2012, cuyo objetivo pasaba la competición entre 8 equipos para demostrar la capacidad de conducción cooperativa y cuál era sistema de comunicación más efectivo para escenarios de tráfico predeterminados.

2.4.2 Los conceptos de swarm y platoon.

El mecanismo del ejercicio explica a la perfección los conceptos de *swarm* y *platoon*. Consistía en que cada equipo debía transmitir la posición y los datos de estado de sus vehículos inalámbricamente, siendo recibidos por otros equipos para diseñar sus propias estrategias de control colaborativo longitudinales dentro del conjunto heterogéneo de vehículos o *swarm*, tal y como se puede ver en la *Figura 31*. De esa manera, cada vehículo puede desarrollar su control autónomo con los datos de los vehículos inmediatamente anteriores en el *platoon* o cola y permitiendo, igualmente, recibir e integrar los datos provenientes de la infraestructura (Bayezit et al., 2014).

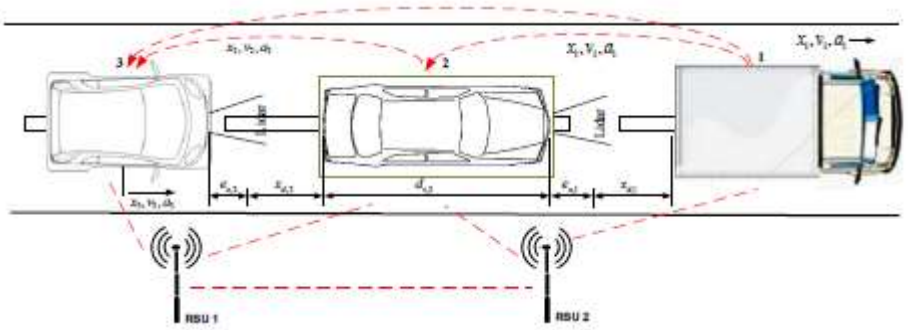


Figura 30: Ejemplo de integración V2V y V2X en la circulación de un platoon. (Bayezit, 2014).

Estos vehículos se comportan como robots en cierto grado autónomos cuya procesadora central de control recibe datos propios o locales y externos. En lo referente a posición y cinemática relacionadas con el movimiento del vehículo, obtenidos por medio de encoders, acelerómetros, giroscopios, GPS, Lidar y otros sensores internos; por el contrario, los datos provenientes de la infraestructura (semáforos, límites de velocidad) y los estados de los vehículos anteriores del *platoon* se obtienen con la ayuda de transceptores inalámbricos. Todos esos datos son integrados en una secuencia de control que permite diferentes grados de conducción autónoma y que se traduce en una asistencia a la conducción mediante la actuación del acelerador, el pedal de freno y el control de la caja de cambios del vehículo (ver *Figura 32*).

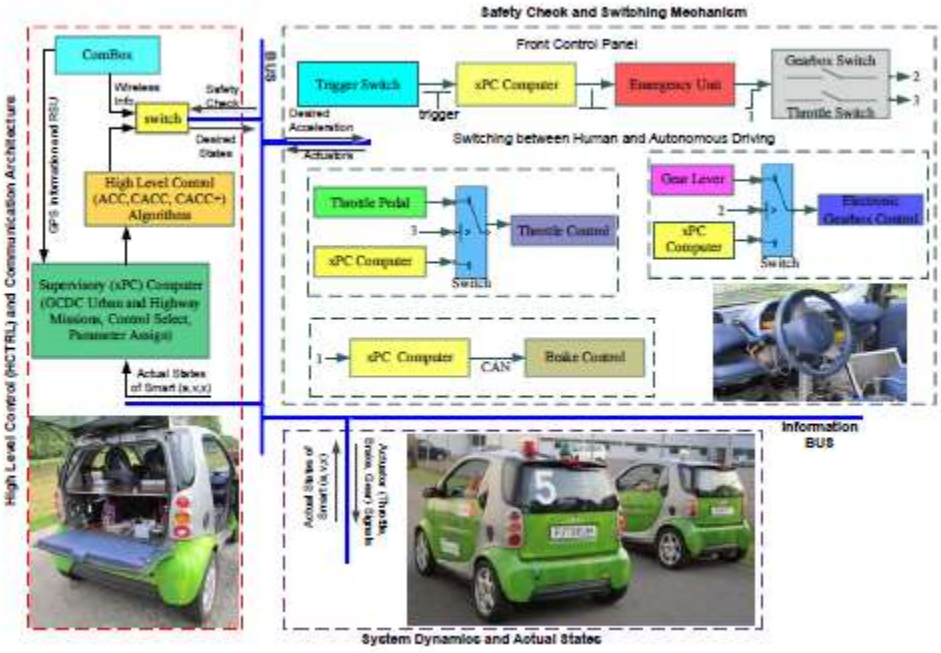


Figura 31: Equipamiento y control por bloques del vehículo presentado en el GCDC 2011 (Bayezit, 2014)..

Los *swarms* o enjambres deben quedar definidos adecuadamente para su correcta integración en ulteriores modelos microscópicos, cuyo enfoque común persigue definir una distancia o tiempo de avance entre vehículos constante a lo largo del tiempo como variable controlada. Esa distancia constante lleva a un aumento del rendimiento del tráfico, puesto que el error de la distancia entre los vehículos es independiente de la velocidad éstos, mejorando pues la estabilidad general y seguridad del conjunto del tráfico (Echeto et al., 2022). Esa definición se centra en los siguientes conceptos:

- *Tamaño*: es el número de individuos que pertenece a un enjambre. Debe ser lo suficientemente grande para aumentar su eficiencia, ya que se logra un mejor control cuanto más grande sea el número de inputs al modelo.

- *Flexibilidad*: debe ser capaz de adaptarse a las condiciones capaces del tráfico, así como a los elementos "díscolos" de la formación, pudiendo igualmente adoptar a otros nuevos miembros.

- *Objetivo*: el tener una finalidad resulta clave en la formación del *swarm* y en su funcionamiento. No es lo mismo un grupo que se vea obligado a enfrentar una congestión del tráfico que uno que persiga la optimización del flujo sin haber llegado al punto de *breakdown*.

- *Heterogeneidad*: se debe considerar que el tráfico real no está compuesto únicamente por un único vehículo tipo y que cada tipología que lo conforma posee una serie de características morfológicas y dinámicas distintas que deben incorporarse al modelo.

- *Espaciamiento*: es la distancia objetivo buscada entre los distintos integrantes del *swarm*, aquella que deben perseguir con sus decisiones dinámicas. Está directamente relacionada con el concepto de permeabilidad.

De esta manera, los *swarms* de vehículos autónomos pueden configurarse como un conjunto controlado de vehículos que se puedan mover dentro de un modelo de comportamiento estable y determinado que garanticen un nivel de servicio y seguridad óptimo para la vía.

2.4.3 Control del tráfico mediante swarms y platoons.

Para ejecutar ese control, los modelos microscópicos enunciados en el apartado 2.1 son a priori la opción más adecuada. Existen, como se mencionaba, diferentes tipologías como pueden ser el *car-following* o el *cellular automata*. Dentro de ese primer grupo, diversos modelos se han desarrollado, como pueden ser el *Gazis-Herman-Rothery* (GHR), el *Collision Avoidance* (CA), los modelos lineales, el modelo *Fuzzy-Logic Based*, el modelo *Meta*, el modelo *Optimal Velocity* (OV) y el *Intelligent Driver Model* (IDM) (Echeto et al., 2022).

El caso del *Intelligent Driver Model* (IDM) es especialmente interesante para la formación de colas, pues se trata de un modelo de car-following en cierta manera basado en el concepto de velocidad óptima del modelo OV en el que los vehículos persiguen una velocidad objetivo pero, a su vez, tratan de realizar una conducción defensiva minimizando las operaciones de frenado de los *clossing* y *following processes*, pudiendo definir entonces parámetros objetivo y límite para las variables de estado y dinámicas de los distintos vehículos implicados en el modelo. En el caso que nos aplica, estando el flujo formado por dos

tipos de vehículos (ligeros y pesados), se podría incluso discernir entre el comportamiento de ambos dos estableciendo objetivos separados, tal y como se puede ver en la *Tabla 2* (Yang et al., 2013).

Parameters	Variable	Car to Car	Car to Truck	Truck to Car	Truck to Truck
Maximum Acceleration	$a_n(m/s^2)$	1.01	1.03	0.78	0.74
Desired Speed	$v_n(m/s)$	27	19.3	20.6	17.7
Linear Jam Distance	$s_n^0(m)$	0.85	1.35	1.11	1.53
Non-Linear Jam Distance	$s_n^1(m)$	0.19	0.27	0.12	0.36
Safe Time Headway	$\tau_n(s)$	1.2	1.4	1.8	2
Comfortable Deceleration	$b_n(m/s^2)$	2.26	2.12	1.7	1.61
Acceleration Exponent	δ_n	4	4	4	4

Tabla 2: Parámetros objetivos de un modelo IDM heterogéneo (Yang, 2013).

Conocidos y/o determinados unos parámetros apropiados que gobiernen la dinámica de los vehículos que circulan por una vía para optimizar la eficiencia del conjunto del tráfico que circula por ella, se podría plantear un control sobre éste mediante la formación de *swarms* de vehículos que se comportasen dentro de ese estándar óptimo.

Sin embargo, el avance de la tecnología se presenta a veces no tan rápido como pudiese ser deseado. El avance del coche autónomo y de los ITS y VII es constante pero lento, por lo que no todos los vehículos de la vía tienen o tendrán la capacidad de ser u operarse de forma autónoma ni todos los tramos de la vía podrán presentar siempre los mismos niveles de equipamiento e integración con los vehículos. Además, siempre cabe la posibilidad de que algunos miembros de la comunidad que circula por la vía siempre se conduzcan de forma manual, no obedeciendo a los parámetros óptimos antes mencionados e incluso, a veces, fuera de los límites marcados por las normas de tráfico. Por ello, se han de valorar formaciones mixtas del tráfico entre vehículos autónomos, vehículos autónomos conectados (V2V) y vehículos tradicionales.

Se puede comprobar como únicamente un reducido número de vehículos autónomos completamente rodeados de vehículos conducidos por humanos pueden llegar a prevenir situaciones como la formación de colas o el *breakdown* (ver *Figura 32*). Con tan sólo un 6% de estos vehículos, se puede llegar a resultados de estabilización del tráfico asemejando lo máximo posible el flujo al que resultaría si éste sólo estuviese formado por un enjambre de vehículos autónomos o automatizados: bajo ese supuesto, las variables controladas se comportarían según un controlador PID de constante proporcional nula, si bien por razones de seguridad, ésto no puede ser implementado en la realidad, resultando que el valor k_p más cercano pero factible podría alcanzar resultados similares si ese porcentaje de vehículos autónomos se intercalase en el conjunto de los vehículos (Wu et al., 2018).

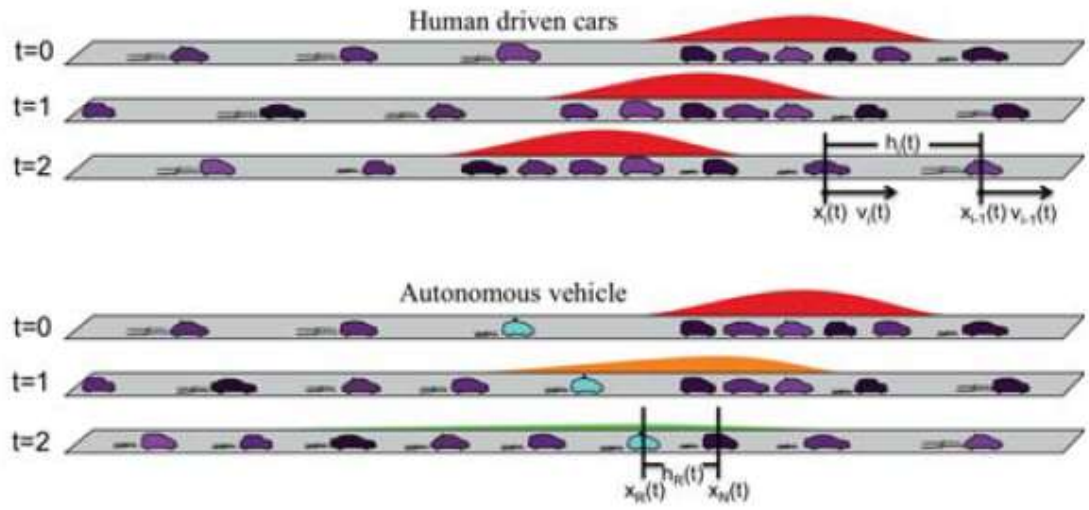


Figura 32: Efecto estabilizador del los vehículos autónomos en el conjunto del tráfico rodado (Wu, 2018).

Con ese comportamiento estabilizador, otros autores han estudiado la influencia de los *swarms* en la capacidad de las vías de alta capacidad. Mediante simulaciones microscópicas, se pude llegar a demostrar un incremento del flujo de 10.000 vehículos por hora y carril, si bien este resultado depende enormemente de la longitud del *platoon* formado y del grado de penetración (β) de los vehículos autónomos sobre el total de los que circulan (Sala et al., 2019). Esta influencia se muestra en diversos escenarios evaluados en la gráfica de la *Figura 33*:

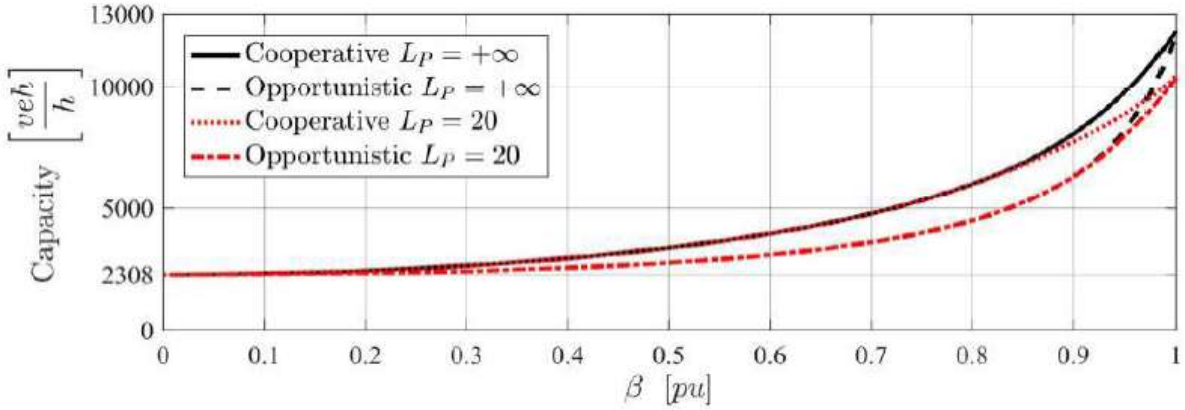


Figura 33: Aumento de la capacidad de la vía, por carril, en función del grado de penetración de vehículos autónomos (Salas, 2019)

La longitud del *platoon*, que a su vez depende del número de vehículos que lo formen y de la distancia entre ellos, introduce dos conceptos importantes para el desarrollo de los *swarms* de vehículos conectados: estabilidad y permeabilidad. Un *platoon* es una cola de vehículos que avanzan en formación de forma coordinada a una distancia entre ellos menor de la habitual entre dos vehículos conducidos

por un ser humano, que se regirían por un modelo de Wiedemann, por lo que esa distancia entre ellos influye enormemente en la longitud total de la cola y, por ende, en la permeabilidad de ésta a que se intercalen vehículos no automatizados que puedan llegar a dividirla.

Por un lado, una distancia entre vehículos dentro del *platoon* favorece su formación y persistencia en el tiempo, lo que tiene efectos positivos en el comportamiento del tráfico y la capacidad de la vía, como se ha enunciado del trabajo de Sala et al. Además, reduciría, el número de cambios de carril en situaciones de alta demanda, con el efecto ya mencionado en la capacidad de la vía (ver referencias anteriores a los trabajos de Gupta y Kerner).

Por el contrario, y uniendo este concepto con el estudio de Wu mencionado en el anterior punto, una distancia entre vehículos baja disminuye la permeabilidad del conjunto del tráfico, aumentando así la probabilidad de interferencias en las trayectorias de los vehículos que cambian de carril por afecciones o efemérides del tráfico, como pudiese ser un estrechamiento en la calzada, la reducción del número de carriles o una operación de adelantamiento de un vehículo más lento.

Por ello, la formación de esos *platoons* en cada uno de los carriles, agrupándose consecuentemente en los citados enjambres o *swarms* si le añadimos una segunda dimensión en forma de número de carriles, presenta una complejidad elevada. Se tiene que tratar la posibilidad de que los vehículos inteligentes en red pueden unirse o salir de la formación dinámicamente sin poner en peligro la estabilidad del conjunto y, además, se debe tener en cuenta dos comportamientos de control esenciales como son el *lane-keeping* o seguimiento entre vehículos como característica intrínseca del *platoon* y la evitación de obstáculos estáticos (puntuales) o dinámicos (vehículos más lentos) que pudieran encontrarse.

Un posible enfoque sería, adoptando un modelo microscópico del tráfico como el mostrado en la *Figura 34*, realizar una optimización del espacio mediante la definición de una función de coste a minimizar. Dicha función podría ser optimizada por técnicas heuristicas (Marjovi et al., 2015).

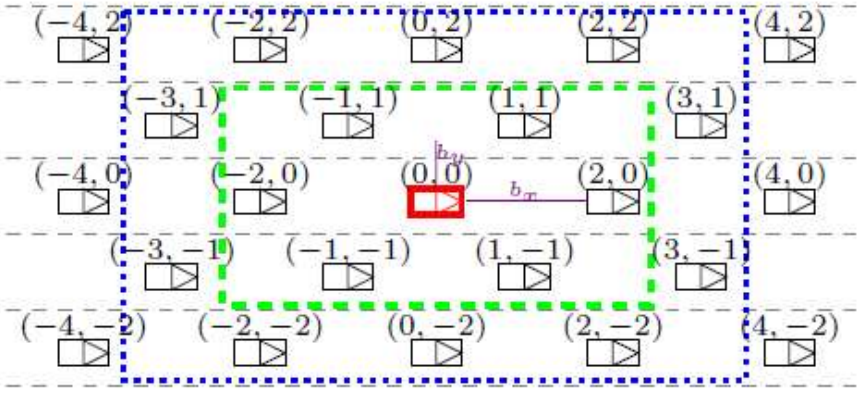


Figura 34: Grafo dinámico de control del convoy de vehículos autónomos conectados (Marjovi, 2015).

3. ENFOQUE AL PROBLEMA. DEFINICION DEL MODELO DE SIMULACION.

Una vez hecho un repaso de las diferentes publicaciones y líneas de investigación al respecto a la temática del problema que se quiere abordar, el siguiente punto consiste en decidir, de todas las soluciones enunciadas, qué línea se debe seguir para conseguir un entorno de simulación útil y representativo del problema descrito donde poder analizar el flujo del tráfico y los problemas asociados que se quieren abordar.

Partiendo de la idea primigenia del tramo de autopista y la formación de cuellos de botella causados por una reorganización del flujo del tráfico en un cambio de sección, la elección del enfoque debe pasar por un modelo que permita representar los fenómenos y comportamientos ya anunciados como el de *bottleneck*, *permeabilidad*, *car-following*, *breakdown* y *capacity drop*, así como la implementación de sistemas de seguimiento, gestión y control del tráfico.

3.1 Modelos de simulación del tráfico.

En los epígrafes 2.1.2 y 2.2.2 del anterior apartado se enunciaron las dos principales tipologías de modelos de representación del tráfico, microscópica y macroscópica, su funcionamiento y las consideraciones que en ellos se hacían en lo referente a la capacidad de una sección de autopista, que es el parámetro final que define el objetivo de este trabajo.

A esas dos tipologías habría que sumarle una tercera, la mesoscópica, una suerte de modelo intermedio entre ambas dos previamente anunciadas. Estos tres tipos de modelos presentan una serie de características principales que es importante evaluar previo a la elección de uno de ellos (Martín Gasulla, 2011):

Modelo	Microscópico	Mesoscópico	Macroscópico
Ámbito	Detallado, definiendo las características de cada elemento (trazado, sección característica, incorporaciones, etc.) en un área pequeña	Medianamente detallado, definiendo las principales secciones y nudos, en un área intermedia	Amplio espectro, definido mediante un grafo de nodos
Representación del tráfico	Matriz O/D dinámica, bien modificable, bien en función del tiempo	Matriz O/D dinámica en función del tiempo	Matriz O/D estática
Control del tráfico	Señalización, detectores, marcas viales, algoritmos etc. definidos con exactitud	Se introducen reglas y pautas de comportamiento aproximado, pero sin detallar elemento a elemento	Algoritmos en función de tiempos y costos
Principio de funcionamiento	Modelo atómico, vehículo a vehículo, en base a reglas de car-following, cambios de carril y decisiones O/D	Modelo atómico, pero con reglas simplificadas	Modelo basado en ecuaciones de equilibrio de fuerzas.
Ventajas	Permite estudiar la interacción entre vehículos y el efecto de decisiones y acciones concretas de éstos o sobre éstos	Permite analizar dinámicamente redes regionales	Buena relación entre definición, economía de recursos y resultados en amplios espectros
Inconvenientes	Exige de un elevado grado de detalle y preparación, lo que implica grandes dosis de esfuerzo en cuanto a diseño y recursos de computación	Modelos con pocos años en el mercado	No permite modelar cambios en estrategias operacionales ni desviaciones dinámicas. Necesidad de corroborar los resultados con una aproximación más en detalle.

Tabla 3: Comparativa entre distintos modelos de simulación del tráfico (Martín Gasulla, 2011).

Los modelos de microsimulación detallan el tráfico a nivel de cada vehículo y de cómo interactúan con el resto de los vehículos y con la infraestructura: por composición del tráfico, parámetros específicos de comportamiento del conductor, etc. Con esa cantidad de pequeños detalles a definir y, por consiguiente, a procesar, implica normalmente extenderlos a una cantidad normalmente reducida de elementos en torno al fenómeno simulado.

Estos modelos funcionan mediante el procesado, vehículo a vehículo, de normas de comportamiento en lo referente a desplazamiento longitudinal (aceleración/desaceleración, lo que representaba los modelos de Wiedeman) y lateral (cambio de carril), pudiendo añadir otros factores como el comportamiento ante una ruta prefijada o una señalización o geometría variable.

Debido a ese detalle atómico y su extensión para todos los elementos presentes en el modelo, estos modelos precisan de un elevado coste computacional.

Por el contrario, los modelos macroscópicos se enfocan más al estudio de la demanda de viajeros y su comportamiento frente a cambios en las condiciones existentes. De esa manera, en un modelo de este tipo se analiza un fenómeno con grandes cantidades de elementos cuyas dimensiones y grado de detalle son notablemente menores al área circunscrita en éstos. En este caso, prima el comportamiento de todo el sistema y la tendencia global ante la interacción entre dos elementos atómicos de éste. Su uso principal está destinado al planteamiento de estrategias de decisión donde éstas se toman en base a criterios de economía de coste (monetario o por tiempo de viaje o distancia recorrida).

Su funcionamiento está basado en la teoría de colas, asumiendo condiciones estacionarias y continuas, o lo que es lo mismo, que todos los vehículos del modelo se encontrarán en movimiento y no se producirán las discontinuidades que un embotellamiento o cuello de botella pueda causar. Esta apreciación, si bien no es exacta y los propios resultados que se puedan extraer del modelo así lo terminan corroborando, sí que es bastante aproximada y puede comprobarse con una convergencia de los resultados reales y del modelo a tiempo infinito. En cualquier caso, su aplicación debe centrarse en redes no demasiado grandes y siempre considerando un error de posible modelado, causado por la sensibilidad de éste a los detalles microscópicos, al tamaño del área de estudio y al tiempo de evaluación considerado.

Finalmente, los modelos mesoscópicos representan un término medio entre los dos anteriores: no se centra en el análisis de una situación o sistema predefinido en el que una serie de integrantes debe desenvolverse, sino que hace hincapié en el análisis de esos elementos como un grupo, en cómo reaccionan entre ellos. Para hacerlo, se sirven de una definición con gran detalle de los elementos intervinientes, pero simplificando su comportamiento e interacciones.

Para conseguir este nivel intermedio de procesamiento, estos modelos agrupan los vehículos en bloques para procesarlos como una única entidad que discurre por la red modelada siguiendo un patrón definido de velocidad-densidad (como si fuesen una unidad dinámica) pero prescindiendo de los patrones de desplazamiento longitudinal (Wiedeman) y lateral (cambio de carril) que sí que procesa un modelo microscópico.

3.2 Modelo de tráfico seleccionado.

En el caso del trabajo aquí presentado, el objetivo de éste tiene tres aspectos primordiales que deben cubrirse:

- Desarrollar un entorno virtual en el que poder representar una situación de tráfico saturado o en vías de saturación en el que identificar las dinámicas del tráfico que pasa de *flujo libre* a un modelo de *car-following*. Según Wiedeman (y como se ve en la *Figura 5*), éstas son: *uninfluenced driving, closing process, following process, mínimum safety distance* y *stationary vehicles*.

  Dentro de esas dinámicas de desplazamiento longitudinal, exceptuando la primera, se encontrarán los fenómenos previamente descritos de *bottleneck*, *breakdown* y *capacity drop* que se pretende identificar y prevenir. Igualmente, llegado ese punto de *breakdown*, cobra especial importancia el análisis de los desplazamientos laterales de los vehículos intervinientes en el modelo.

- Estudiar la implementación de un conjunto de sistemas de gestión del tráfico y estudiar su viabilidad y eficacia ante las situaciones de estudio.

- Evaluar la posibilidad de establecer una estrategia de control que aglutine esos sistemas con un orden lógico y efectivo con el fin de poder identificar, anticipar y reaccionar ante los procesos que van asociados a una caída o estancamiento en la capacidad de la sección de estudio.

Tanto el primero de estos puntos, la intención de modelar las dinámicas longitudinales y laterales de los vehículos que circulan por un tramo de autopista, como la aspiración de desarrollar un sistema de identificación y control eficaz de situaciones que impliquen una pérdida de dinamismo del flujo evaluado (lo que hemos llamado anteriormente capacidad y nivel de servicio), hacen pensar en que la elección del modelo pasará por aquella tipología que sea capaz de centrarse en el vehículo como unidad atómica e inseparable a tratar. De esa forma, un modelo macroscópico no se presenta como la opción más adecuada para este caso.

En cuanto a la decisión entre los dos restantes, microscópico o mesoscópico, la decisión se fundamenta en el tamaño del ámbito de estudio. Para el presente ejercicio, que versa en torno a la formación de cuellos de botella causados por una reorganización del flujo del tráfico en un cambio de sección en una autopista, el nivel de detalle y lo acotado de la dimensión a considerar llevan a la elección de un modelo microscópico.

Por el contrario, si se decidiese estudiar el comportamiento del tráfico en un conjunto espacial mayor, como pudiese ser una sucesión de cambios de sección transversal, diversas entradas y salidas de vehículos o, incluso, la consideración de los dos sentidos de la circulación para una toma de decisiones de más amplio espectro, en ese caso sí que se podría evaluar el optar por un modelo mesoscópico

Por lo tanto, se va a implementar un modelo microscópico de una sección de autopista para estudiar el flujo de tráfico en su cambio de régimen de libre a saturado y, mediante la implementación de distintos sistemas de control, se va a analizar cualitativamente las diferencias en la dinámica que cada una por separado o varias en conjunto y secuencialmente ofrecen sobre éste.

3.3 Software de simulación.

Dentro de los software microscópicos existentes en el mercado se ha contactado con diversas empresas desarrolladoras para poder obtener información acerca de sus productos y valorar la posibilidad de obtener una licencia para estudiantes con la que desarrollar el presente trabajo.

La elección del software ha sido el programa Vissim de la empresa PTV:

https://www.ptvgroup.com/en/products/ptv-vissim/

Se trata de un entorno de simulación microscópica en el que a los elementos atómicos dentro del modelo se les asignan patrones de comportamiento tanto individual como de grupo, lo que permite representar diversos tipos de vehículos y las interacciones entre ellos. Para conseguirlo, el programa tiene dos subsecciones que procesan separadamente esa información:

- Por un lado, se procesarán las características tanto del flujo de tráfico como las de la morfología de la infraestructura/sección de estudio. Esto incluye:

    - ✓ Características morfológicas y dinámicas de los vehículos: tipología, longitud, velocidad máxima y aceleraciones/deceleraciones máximas.

    - ✓ Características conductuales de los vehículos: velocidad deseada de circulación, umbrales de percepción de los conductores y dinámica de los vehículos adaptada a éstos.

    - ✓ Geometría de la vía mediante la concatenación de enlaces y conectores.

    - ✓ Definición de elementos auxiliares y de señalización tales como detectores, regulaciones semafóricas, señales de prioridad y velocidad, etc.

- Por otro lado, se gestionará el comportamiento individualizado de los vehículos presentes en el modelo en cada instante de simulación, sus interacciones y sus decisiones. Para ello, el software tratará de manera individualizada la dinámica longitudinal del vehículo sirviéndose del modelo de Wiedeman basado en la distancia con el vehículo precedente y le añadirá la componente transversal que gestiona los movimientos laterales a lo ancho de la sección basándose en distancias de anticipación, número máximo de vehículos bajo interacción, etc.

El modelado de cualquier escenario pasará por la definición física del entorno en el que se produce (infraestructura y superestructura), la definición de unos inputs que utilicen el modelo y el ajuste de los parámetros conductuales que rigen el comportamiento de esos elementos activos. A partir de esa base,

se puede valorar la optimización, ampliación o descarte de elementos en base a una corroboración/refutación de premisas iniciales.

3.4 Modelado del trazado.

Como caso de estudio se ha decidido plantear una tramo de autopista en el que, debido a sucesivas reducciones en el número de carriles, se produce forzosamente la necesidad de una reordenación del flujo del tráfico cobrando especial importancia parámetros ya anunciados como el de *bottleneck*, *permeabilidad*, *car-following*, *breakdown* y *capacity drop*.

Para ello, se seguirán los pasos enunciados por Dervisoglu ya mencionados en el epígrafe 2.2.1.

Los cuellos de botella se producen, en la mayoría de ocasiones, por dos factores: un trazado con incorporaciones, trenzados o reducción en el número de carriles o por la perturbación del flujo del tráfico por la interacción de unos vehículos con otros, generalmente debido a un vehículo más lento. Ambos fenómenos no son independientes y existe una clara interrelación entre el primero y el segundo.

De cara a abordar un modelo que permita representar un escenario en el que se puedan evaluar (al menos académicamente) todos esos conceptos, poder desarrollar métodos de control del tráfico que sean efectivos y abordables, comparar sus resultados sobre éste e integrarlos en una estrategia de control fundada, se ha optado por la selección de un trazado de autopista en el que se aúnen, por un lado, los efectos de la incorporación de vehículos más lentos con una reducción en el número de carriles de la sección, favoreciendo de esa manera la formación no sólo de un cuello de botella físico y fijo (el de la reducción del número de carriles) si no la de cuellos de botella móviles causados por los propios vehículos en movimiento buscando adaptarse a la situación cambiante.

3.5 Escenarios reales.

El modelo se ha planteado como una simplificación de una serie de tramos de autopista reales diseminados por la geografía española y que, dada su especial disposición y su muy concurrido uso son ampliamente conocidos por la gran parte de los conductores, que en multitud de ocasiones discurren por ellos y, recurrentemente, pueden llegar a “sufrir” la inclemencias ocasionadas por su saturación puntual:

- Por un lado, en la salida de Madrid (zona de Ciudad Universitaria y Puerta de Hierro), se encuentra el tramo de la A-6 que enfila la cuesta del Hipódromo de la Zarzuela, mostrado en la *Figura 35*. Dicho tramo, entre los PK 7 y 9, es uno de los más concurridos y difíciles de la entrada y salida a la Capital y concurre, por un lado, una reducción en el número de carriles (tanto en sentido salida como en el de entrada) al reorganizarse los flujos de tráfico que circulan por la mencionada A-6, los que entran y salen de la autopista de circunvalación M-30 y los que entrarán o saldrán de la capital por la carretera de la Dehesa de la Villa. Esa reorganización de carriles y adición/sustracción de flujos (se considerará el sentido salida, que sólo añade) se ve complementada con la presencia de un carril *Bus-VAO* cuya entrada se encuentra al inicio de dicha cuesta, aligerando el tráfico con una sección extra de dos carriles hasta Las Rozas (salidas 18-19).

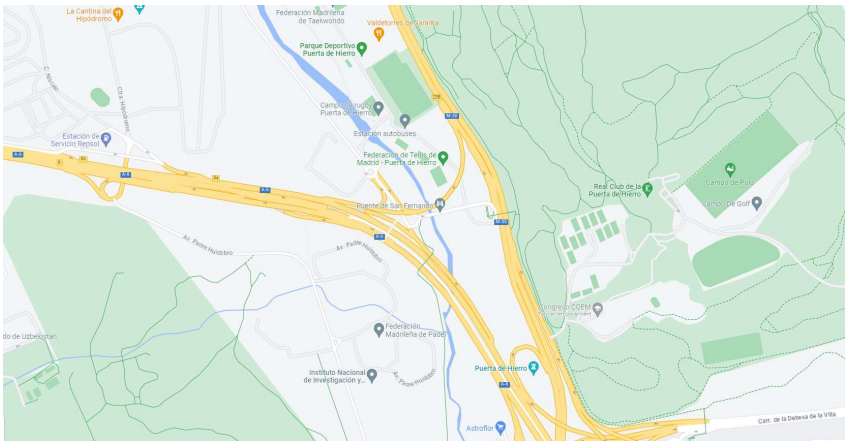


Figura 35: Salida de Madrid por la A-6 a la altura del Hipódromo de La Zarzuela (Google Maps, 2023).

- En esa misma carretera, se ha considerado el tramo de la AP-6 entre los PK 47 y 51 (sentido Noroeste), en el término municipal de Guadarrama (Madrid), mostrado en la *Figura 36*. En este tramo se produce la división de las dos calzadas de la citada autopista en tres y, a continuación, se adecúa el número de carriles por calzada (se reducen) para afrontar la penetración del accidente orográfico por los túneles homónimos (siempre hay un túnel en servicio para cada sentido de circulación y se habilita el tercero en un sentido u otro según el volumen de tráfico). Esta ruta es de especial importancia para la comunicación tanto de turismos como de vehículos de transporte entre la Capital, la Meseta Norte y la Costa Atlántica.

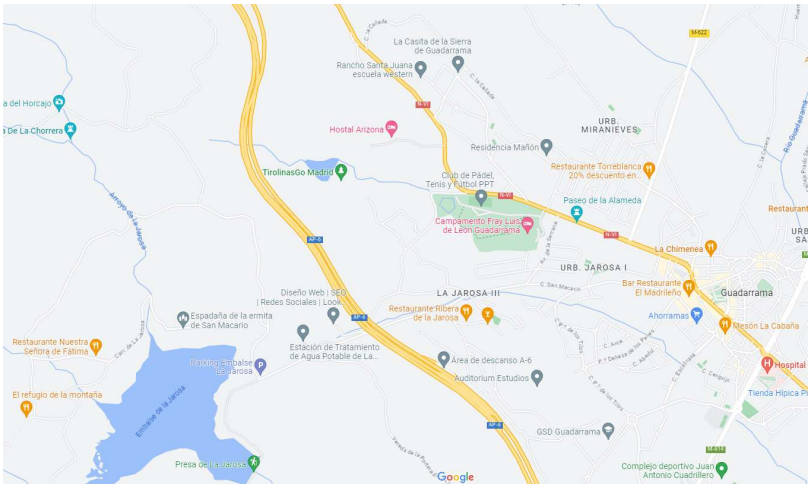


Figura 36: Tramo de la AP-6 en el acceso Sur a los Túneles de Guadarrama (Google Maps, 2023).

- Igualmente, el tramo de la AP-7 comprendido entre los PK 254 y 258 (sentido Sur) en los términos municipales de Vilaseca y Salou (Tarragona) presenta un estrechamiento con pérdida de un carril de circulación a la altura de la salida 35, (ver *Figura 37*). Con ocasión de operaciones salida fin de semana desde la Ciudad Condal y, sobre todo, en época estival con un enorme volumen de vehículos de turistas extranjeros en tránsito a regiones costeras del Levante y el Sur español, hacen que dichos vehículos se unan al enorme flujo de vehículos pesados en ruta transportando gran parte de la producción agrícola y fabril de las mencionadas zonas a destinos europeos y viceversa, generando enormes colas y disminuciones en los niveles de servicio de la vía.

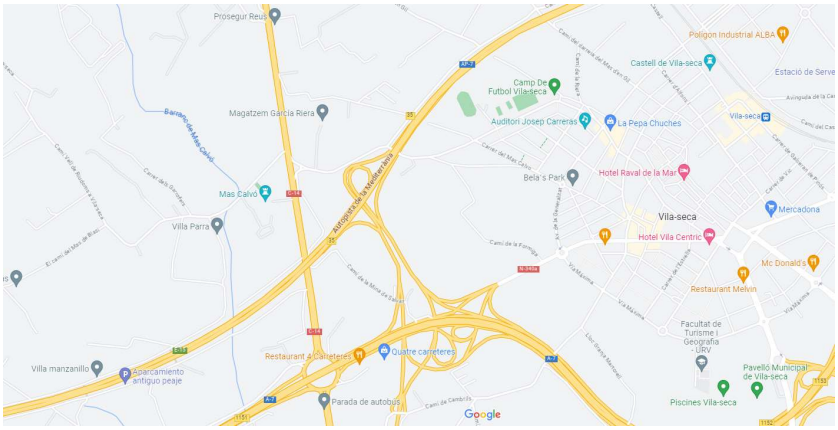


Figura 37: Tramo de la AP-7 entorno a la Salida 35, Vilaseca-Salou (Google Maps, 2023).

Combinando ambos dos ejemplos, se ha procedido a imaginar una autopista periurbana (en un entorno llano) de tres carriles de circulación en el que se produce una incorporación y una reducción en el número de carriles (sería el caso inspirado en la salida de Madrid por la A-6 y en la AP-7) y, a la vez, existe una calzada extra que se puede habilitar según el estado del tráfico (como el carril *Bus-VAO* de la A-6 o el tercer Túnel de Guadarrama).

3.6 Geometría de la vía.

Se ha tomado como referencia la Instrucción de Carreteras, Norma 3-1 IC "Trazado" (Orden FOM/273/2016), en lo referente a la sección transversal y geometría en alzado de las transiciones y camios de carril para implementar la geometría de la sección planteada.

Por un lado, se han tenido en cuenta las consideraciones referentes a la sección transversal recogidas en la *Tabla 4*,tanto la anchura de carril tipo como los arcenes a plantear en la vía, para una velocidad de proyecto de 120 km/h.

TABLA 7.1

DIMENSIONES DE LA SECCIÓN TRANSVERSAL

CLASE DE CARRETERA	VELOCIDAD DE PROYECTO (V_p) (km/h)	ANCHO (m)				NIVEL DE SERVICIO MÍNIMO EN LA HORA DE PROYECTO DEL AÑO HORIZONTE
		CARRILES	ARCENES		BERMAS (MÍNIMO)	
			INTERIOR / IZQUIERDO	EXTERIOR / DERECHO		
Autopista y autovía	140, 130 y 120	3,50	1,00 / 1,50	2,50	1,00	C
	110 y 100	3,50	1,00 / 1,50	2,50	1,00	D
	90 y 80	3,50	1,00	2,50	1,00	D

Tabla 4: Sección Transversal según Norma 3.1 I-C (MITMA, 2016).

En lo referente al trazado longitudinal, se ha tenido en cuenta tanto la distancia mínima del carril de aceleración y la longitud de su cuña de transición al finalizarse (ver *Figura 38*) como la distancia mínima entre pérdidas de carril en un tronco de autopista (*Figura 39*):

FIGURA 8.1

CARRILES DE CAMBIO DE VELOCIDAD

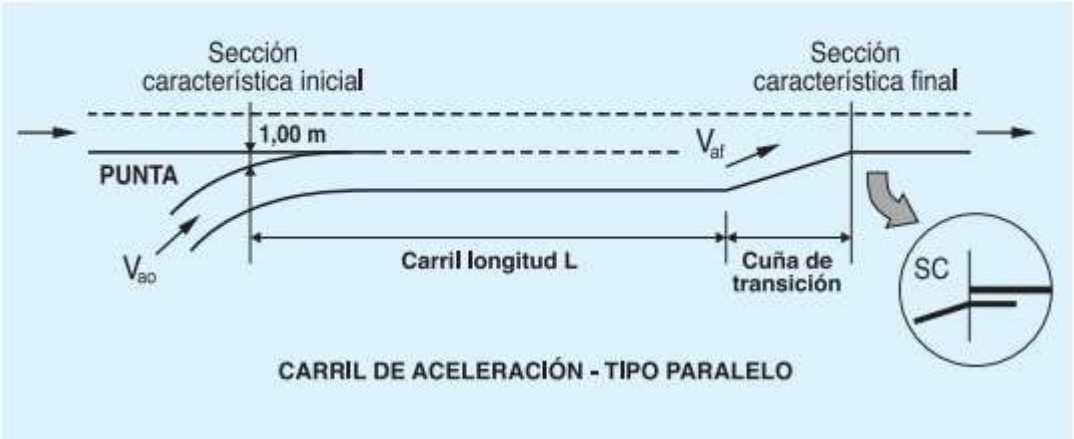


Figura 38: Carril de incorporación tipo paralelo según Norma 3.1 I-C (MITMA, 2016).

FIGURA 8.9

CONFLUENCIA POR LA DERECHA CON DISMINUCIÓN DEL NÚMERO DE CARRILES UTILIZANDO CARRILES DE ANCHO CONSTANTE

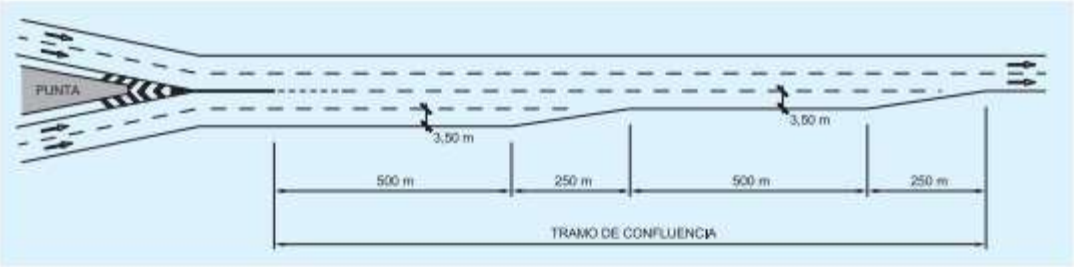


Figura 39: Disminución del número de carriles por la derecha según Norma 3.1 I-C (MITMA, 2016).

En lo referente a este último parámetro, la distancia entre pérdidas de carril, en el siguiente apartado se evaluará el efecto sobre el tráfico de cumplir con esta recomendación de la Instrucción de Carreteras.

3.7 Simulación del tráfico.

Para la simulación del tráfico, tanto en volumen como en composición, se han tomado como referencia los datos facilitados por el MITMA para los tramos considerados como referencia, recogidos en la *Tabla 5*:

Tramo: A-6	
Carretera	A-6
Tipo de carretera	Autopista libre y autovía
Provincia	Madrid
PK inicio	7+500
PK fin	9+070
Longitud	1.61
vh-km total	72,902,069
vh-km ligeros	70,793,108
vh-km pesados	2,108,962
IMD total	123,718
IMD ligeros	120,139
IMD pesados	3,579

Tramo: AP-6	
Carretera	AP-6
Tipo de carretera	Autopista de peaje
Provincia	Madrid
PK inicio	42+060
PK fin	47+380
Longitud	5.35
vh-km total	70,366,280
vh-km ligeros	61,858,336
vh-km pesados	8,507,944
IMD total	35,936
IMD ligeros	31,591
IMD pesados	4,345

Tramo: AP-7	
Carretera	AP-7
Tipo de carretera	Autopista libre y autovía
Provincia	Tarragona
PK inicio	258+500
PK fin	265+580
Longitud	8.60
vh-km total	75,233,939
vh-km ligeros	51,979,469
vh-km pesados	23,254,470
IMD total	23,902
IMD ligeros	16,514
IMD pesados	7,388

Tabla 5: Tráfico registrado en 2020 en los tramos tomados como referencia (MITMA, 2020).

Obviamente, si se toman los valores de referencia las IMD a 24 horas, tomando los valores horarios como constantes, se incurriría en un error ya que la distribución del tráfico no es la misma de madrugada que en hora punta. Por ello, y como el objetivo del presente trabajo es estudiar la influencia de los vehículos pesados en un tráfico en autopista cargado, se ha decidido tomar el porcentaje de pesados del caso de la AP-7 (aprox. 30%) y jugar con la capacidad del tráfico del modelo planteado,

tomando como referencia que un estándar de capacidad aceptado es el de 2.000 vehículos ligeros por hora y carril para este tipo de vía.

Igualmente, se va a considerar que, dentro de los vehículos pesados, existen dos grupos, uno más rápido que otro (aproximadamente en una relación 2:1) para, en parte, simular el efecto de la orografía del trazado, pues cuan más sinuosa sea, mayor efecto sobre la dinámica de los vehículos pesados tendrá y, por lo tanto, mayor afectación tendrá sobre el conjunto del tráfico. Esta distinción podría simular, por ejemplo, la diferencia entre vehículos pesados y camiones articulados y/o de gran tonelaje. Como se verá más adelante, se considerarán velocidades de circulación diferentes para ambos.

Finalmente, también se debe tener en cuenta la proporción del tráfico que circula por el tronco de la autopista y el que se incorporará por la entrada simulada, pues esa incorporación se realizará a velocidad más reducida que la de los vehículos y, conforme ocupa un carril (el de la izquierda) primero y el central después, irá entorpeciendo poco a poco el flujo del tráfico.

3.8 Modelo de simulación.

3.8.1 Definición geométrica.

El modelo diseñado en Vissim tiene la forma mostrada en la *Figura 40*:

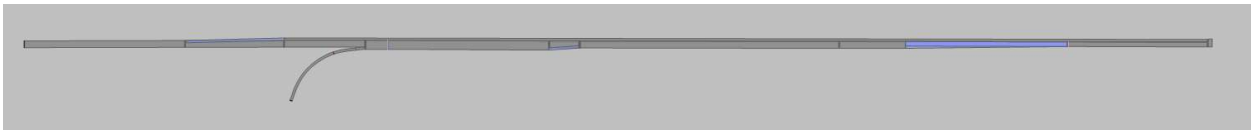


Figura 40: Modelo de vía en PTV Vissim .

Se trata de un tronco de autopista interurbana de tres carriles por sentido en el que existe una incorporación desde una vía aledaña y, seguidamente, existe una reducción de tres a dos carriles por sentido. Igualmente, y como se verá más adelante, se plantea el uso de un carril adicional estilo *VAO, carril reversible* o *shoulder lane*, que se activaría o no en función de la situación del tráfico.

Esta configuración es bastante común en ámbitos periurbanos en los que se pasa de una autopista de vía urbana a una de tráfico abierto o, ya fuera de las ciudades y su periferia, en aquellos tramos en los que debido a la orografía existen estructuras de obra civil tales como puentes, viaductos o túneles que limitan el trazado de la vía.

Detalladamente, cuenta con los siguientes elementos:

- Tronco principal de 3 carriles de 3.5 metros de anchura, con suficiente longitud (250 metros) para poder llegar a los elementos en los que el trazado y la sección transversal intervienen en el discurrir del tráfico (*Figura 41*):

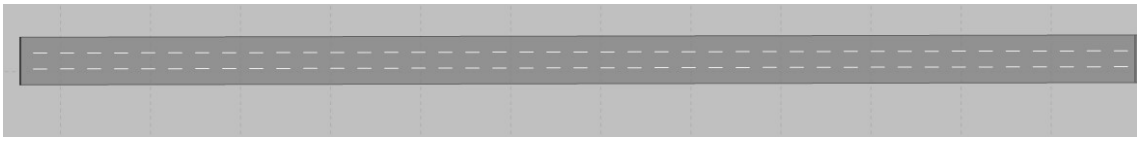


Figura 41: Detalle del trazado en PTV Vissim . Tronco principal.

- Carril extra de descargo con activación automática (*Figura 42*):

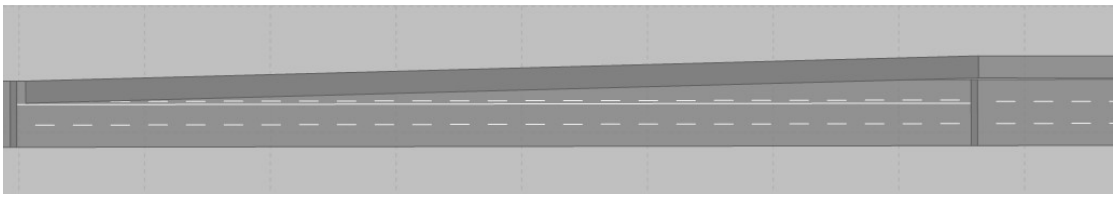


Figura 42: Detalle del trazado en PTV Vissim. Carril extra.

Para la calzada suplementaria se ha propuesto un único carril de 3.50 metros de anchura en el que la velocidad está limitada a 90 km/h.

- Ramal de incorporación con carril de aceleración terminado en cuña, respectando lo dispuesto en la Norma 8.1-IC (*Figura 43*):

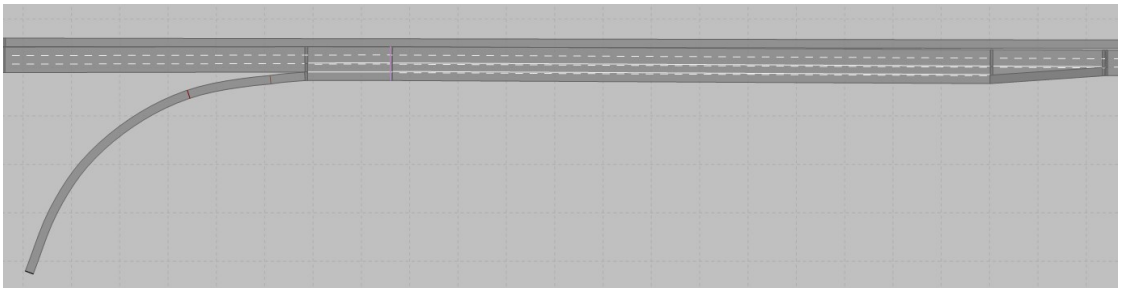


Figura 43: Detalle del trazado en PTV Vissim . Ramal de incorporación.

La velocidad de incorporación por el ramal se encuentra recomendada (que no limitada) a 60 km/h debido a la pronunciada curva que forma.

- Sección de confluencia de carriles con distancia mínima (L=500 metros, según lo dispuesto en la Norma 8.1-IC) antes de ejecutar la segunda pérdida de un carril (*Figura 44*):

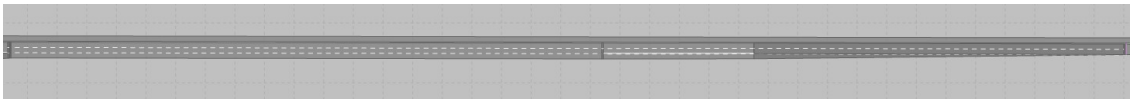


Figura 44: Detalle del trazado en PTV Vissim . Confluencia de carriles.

Mencionar que igualmente se ha probado con un modelo con L=350 metros, obteniendo resultados de tráfico más saturado y menos fluido, tal y como se verá en el siguiente capítulo.

- Tramo final y unión de los flujos (*Figura 45*):

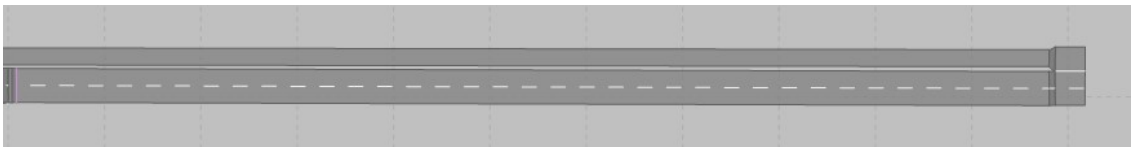


Figura 45: Detalle del trazado en PTV Vissim . Tramo final.

Como apunte adicional, el tronco de la autopista se encuentra limitado a 120 km/h para turismos, 90 km/h para vehículos pesados y 70 km/h para pesados de gran tonelaje.

Otra consideración importante es la referente a los conectores y transiciones incorporados en el modelo (unión entre distintos links, transiciones con cambios en la sección, etc.). Se han configurado para ser tenidos en cuenta por los conductores con una antelación de 500 m, garantizando un tráfico lo más fluido y pausado posible, tal y como se ha dejado establecido en la sección de *Lane Change* de cada link (*Figura 46*):

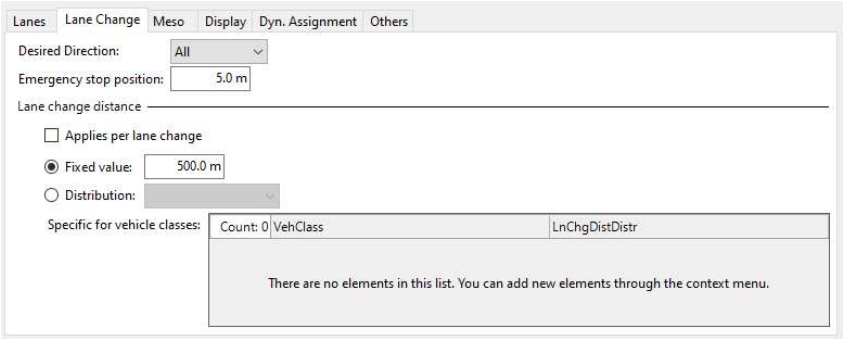


Figura 46: Detalle del parámetro "Lane Change Distance" en PTV Vissim.

3.8.2 Definición de los comportamientos de los vehículos.

En la sección de *Driving Behaviors* de PTV Vissim, se pueden configurar los parámetros que rigen el comportamiento de los conductores según varios modelos preestablecidos y con varias opciones en cuanto a distancias consideradas, número máximo de vehículos con los que se considera interactuando a la vez, vigilar los carriles adyacentes, avanzarse a la siguiente decisión de ruta, etc…

En el caso del modelo desarrollado, se han considerado dos de los *Driving Behaviors* ofrecidos por el programa por defecto:

- Para la sección aguas arriba de la incorporación y aguas debajo de la segunda reducción de carril, así como para el vial extra se ha seleccionado el *Right-Side Rule (motorized)*, que está calibrado para que los vehículos circulen por el carril de la derecha siempre que sea posible.

- Para la sección que va de la incorporación a la desaparición del tercer carril del tronco se ha seleccionado el *Freeway (free lane selection)*, que permite a los conductores situarse en el carril que más les convenga en función del destino y la velocidad prefijada para ellos.

Ambos dos *Driving Behaviors* mencionados se basan en un modelo Wiedeman 99 con unos parámetros de seguimiento en cuanto a distancias y dinámicas iguales, tal y como se ve en la *Figura 47*:

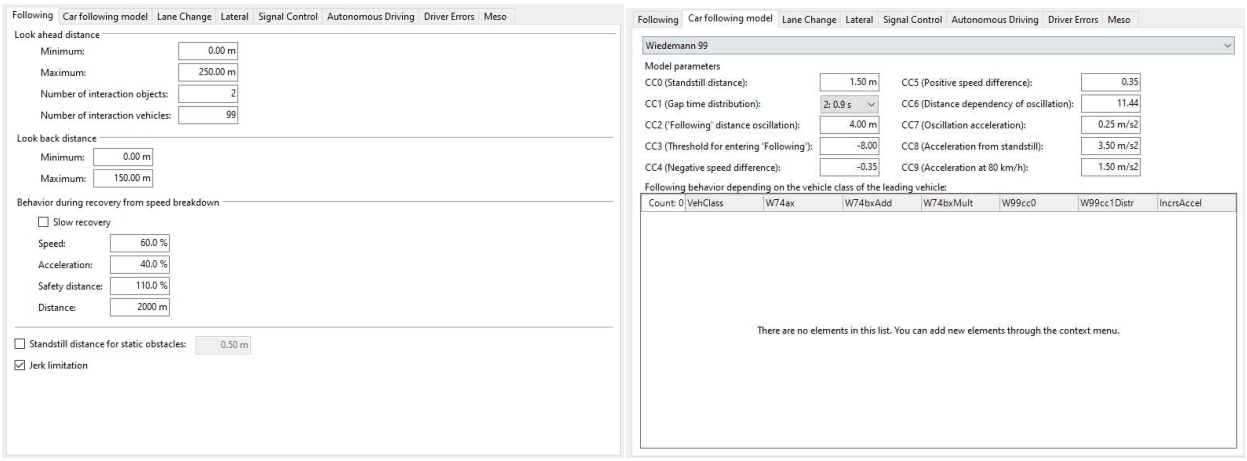


Figura 47: Detalle de la configuración "Following" (izquierda) y "Car following model" (derecha) en PTV Vissim .

Más adelante, cuando se traten las opciones que las *Vehicle Infraestructure Integration* (VII) y los enjambres de vehículos conectados o *swarms* ofrecen a la gestión del tráfico se volverá sobre estas dos configuraciones específicas.

En lo referente a los cambios de carril e interacción con los vehículos que circulen en ellos, sí que existen diferencias. Además, en ambos casos, se han habilitado las opciones de *observe adjacent lane(s)*, *advanced merging* y *consider next turn* para hacer del modelo más real y fluido, asimilando el comportamiento de los vehículos del modelo al real que un conductor tendría en la autopista. Esta configuración específica se muestra en las *Figuras 48 ("Right-side rule") y 49 ("Freeway")*:

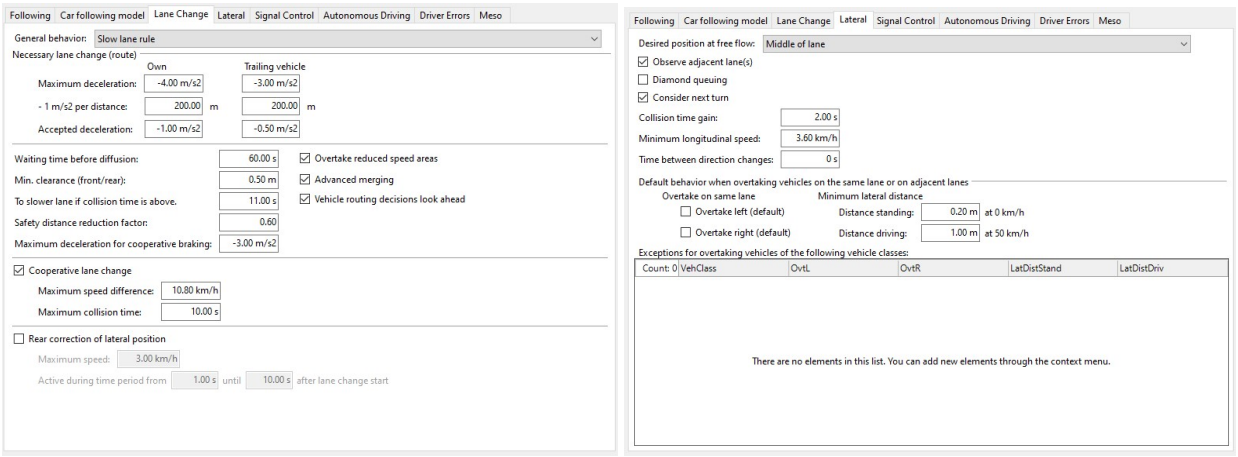


Figura 48: Detalle de la configuración "Lane change" (izquierda) y "Lateral" para "Right-side rule (motorized)" (derecha) en PTV Vissim .

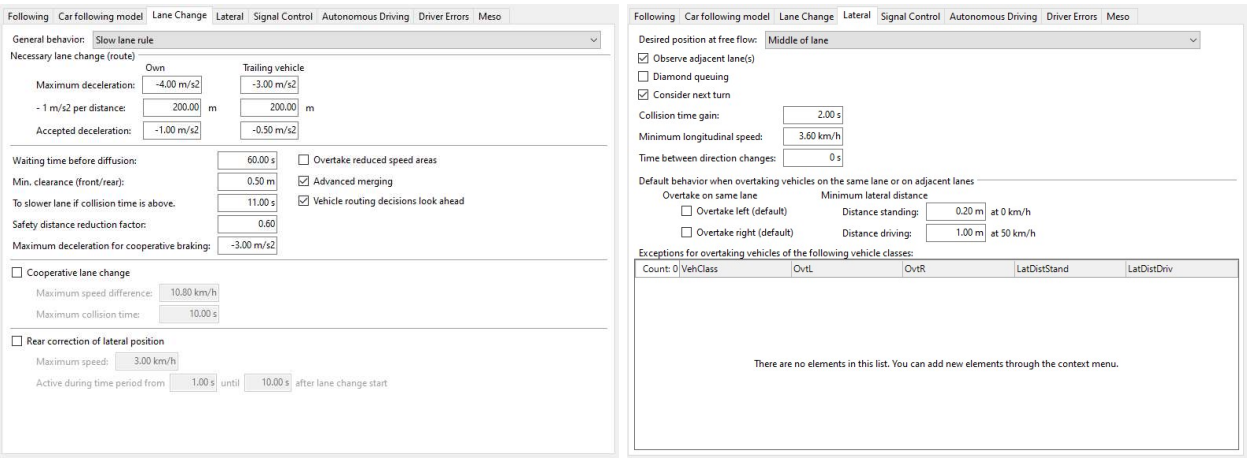


Figura 49: Detalle de la configuración "Lane change" (izquierda) y "Lateral" para "Freeway (free lane selection)" (derecha) en PTV Vissim .

3.8.3 Definición de la composición del tráfico.

Partiendo de lo enunciado anteriormente y con los datos de tráfico de los tramos, se ha procedido al modelado y se ha buscado la obtención el punto de *breakdown* que marque el nivel de saturación del tronco considerado. Para ello, se ha considerado un periodo de simulación de 1 hora dividido en intervalos de 300 segundos (5 minutos).

En todos los casos, se ha considerado la siguiente relación entre tipos de vehículos:

Count: 3	VehType	DesSpeedDistr	RelFlow
1	100: Car	120: 120 km/h	0.690
2	200: HGV	90: 90 km/h	0.210
3	201: HGV_low	70: 70 km/h	0.100

Tabla 6: Detalle de la composición del tráfico por tipología de vehículo y velocidad prefijada.

Partiendo de estos datos, y tras sucesivas simulaciones, se han llegado a dos puntos de trabajo y estudio que corresponden con dos situaciones: una que va cargando el tráfico del tronco hasta llegar al punto de *breakdown* y a continuación comienza a descargarlo. Y una segunda en la que se pasa el punto de *breakdown* y se continúa incrementando el flujo de vehículos para comprobar cómo se produce el *capacity-drop* del tronco. Con ambas situaciones, el objetivo sería estudiar el comportamiento del tráfico sin ningún tipo de control activo, ver cuánto de efectivo sería el implementar una serie de sistemas de control del tráfico y desarrollar una técnica de control que, tomando como algoritmos los desarrollados por separados, articule una estrategia de control efectiva y robusta para afrontar la saturación del flujo de tráfico en la sección de estudio.

Esas distribuciones para los dos escenarios corresponden con los siguientes valores (*Tabla 7*):

Time (s)	Tráfico sin saturar		Tráfico saturado	
	Tronco (veh/h)	Ramal (veh/h)	Tronco (veh/h)	Ramal (veh/h)
0-300	1500	500	1500	500
300-600	1600	600	1700	600
600-900	1700	500	1900	500
900-1200	1800	600	2100	600
1200-1500	1900	620	2300	620
1500-1800	2000	625	2500	625
1800-2100	2100	630	2600	630
2100-2400	2000	620	2700	620
2400-2700	1900	600	2800	600
2700-3000	1800	550	2900	550
3000-3300	1700	500	3000	500
3300-3600	1600	450	3100	450

Tabla 7: Detalle de la distribución horaria de vehículos para los dos puntos de trabajo elegidos.

4. ESTRATEGIAS DE CONTROL DEL TRAFICO.

Para la gestión del tráfico se han desarrollado los siguientes métodos en PTV Vissim y/o su herramienta de gestión de señalización VisVAP.

Vissim permite no sólo el modelado de infraestructuras de transportes para vehículos y viandantes sino la implementación de sistemas de gestión de los usuarios de la red modelada. Para ello, ofrece diversas opciones:

- Elementos preconfigurados como señalización fija, semáforos, *Ramp Meterings* o parámetros de la conducción (relacionados con el comportamiento).

- Posibilidad de introducir programación scripts en VBasic que modifiquen uno o varios parámetros del modelo y de sus elementos, mediante la opción de *Attribute modifications*.

- La herramienta VisVAP, que dota de una interfaz gráfica para acometer lógicas y secuencias programadas con un entorno visual.

- La utilidad VissimCOM como herramienta de integración con otros entornos de programación, como pueden ser MATLAB o Phyton, que permite acceder y gestionar desde ellos a variables del modelo.

En el presente trabajo y a lo largo de los dos siguientes capítulos se van a desarrollar métodos de control del tráfico que cubran las tres primeras opciones de las enumeradas.

4.1 Calzada extra.

Se trata de un carril de descargo cuya entrada se encuentra aguas arriba de la incorporación modelada y su final se encuentra al final del tramo modelado.

Para su representación, se han generado dos *partial routes* dentro del modelo: ambas nacen en la sección inicial del tronco considerado, y mientras que una continua por él hasta llegar al final, la segunda se desvía por el carril adicional, tal y como se aprecia en la *Figura 50*:

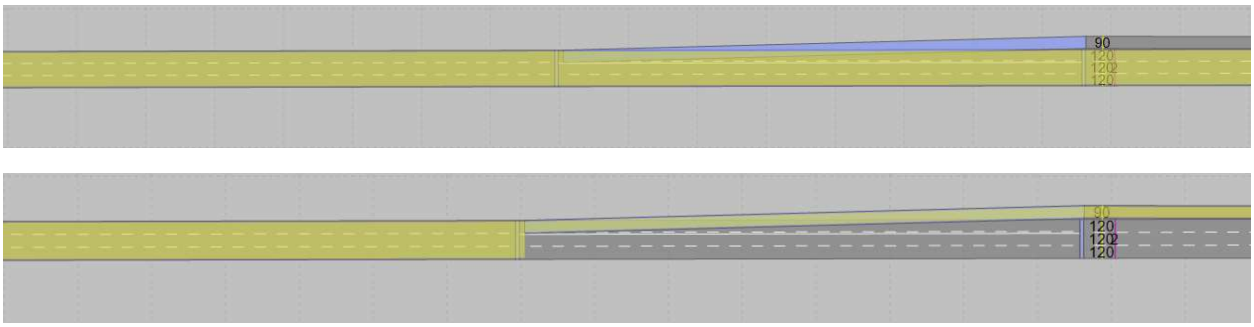


Figura 50: Partial routes generadas para la gestión del carril extra en PTV Vissim.

Así pues, sólo hace falta un algoritmo de control que regule cuándo se debe abrir el carril y qué proporción de vehículos se desviarán por el en caso de abrirse. Para ello, se ha implementado una secuencia en VisVAP que evalúa cada 5 minutos mediante cuatro estaciones de aforo situadas de forma paralela (justo en el punto de enlace entre el tronco de la autopista y el ramal de incorporación) el valor acumulado de vehículos que han pasado en ese periodo. Con ese dato, si supera un valor de *Q_ON* se abrirá durante los siguientes 5 minutos el carril extra; si por el contrario, 5 minutos después, el valor acumulado cae por debajo de *Q_OFF*, se cerrará el carril extra. El secuencia de funcionamiento se aprecia en la *Figura 51*:

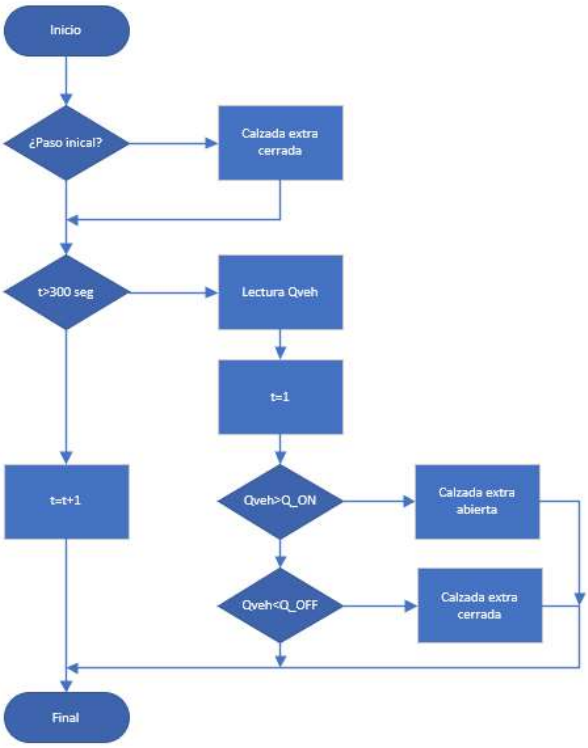


Figura 51: Secuencia de gestión de la calzada extra.

En cuanto a la proporción de vehículos que pasan al carril adicional, se ha estimado que al tener el tronco inicialmente 3 carriles y ser el carril adicional uno (1) extra, la proporción de vehículos que se desvían es 1:3, si bien el valor es ajustable y podría llegar a plantearse incluso un cálculo que lo modificase en función de las condiciones reales del tráfico en cada momento. Dicho relación se puede definir con el tercer parámetro del comando *Set_route* (los dos primeros corresponden con el número de *partial route* declarada y el itinerario seleccionado dentro de ella, respectivamente), tal y como se puede apreciar en la parte inferior derecha de la *Figura 52*:

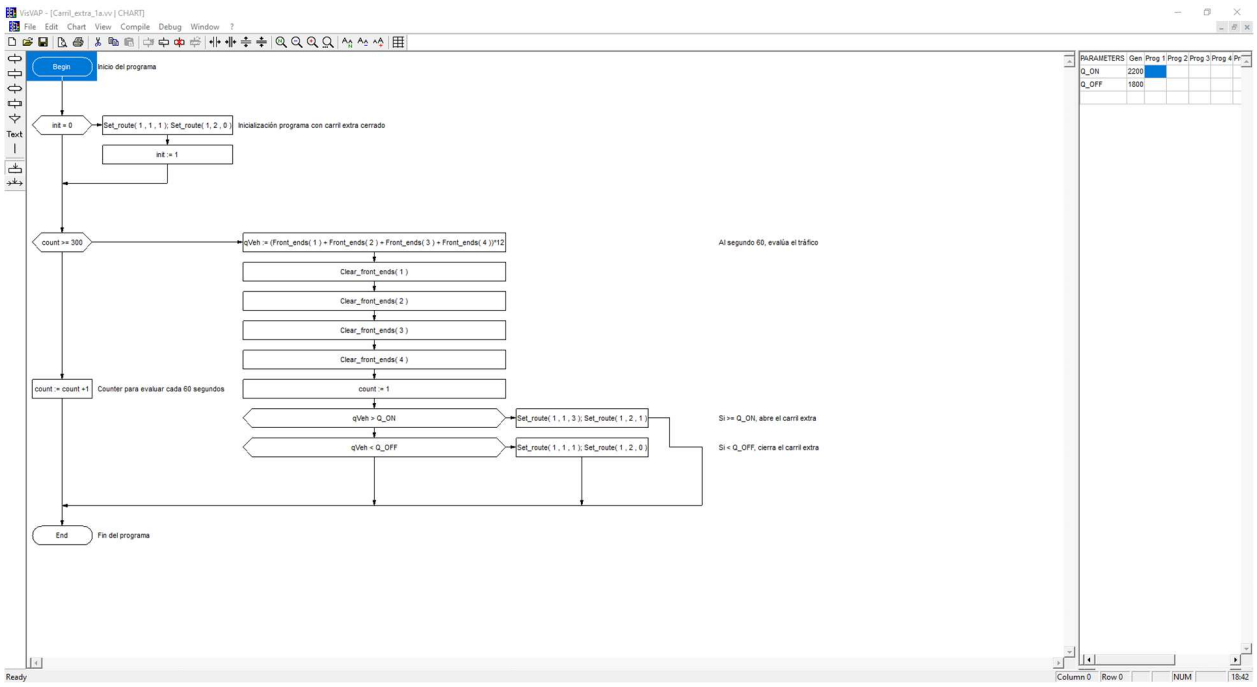


Figura 52: Secuencia de gestión del carril extra en VisVAP

Con la disposición de un carril o de una calzada extra se permite crear una vía de desagüe para el flujo del tráfico en situaciones de o cercanas a la congestión. Para su implementación, existen varias alternativas, como se aprecia en la *Figura 53*. Por un lado, tendríamos los carriles extra creados por la delimitación con conos de nuevos carriles en el mismo sentido o en sentido contrario a la dirección donde se vayan a ejecutar, que coincidirían con los dos casos de la parte superior de la Figura; por el contrario, existiría una segunda posibilidad que sería la modificación de la infraestructura para crear carriles reversibles (en el caso que nos atañe, el de una autopista, serían calzadas extras y segregadas) que pudiesen ser alternativamente usadas por un sentido de la circulación o por el contrario, tal y como se aprecia en las imágenes inferiores de la *Figura 53*. En cualquier caso, de nuevo, al tratarse de una autopista, la opción más viable pasa por realizar la calzada segregada, ya que si bien implica un desembolso extra en términos de construcción y gestión de la infraestructura, dota a ésta de mayores índices de seguridad y confort para sus usuarios.

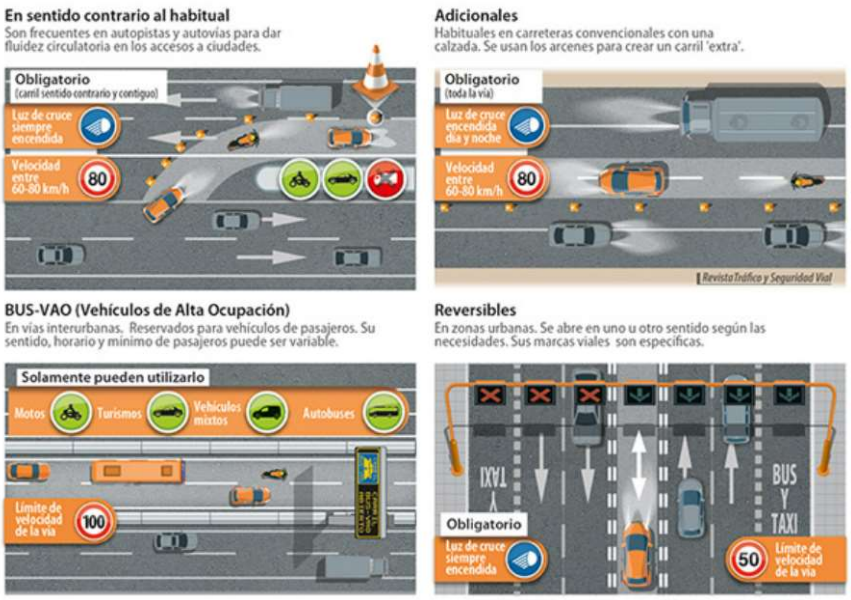


Figura 53: Ejemplos de carriles anti-atascos (DGT, 2016).

4.2 Gestión de carriles.

Continuando con la idea de las *partial routes* del método anterior, se ha desarrollado un método de gestión de carriles del propio tronco (sin tener en cuenta el efecto de la calzada extra) que identifique los momentos en los que la incorporación de vehículos por el ramal de acceso a la autopista supere un valor determinado para, en ese momento, canalizar el flujo que circula por el tronco por los dos carriles de la izquierda.

El objetivo que se persigue con esa acción es liberar el carril derecho del tronco para facilitar la incorporación y la ganancia de velocidad de los vehículos que entran en el tronco y, así, poder afrontar ordenadamente y en condiciones lo más iguales posibles en lo referente a la velocidad, su ingreso en los dos carriles de la izquierda conforme al estrechamiento de la calzada. Mediante ese propósito se conseguiría que los movimientos laterales de reordenación de los vehículos no implicasen (o si lo hacen, que lo hagan en una menor medida) una perturbación del tránsito de los vehículos que circulen por el carril adyacente.

La estructura del programa, diseñado igualmente en VisVAP, se basa en dos *partial routes* para los vehículos que ya estaban en el tronco de la autopista y, mediante una secuencia a repetir cada 5 minutos y con sendos valores *Q_ON* y *Q_OFF* de activación, redirige el flujo por las *partial route* según una proporción predefinida (estimada inicialmente en 1:2 considerando que no todos los conductores suelen hacer caso de este tipo de señalización), tal y como se aprecia en les *Figuras 54* (flujograma) *y 55* (detalle en VisVAP):

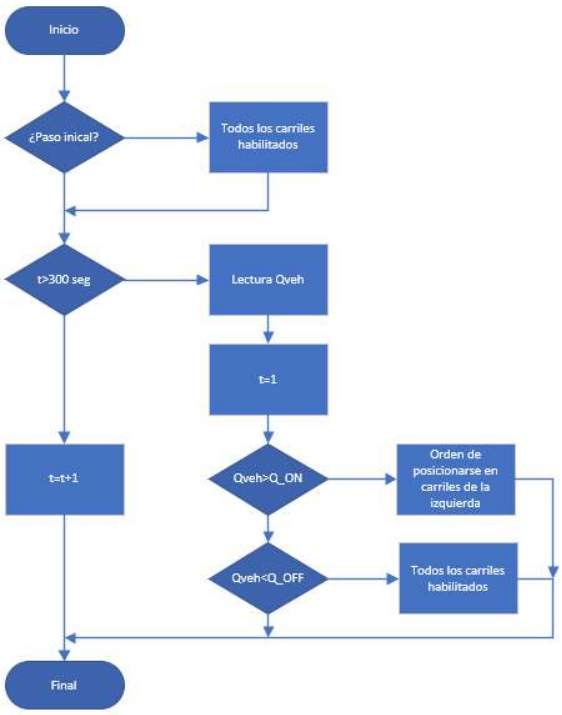


Figura 54: Secuencia de gestión de los carriles del tronco de la autopista.

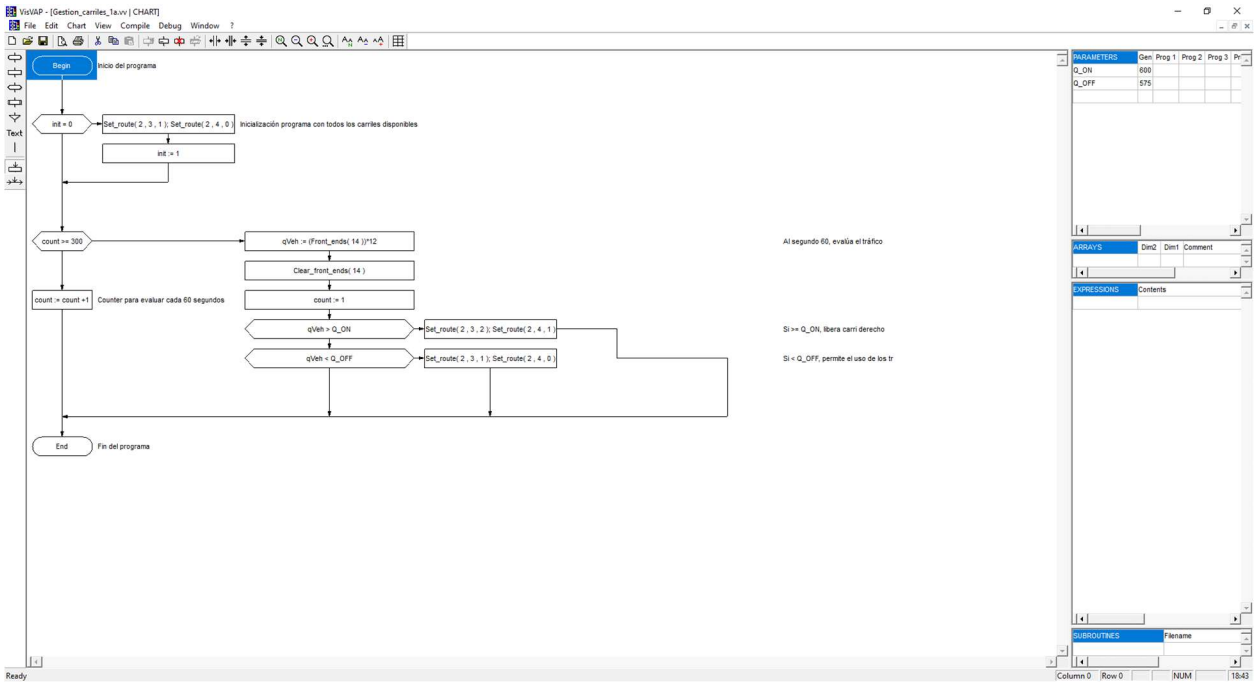


Figura 55: Secuencia de gestión de los carriles del tronco de la autopista en VisVAP.

Para la implementación de este sistema basta con instalar paneles de señalización variable como los mostrados en la *Figura 56* y cada vez más habituales en nuestras carreteras. De hecho, estos mismos paneles pueden ser igualmente utilizados para otros sistemas de gestión del tráfico como el VSL que más adelante se enunciará.



Figura 56: Ejemplos de señalización variable. (Fixalia, 2023).

4.3 Ramp Metering.

El sistema de *Ramp Metering* es un sistema de control del tráfico que consiste en evaluar la cantidad de vehículos tanto aguas debajo de una incorporación como en el propio acceso, con el fin de regular la cantidad de vehículos que ingresan en el tronco para tratar de evitar superar la capacidad total de éste.

Para ello, el sistema consta de estaciones de aforo en ambas calzadas y de un semáforo en la incorporación que regula el paso según un algoritmo que tiene en cuenta la capacidad del tronco, tal y como se muestra en la *Figura 57*:

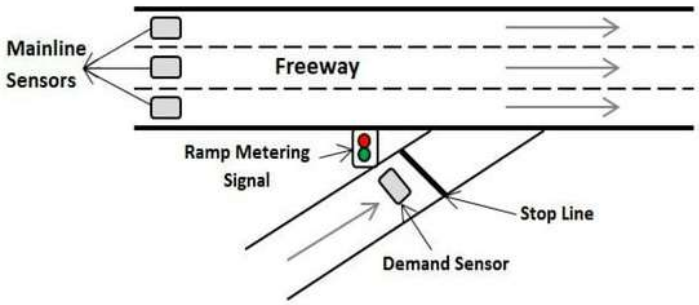


Figura 57: Esquema de funcionamiento de un sistema de Ramp Metering (Ghanbartehrani, 2020)..

Para la definición en PTV Vissim de esta estrategia de control se ha elegido configurar el propio algoritmo que viene incluido en el programa, que usa el algoritmo ALINEA, el cual y opcionalmente permite incluir un segundo algoritmo de detección y disipación de colas en el ramal de acceso causadas por el semáforo instalado. La ventana que permite introducir los parámetros requeridos en esta utilidad se muestra en la *Figura 58*:

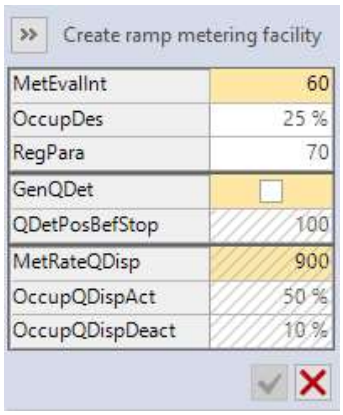


Figura 58: Detalle de la configuración de un Ramp Metering en PTV Vissim.

Todos estos parámetros son usados por el algoritmo de ALINEA, que calcula el número de vehículos que hay en la sección considerada con la siguiente expresión:

$$Q(k) = Q(k-1) + (A(k) - D(k)) \qquad (3)$$

Donde *Q* es la capacidad , *A* el número de vehículos que llega a la incorporación y *D* los que han salido en el ciclo anterior, todo calculado en cada ciclo *K*.

Así pues, definiendo un porcentaje de ocupación sobre la capacidad de la vía deseado (parámetro *OccupDes* en Vissim), se puede comparar con el obtenido mediante proporción directa del valor del algoritmo con la capacidad máxima de la vía, actuando así sobre la señal lumínica del semáforo.

4.4 Variable Speed Limit.

Igualmente, se ha implementado un sistema de velocidad variable a lo largo de toda la sección, considerando cuatro grupos de tres señales lumínicas (una por carril) que distinguen entre vehículos ligeros, pesados y pesados lentos, de apariencia similar al mostrado en la *Figura 59*. El primer grupo se encontrará situado justo después de la bifurcación al carril de descarga, el segundo justo después de la unión con el ramal de incorporación, el tercero tras la desaparición de su carril de aceleración, y el cuarto justo antes de la reducción a dos carriles. Aguas abajo de ésta se encontrarán señales de limitación de velocidad fijas con los valores preestablecidos para la vía, una vez el flujo de descarga ya está canalizado y alejado de las restricciones físicas del trazado.



Figura 59: Ejemplo de señalización de velocidad variable (Servei Català de Trànsit, 2017)..

El sistema basa su funcionamiento en tres detectores de lazo situados en el tronco de la autopista y aguas arriba de la pérdida del tercer carril, justo antes de la línea discontínua-contínua que marca el inicio de esa transición. Su localización se aprecia en la parte izquierda de la *Figura 60*. Se ha elegido ese punto ya que es el punto de inicio del *bottleneck* donde los conductores que no se hayan desplazado a los carriles de la izquierda deberán comenzar a hacerlo, reduciendo su velocidad si es necesario y entorpeciendo pues el tráfico, antes de quedarse sin espacio físico para ejecutar el cambio de carril y verse obligados a detenerse, lo que sería todavía peor para la fluidez del tráfico.

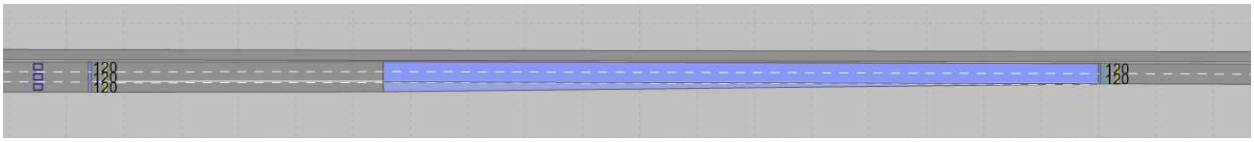


Figura 60: Disposición de los detectores de lazo del sistema VSL.

Explicándolo según el modelo de Kerner enunciado en el segundo capítulo (ver *Figura 12*), mediante el registro de la velocidad de los vehículos ligeros en ese punto se puede determinar la velocidad mínima que tendría el flujo sincronizado que pasa el obstáculo físico y, de esa manera, se podría adaptar la de los vehículos que se van acercando a ese punto para evitar o mitigar la formación de un potencial atasco móvil que tendería a crecer aguas arriba, saturando el tronco.

A partir de esos grupos de señales, se ha diseñado una secuencia en VisVAP que se aprecia en el flujograma de la *Figura 61* y funciona de la siguiente manera:

- Inicialización: establece de forma manual, tras el análisis del gráfico de Van Aerde en el mencionado punto, velocidades límite (*vxx_obj*) para los tres tipos de vehículos y valores iniciales para lecturas reales en los tres carriles (*vlig_n*).

- Secuencia de evaluación de la velocidad de los turismos, cada 5 minutos:

    - Registro de la velocidad del último vehículo ligero en los tres detectores del tronco. Si la velocidad de éste es superior o inferior en más de 20 Km/h a la lectura anterior, se deshecha la medida y se considera la última; si no, se guarda el valor.

- Cálculo de la media de las tres velocidades mencionadas.

- Reset del contador de tiempo.

- Comparación con el valor objetico previo (*vlig_obj*): si la velocidad media se encuentra 5 km/h por debajo del anterior objetivo, se reduce éste en 10 Km/h; si por el contrario es mayor, se aumenta en 10 Km/h siempre que no supere los 120 Km/h.

- Determinación de la velocidad objetivo de los pesados (*vhgv_obj*) en función de la de los ligeros previamente calculada.

- Determinación de la velocidad objetivo de los pesados lentos (*vhgvlow_obj*) en función de la de los ligeros previamente calculada.

- Comunicación de las tres velocidades objetivo (*vlig_obj*, *vhgv_obj y vhgvlow_obj*) a los paneles de velocidad máxima del tronco.

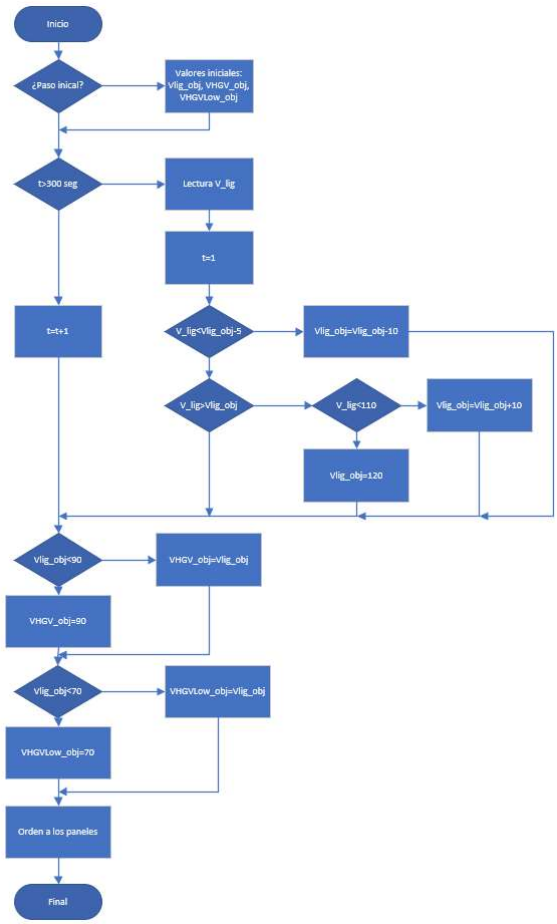


Figura 61: Secuencia de gestión de la velocidad máxima permitida en la sección de estudio. Sistema VSL.

De acuerdo con los 4 grupos de señales dispuestos a lo largo del trazado considerado, unido a los tres tipos de vehículos considerados y considerando que los paneles de velocidad variable considerados son carril a carril, se llega a que el sistema descrito debe actuar coordinadamente sobre 39 señales independientes correspondientes a los paneles de señalización variable. Esa acción que en el diagrama de la *Figura 61* se corresponde con una única acción final es, de facto, una concatenación bastante compleja, como se ve en la parte inferior de la *Figura 62*, la secuencia programada en VisVAP:

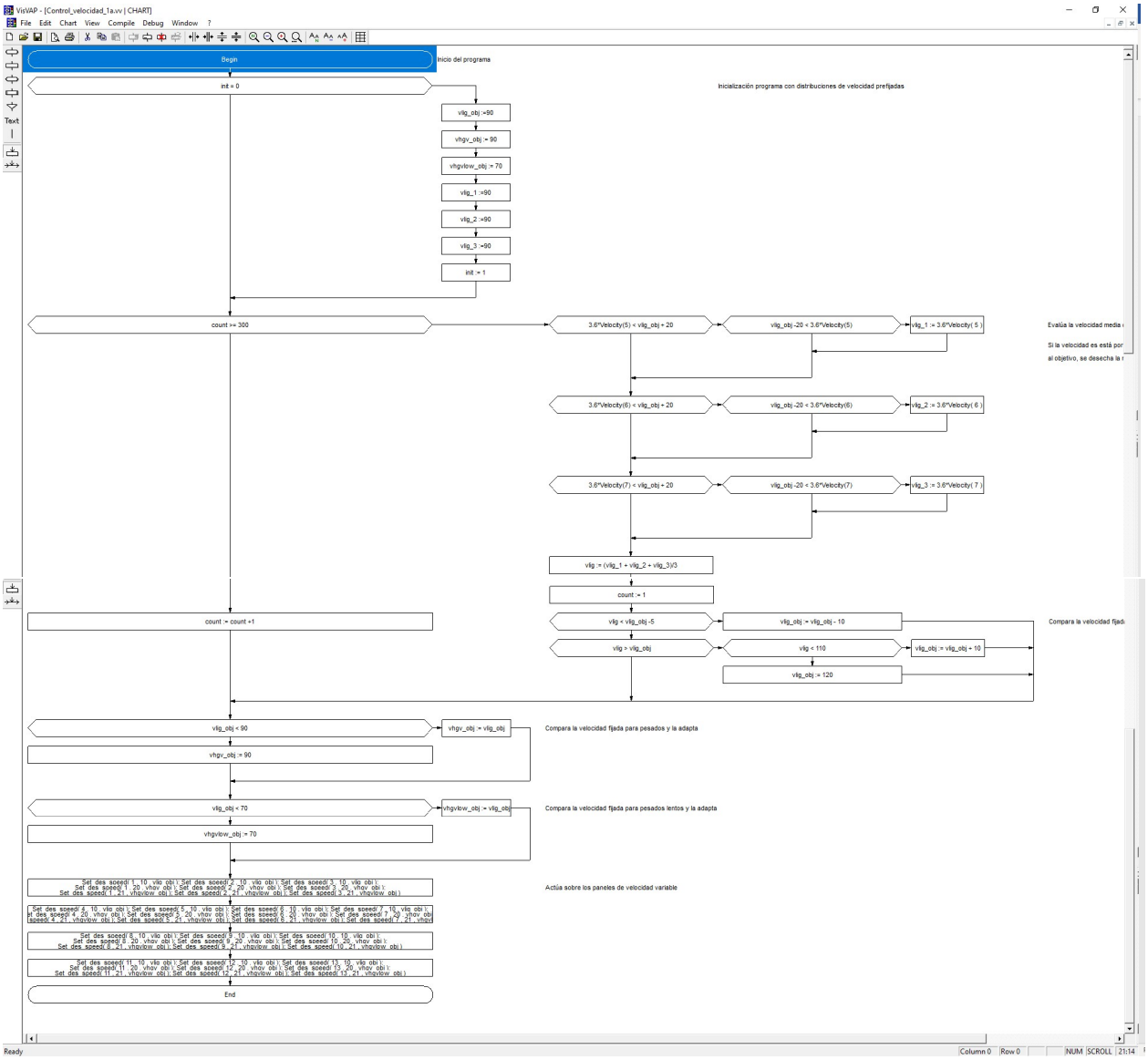


Figura 62: Secuencia del sistema de velocidad variable desarrollado en VisVAP.

Con el establecimiento de esos nuevos límites de velocidad basados en la velocidad real en la entrada del cuello de botella físico se persigue adaptar la velocidad de los vehículos en la sección a la mínima esperable con el fin de reducir al mínimo los *closing processes* de Wiedemann (alcances, en castellano) que las colas causadas por reorganización del flujo del tráfico pudiesen generar, evitando así una propagación del atasco aguas arriba del punto crítico.

4.5 Sistema de restricción de vehículos pesados lentos.

Igualmente, y haciéndonos servir de la herramienta *Attribute Modification* de Vissim, se ha implementado un script que evalúe el flujo de vehículos que pasan por el punto mencionado anteriormente (justo antes de la desaparición del tercer carril del tronco) para, si supera un cierto valor, restringir el uso de la vía por parte de los vehículos más lentos, en este caso los de la categoría *HGV_low* que serían los que se asimilarían a los camiones de gran tonelaje.

El script implementado basa su funcionamiento en una variable manipulada o *Target attribute*, que en este acaso es el *Relative Flow(201,70)*, es decir, la proporción de vehículos de clase 201 a 70 km/h (que son en el modelo creado los vehículos pesados lentos). Mediante una comparación del número de vehículos con un valor de 2500 veh/h, el script cambia el valor de ese flujo relativo para los dos (2) inputs de tráfico del modelo, el tronco y el ramal de incorporación. Con todo, el algoritmo queda configurado según la *Figura 63*:

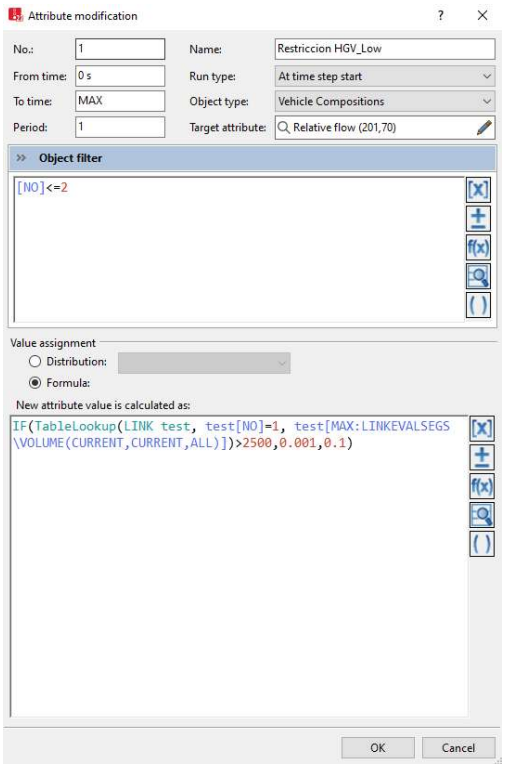


Figura 63: Script para restricción de vehículos pesados.

Esta medida, que habitualmente se toma en las vías de alta capacidad en operaciones de tráfico debido a grandes previsiones de viajes por carretera (verano, Semana Santa, puentes y acueductos, etc.) es bastante efectiva pues retira de la circulación vehículos cuya dinámica es sensiblemente peor que la del resto de usuarios de la vía (menor velocidad, menos capacidad de aceleración, mayor distancia de frenado…). Todo ésto hace que el flujo del tráfico se vea entorpecido al tener que esquivar estos obstáculos móviles, por no hablar de todas las colas que pueden causar si se cambian de carril por

adelantarse entre ellos o si tienen que enfrentarse ante un cambio fisionómico de la sección trasversal como es el caso del estrechamiento planteado en el modelo.

4.6 Resultados.

Para la obtención de los resultados de cara a su procesamiento y generación de informes, tendencias y conclusiones, se han utilizado las opciones de *Evaluation* de cada *link* o sección del trazado, habilitando únicamente los del *link* previo a la reducción de carriles ya mencionado y los de la calzada extra utilizada como medio de descargo.

Para el primer punto, se ha optado por segmentarlo cada 50 metros ya que los cambios de carril pueden ser frecuentes, siendo como siempre el más interesante el último de ellos y más cercano al cambio de sección pues será el primero en mostrar signos de saturación de la vía si se supera el punto de *breakdown*. Por el contrario, para el segundo, se ha optado por segregarlo cada 1000 metros, ya que al plantearse como una calzada única, el tráfico que por él circula está ya canalizado y sin posibilidad de adelantamiento, lo que implica dinámicas constantes puras que se ven regidas por el modelo de Wiedeman. Dicha habilitación y la longitud de la segmentación configurada se observa en la parte izquierda de la *Figura 64*:

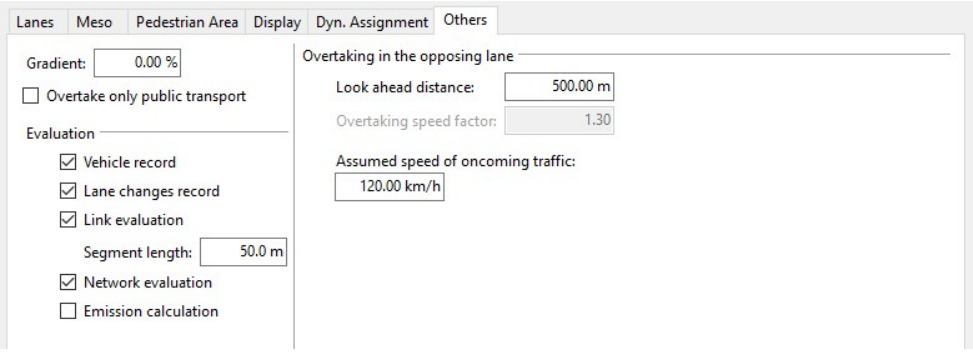


Figura 64: Detalle las opciones de "Evaluation" dentro de un Link en PTV Vissim.

Con las estadísticas de esos dos *links* habilitadas, en la sección de *Link segment results* se pueden seleccionar los parámetros a capturar una vez habilitada la evaluación del *link* (ver *Figura 65*): parámetros del flujo, retrasos respecto al escenario de *free flow*, consumo de combustible, emisiones, porcentajes de ocupación, costo por kilómetro, etc.

Para las simulaciones aquí planteadas, como lo más interesante es analizar el flujo con las gráficas que combinan capacidad, densidad, y velocidad, se ha optado por habilitar sólo éstas.

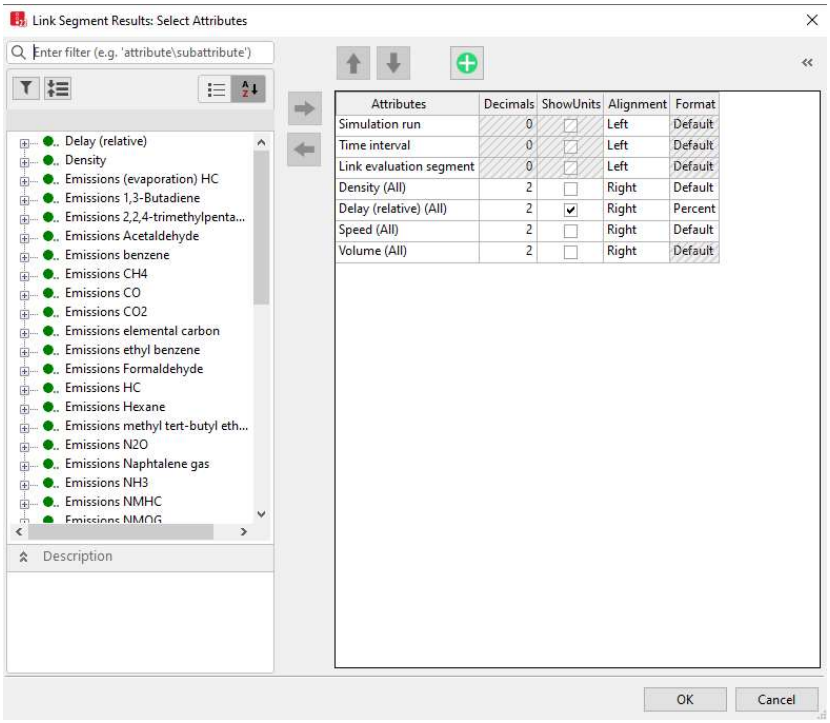


Figura 64: Detalle las opciones de Evaluation dentro de un Link en PTV Vissim.

Partiendo de esa información recogida en sendas simulaciones por separado, en el presente apartado se enunciarán los resultados obtenidos con cada uno de los métodos de control del tráfico implementados.

Dichos resultados se expondrán e interpretarán a partir de las tres gráficas siguientes, que permiten evaluar la situación de la vía en lo referente a la saturación:

- Gráfica capacidad-densidad, que relaciona el flujo (veh/h) que pasa por un punto del trazado con la densidad (veh/km) que existe en ese momento. Esta gráfica, como se observaba en las *Figuras 8, 9 y 10* del apartado segundo.

- Gráfica velocidad-densidad, que relaciona la velocidad (km/h) de los vehículos en esa sección con la densidad de ésta.

- Gráfica velocidad-capacidad, o gráfica de Van Aerde (ver *Figura 11*).

En los tres casos, la evaluación del tráfico se basa en evaluar las condiciones de la capacidad por la interpretación de sus pendientes y la identificación de los puntos en los que cambia de signo. Este mecanismo correspondería con los conceptos de *capacity-gain*, *breakdown* y *capacity-drop* ya enunciados con anterioridad.

Antes de evaluar el efecto de los distintos métodos aplicados, y como complemento a la comprensión de este mecanismo, se muestran las gráficas obtenidas en el modelo para un flujo de tráfico no regulado con los inputs enunciados en la *Tabla 7*.

En dicha *Tabla 7* se enumeraban dos distribuciones temporales de vehículos entrando en la sección de estudio para el periodo considerado. La primera de las distribuciones corresponde con una distribución no saturada del tráfico, es decir, un régimen en el cual un aumento de los vehículos que entran en la sección de estudio es absorbido perfectamente por ésta y no implica una pérdida de velocidad media del conjunto ni un aumento de la densidad circulatoria. Por el contrario, el segundo caso corresponde con una distribución saturada del tráfico, es decir, una situación en la que la vía no es capaz de asumir ese aporte de usuarios y los vehículos tienden a apelotonarse a lo largo del trazado, resultando en una bajada de nivel de servicio de la vida, de la velocidad media de los vehículos que en ella se encuentran y, por consiguiente, un aumento de los retardos en el tiempo de viaje de ese trayecto.

En primer lugar, en las *Figuras 65 y 66* se observan los resultados obtenidos para los tráficos no saturado y saturado respectivamente, considerando el modelo con una distancia de 500 m. entre pérdidas de carril como recomienda la IC.

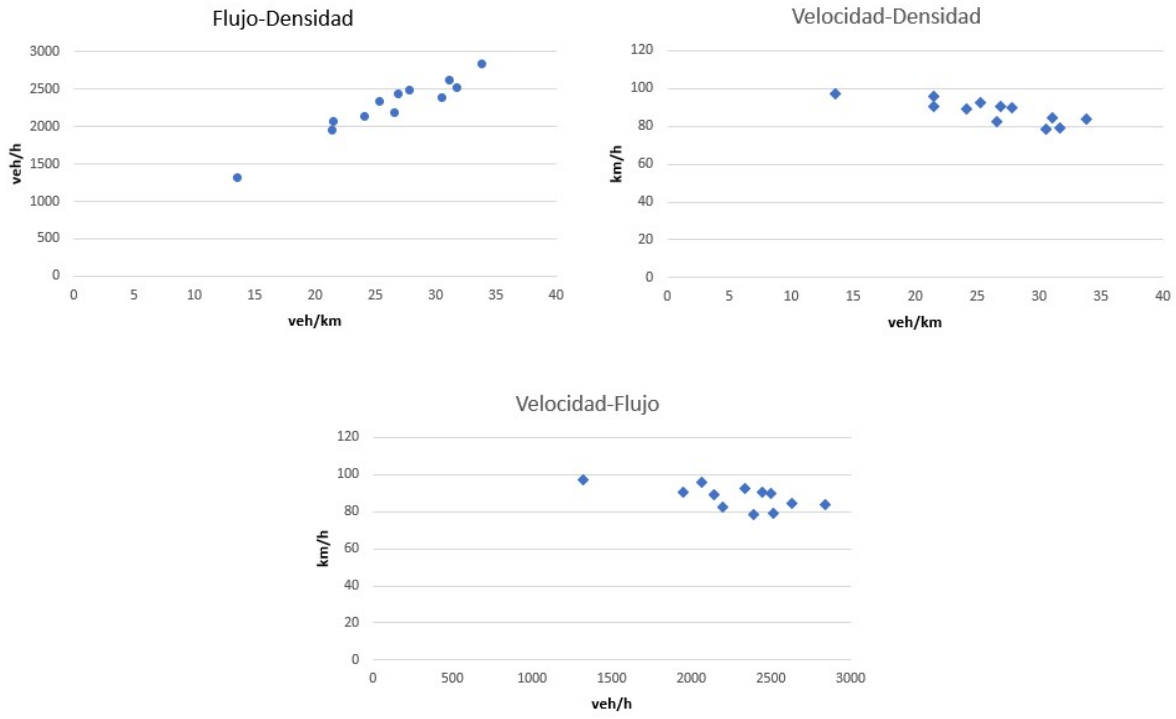


Figura 65: Simulación con tráfico no saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim.

Como se puede observar, en el primero de los casos (*Figura 65*) los 12 puntos representados (cada uno correspondiente a un intervalo de 5 minutos) se podrían asimilar a una formación rectilínea y elástica en las tras gráficas, siempre de pendiente aproximadamente constante. Ésto indicaría que estaríamos ante una situación de tráfico en la que se va ganando capacidad, es decir, la vía admite más vehículos por unidad de tiempo pero, como se puede ver con la ganancia de densidad y la pérdida de velocidad según se aumenta la capacidad, se va abandonando poco a poco el régimen de tráfico libre y se va cayendo en una situación de *car-following*.

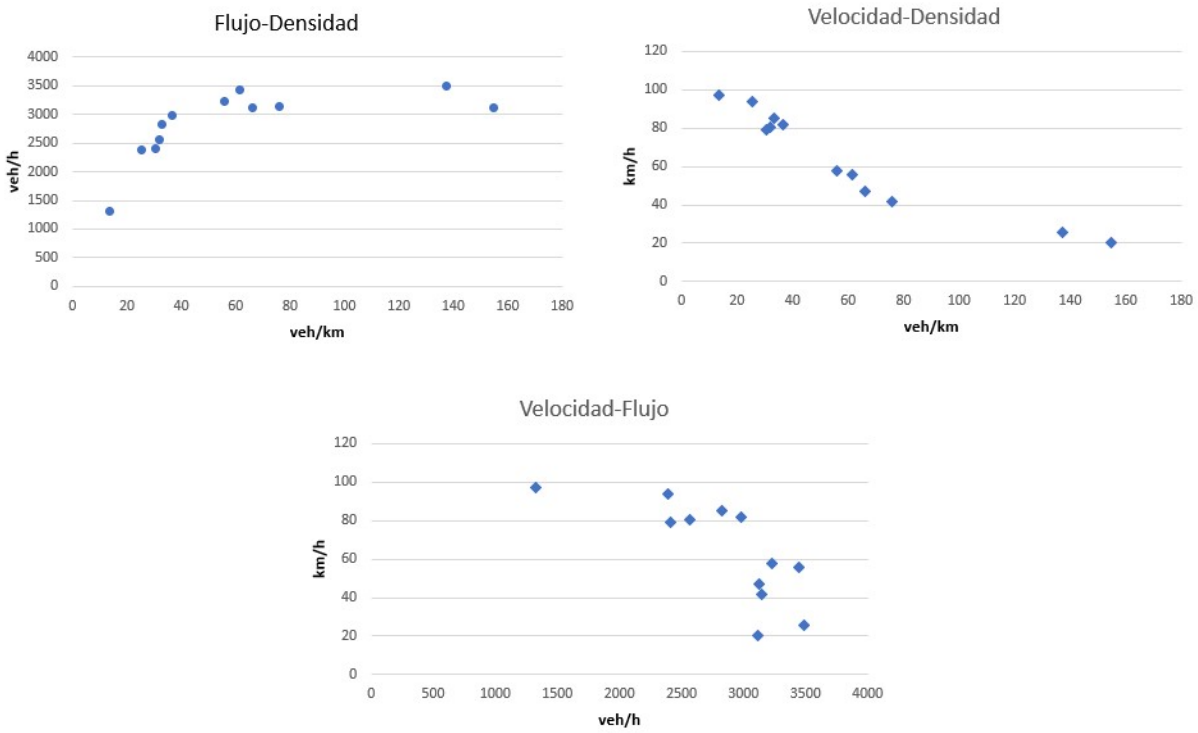


Figura 66: Simulación con tráfico saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim.

Por el contrario, en el segundo de los casos (*Figura 66*), al incrementarse el número de vehículos que transitan por el tramo evaluado se observa que no todos los puntos se pueden encuadrar dentro de una misma línea de tendencia pseudo rectilínea, sino que claramente existe un punto de inflexión o de *breakdown* aproximadamente en torno al punto de 3000 veh/h. En el primero de los gráficos (arriba, izquierda) se observa cómo a partir de ese punto la capacidad de la vía apenas crece, pero sí su densidad, que pasa de tener un comportamiento elástico hasta un valor de 40 veh/km y carril para, a continuación, entrar en un régimen plástico donde ésta no para de crecer sin apreciarse gran variación en el número de vehículos que pasan por la sección de estudio, que de hecho van poco a poco disminuyendo.

La explicación de este fenómeno podría estar de nuevo en la *Figura 12*, en la explicación dada por Kerner a ese punto de *breakdown*: aguas arriba del cuello de botella se va extendiendo poco a poco un atasco que va llenando la vía de vehículos apelotonados unos detrás de otros siguiendo escrupulosamente la velocidad del precedente (flujo sincronizado), como en una procesión. De hecho, esto sirve para introducir el comportamiento de la velocidad a partir de ese punto, que comienza a caer drásticamente desde los 80 km/h (20 por debajo de los primeros instantes con menos vehículos) pudiendo llegar, si la congestión continuase y siguiendo el modelo de Van Aerde, hasta prácticamente detener el flujo (abajo).

Comparativamente, el mismo modelo con los mismos inputs de vehículos, pero con una distancia entre pérdidas de carril de 350 metros presenta un comportamiento bastante menos satisfactorio desde el punto de vista de la fluidez.

En la *Figura 67* se puede observar cómo la misma distribución temporal del tráfico que no implicaba llegar al estado de saturación para el caso anterior, con una mayor distancia entre pérdidas de carril en el tronco, en esta ocasión sí que lo hace. En sí la capacidad de la vía no varía y está en torno a los 3000 veh/h (arriba, izquierda), pero el disponer de 150 metros menos entre pérdidas de carril hace que los vehículos deban redistribuirse hacia los carriles de la izquierda en menos espacio, lo que equivale a que, según va aumentando el tráfico y al tener menos facilidad para hacerlo, se vean obligados a reducir su velocidad para poder ejecutar los cambios de carril sin quedarse sin especio y tener que detenerse al final del carril de la derecha, lo que se aprecia con una caída drástiac de la velocidad en ese punto (abajo). O lo que es lo mismo, que cuando ingresen en el carril de su izquierda lo harán a menos velocidad entorpeciendo el tránsito de los vehículos que en ellos circulan, que se verán obligados a adaptar su velocidad y se apelotonarán en un tren que, poco a poco, se hará más lento hasta llegar a la situación de colapso (arriba, derecha)..

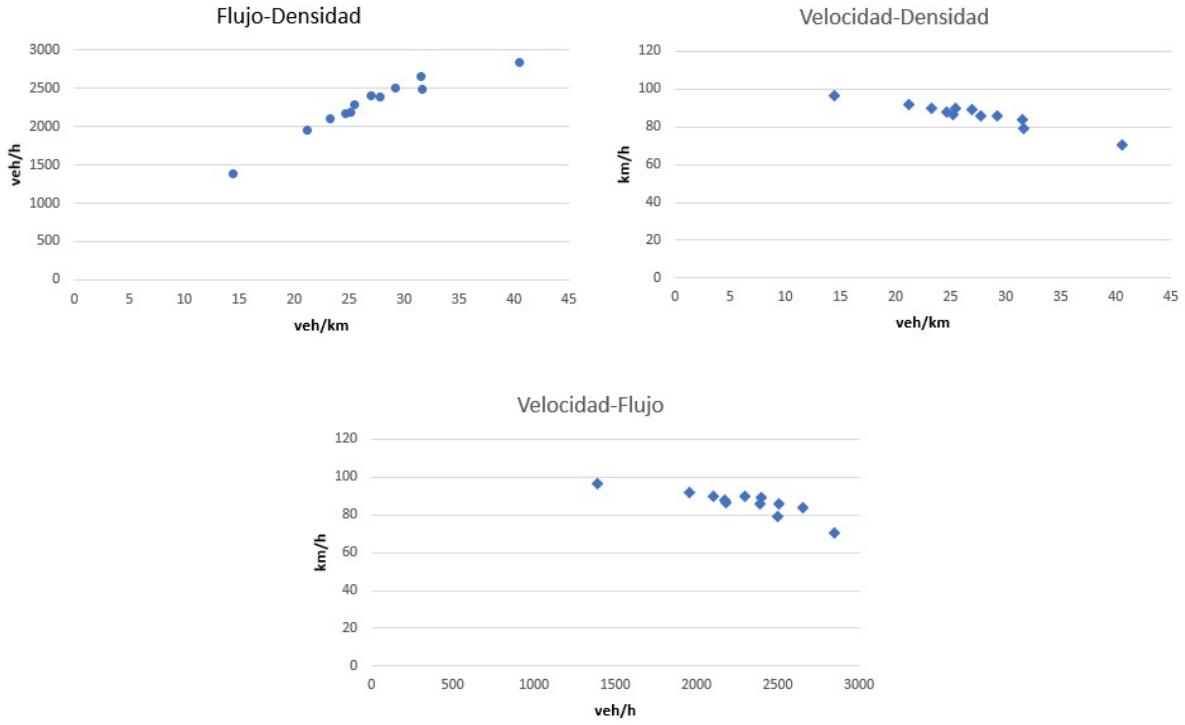


Figura 67: Simulación con tráfico no saturado y L=350 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim.

En el caso del input para tráfico saturado, en la *Figura 68* se apreciarían los mismos comportamientos descritos en la *Figura 66* pero más pronunciados, observando perfectamente como las tres curvas van mostrando lo que sería una forma genérica de ellas según lo visto en el Capítulo 2, o lo que es lo mismo, generan una situación de saturación de la vía bastante teórica.

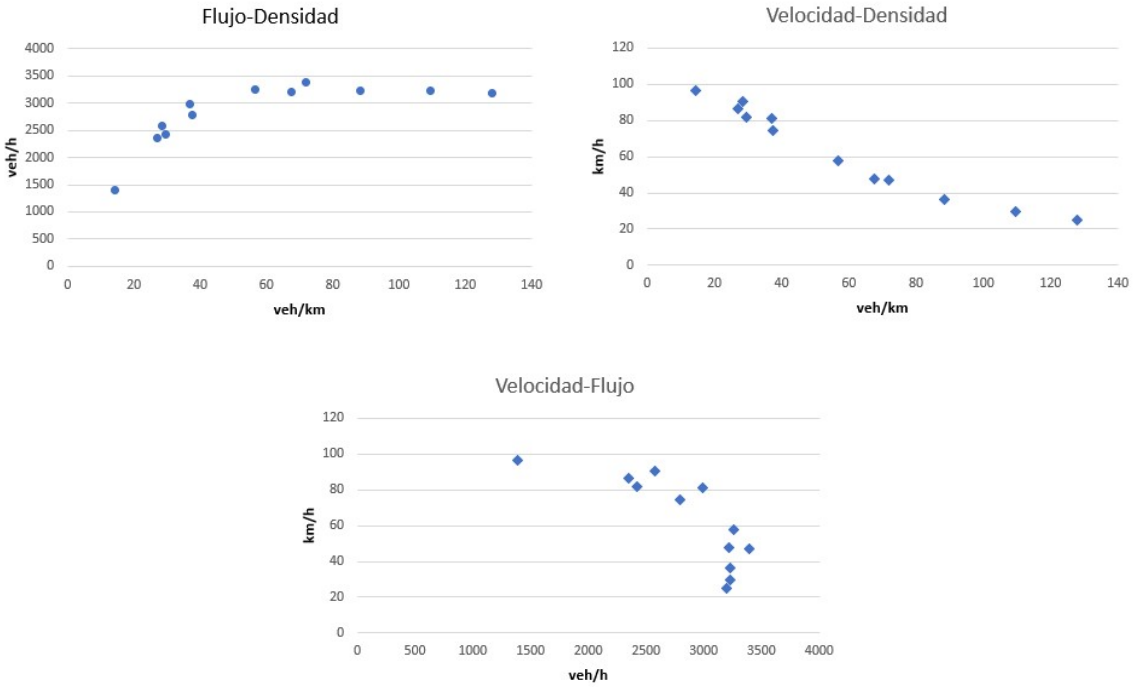


Figura 68: Simulación con tráfico saturado y L=350 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim.

En cualquier caso, viendo las diferencias entre ambos casos, queda clara la importancia de un buen planeamiento en fase de proyecto del trazado para evitar crear cuellos de botella por un mal trazado. Al respecto, la Norma 3.1-IC y su recomendación se muestra como una buena herramienta de mínimos para plantear trazados seguros y confortables para el usuario, ya que los parámetros de diseño en ella recogidos suponen un buen y probado punto de partida para asegurar .la realización de trazados cómodos y seguros, lo que implica en casos de elevada intensidad circulatoria, niveles de servicio superiores.

4.6.1 Calzada extra.

El carril extra gestionado se presenta como una buena alternativa, pues presumiblemente dará a la vía más capacidad al incluir un carril más que sumar a la sección original.

En la *Figura 69* se comparan los resultados obtenidos en la sección de estudio la vía con tráfico saturado si se habilita la calzada frente a un escenario base sin ella. Se aprecia que el carril extra absorbe en el peor de los momentos 872 veh/h, lo que implica que en ese tramo de 5 minutos evaluado hay un gran descargo en el tronco principal. En términos absolutos, la vía presenta una ganancia en capacidad de 474 veh/h (2979 veh/h del escenario base versus 3453 veh/h de capacidad con la adición del carril extra gestionado).

Con ello, si nos fijamos en el gráfico flujo-densidad de la misma *Figura 69*, en los puntos que quedan en la parte derecha y que se sitúan fuera de la pendiente inicial de ganancia de capacidad, se observa que con la estrategia de apertura de la calzada extra tan sólo se aprecian dos intervalos de 5 minutos en los que el tráfico supera el punto de *breakdown*, mientras que sin ningún sistema gestionado la vía pasa hasta 6 intervalos saturada, la mitad del tiempo (arriba, izquierda). Esto que desemboca en que la congestión se va extendiendo por el tronco llegando a afectar incluso al ramal de incorporación, sin remedio alguno, disparándose la densidad con vehículos cada vez más lentos (arriba, derecha). Por el contrario, con el sistema gestionado, se observa que la vía se recupera hasta en dos ocasiones de un *breakdown*, coincidiendo ambos momentos en los de mayor capacidad de absorción de tráfico por parte de la calzada extra. Esta capacidad extra de "desagüe" se antoja clave como una de las mejores formas de descargo del tráfico.

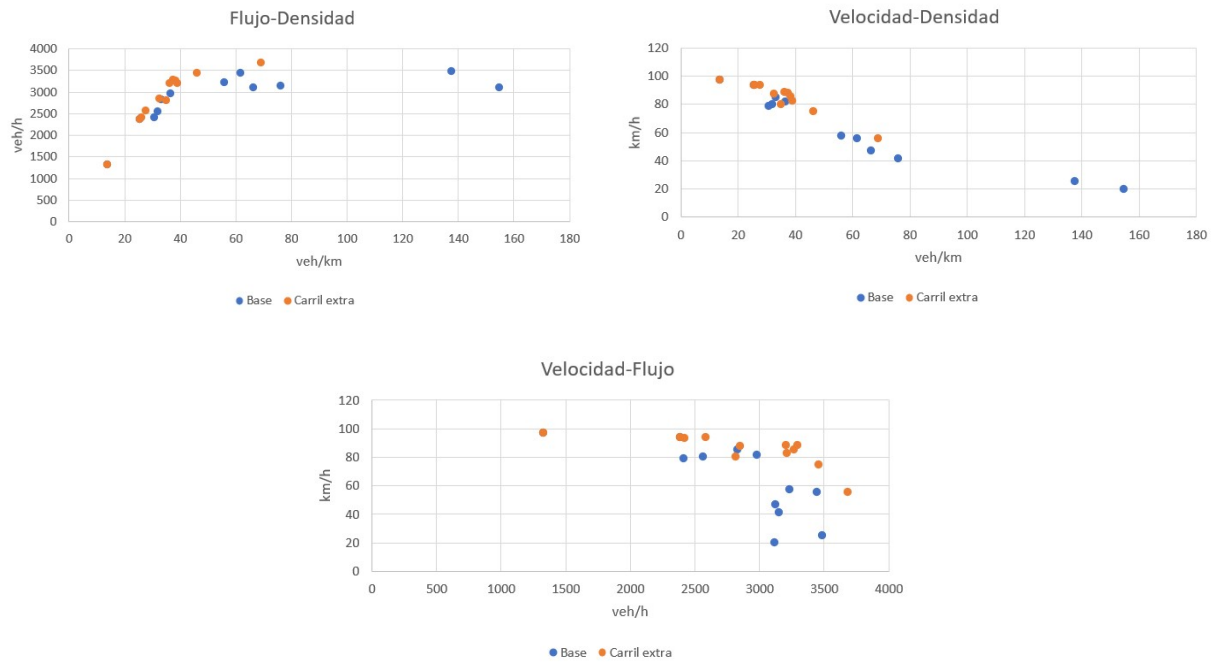


Figura 69: Efecto de la adición de un carril extra gestionado en una simulación con tráfico saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim-

En situaciones de tráfico no saturado, la calzada extra pierde gran parte de su efecto, pues cuanto menos vehículos ingresen en el tramo de estudio, menos pasarán a circular por la calzada extra. Sin embargo, cierto es que aunque en términos de descargo totales el efecto es mucho menor, en términos relativos sí que se aprecia una mínima reducción de la densidad con su consiguiente efecto sobre la velocidad registrada, pues recordemos que con la vía limitada a 120 km/h para turismos, 90 km/h para vehículos pesados y 70 km/h para pesados de gran tonelaje, los 100 km/h de media registrados se antojan algo escasos, máxime cuando el 69% del tráfico introducido corresponde a vehículos ligeros.

Si se busca mejorar el efecto de este sistema, pues está basado en una relación 1:3 según la forma de las secciones transversales de ambas calzadas, carril de descarga y tronco principal, se podrían plantear dos formas de hacerlo:

- Modificar los umbrales de activación-desactivación, lo cual no parece lo más práctico ya que al situarse bastante por debajo de la capacidad máxima de la vía, como se ha dicho, no supone diferencia en términos de capacidad máxima, que seguirá siendo la misma pues la capacidad en vehículos por hora y carril es cuasi-constante. Por el contrario, sí que se apreciaría una mayor fluidez del tráfico a intensidades circulatorias menores, algo que es de agradecer, al iniciarse el descargo con antelación..

- Cambiar la relación de vehículos que circulan por ambas calzadas. Para hacerlo, prefijando una relación que se considere óptima, se podrían utilizar los *Vehicle Infrastructure Integration* (VII) enunciados en el apartado 2.4 del presente documento.

Comparativamente hablando, el efecto de pasar una relación 1:3 a 1:2 en la capacidad de descargo implica una ligera mejora en la capacidad conjunta de la vía, pasando de 3453 veh/h a 3515 veh/h, como se puede apreciar comparativamente en la *Figura 70*. En ese nuevo caso, la capacidad máxima de descargo registrada es de 1068 veh/h (arriba, izquierda), si bien en las simulaciones realizadas se comienza a registrar una menor velocidad media de los vehículos que circulan por la calzada extra (abajo, 83.06 km/h en el primer caso contra 81.83 km/h en el segundo en el momento de mayor intensidad circulatoria, entre los minutos 30 y 35 de la simulación), lo que denota que cada vez más vehículos pesados estarían circulando por ese bypass.

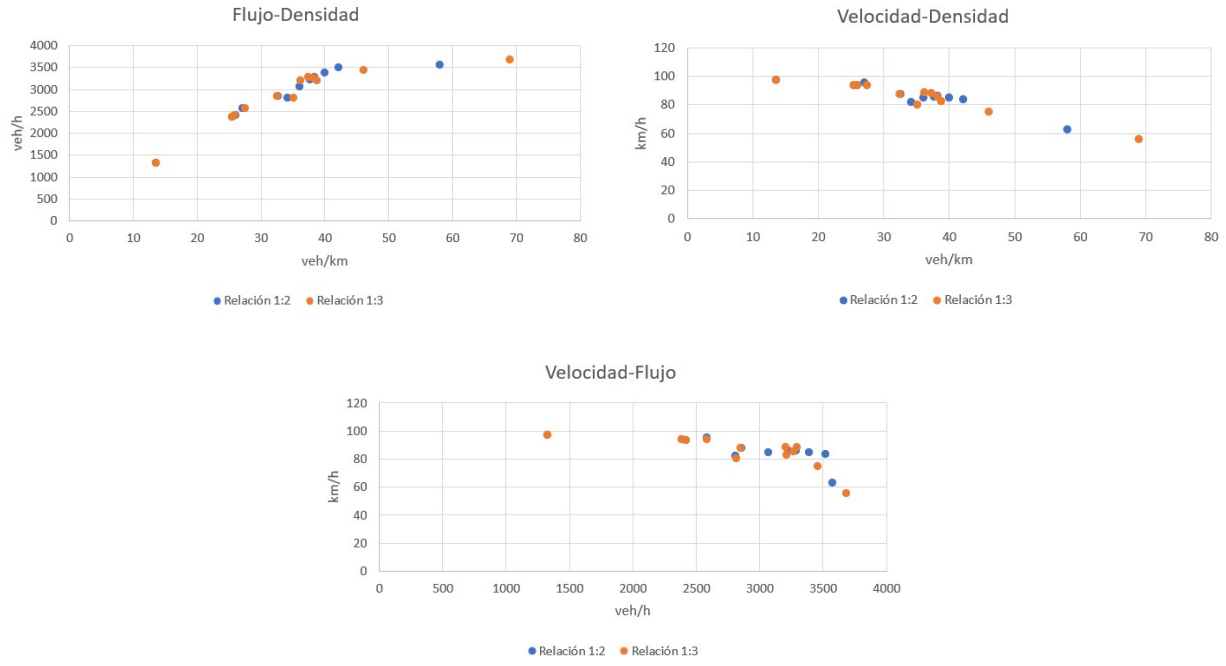


Figura 70: Comparativa entre proporciones de descargo por parte del carril extra gestionado en una simulación con tráfico saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim.

4.6.2 Gestión de carriles.

Este sistema representa una buena idea sobre el papel al reorganizar el flujo existente en el tronco para dejar espacio (y tiempo) a los vehículos que acceden por el ramal a incorporarse y situarse en los carriles de la izquierda que finalmente perduran.

Como se indica, sobre el papel es una buena idea, pero la relación de vehículos que se sitúan en los carriles de la derecha y los que se reorganizan libremente adaptándome a la fisonomía de la sección se antoja clave, ya que se han encontrado resultados curiosos. Por ejemplo, con la relación 1:2 considerada inicialmente (esto quiere decir que sólo 1 de cada 2 vehículos se situarán en los carriles de la izquierda, mientras que el resto harán caso omiso a los paneles direccionales), tan sólo en el caso del trazado con la distancia entre pérdidas de carril de 350 metros resultará efectiva, mientras que en el caso del trazado conforme a la Norma 3.1-IC no tendrá efecto alguno pues los vehículos habrán tenido espacio suficiente para reorganizarse ellos solos. En el primer caso, como se puede ver en la *Figura 71*, se podría incluso evitar el sobrepasar el punto de *breakdown* con la primera de las distribuciones de tráfico evaluadas: se consiguen iguales valores de capacidad (arriba, izquierda) pero distribuyendo mucho mejor los vehículos a lo largo del trazado, resultando densidades comparativamente menores (arriba, derecha) y reducciones menores en la velocidad media registrada en cada periodo (abajo).

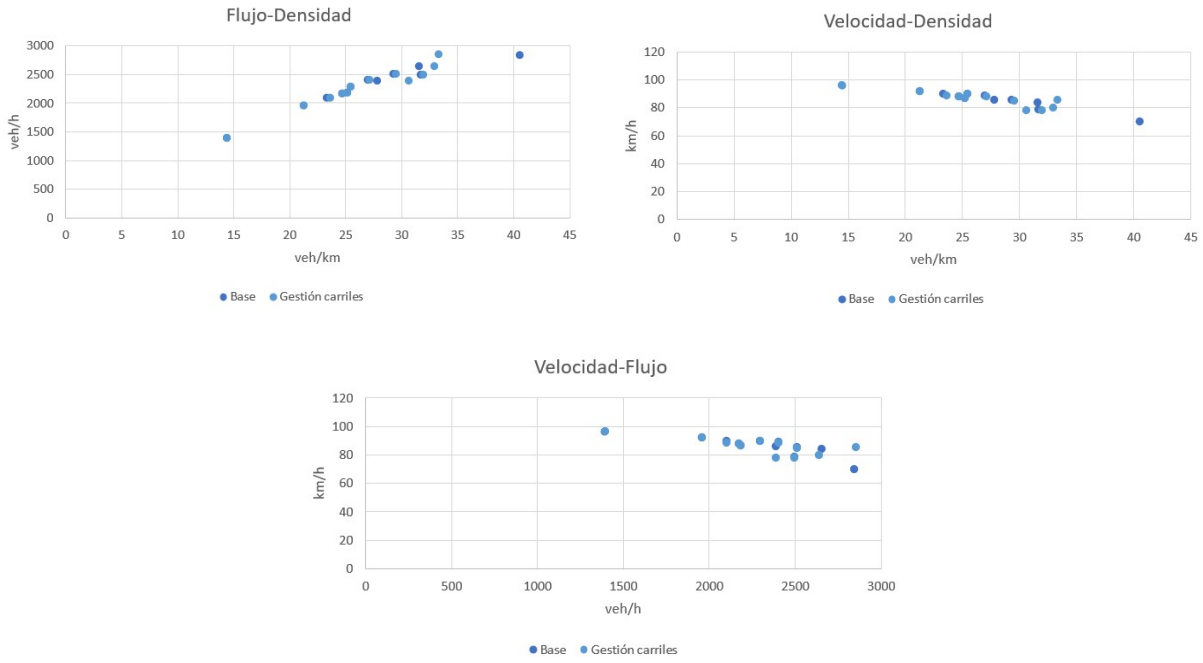


Figura 71: Efecto de la gestión de carriles del tronco en una simulación con tráfico no saturado y L=350 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim.

Así pues, para el caso principal de L=500 metros, se deberá estudiar en qué proporción es efectivo este método. Para ello, se han probado can varias relaciones (1:3, 2:1, etc.) introduciéndolas en la secuencia de VisVAP.

Los resultados, sin embargo, dejan entrever que este sistema en efecto pierde todo su efecto si se cumple la Instrucción de Carreteras, tal y como se ha explicado. Analizando la simulación en tiempo real, se observa que en todos los casos el momento crítico no viene por una falta de espacio por la reorganización ante la pérdida del carril derecho del tronco, pues los vehículos ya se han ido reorganizando a la derecha al haber configurado el modelo con una distancia de anticipación de 500 metros (*ver Figura 64*), que coincide con el mínimo marcado por la Instrucción de Carreteras para esta operación de reducción, por lo que en efecto tiene sentido que no se haya visto mejora ni siquiera probando varios valores de la relación de flujos.

El otro punto de conflicto, unos 500 metros antes, es la cuña del final del carril de aceleración (ver *Figura 43*). Si se repite el ejercicio habilitando la colección de datos en ese punto se observa que ocurre lo mismo: no hay mejora alguna pues en 300 metros (y ayudado por la línea continua-discontinua que delimita el carril derecho con el central del tronco), los vehículos que se incorporan acelerando tienen espacio de sobra para ingresar en el tronco, causando las mismas molestias con o sin sistema de gestión de carriles.

En ninguno de los casos enunciados anteriormente este sistema supone una mejora de la capacidad de la vía, quedando en 2841 veh/h, los mismos del escenario base para esa geometría y ese input de tráfico, resultando pues un resultado idéntico al visto en la *Figura 65*.

4.6.3 Ramp Metering.

El *Ramp Metering* planteado como un gestor de la capacidad evitando que se supere la máxima teórica de la vía es ya una declaración de intenciones de cuándo se podrá utilizar este sistema de forma efectiva.

A tenor de los resultados en tráfico no saturado, para los dos escenarios considerados, L=350 m. y L=500 m., se aprecia una mayor estabilidad en la velocidad media del conjunto, una menor densidad circulatoria.

En el primero de los casos, se llega a evitar el fenómeno de *breakdown*. En el primero de ellos, *Figura 72*, se observa como el sistema retiene la capacidad máxima la densidad circulatoria en valores próximos al máximo (arriba, izquierda, de 2843 veh/h) y evita que la entrada de más vehículos en la sección incurra en un exceso de densidad circularía (arriba, derecha). Por consiguiente, todo apunta a una velocidad media mayor en el conjunto al reducirse los *closing processes*, como así ocurre (abajo).

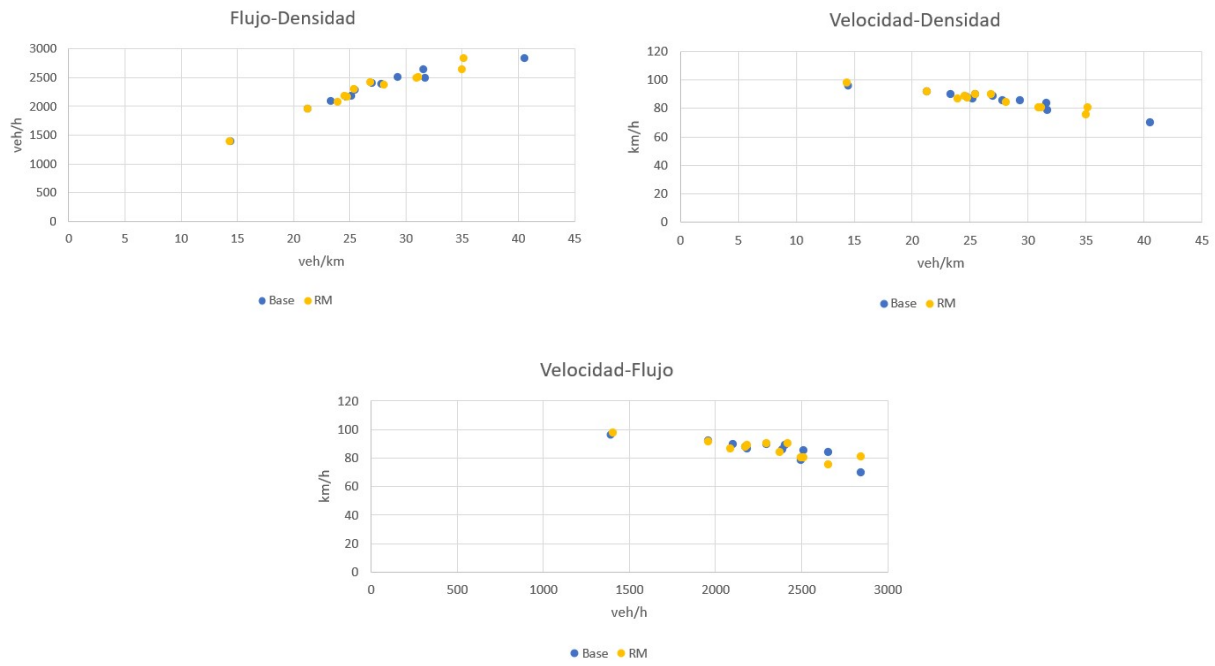


Figura 72: Efecto del Remp Metering en una simulación con tráfico no saturado y L=350 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim.

Sin embargo, en el segundo caso y como ya se ha visto anteriormente, el efecto de este sistema de gestión es menor al haber mayor espacio para ejecutar movimientos laterales de reorganización, por lo que no se aprecia mucha diferencia respecto al escenario base en términos de capacidad y densidad circulatoria. En la *Figura 73* se observa que la mejora en términos de densidad máxima (arriba, derecha) y velocidad media registrada (abajo) es bastante limitada respecto al escenario base sin control alguno.

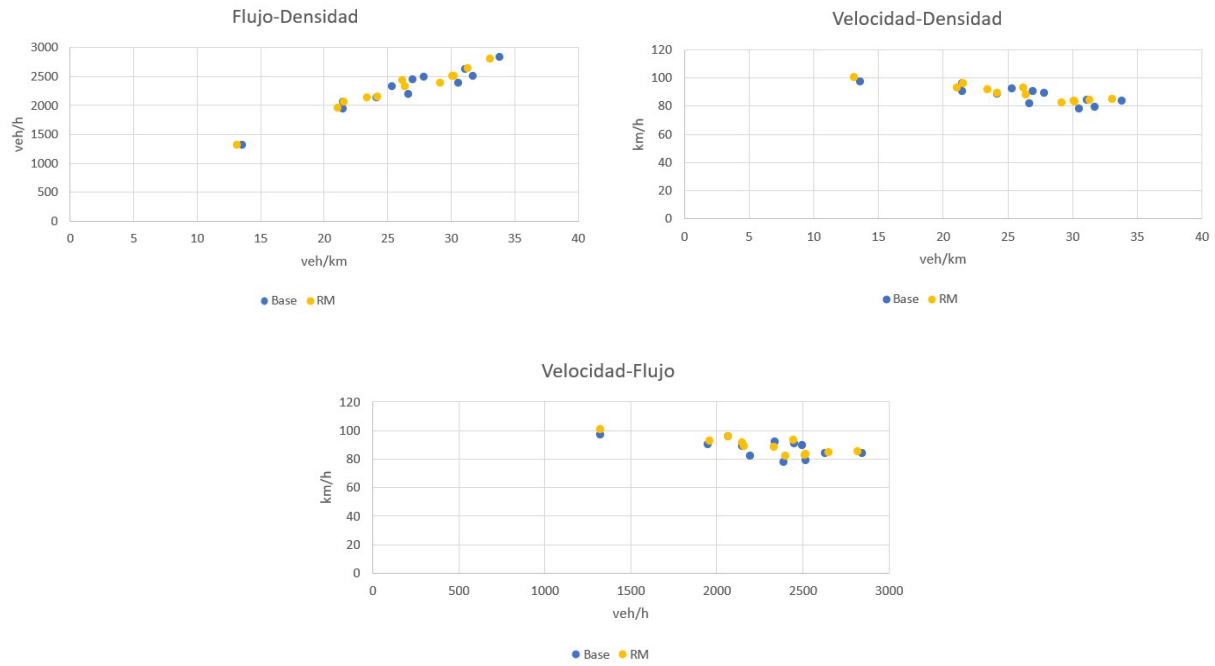


Figura 73: Efecto del Remp Metering en una simulación con tráfico no saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim.

Por el contrario, en condiciones de tráfico saturado más allá del punto de *breakdown*, el efecto del RM es nulo, por no hablar de contraproducente, tal y como se aprecia en la *Figura 74*. Se observa que los puntos que quedan a la derecha del punto de *breakdown*, aquellos que se encuentran en un escenario de pérdida de capacidad en la vía, presentan valores mayores de densidad circulatoria en el caso de utilizarse el sistema de RM (color amarillo) que aquellos coetáneos en el tiempo de la simulación base sin ninguna estrategia de control aplicada (color azul) (arriba, izquierda), mientras que el perfil de velocidades según aumenta la intensidad circulatoria tiende a reportar valores cada vez menores (abajo).

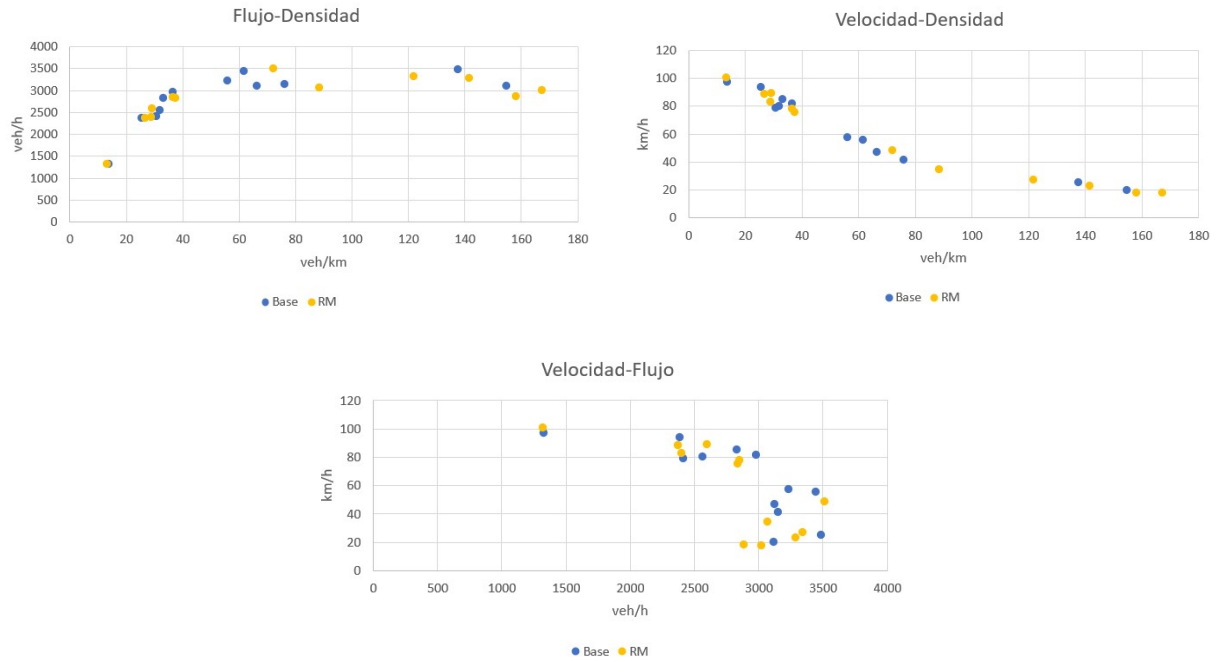


Figura 74: Efecto del Remp Metering en una simulación con tráfico saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim.

La explicación a este fenómeno es lo expuesto en el epígrafe 4.4.4.3: el algoritmo de control trata de mantener la capacidad por debajo de un porcentaje predefinido, pero, si como en el caso del tráfico saturado se tiene un escenario que ha superado por mucho ese punto buscado, el sistema tratará de retener la entrada de vehículos por el ramal a toda costa, permitiéndola únicamente en los casos en los que la cola en ese vial supere el valor prefijado. Eso implica que el RM dejará de controlar la capacidad para controlar únicamente la cola tras el semáforo del ramal, lo que resulta contraproducente para la dinámica del flujo del tronco.

4.6.4 Variable Speed Limit.

El caso del *VSL* (sistema de velocidad variable) planteado en muy similar al anterior *RM* en lo referente a resultados. Por un lado, se muestra bastante homogeneizador en situaciones que no alcancen el punto de *breakdown*, ente las cuales modula la velocidad de los vehículos, que es la variable manipulada del sistema. En la *Figura 75* se puede apreciar que el trazado de las gráficos (los tres) es de aspecto algo más rectilíneo, sobre todo en el caso de L=500 metros, lo que hace pensar que su efecto es bastante sensible a los condicionantes existentes.

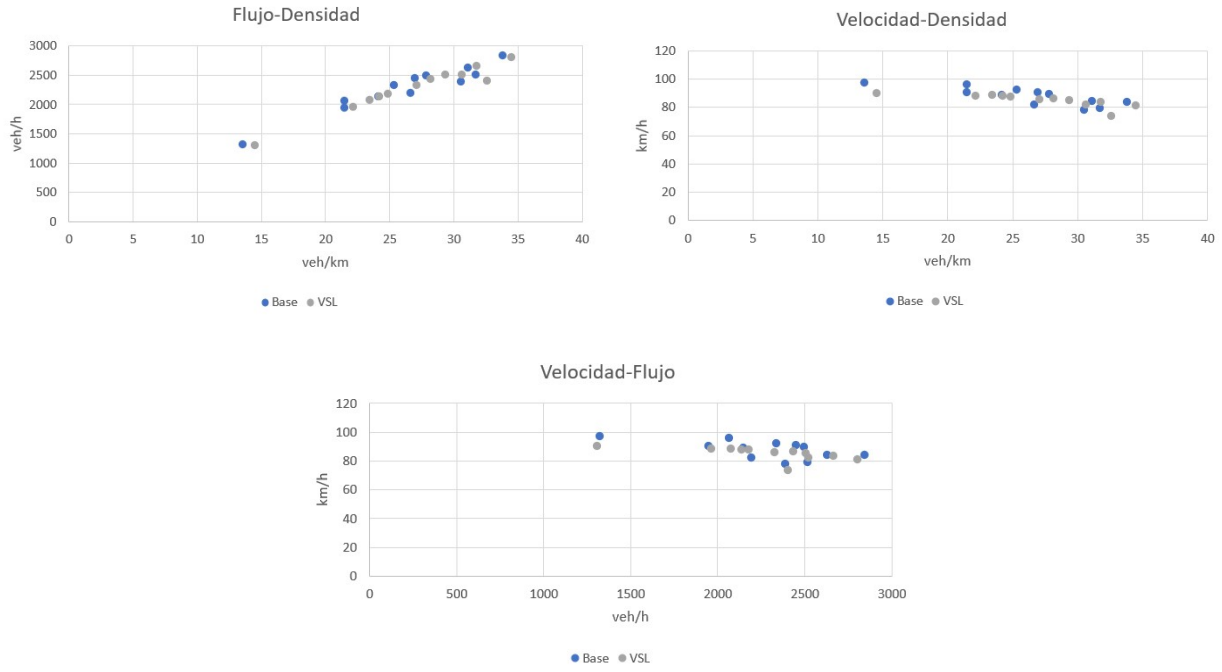


Figura 75: Efecto del sistema Variable Speed Limit en una simulación con tráfico no saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim.

Por el contrario, una vez el tráfico se va acercando al punto de *breakdown* y, sobre todo, superado éste (tráfico saturado), el sistema pierde toda su utilidad. En los dos casos considerados, al pasar el *breakdown* y como se veía en la *Figura 65* al inicio de este punto, la velocidad comienza a caer drásticamente dibujando casi una vertical en la gráfica velocidad-flujo. Ante este escenario, donde el tráfico puede llegar a caer hasta 25 km/h entre dos periodos consecutivos de 5 minutos, el sistema no presenta ningún tipo de efectividad, pudiendo llegar a ser incluso contraproducente, como se puede ver en la *Figura 76* (abajo). En el caso de la intensidad y la densidad (arriba, izquierda y derecha respectivamente) no se aprecian grandes diferencias respecto al escenario base más allá de un trazado más sueve y tendido en los intervalos anteriores al punto de *breakdown*.

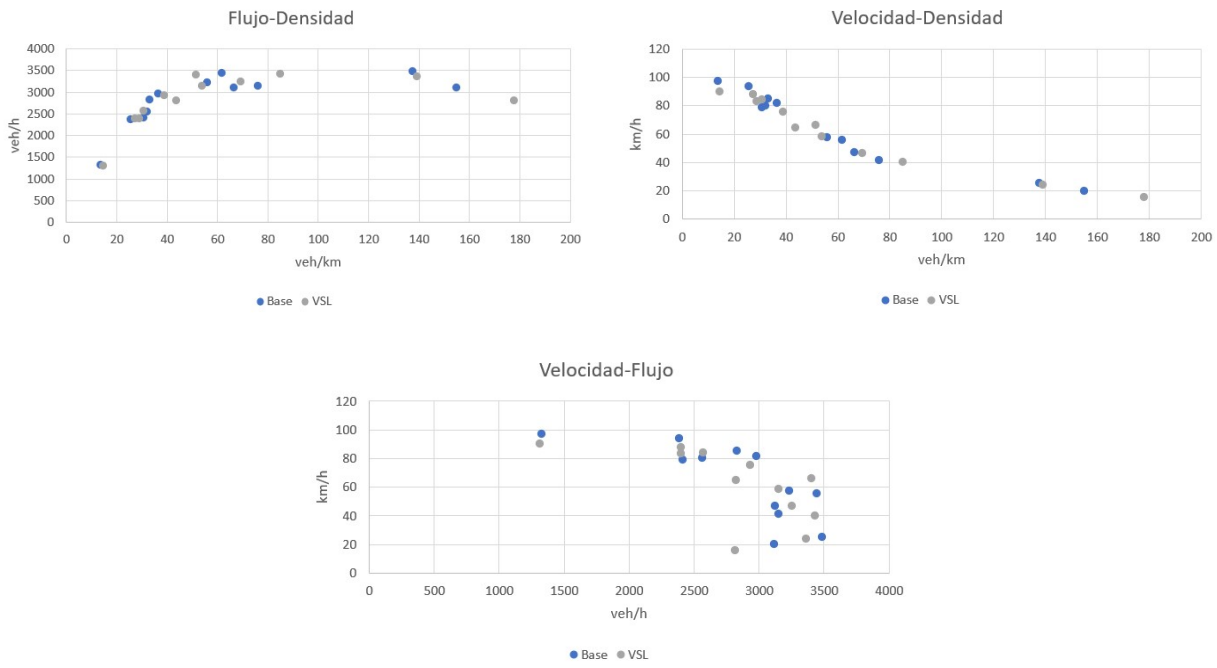


Figura 76: Efecto del sistema Variable Speed Limit en una simulación con tráfico saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim.

Con ese comportamiento ante tráfico saturado, se han planteado las siguientes opciones de *tunning* (sintonía) al sistema:

- Por un lado, el primer parámetro que cobra especial importancia son las velocidades iniciales que muestren los paneles. Como se indicaba en el punto 4.4.4.4, se habían elegido analizando las condiciones iniciales del tráfico al inicio de la simulación. En efecto, se demuestra que una diferencia de 10 km/h por encima o por debajo, implica que el sistema esté 1 ciclo desacompasado respecto al tráfico real, por lo que ante ese retraso puede llegar a perder toda su efectividad. Simulaciones realizadas han desaconsejado su uso por adelantar la entrada en un escenario *capacity-drop* y, consecuentemente, en una pérdida constante de la velocidad media de los vehículos en la sección.

- Un segundo punto de mejora es determinar en cuántos carriles se evalúa la velocidad de los turismos para decidir los límites de la velocidad en consecuencia. Inicialmente se ha considerado hacerlo en los tres carriles del tronco, si bien se ha probado igualmente a hacerlo sólo con los dos de la izquierda, descartando el de la derecha por ser el carril que los vehículos están abandonando y poder existir alguno de ellos que esté mirando el carril adyacente esperando un hueco, lo que implicará circular y registrar menos velocidad y distorsionar, por consiguiente, el parámetro de decisión. El resultado comparativo, en tráfico no saturado, es inapreciable (prácticamente igual al mostrado en la *Figura 75*) pues el sistema consigue adaptarse bastante bien a la velocidad real del flujo. Por el contrario, en tráfico saturado sí que se aprecia una mejoría respecto a evaluar los tres carriles, pero con la nula efectividad del sistema más allá del punto de *breakdown* no merece la pena.

- El tercer punto de mejora posible sería las propias decisiones de los límites de velocidad en base a la velocidad registrada por los vehículos lentos. En este caso se estaría hablando de dos posibilidades:

  - ✓ Por un lado, y al estar enfrentándonos a una situación de tráfico creciente, se ha probado a implementar una doble transición que detectase dos tipos de magnitudes en la caída de la velocidad. La primera, si cayese entre 5 y 15 km/h respecto al objetivo previo disminuiría la velocidad objetivo 10 km/h. La segunda, si lo hiciese en más de 15 km/h, lo haría en 20 km/h. Con ese criterio, el sistema se arruina completamente pues bajar de golpe 20 km/h en la velocidad objetivo hace que el flujo se ralentice tanto que, en el siguiente ciclo, volvería a tomarse la misma medida, entrando así en un bucle ilógico.

  - ✓ Por otro lado, en la ganancia de velocidad se ha probado a no esperar a recuperar la velocidad objetivo previa para subirla 10 km/h, sino que si se acercase a 5 km/h, aunque sea por debajo, lo hiciese, lo que supone una mayor predisposición del sistema a ganar velocidad. El resultado es prácticamente inapreciable en tráfico no saturado, incluso se podría decir que algo más irregular que en el caso inicial según se acerca al punto de *breakdown*. De igual forma se ha probado el efecto contrario, es decir, hacerlo menos predispuesto a ganar velocidad limitando las subidas sólo cuando se supere la limitación previa en 5 km/h. La variación, más estable que en la anterior prueba, es igualmente escasa. Esta comparativa del ajuste con el sistema VSL inicialmente considerado se puede ver en la *Figura 77*, donde se aprecia en las gráficas (las tres) que no hay apenas diferencia entre las tres opciones de ajuste planteadas. Con todo, se decide dejar la ganancia de velocidad según se consideró inicialmente.

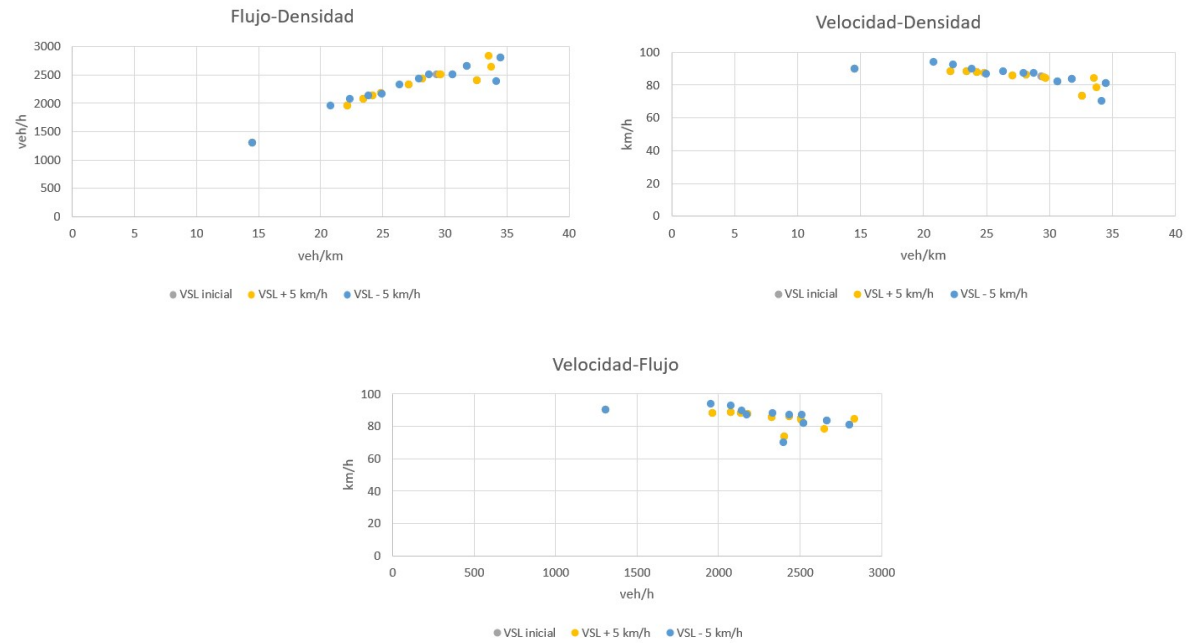


Figura 77: Comparativa de la efectividad del sistema Variable Speed Limit con diferentes parámetros de decisión en la ganancia de velocidad en una simulación con tráfico no saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim .

Con todo, queda claro como se mencionaba anteriormente que es un sistema bastante difícil y complicado de calibrar, que sólo ofrece un cierto grado de mejora del flujo en situaciones de tráfico libre o en los primeros momentos del *car-following* (lo que en el modelo de Wiedemann se definía como *uninfluenced driving* y *closing porcess*, ver *Figura 5*).

4.6.5 Sistema de restricción de vehículos pesados lentos.

Los resultados de retirar los vehículos lentos son, a priori y vista su gran utilización en los momentos de puntas de desplazamientos, bastante prometedores sobre el papel. Y en efecto, extraídos los datos del modelo, retirando los vehículos pesados más lentos con intensidades superiores a 2500 veh/h, se pueden conseguir ganancias importantes en la fluidez, con una mayor velocidad media y una menor densidad de vehículos en el flujo, como se puede ver a continuación.

En el caso de un tráfico no saturado, el efecto de observar las gráficas según la *Figura 78* puede ser algo confuso , ya que el sistema sólo actuaría entre el minuto 30 y el 50, pudiendo llegar a pensar que es poco efectivo. Sin embargo, viendo que el perfil muestra velocidades más altas (abajo) y que la densidad circulatoria mayor es menor que sin la regulación (arriba, derecha e izquierda), se aprecia que hay un efecto positivo. Analizando los datos se puede apreciar que en los periodos de funcionamiento se obtienen velocidades medias hasta 18 km/h superiores (89.7 vs 97.) con densidades tan sólo 5 veh/km inferiores (26.31 vs 31.72) comparando el escenario base con la simulación con la restricción activa en el momento peor (minutos 35 a 40 de la simulación).

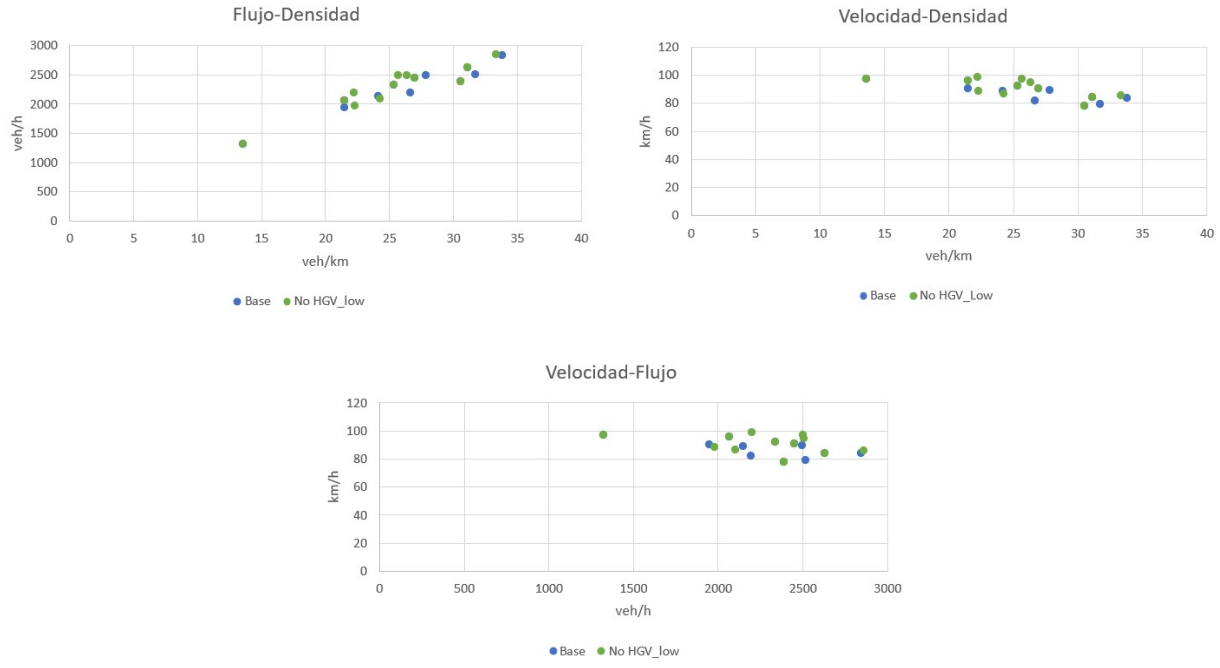


Figura 78: Efecto del sistema de restricción a vehículos pesados en una simulación con tráfico no saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim.

Donde sí se ve claramente la mejora es en la simulación con tráfico saturado, donde existe una gran subida de la intensidad en poco tiempo. En ese caso, sí que se aprecia que todas las curvas de la *Figura 79* se van separando de las originales desde un instante temprano y, aunque no se consigue evitar la congestión del flujo, ésta se ve mitigada en gran medida, reduciendo el intervalo en el que el tráfico se satura a 15 minutos, como se puede ver analizando la cantidad de intervalos que se encuentran en una situación de *capacity drop* (arriba, izquierda). Esa diferencia implica que mientras en un escenario sin regulación el tráfico se satura a partir del minuto 25 hasta caer a una velocidad media de 20.11 km/h respecto de los 97.46 km/h al inicio de la simulación, con la estrategia de retirar los vehículos pesados se puede evitar que la velocidad caiga por debajo de los 70 km/h en 45 de los 60 minutos de la simulación (abajo).

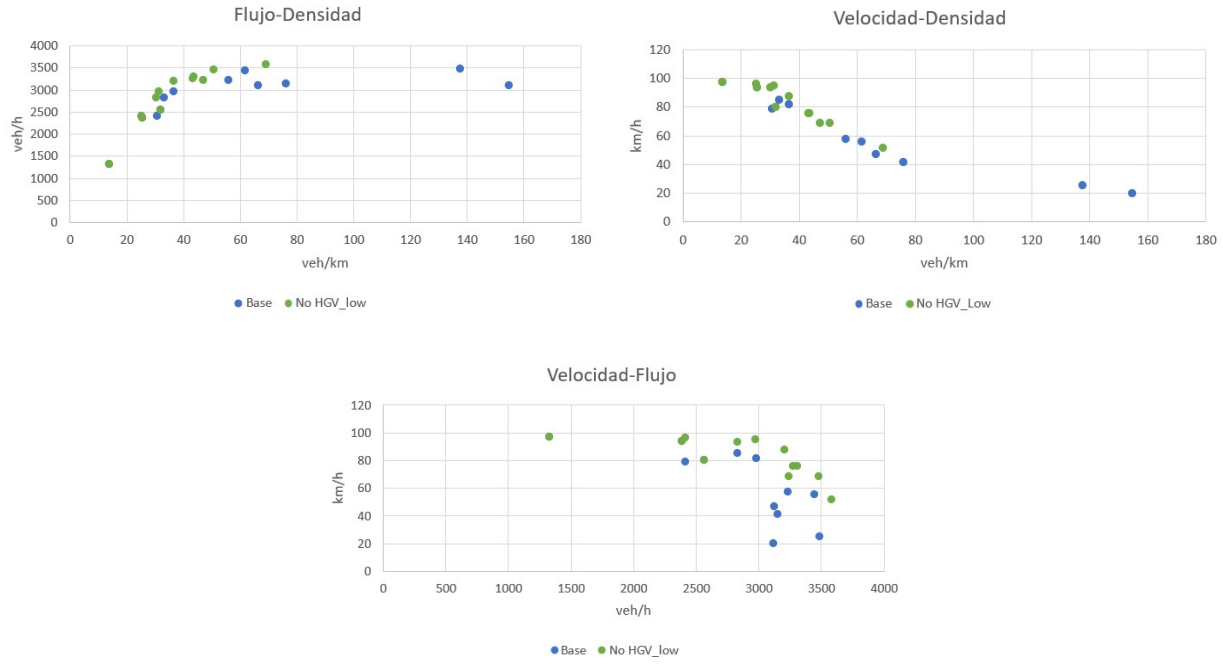


Figura 79: Efecto del sistema de restricción a vehículos pesados en una simulación con tráfico saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim.

Continuando con la mejora vista, se podría evaluar el efecto de añadir a la prohibición de los vehículos más pesados y lentos a partir de los 2500 veh/h la del resto de vehículos pesados y furgones a partir de intensidades de 3000 veh/h, que es un valor muy cercano al *breakdown* con el mix de tráfico inicial.

Los resultados, como se puede ver en la *Figura 80*, son muy satisfactorios en lo referente a capacidad (arriba, izquierda). La primera restricción se consigue mitigar la tendencia del flujo inicial a congestionarse, aumentando la capacidad máxima antes del *breakdown* en aproximadamente 300 veh/h. Con la segunda restricción, la capacidad máxima aumenta hasta el máximo del flujo simulado sin congestión (e incluso mejorando los resultados de velocidad media), dejando entrever que sólo con vehículos ligeros se podría llegar hasta los 2000 veh/h y carril que, sobre el papel, sería la capacidad máxima teórica aceptada para este tipo de vía. Consecuentemente, al retirar todos los vehículos

pesados de la vía, se consigue la paradoja de que en los momentos de mayor intensidad y densidad circulatoria sean en los que se registren mayores velocidades medias del conjunto de los vehículos ligeros (arriba, drecha, y abajo).

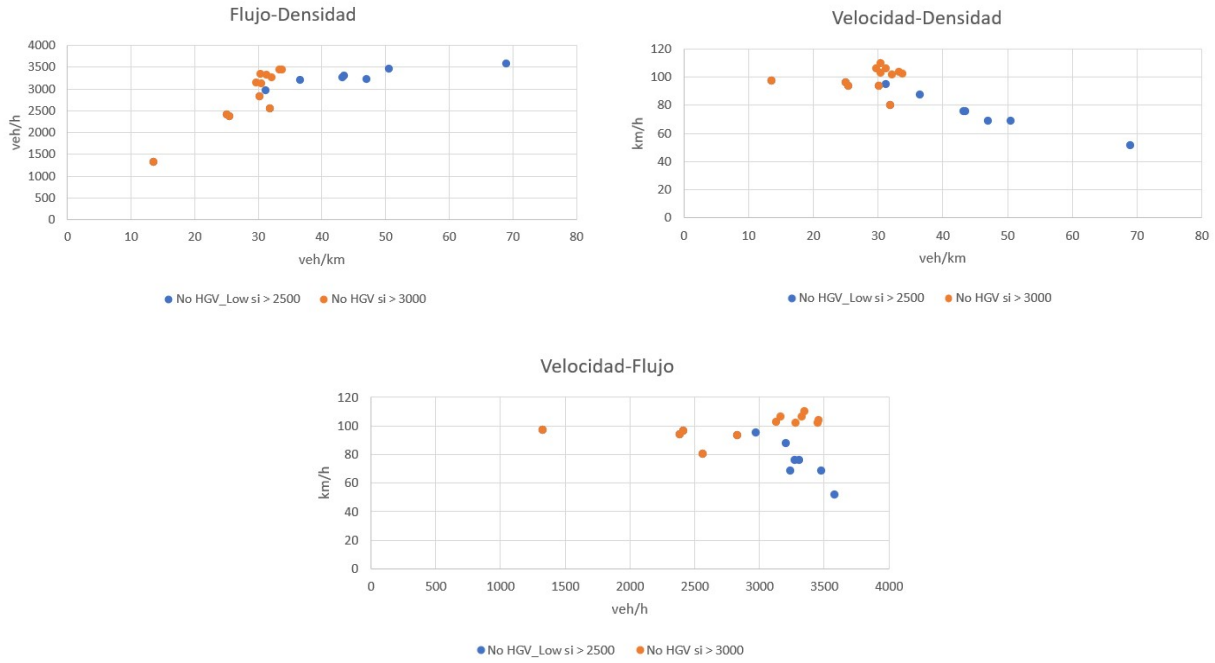


Figura 80: Efecto del sistema de restricción a vehículos pesados en una simulación con tráfico saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim.

Este último comportamiento descrito lleva a pensar que el sistema ofrece una mayor capacidad de regulación y que, probablemente, una estrategia o enfoque superior más complejo en su activación pueda incrementar notablemente sus beneficios sobre el conjunto del tráfico, haciéndolo más lineal sin perder sus aspectos ventajosos.

4.7 Conclusiones y valoración comparativa.

Los cinco métodos de control del tráfico expuestos han demostrado, ante todo, tener efectividad en escenarios diferentes, lo que nos da una primera idea de cuándo se podrá usar cada uno de ellos:

- La gestión de carriles del tronco sólo se muestra efectivo cuando las características del trazado, tanto longitudinal como transversal, presentan un accidente o no son lo suficientemente holgadas para permitir la correcta acomodación del flujo del tráfico. De cara a trabajos futuros se podría valorar el efecto del alzado en trazado (desniveles), si bien se presupone que en este sentido será de ayuda.

- Para situaciones de tráfico no congestionado, los sistemas de *Ramp Metering* y *Variable Speed Limit* se presentan como una buena opción de homogeneización, estabilización y optimización del flujo. Más allá del punto de *breakdown*, su efectividad lejos de ser limitada puede llegar a ser contraproducente.

- Para situaciones en las que el tráfico presente los primeros signos de congestión, el carril extra gestionado y las restricciones de vehículos pesados son métodos bastante efectivos, suponiendo una mejora de la capacidad de la vía. Sin embargo, como contrapartida, ambos sistemas implican una infraestructura extra (una calzada adicional en un caso, aparcamientos y sistemas de detección e información por el otro).

Esas conclusiones se ven refrendadas si se analizan los datos literales obtenidos en las distintas simulaciones y se comparan las distintas estrategias de control.

Por un lado, considerando la distribución del tráfico no saturado de la *Tabla 7* para el escenario de la sección que cumple la IC, si se pone el objetivo en dos momentos temporales, entre el minuto 25 y 30 (segundos 1500 a 2800, momento previo a la capacidad máxima registrada y cuando todos los sistemas han superado el umbral de actuar) y entre el 30 y 35 (el momento de flujo máximo de esa distribución) se llega a los datos recogidos en la *Tabla 8*. En ella se aprecia como en escenarios que no alcanzan el punto de *breakdown* o capacidad máxima de la sección los sistemas de *Variable Speed Limit* y *Ramp* Metering se muestran de utilidad si bien su efecto es limitado. Por el contrario, la estrategia de la calzada extra y las restricciones a vehículos pesados lentos se muestran de utilidad conforme se acercan a ese punto, presentando un cierto retardo entre su acción de control y el efecto en la variable controlada a tenor de sus resultados en el primer instante evaluado.

Escenario Base	Intervalo	Densidad	Velocidad	Flujo	Mejora	Intervalo	Densidad	Velocidad	Flujo	Mejora
	1500-1800	31.09	84.55	2628		1800-2100	33.82	84.04	2842	
Calzada Extra 1:2		30.94	85.76	2653	SI		31.52	89.59	2822	SI
Gestión Carriles		31.09	84.55	2628	NO		33.82	84.04	2842	NO
VSL		31.78	83.89	2666	SI		34.46	81.33	2803	NO
RM		31.31	84.62	2650	SI		33.04	85.22	2816	SI
No_HGVLow		31.09	84.55	2628	NO		33.29	85.83	2857	SI

Tabla 8: Resultados de las estrategias de control planteadas con tráfico no saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim.

Adicionalmente, se ha realizado el ejercicio de tomar la distribución de tráfico saturado de la *Tabla 7* para el escenario de la sección que cumple la IC y comparar las estrategias de control en tres instantes diferenciados: en un punto por debajo de la capacidad máxima de la sección (intervalo 300-600 segundos), en uno inmediatamente anterior al punto de *breakdown* (intervalo 1200-1500) y en uno justo después (intervalo 1800-2100). Los datos para esos tres instantes se pueden observar en la *Tabla 9*. Se corrobora que los sistemas de VSL y RM tienen un efecto pacificador en el flujo del tráfico en momentos de fluidez del tráfico (primer intervalo), si bien conforme se llega al punto de capacidad

máxima de la vía su efecto decae y, sobrepasado ese punto, es nulo e incluso contrario al objetivo de control. Por el contrario, las estrategias de la calzada extra gestionada y las restricciones a pesados lentos se muestran bastante muy efectivas precisamente a partir del punto de *breakdown*, cuando las otras dos mencionadas dejan de ser efectiva para el objetivo de control marcado.

Escenario Base	Intervalo	Densidad	Velocidad	Flujo	Mejora	Intervalo	Densidad	Velocidad	Flujo	Mejora	Intervalo	Densidad	Velocidad	Flujo	Mejora
	300-600	25.38	94.04	2386		1200-1500	33.1	85.37	2826		1800-2100	61.56	55.88	3440	
Calzada Extra 1:2		25.38	94.04	2386	N/A		35.03	80.34	2814	NO		46.06	75.15	3453	SI
Calzada Extra 1:3		25.38	94.04	2386	N/A		34.15	82.19	2806	NO		42.07	83.59	3516	SI
Gestión Carriles		25.38	94.04	2386	NO		33.1	85.37	2826	NO		61.56	55.88	3440	NO
VSL		27.27	88.00	2400	SI		43.42	64.95	2820	NO		84.97	40.38	3431	NO
RM		26.69	88.87	2372	SI		37.45	75.69	2834	NO		71.94	48.82	3512	NO
No_HGVLow		25.38	94.04	2386	N/A		30.14	93.84	2828	SI		50.48	68.82	3474	SI
No_HGVLow_imp		25.38	94.04	2386	N/A		30.14	93.84	2828	SI		30.33	110.25	3343	SI

Tabla 9: Resultados de las estrategias de control planteadas con tráfico no saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim.

Igualmente, en la *Tabla 9* se han incluido ambas dos mejoras planteadas en el apartado 4.6 del presente capítulo fruto del ajuste o *tunning* de dos de los sistemas planteados: un cambio en la relación de vehículos que hacen uso de la calzada extra una vez esta se abre al tráfico (*Calzada Extra 1:3*) y una segunda restricción al resto de vehículos pesados cuando se alcanza un flujo de entrada en la sección de estudio de 3000 veh/h (*No_HGVLow_imp*). Se comprueba en ambos casos que los sistemas presentan una mayor efectividad en el escenario de tráfico más cargado de los evaluados (intervalo 1800-2100) y que, en el caso de la calzada extra gestionada, su acción de control tiene una más pronta respuesta que la originalmente plantado. Con estos resultados, una posible estrategia que se puede evaluar en trabajos fututos sería el aunar el sistema de la calzada extra gestionada con las restricciones de pesados, derivando por esa calzada extra los vehículos pesados en lugar de restringir directamente su uso, lo que podría llegar a repercutir en un mayor nivel de servicio para esos vehículos al estar la vía abierta siempre para ellos y en un ahorro en infraestructura al poder ahorrarse la construcción de campas de estacionamiento para éstos.

Finalmente, con las *Tabla 8 y 9* se comprueba que el sistema de gestión de carriles del tronco no tiene efectividad alguna en el trazado estudiado, no representando mejora alguna con respecto al escenario *Base*, el cual cumple con la IC y presenta una distancia entre pérdidas de carriles en el tronco suficiente para una correcta reorganización de los movimientos laterales de los vehículos durante el periodo de simulación.

Con todo, la estrategia de control que se desarrolle deberá tener en cuenta estos aspectos, identificando en cada situación cuál es escenario de trabajo y utilizando en consecuencia estos sistemas de una forma ordenada y eficiente.

5. NUEVAS TECNOLOGIAS: VEHICULO AUTONOMO Y CONECTADO.

El anterior capítulo se centraba en la implementación y el análisis comparativo de sistemas de control del tráfico tradicionales, entendiendo como "*tradicionales*" el hecho de ser ampliamente utilizados.

Sin embargo, tal y como se enunciaba en el epígrafe 2.4, el desarrollo de la tecnología en lo referente a interconexión e interoperabilidad ha abierto un paradigma completamente nuevo, con formas de control diferentes. Los conceptos *Vehicle-to-Vehicle* (V2V), *Vehicle-to-Infraestructure* (V2X) y *Vehicle Infrastructure Integration* (VII) dan lugar a una atomización del flujo del tráfico en el que cada vehículo es un elemento sensor y actuador a la vez, comunicándose entre ellos y con la infraestructura, pudiendo desplazarse independientemente o agrupándose en enjambres o *swarms*. Todo ello crea un nuevo horizonte de posibilidades en lo referente a la gestión del tráfico, la seguridad y la movilidad eficiente.

En este capítulo se abordan dos posibles técnicas a la hora de abordar el control del tráfico con estas nuevas tecnologías. La diferencia entre éstas y las desarrolladas en el anterior capítulo radica en el hecho de que las aquí presentadas actúan directamente sobre el vehículo, modificando su trayectoria, velocidad y disposición activa e individualmente. Por el contrario, las técnicas tradicionales se centran en regular el flujo del tráfico como conjunto, condicionando o limitando el discurrir de éste según un cierto criterio, pero nunca actuando directamente sobre sus elementos. Dicho de otra manera, mientras que con las técnicas hasta ahora implementadas el conductor se presentaba como el maestro de ceremonias de la sinfonía del tráfico, ocasionando con sus decisiones un efecto sobre éste, con las nuevas técnicas basadas en las comunicaciones, concretamente en la *Vehicle Infrastructure Integration* (VII), los vehículos se hacen autónomos y los conductores ceden parte o la totalidad de la conducción a la inteligencia artificial.

Como se explicó a lo largo del capítulo 2, existen dos aspectos enormemente importantes a la hora de estudiar el fenómeno de la formación y propagación de colas de vehículos:

- Por un lado, al dejar de circular en flujo libre y no influenciado, los vehículos pasan a regirse por un modelo de *car-following* explicado por el modelo de Wiedeman (74 ó 99), y mostrado en la *Figura 5*. El paso de un régimen a otro y el comportamiento se basa en la distancia con el vehículo precedente, pudiendo establecer una pauta dentro de la reacción del conductor del vehículo perseguidor según la *Figura 6*.

- Por otro lado, asumiendo que en efecto se ha pasado a un modelo de *car-following* y que la cola se ha formado, tienen un papel relevante los conceptos de *espaciamiento* y *permeabilidad*, que guardan una relación directa con las interferencias entre vehículos cuyas trayectorias puedan cruzarse en movimientos laterales entre carriles de la sección, bien para adelantamientos, bien para su reacomodo de cara a salvar un cambio en la sección transversal (ver *Figura 28*).

  De los trabajos de Wu, Salas y Echeto mencionados en el apartado 2.4.3 se extrae que *espaciamiento* y *permeabilidad* son igualmente importante a la hora de poder configurar el uso, formación y mantenimiento de *platoons* como formaciones de vehículos discurriendo en pelotón de forma autónoma. Esto tiene efectos positivos en el comportamiento del tráfico y la capacidad de la vía en su conjunto.

En ambos casos, la distancia entre vehículos resulta crucial en los aspectos estudiados. Por ello, las medidas de control que se propondrán en este capítulo versarán sobre el control de la distancia entre los vehículos y la formación y disposición de *platoons* dentro del flujo existente.

5.1 Control dinámico de la distancia entre los vehículos.

Partiendo de las dos distribuciones de tráfico consideradas como base para el estudio del presente trabajo (capítulo 3), las cuales buscaban el punto de *breakdown* a partir del cual la capacidad de la vía comenzaba a resentirse y cómo era esa caída del volumen registrado, resulta claro que la formación de colas también se produce bajo un régimen de *car-following*. Por ello, el control de la distancia entre los vehículos que pasen por la sección jugará un papel clave en su fluidez.

La mejor forma de abordar la pregunta de qué distancia entre vehículos es la óptima desde el punto de vista del flujo de tráfico es la de plantear el modelo de Wiedeman 99, bajo el cual nuestro modelo se rige a través del programa PTV Vissim, el cual se configura mediante 10 parámetros que se muestran en la *Tabla 10*:

Parameters	Unit	Description
CC0	m	**Standstill distance**: The desired standstill distance between two vehicles. No stochastic variation. You can define the behavior upstream of static obstacles via the attribute **Standstill distance in front of static obstacles** (see "Editing the driving behavior parameter Following behavior" on page 298).
CC1	s	**Gap time distribution**: Time distribution from which the gap time in seconds is drawn which a driver wants to maintain in addition to the standstill distance. At a speed v the desired safety distance is computed as: $dx_{safe} = CC0 + CC1 \bullet v$ At high volumes this distribution is the dominant factor for the capacity.
CC2	m	**'Following' distance oscillation**: Maximum additional distance beyond the desired safety distance accepted by a driver following another vehicle before intentionally moving closer. If this value is set to e.g. 10 m, the distance oscillates between: dx_{safe} und $dx_{safe} + 10\ m$ The default value is 4.0m which results in a quite stable following behavior.
CC3	s	**Threshold for entering 'BrakeBX'**: Time in seconds before reaching the maximum safety distance (assuming constant speed) to a leading slower vehicle at the beginning of the deceleration process (negative value).
CC4	m/s	**Negative speed difference**: Lower threshold for relative speed compared to slower leading vehicle during the following process (negative value). Lower absolute values result in adopting a speed more similar to the leading vehicle.
CC5	m/s	**Positive speed difference**: Relative speed limit compared to faster leading vehicle during the following process (positive value). Recommended value: Absolute value of **CC4** Negative values result in adopting a deceleration speed more similar to the leading vehicle.
CC6	1/(m • s)	**Distance impact on oscillation**: Impact of distance on limits of relative speed during following process: • Value 0: Distance has no impact on limits. • Larger values: Limits increase with increasing distance.
CC7	m/s^2	**Oscillation acceleration**: Acceleration oscillation during the following process.
CC8	m/s^2	**Acceleration from standstill**: Acceleration when starting from standstill. Is limited by the desired and maximum acceleration functions assigned to the vehicle type.
CC9	m/s^2	**Acceleration at 80 km/h**: Acceleration at 80 km/h is limited by the desired and maximum acceleration functions assigned to the vehicle type.

Tabla 10: Parámetros de configuración de un modelo Wiedeman 99 (PTV, 2023).

Como se aprecia, los parámetros que más influencia tienen en la distancia entre vehículos son CC0, CC1 y CC2.

Los dos primeros marcan la distancia entre vehículos según la distancia ideal entre vehículos (CC0) y la adaptada en función de la velocidad (CC1) en forma de *gap* o espaciamiento temporal, una suerte de margen de seguridad para reaccionar ante imprevistos. En conjunto, la distancia entre vehículos quedaría conformada por la siguiente expresión:

$$d_{SAFE} = CC0 + CC1 \cdot v \qquad (4)$$

En cambio, CC2 marca la distancia de seguridad adicional a la que el conductor perseguidor puede descolgarse antes de volver a tratar de acercarse al vehículo precedente, o dicho de otra manera, a tratar de volver a situarse a una distancia d_{SAFE} del vehículo precedente.

En cualquier caso, esa distancia d_{SAFE} se antoja la más idónea para ser considerada como variable manipulada para el control de velocidad, volumen e intensidad del flujo.

En la *Figura 6* se apreciaban perfectamente los tres parámetros mencionados, ahora ilustrados en la *Figura 81*:

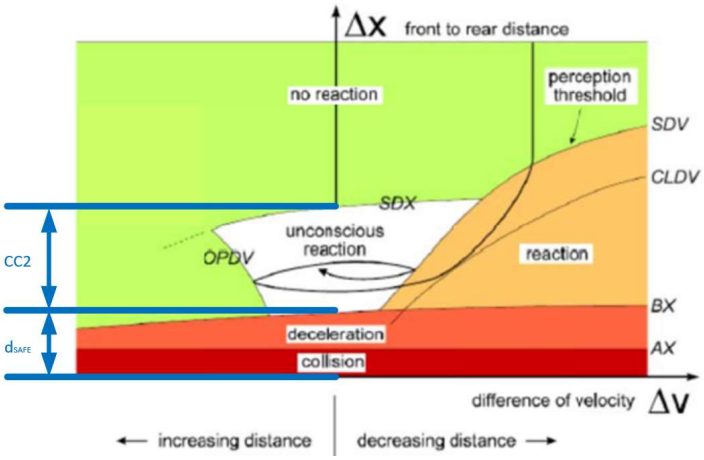


Figura 81: Reacciones del conductor en función de la presencia de otros vehículos (PTV, 2023).

Así pues, el objetivo de un sistema de mejora del flujo del tráfico conllevará la configuración de esos 3 parámetros de una forma adecuada:

- El parámetro CC0 es un parámetro longitudinal puro, es decir, no depende de la velocidad del vehículo, por lo que su aumento implica una mayor y correlativa distancia entre vehículos.

- El parámetro CC1 depende de la velocidad de los vehículos, por lo que a mayor velocidad, mayor distancia agregada.

- El parámetro CC2 conlleva, más que una distancia entre vehículos, una predisposición a crear huecos, lo que tiene una relación directa con el aumento de la permeabilidad.

Todos estos parámetros son configurables en la sección "*Car following model*" del "*Driving Behavior*" de cada vehículo. En la *Figura 82*, se pueden ver los valores por defecto:

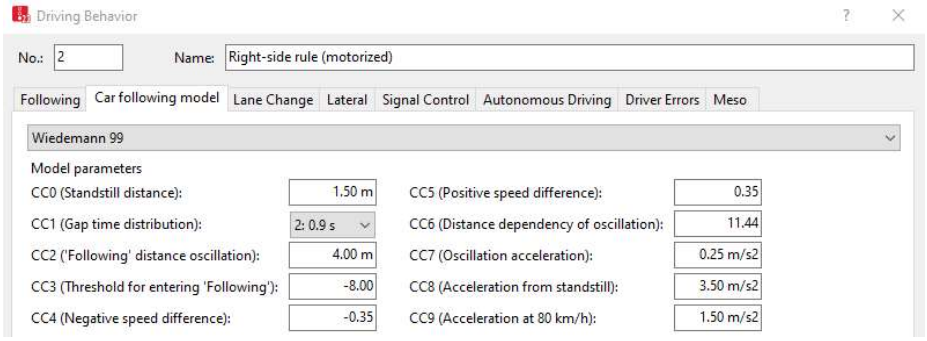


Figura 82: Configuración de los parámetros de Car following según un modelo de Wiedemann 99.

Se han probado distintas variaciones de esos tres parámetros para observar su efecto sobre el tráfico:

- El parámetro CC0 o "*standstill distance*" muestra la distancia mínima entre vehículos independientemente de la velocidad. Está fijada en 1.50 m, que a priori es bastante poco considerando que un vehículo turismo mide de media 4.50 m. Si se evalúa su influencia se comprueba que aumentándolo se aumentan los huecos entre vehículos y sube la permeabilidad, pero la fluidez del tráfico se resiente ya que los conductores comienzan a buscar formar huecos, lo que hace caer la densidad del flujo. Un valor de 2.50 m muestra una mejora aceptable en velocidad e intensidad sin que disminuya en exceso la densidad, mientras que un valor de 1.50 m hace el pelotón más compacto.

- El parámetro CC1 ó "*gap time distribution*" es, sin duda, el de mayor peso en la distancia entre vehículos pues al ir multiplicado por la velocidad su efecto se magnifica. Con un valor inicial de 0.9 s, a una velocidad de 90 km/h, supone una distancia entre vehículos de 22.5 m. Es un valor grande, muy grande, que sumado al anterior, llega hasta los 25 m, lo que implica que un camión con semirremolque de, aproximadamente, 16.50 m de longitud de media pueda intercalarse sin problemas entre dos vehículos. Evaluando su funcionamiento se aprecia que una reducción en su valor podría aumentar la densidad, si bien no se debe hacer en exceso ya que implicaría una merma en la seguridad y una bajada en la permeabilidad para con los vehículos pesados más largos. Pasando de un valor de 0.9 s a 0.8 s se consigue un valor de compromiso aceptable.

- El parámetro CC2 ó "*following distance oscillation*" no juega un papel a priori directo en lo referente a la distancia entre vehículos en situaciones de tráfico saturado, pues se abandona el estado de *following process* para entrar en uno de *mínimum safety distance*. Es decir, los conductores dejan de seguir a su leader de una forma inconsciente (ver región blanca de la *Figura 81*) para situarse en la región inferior de ésta, a una distancia d_{SAFE} constante (o casi). Se ha probado a modificar el parámetro CC2 para ver si produce mejora alguna en situaciones anteriores al punto de *breakdown* y el resultado es que cuanto menor sea éste, menos

oscilaciones habrá en las colas y, por consiguiente, menor efecto acordeón se producirá, evitando que el flujo sincronizado avance aguas arriba del tronco.

Estos tres parámetros se han modificado cuando la intensidad de vehículos aguas arriba de la pérdida del tercer carril del tronco supera el valor de 2000 veh/h. Para ello se han planteado tres *Attribute modification*s que manipulan los parámetros antes descritos, tal y como se puede ver en la *Figura 83*. En el caso de CC0 y CC2, se puede identificar y actuar directamente introduciendo valores; en el caso de CC1 se debe crear un nuevo *Time distribution* (nº104) igual a 0.8 para introducir el valor.

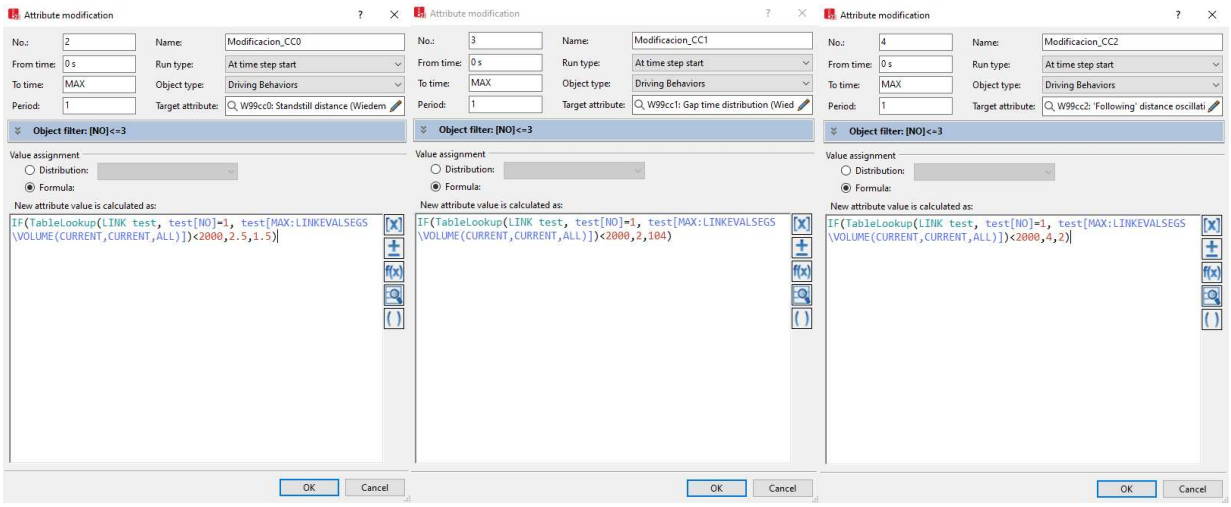


Figura 83: Interfaz para configuración de parámetros del modelo Wiedemann 99. De izquierda a derecha, configuración de CC0, CC1 y CC2.

En síntesis, la modificación de estos tres parámetros tiene una doble vertiente. Por un lado, el aumento de la permeabilidad por la creación de huecos mayores entre dos vehículos consecutivos; por otro lado, la imposición de límites duros y más exigentes desde el punto de vista de la conducción para aumentar la densidad del tráfico sin que caigan volumen y velocidad, lo que conlleva que el conductor pueda tomar decisiones más arriesgadas a la hora de mantenerse en un carril o para moverse lateralmente e introducirse dentro de un hueco existente en el carril adyacente.

Es decir, la modificación activa de estos parámetros permitiría modular el tráfico aumentando la fluidez y el espaciamiento en escenarios de baja intensidad de tráfico, y modificar el comportamiento de los conductores ante una menor fluidez reduciendo su reticencia a efectuar según qué movimientos al variar su criterio a la hora de tomar decisiones.

La aplicación de estos parámetros en cuanto que consiste en un cambio conductual en la forma de conducir de los usuarios de la vía no es trivial y representa un reto. Para poder llegar a ese nivel de ajuste deben utilizarse las técnicas VII en toda su dimensión, automatizando la conducción mediante el uso de asistentes. En la *Figura 84* se pueden observar los distintos niveles de automatización:

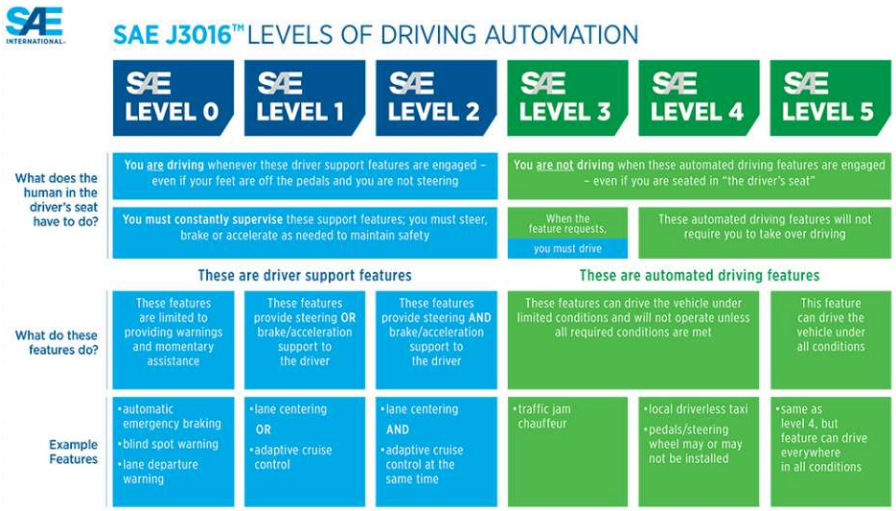


Figura 84: Niveles de conducción autónoma. (SAE, 2019).

En nuestro caso, un control de crucero adaptativo podría valer en situaciones anteriores al punto de *breakdown* en las que el tráfico sea libre o en los primeros estadios del modelo de *car-following*, *clossing and following processes*, alcance y seguimiento. Por el contrario, según se acercase el tráfico al punto de capacidad máxima, esos procesos de seguimiento que se mueven en la zona de reacciones inconscientes pueden derivar en vehículos circulando en procesión a distancias cercanas a la mínima de seguridad y/o a sufrir paradas intermitentes. En ese caso, un asistente de atascos podría adaptarse perfectamente a las consignas que recibiese de la infraestructura y permitiría al vehículo discurrir detectando y/o interconectándose con otros vehículos a su alrededor.

En el primero de los casos se está tratando una automatización de nivel 1 ó 2 de la conducción mientras que en el segundo se pasa ya al nivel 3. Esto significa que partiendo del valor de 2000 veh/h establecido como umbral, por debajo de éste se estarían aplicando sistemas de apoyo a la conducción mientras que por encima se activarían funcionalidades de conducción autónoma. En el caso de los vehículos sin estos sistemas, se debería realizar un apoyo visual por paneles de señalización variable a fin de educar al conductor, si bien su efectividad dependerá de la disposición de los usuarios a respetar la indicación.

La efectividad de esta solución dependerá de la proporción de vehículos que dispongan de estos sistemas en el conjunto del tráfico, así como del porcentaje de ellos en los que sus conductores permitan ese uso automatizado de los sistemas, es decir, el porcentaje de conductores que deleguen la total o parcial conducción a estos sistemas.

Para este caso de estudio se ha considerado que el 100% de los vehículos del modelo poseen los sistemas necesarios para su gestión vía VII, mostrándose los resultados más adelante. En cualquier caso, al igual que se vio en el apartado 2.4.3 (Salas et al., 2019), se podría evaluar en un estudio posterior cómo variarían los resultados obtenidos en función del grado de penetración de estos sistemas sobre el total del tráfico considerado. Para su modelado en PTV Vissim bastaría con crear *vehicle classes* similares a las iniciales cuyos *driving behaviors* tuvieran parámetros invariables y repartir los inputs entre estas nuevas *vehicle classes* y las existentes en una proporción u otra para obtener datos comparativos.

5.2 *Swarms* de vehículos interconectados. *Platooning*.

Un *platoon* es un grupo de vehículos que se siguen los unos a los otros y se mantienen en formación de acuerdo con unas determinadas condiciones: el vehículo líder y sus seguidores se desplazan de forma síncrona dentro del mismo carril, por lo que al acelerar y desacelerar intentan tener en cuenta el tiempo de separación.

La dinámica de un *platoon* varía con respecto a la de un vehículo que avanza individualmente en el tráfico. Mientras que la aceleración y la velocidad de los vehículos en formación interpolan linealmente entre el vehículo de cabeza y el último vehículo, en los vehículos que se rigen por un comportamiento individual esta relación se basa en el modelo de seguimiento de automóviles de Wiedemann.

Para formar un *platoon* basta con que un vehículo se aproxime a otro (o al último de un grupo preexistente) y que frene para situarse a la distancia o gap objetivo del grupo, siempre que no se supere el número máximo de integrantes prefijado. Igualmente, si un grupo se acerca a otro ya formado y que le precede ambos se pueden fusionar si se cumplen las condiciones definidas para cada uno ellos. En el caso contrario, cualquier vehículo puede abandonar la formación, por ejemplo, para seguir su ruta o porque su conductor considera que debe seguir otro ritmo. Para dejar el pelotón de manera segura, el vehículo debe aumentar la distancia con el vehículo precedente y con el posterior, por lo que al segregarse del grupo lo hará formando dos *platoons*.

Una vez dentro del *platoon*, el líder del grupo es el único que interactúa con el resto de los integrantes del tráfico, como si no formase parte del grupo, y toma decisiones en cuanto al desplazamiento longitudinal y lateral consecuentemente. Por el contrario, el resto de los integrantes se limitan a mantener el gap con el vehículo precedente. En cambio, todos los integrantes del grupo mediante sus sensores son capaces de reaccionar ante obstáculos que se encuentren o ante cambios en la señalización que no afectasen a los vehículos situados en la parte delantera del pelotón.

En PTV Vissim la posibilidad de establecer *platoons* y las propiedades de estos grupos se pueden definir en cada *Driving behavior* de los usados en el modelo. Como se aprecia en la *Figura 85*, se dispone de una casilla de habilitación de los pelotones y una serie de propiedades básicas de éstos como pueden ser el número máximo de integrantes permitido, velocidad de circulación (siempre que no se supere la limitada mediante señalización), el *gap* entre vehículos de la formación, o la máxima distancia a la que un vehículo puede detectar y decidir unirse a un *platoon*:

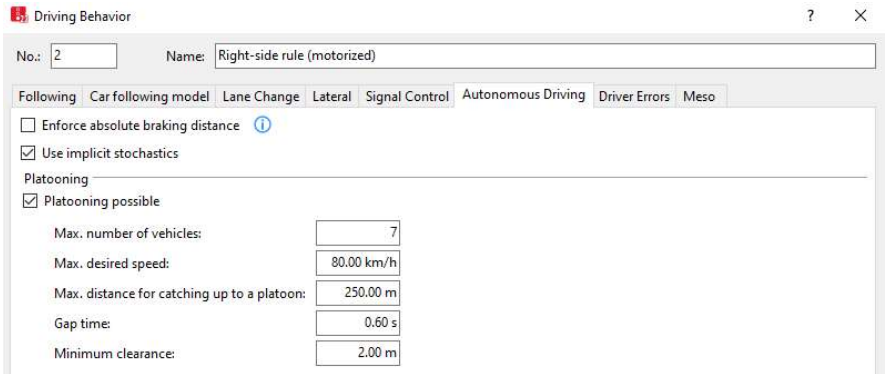


Figura 85: Parámetros de configuración de platoons en Vissim.

Lamentablemente, la activación o manipulación de esos parámetros no puede realizarse online mientas el modelo se está ejecutando.

Idealmente la mejor opción pasaría por implementar un script en la sección de *Attribute Modification* que habilite y restrinja la formación de *platoons* en los dos *Driving behaviors* usados por el modelo de acuerdo a la intensidad registrada justo antes de la pérdida del tercer carril del tronco, una vez ambas entradas de tráfico han convergido y se hubiese producido (si estuviese abierto) el descargo en la calzada extra.

Sin embargo, al no ofrecer el software esa opción (se ha probado incluso creando nuevos *Driving behaviors*, pero el programa tampoco permite la reasignación de los vehículos a éstos una vez iniciada la simulación), el presente trabajo se limita a enunciar este nuevo paradigma y estudiar su efecto en la formación de colas en el tronco de autopista del modelo de estudio.

Respecto al resto de parámetros, se han decidido dejar como en la *Figura 85* ya que la velocidad es ligeramente menor a la velocidad media registrada en el tramo en condiciones de *free-flow,* y el gap y la distancia mínima son ligeramente menores a las de los vehículos del modelo en situaciones de *car-following,* con un comportamiento según el modelo de Wiedemann.

La formación de *platoons* o pelotones se encuadra en los niveles 4 y 5 de conducción autónoma, de acuerdo con la *Figura 84*. En este caso, al tratarse de una autopista, debería ser necesariamente un nivel 5. En este nivel los mecanismos de automatización pueden conducir el vehículo de forma autónoma bajo cualquier circunstancia. De hecho, el conductor podría desentenderse completamente de la conducción durante todo el trayecto o, simplemente, no haber nadie en ese asiento.

Esa posibilidad abre la puerta a los vehículos de servicio público sin conductor, ya sean turismos, derivados, autobuses o autocares. Incluso, en un futuro en el que el paradigma del transporte por carretera se vea reorganizado por la revolución que supone la conducción autónoma, se podría llegar al escenario de poder planificar la circulación de éstos en viajes de recogida o retorno tras un servicio para, ante una previsión de tráfico, evitar situaciones de congestión y colas como las aquí estudiadas.

5.3 Resultados

Para la obtención y valoración del efecto que tienen sobre el conjunto del tráfico los dos métodos presentados anteriormente se utilizarán los mismos criterios y herramientas que los enunciados en el punto 4.6.

5.3.1 Control dinámico de la distancia entre los vehículos

Entender la dinámica del flujo y tomar decisiones que lo modifiquen no es sencillo. El sistema aquí propuesto con su doble acción es un ejemplo: en situaciones lejanas a la saturación, el sistema trata de aumentar la permeabilidad espaciando el convoy, mientras que en situaciones que se acercan al *breakdown* o que directamente ya pierden capacidad, compacta y varía el comportamiento para que los conductores tomen decisiones que sin asistencia alguna no harían, manteniendo el seguimiento dentro del carril.

En un caso o en otro, ambas opciones opuestas persiguen un mismo objetivo: aumentar la capacidad y la velocidad media modulando en un sentido u otro la densidad del flujo. Es un efecto similar a lo que se consigue en una planta industrial con la acción de un rango partido. Por ello, se deben estudiar por separado su efecto según el escenario.

En el caso de un tráfico no saturado, como sería el modelo con la distancia entre pérdidas de carril de 500 m, se aprecia en la *Figura 86* que ante bajas intensidades de tráfico la densidad disminuye conforme aumenta la permeabilidad (gráficas superiores) permitiendo una mayor velocidad media de los vehículos ya que elimina parte de los *closing processes* al tener más espacios para reorganizarse ante los cambios en la sección transversal de la vía (gráfica inferior). Por el contrario, según se va acercando el tráfico al punto de *breakdown*, el sistema comienza a compactar y estabilizar el flujo.

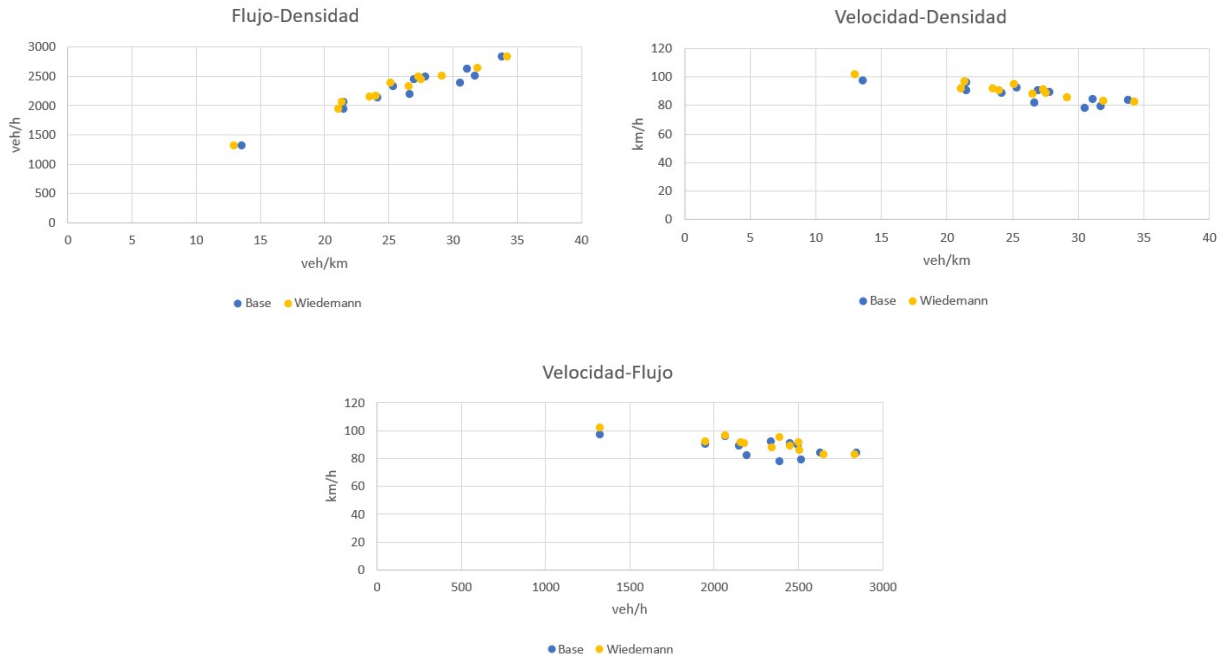


Figura 86: Efecto del sistema de control de distancia en una simulación con tráfico no saturado y L=500 m.

Ese mismo efecto se aprecia bien en la *Figura 87*, correspondiente a un tráfico no saturado pero con el trazado que no cumple la IC, pues en esta situación un tráfico que no debería saturar la vía sí que lo hace (arriba, izquierda) y se nota una pérdida importante en el nivel de servicio de ésta en forma de caída de la velocidad media (abajo). Sin embargo, con el sistema de control de la distancia, la estabilización del flujo es continua y se observa un comportamiento lineal de la ganancia de la capacidad hasta llegar prácticamente al valor máximo empírico (arriba, izquierda), con valores estables en lo referente a densidad (arriba, derecha) y velocidad (abajo).

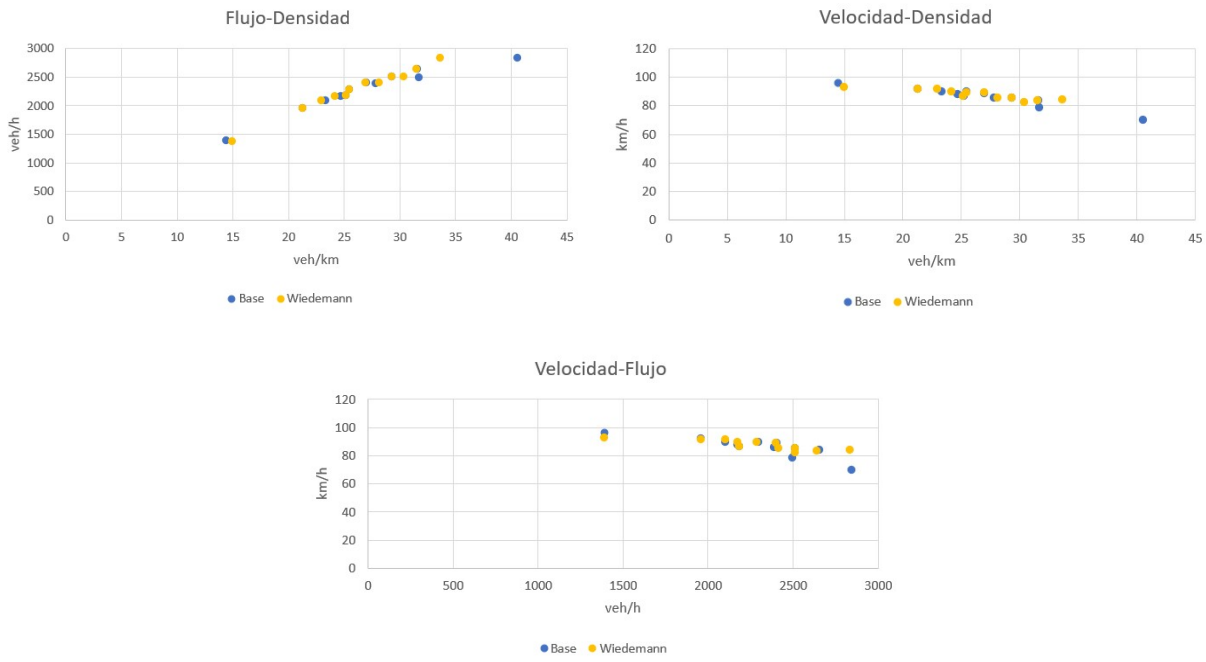


Figura 87: Efecto del sistema de control de distancia en una simulación con tráfico no saturado y L=350 m.

Para un tráfico ya completamente saturado se aprecia que el sistema es igualmente efectivo ya que reduce enormemente la densidad a intensidades altas (arriba, derecha). Sin embargo, cuanto mayor es el volumen de vehículos que ingresan en la sección de estudio, el sistema va perdiendo su efecto positivo en lo referente a la velocidad media registrada (abajo). Esto se debe a que por menor que sea la densidad respecto al escenario base, llega un punto en que la vía alcanza la capacidad empírica obtenida y los vehículos que ingresan lo hacen bajo un escenario de *capacity-drop*, lo que hace que al no poderse compactar más el flujo sincronizado lento que se crea en el cuello de botella comienza poco a poco a extenderse aguas arriba de ese punto.

En cualquier caso, tal y como se aprecia en la *Figura 88*, el sistema es capaz de reducir a 3 los intervalos considerados que se encuentran en un escenario de pérdida de capacidad, respecto a los 6 que se producían sin regulación alguna (arriba, izquierda). Este hecho se puede observar igualmente en términos de densidad (arriba, derecha), y velocidad (abajo), concentrando en ambos casos los valores registrados en 9 de los 12 intervalos en las zonas estables y elásticas de las curvas.

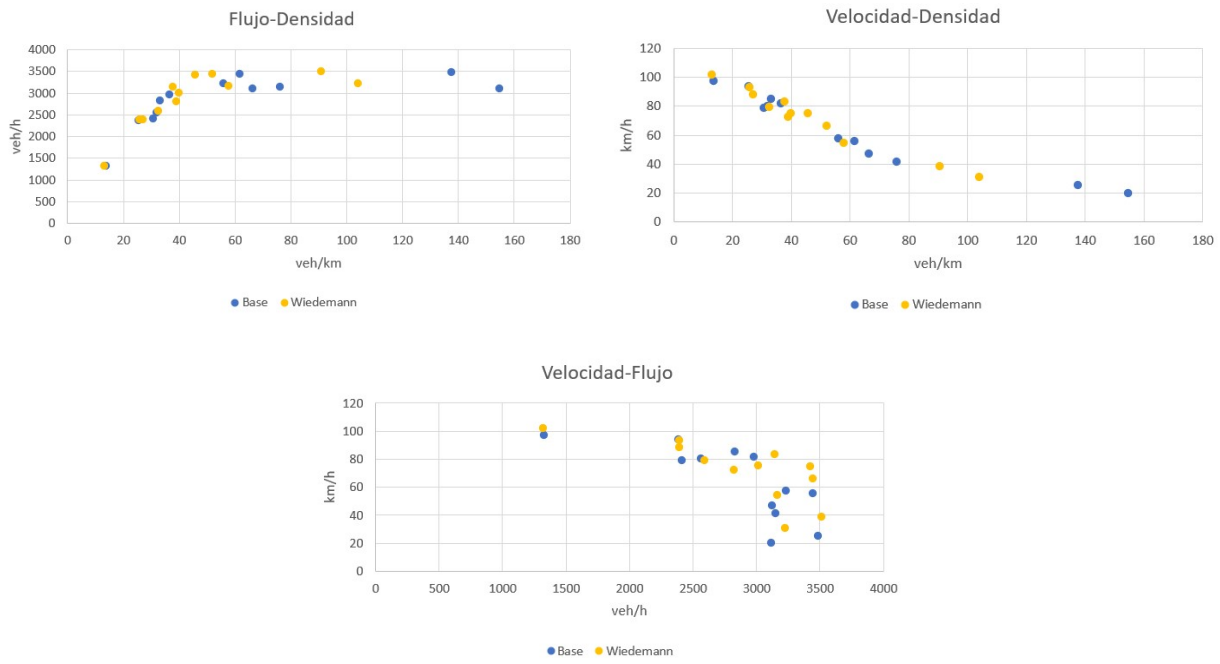


Figura 88: Efecto del sistema de control de distancia en una simulación con tráfico saturado y L=500 m.

5.3.2 Swarms de vehículos interconectados. Platooning.

La existencias de convoyes de vehículos avanzando en formación, a una velocidad constante por debajo de la media del conjunto del tráfico y de forma más compacta a la que los vehículos no automatizados lo hacen, no parece ser la forma óptima de facilitar los movimientos laterales de reorganización ni, consecuentemente, la de evitar la formación de colas tras vehículos lentos. De hecho, un convoy de las características de un *platoon* podría considerarse un vehículo lento de una longitud exagerada, en lo que a efectos de dinámica del flujo del tráfico se refiere.

Así pues, es de esperar que un tráfico en el que discurran *platoons* sea menos dinámico y permeable, y que tenga mayor densidad que uno que se rija única y exclusivamente por las normas del *free-flow* y el modelo de *car-following*. En efecto, eso mismo se puede corroborar con la simulación del tráfico no saturado y el trazado que cumple la IC, como se aprecia en la *Figura 89*. En ella se aprecia cómo la curva de ganancia de capacidad es más lenta que en el escenario base (arriba derecha) y el flujo del tráfico se muestra más compactado y denso (arriba, izquierda) y con velocidades medias futo de esa perturbación del flujo inferiores (abajo).

El efecto, como se ve, puede llegar a suponer el alcanzar el punto de *breakdown* cuando sin *platooning* el mismo tráfico no lo hace.

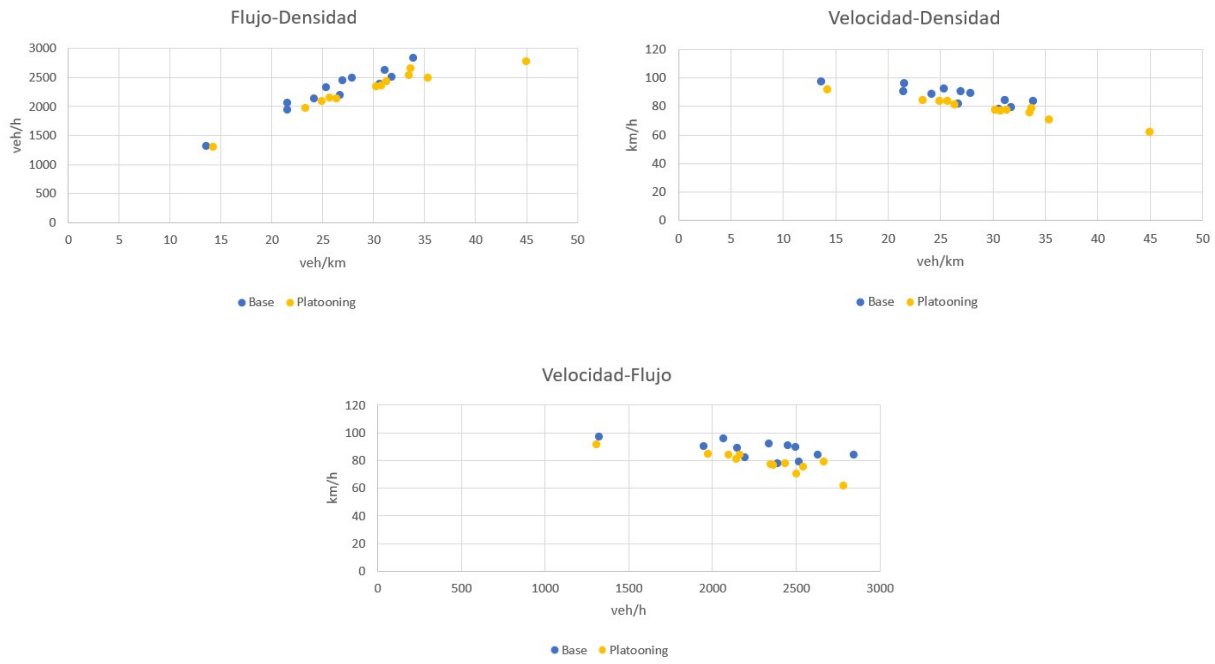


Figura 89: Efecto del platooning en una simulación con tráfico no saturado y L=500 m.

Sin embargo, ésta última afirmación no puede tomarse como absoluta viendo la simulación del mismo tráfico en una sección que no cumple la IC (*Figura 90*). En ese caso, el efecto apaciguador del *platooning* hace que las curvas de ganancia de capacidad (arriba, izquierda), el perfil de velocidades (abajo) y la densidad registrada (arriba, derecha) sean más estables que en el escenario base.

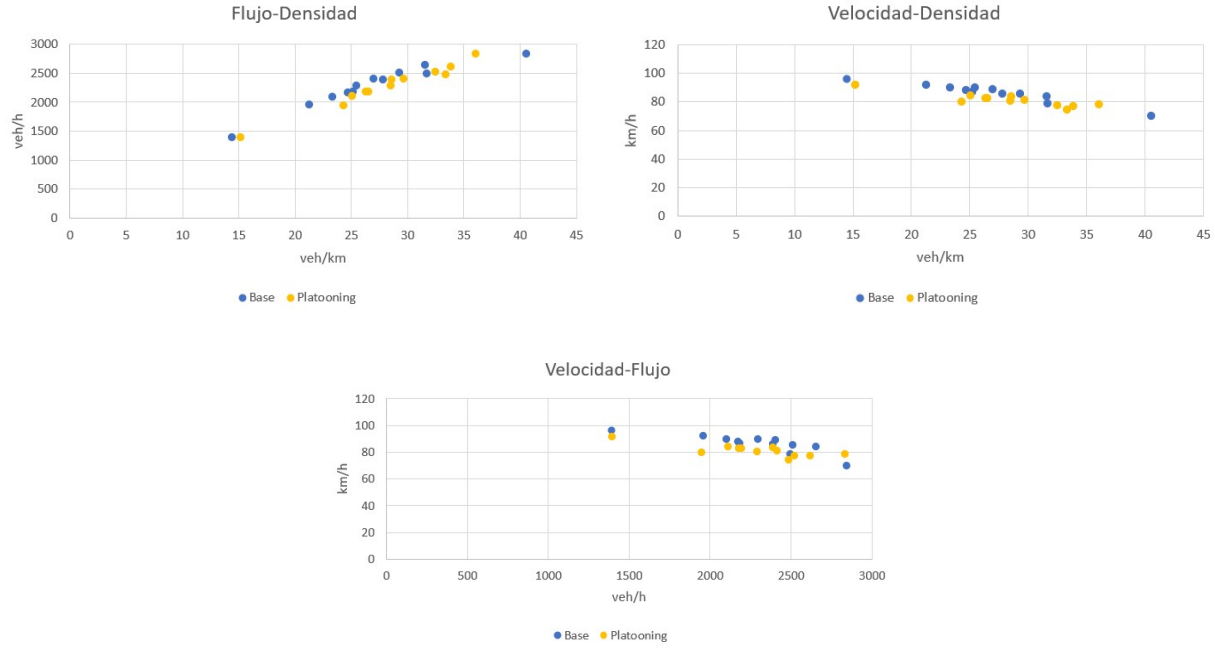


Figura 90: Efecto del platooning en una simulación con tráfico no saturado y L=350 m.

En ese segundo caso se ve que para el punto de mayor intensidad incluso se puede evitar alcanzar el punto de saturación de la vía, si bien en el resto de las observaciones del modelo se cumple que para la misma intensidad, la existencia de *platoons* implica una intensidad circulatoria algo mayor con una bajada de la velocidad media de circulación.

Ese mismo efecto apaciguador descrito en la *Figura 90* se ve corroborado con una tercera simulación con tráfico saturado en la sección de longitud mayor, tal y como se muestra en la *Figura 91*. En este caso, se observa que la ganancia de capacidad (arriba, izquierda) es más lineal y que apenas 2 intervalos de los 12 evaluados superan el punto de *breakdown*, aunque una vez superado éste el comportamiento de la densidad (arriba, derecha) y de la velocidad (abajo) es igual de malo que en escenario base.

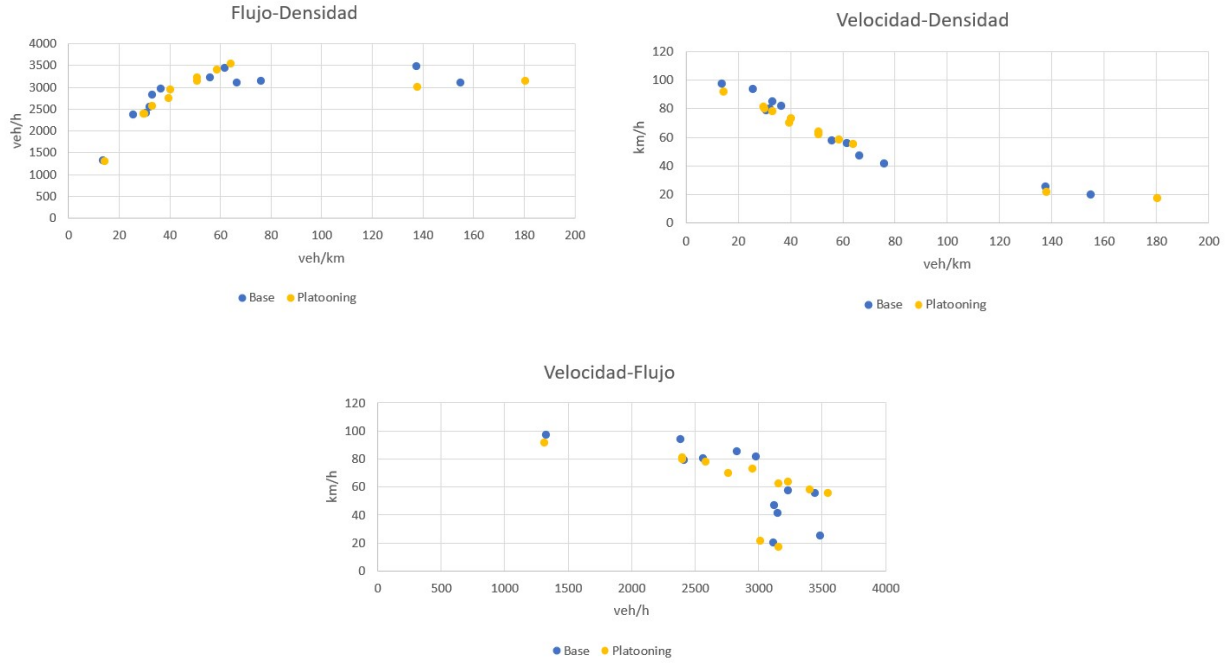


Figura 91: Efecto del platooning en una simulación con tráfico saturado y L=500 m

Este hecho ya se mencionaba en el epígrafe 2.4.3 del presente trabajo, cuando se hablaba del efecto apaciguador de los vehículos autónomos en el conjunto del tráfico (Wu at al., 2018). Análoga conclusión se podría extrapolar al sistema anteriormente descrito, el control dinámico de la distancia entre vehículos.

De la misma manera, otros autores aseguraban que con la ayuda de los *platoons* se podría prevenir situaciones como el *breakdown*, aumentando la capacidad de la vía de forma creciente al porcentaje de penetración de éstos sobre el total del tráfico (Salas et al., 2019). Si bien esto pudiese ser cierto, el mismo autor mencionaba que los resultados dependían del número de vehículos que se concatenaban y el gap que hubiese entre ellos. Para este caso de estudio en el que no ha sido posible el estudiar dinámicamente el efecto de una gestión activa de la activación del *platoon* y de sus parámetros, no se

ha conseguido ese efecto, si bien un posterior trabajo focalizado en ese extremo podría seguir la estela del mencionado trabajo.

5.4 Conclusiones y valoración comparativa.

Los dos sistemas de automatización de la conducción enunciados en este apartado presentan un nuevo mundo de posibilidades en lo referente a adecuar los parámetros de comportamiento de los vehículos que circulan por una autopista.

En el caso del control dinámico se ha implementado un sencillo algoritmo (ver *Figura 83*) de modificación de parámetros SIMO (*Single Input, Multiple Outputs*), partiendo de la intensidad del flujo que presenta buenos resultados. Lo ideal, en cualquier caso, sería realizar uno multivariable que leyese más de un parámetro del tráfico y actuase en consecuencia.

Igualmente, en este trabajo la sintonía de los parámetros se ha realizado sobre la totalidad de los vehículos, ya que tal y como se vio en el caso de los *platoons,* la modificación dinámica de las asignaciones de vehículos a *Diving behaviors* diferenciados no es posible. Un posible punto de continuación de este trabajo sería el estudio de a partir qué porcentaje de penetración de los vehículos autónomos se obtiene la mejora aquí enunciada.

En el caso de los *platoons*, se antoja clave para su viabilidad la posibilidad de activar/desactivar *platooning* y sus parámetros según condiciones reales del tráfico. Sin ese extremo, y viendo los resultados aquí obtenidos, el uso de *platoons* debería restringirse a intensidades de tráfico bajas y/o tramos de autopista sin la complejidad del aquí presentado, pues su efecto negativo sobre la densidad del conjunto y la permeabilidad de éste resultaría contraproducente para la formación de colas que se tratan de evitar.

De cara a cuantificar el efecto de estos dos sistemas, se va a evaluarán en instantes concretos con los mismos criterios seguidos en el apartado 4.7 del anterior capítulo.

Por un lado, considerando la distribución del tráfico no saturado de la *Tabla 7* para el escenario de la sección que cumple la IC, si se pone el objetivo en dos momentos temporales, el primero previo a la capacidad máxima registrada y el segundo el de flujo máximo de esa distribución, se llega a los datos recogidos en la *Tabla 10*, en la que se aprecia que el sistema de control activo de la distancia presenta valores muy similares y coincidentes con los del escenario base mientras que el *platooning* va perdiendo efectividad conforme se llega a la saturación de la vía (punto de *breakdown*), llegando a mostrar un efecto pernicioso sobre la dinámica del flujo conforme se acerca ese momento.

Escenario Base	Intervalo	Densidad	Velocidad	Flujo	Mejora	Intervalo	Densidad	Velocidad	Flujo	Mejora
	1500-1800	31.09	84.55	2628		1800-2100	33.82	84.04	2842	
Control Distancia		31.88	83.11	2649	SI		34.23	82.73	2832	SI
Platooning		33.64	79.23	2666	SI		44.92	61.96	2783	NO

Tabla 11: Resultados de las estrategias de control basadas en VII con tráfico no saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim.

Por el contrario, en ese mismo tramo y con la distribución de tráfico saturado de la *Tabla 7*, se llega a la *Tabla 11*. En ella se aprecia claramente lo anteriormente expuesto, pues el sistema de control activo de la distancia consigue mejorar incluso su efecto con respecto a la fase elástica del tráfico y minimizar el fenómeno de *capacity-drop* (en este caso se valora cuantitativamente en un punto concreto, en el intervalo 1800-2100) mientras que el permitir el *platooning* sólo presenta un efecto positivo en el primero de los periodos evaluados (intervalo 300-600) y se muestra completamente contraproducente en la zona de tráfico saturado (intervalo 1800-2100).

Escenario Base	Intervalo	Densidad	Velocidad	Flujo	Mejora	Intervalo	Densidad	Velocidad	Flujo	Mejora	Intervalo	Densidad	Velocidad	Flujo	Mejora
		25.38	94.04	2386			33.1	85.37	2826			61.56	55.88	3440	
Control Distancia	300-600	25.60	93.27	2387	SI	1200-1500	38.87	72.59	2821	SI	1800-2100	45.67	74.98	3425	SI
Platooning		29.46	81.46	2399	SI		39.39	70.02	2758	NO		63.89	55.51	3546	NO

Tabla 12: Resultados de las estrategias de control basadas en VII con tráfico no saturado y L=500 m. entre pérdidas de carril en PTV Vissim.

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS.

A lo largo del presente trabajo se ha planteado la problemática de las colas en vías de alta capacidad causadas por vehículos lentos y/o cambios en la sección transversal, analizando cómo se forman y cómo se pueden prevenir y mitigar.

Como paso previo se ha realizado un estudio del arte consistente en conocer cómo otros autores han abordado el comportamiento de los vehículos y su interacción entre ellos dentro de la vía y con ésta, y cómo y bajo qué escenarios han estudiado la formación de las colas de vehículos causadas por interferencias en el flujo del tráfico, así como las estrategias de control que se han desarrollado para gestionar esta problemática. Igualmente se ha realizado un estudio de cómo las nuevas tecnologías, los sistemas interconectados y el IoT están revolucionando el mundo digital y han irrumpido en el ámbito del transporte, abriendo la puerta a un nuevo paradigma en lo que a la seguridad y los servicios basado en la automatización se refiere.

Se ha implementado un modelo microscópico en el entorno de simulación del software PTV Vissim consistente en un tramo de autopista de tres carriles en su tronco al que se le une un ramal de incorporación de vehículos y sufre una reorganización de su sección pasando a dos carriles en el sentido de la marcha. Para los escenarios de trabajo simulados se han tomado como base dos distribuciones del tráfico, una que representa intensidades por debajo de la capacidad de la vía (tráfico no saturado) y otra que sobrepasa ese punto de *breakdown* e implica una pérdida de nivel de servicio en la vía (tráfico saturado).

Partiendo de ese modelo se han desarrollado cinco sistemas de control del tráfico basados en tecnologías tradicionales y dos estrategias de control basadas en las nuevas tecnologías *Vehicle-Infraaestructure Integration* (VII).

El estudio comparativo de los resultados demuestra que cada uno de ellos tiene efectividad en escenarios distintos, tanto en lo referente a volumen y composición (tipología de vehículos, no sólo respecto a su fisonomía sino también a su grado de automatización) del tráfico como a la geometría de la vía. Estas particularidades conducen a que un análisis del entorno de aplicación, tanto en lo referente a parámetros del tráfico como al trazado en sí, es clave a la hora de poder identificar qué sistemas de control se adaptan mejor al escenario de trabajo y cómo se pueden interrelacionar y coordinar entre ellos, formando una estrategia de control superior efectiva.

En el caso de los dos sistemas de control basados en *VII*, el control dinámico de la distancia entre los vehículos y los *swarms* de vehículos interconectados, los resultados obtenidos y presentados en este trabajo revelan su enorme potencial, así como su elevado grado de especificidad. Con el ajuste básico realizado en el presente documento su utilidad se asemeja al de otros sistemas tradicionales tratados en el capítulo 4, como son la restricción de vehículos pesados o el control de velocidad. Sin embargo, su complejidad y la multitud de ajustes que ofrecen así a las limitaciones en lo referente a modificación online de parámetros que el software de simulación elegido posee hacen que los resultados aquí mostrados sean una primera aproximación a todas las posibilidades que ofrecen y a que futuros trabajos puedan complementarlos.

La principal contribución de este trabajo se puede resumir en el compendio de las estrategias de control de tráfico que se han simulado y analizado. El objetivo final de cualquier trabajo cuya temática verse

sobre el control implica la selección de unas variables controladas, unas variables manipuladas, la identificación de las perturbaciones que tengan influencia sobre el proceso o situación a controlar, y la elección de la estrategia de control más adecuada que las integre a todas.

En este TFM se han planteado siete sistemas de control del tráfico y se ha evaluado su utilidad. Todos ellos tienen en común que la terna de variables manipuladas y controladas son la tripleta dada por el flujo, la densidad y la velocidad media de los vehículos ligeros del conjunto del tráfico. Partiendo de los conceptos ya mencionados de tráfico en *flujo libre*, modelo de car-*following*, punto de *breakdown* y *capacity-drop*, se pueden identificar las distintas fases del tráfico y discernir entre un tráfico no saturado y uno saturado. De esa forma, se puede evaluar comparativamente la efectividad de cada una de las estrategias de control planteadas, en qué momento muestran su mayor capacidad de control y discernir de qué forma se pueden coordinar y/o complementar para conseguir resultados óptimos sobre el flujo del tráfico en contraposición a un escenario base sin control alguno.

En la *Figura 92* se muestran seis de los siete sistemas de control modelados y su rango de usabilidad según la intensidad de tráfico registrada en base a los resultados obtenidos para las simulaciones realizadas en el trazado que cumple la Norma 3.1-IC. El límite inferior muestra el momento a partir del cual el sistema entra en acción y el superior indica el valor máximo registrado en el que se ha mostrado efectivo desde el punto de vista de control. Respecto al séptimo, la gestión de carriles, no se incluye ya que no muestra efecto alguno en el trazado estudiado. En base a esa clasificación se puede plantear la integración de los mencionados sistemas de control en una estrategia superior agregada.

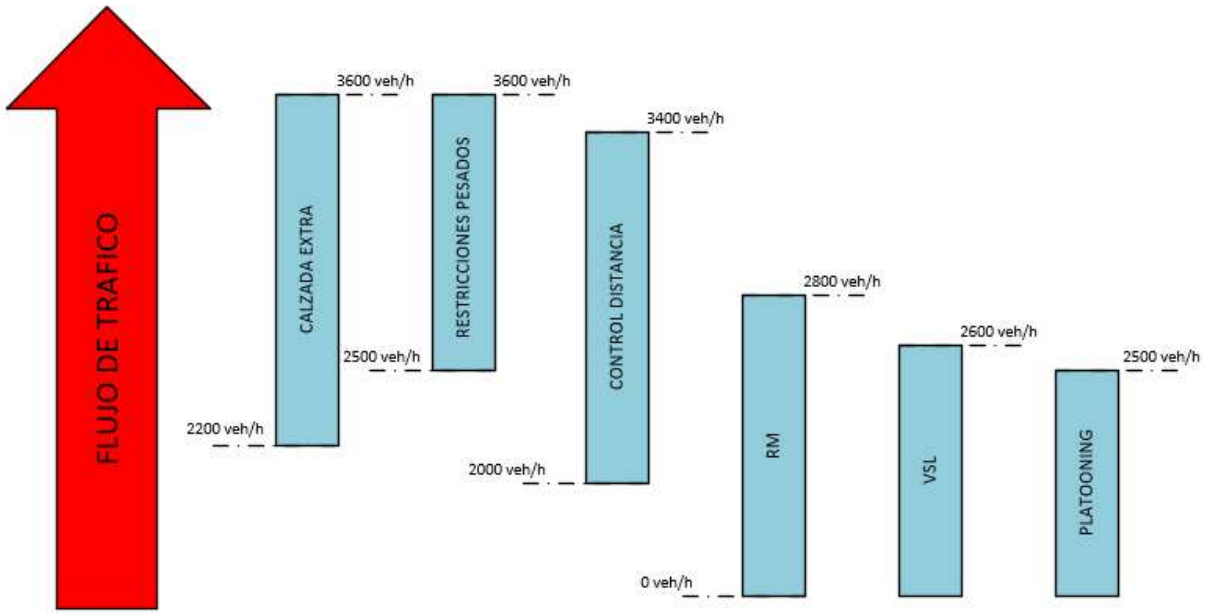


Figura 92: Efectividad de los sistemas de control evaluados en una sección con L=500 m entre pérdidas de carril.

Por lo tanto, este trabajo plantea una primera aproximación a una estrategia de control agregada en lazo abierto que, mediante la evaluación de la intensidad circulatoria en cada momento, active y desactive cada uno de los sistemas de control del tráfico estudiados en base a lo mostrado en la *Figura*

92. Aunque el sistema está diseñado, este sistema complejo de control no se ha podido simular por limitaciones en el software PTV Vissim usado, aunque queda patente su potencialidad.

6.1 Trabajos Futuros

Como trabajos futuros se puede profundizar en el contenido aquí desarrollado para ampliarlo con nuevos sistemas de control del tráfico y nuevos enfoques de integración en un nivel superior.

En ambos casos, y en vista a las limitaciones mencionadas en la memoria, un primer paso para la continuación del trabajo sería transformar el modelo cerrado con programación VBasic, las secuencias en VisVAP y periodo de evaluación prefijado, todo ello desarrollado en la plataforma de PTV Vissim, a uno gestionado por un entorno de programación externo (como MATLAB o Phyton) a través de la interfaz Vissim COM, de tal manera que se pueda en la nueva plataforma pasar de una simulación de periodo continuo a una multi-etapa, con ejecución de los distintos lazos de control de cada sistema. Esto permitiría modificar parámetros, configuraciones y asignaciones, lo que abriría la puerta a los siguientes futuros:

- Optimización de los sistemas planteados, pudiendo modelarlos con mayor detalle y estudiando más en profundidad su efecto. En concreto, permitiría evaluar los sistemas de control activo de la distancia entre los vehículos y los *swarms* de vehículos interconectados.

- Estudio del efecto de posibles perturbaciones en la dinámica del flujo de tráfico, como pueden ser:

    - ✓ Longitud entre pérdidas de carril.
    - ✓ Efecto del trazado en alzado sobre la dinámica del tráfico.
    - ✓ Efecto de distintas distribuciones del tráfico, tanto en composiciones por tipología morfológica (vehículos ligeros, camiones, ciclos, etc.) como por grado de automatización de estos (vehículos interconectados, con sistemas de ayuda a la conducción o, directamente, autónomos).

- Estudio de las combinaciones posibles entre los sistemas aquí enunciados, como pudiese ser el caso de la calzada extra destinada a vehículos pesados.

- Estudio de la efectividad del control agregado de dos o más sistemas de control actuando de manera simultánea sobre el conjunto del tráfico.

- Evaluación de la estrategia de control superior en lazo abierto planteada en este trabajo.

- Desarrollo de estrategias de control superiores más complejas y evaluación de su desempeño.

REFERENCIAS

Echeto, J., Santos, M., & Romana, M. G. (2022). Automated vehicles in swarm configuration: Simulation and analysis. Neurocomputing, 501, 679-693.

Higgs, B., Abbas, M., & Medina, A. (2011, September). Analysis of the Wiedemann car following model over different speeds using naturalistic data. In *Procedia of RSS Conference* (pp. 1-22).

Durrani, U., Lee, C., & Maoh, H. (2016). Calibrating the Wiedemann's vehicle-following model using mixed vehicle-pair interactions. *Transportation research part C: emerging technologies*, *67*, 227-242.

PTV (2023). PTV Vissim 2023, Manual. PTV Planung Transport Verkehr GmbH, Karlsruhe, Germany

Yu, B., Zhou, H., Wang, L., Wang, Z., & Cui, S. (2021). An extended two-lane car-following model considering the influence of heterogeneous speed information on drivers with different characteristics under honk environment. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, *578*, 126022.

Nagatani, T. (1998). Modified KdV equation for jamming transition in the continuum models of traffic. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, *261*(3-4), 599-607.

Jiang, C., Cheng, R., & Ge, H. (2018). Effects of speed deviation and density difference in traffic lattice hydrodynamic model with interruption. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, *506*, 900-908.

Wang, T., Gao, Z., Zhang, J., & Zhao, X. (2014). A new lattice hydrodynamic model for two-lane traffic with the consideration of density difference effect. *Nonlinear Dynamics*, *75*, 27-34.

Wang, T., Cheng, R., & Ge, H. (2019). An extended two-lane lattice hydrodynamic model for traffic flow on curved road with passing. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, *533*, 121915.

Helbing, D., & Treiber, M. (1998). Gas-kinetic-based traffic model explaining observed hysteretic phase transition. *Physical Review Letters*, *81*(14), 3042.

Moussa, N., & Daoudia, A. K. (2003). Numerical study of two classes of cellular automaton models for traffic flow on a two-lane roadway. *The European Physical Journal B-Condensed Matter and Complex Systems*, *31*, 413-420.

Xue, Y. (2005). Lattice models of the optimal traffic current.

Peng, G. (2013). A new lattice model of two-lane traffic flow with the consideration of optimal current difference. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, *18*(3), 559-566.

Peng, G. (2013). A new lattice model of traffic flow with the consideration of individual difference of anticipation driving behavior. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, *18*(10), 2801-2806.

Dervisoglu, G., Gomes, G., Kwon, J., Horowitz, R., & Varaiya, P. (2009, January). Automatic calibration of the fundamental diagram and empirical observations on capacity. In *Transportation Research Board 88th Annual Meeting* (Vol. 15, pp. 31-59).

Asgharzadeh, M., & Kondyli, A. (2018). Comparison of highway capacity estimation methods. *Transportation research record*, *2672*(15), 75-84.

Kerner, B. S. (2000). Theory of breakdown phenomenon at highway bottlenecks. *Transportation Research Record*, *1710*(1), 136-144.

Lorenz, M. R., & Elefteriadou, L. (2001). Defining freeway capacity as function of breakdown probability. *Transportation Research Record*, *1776*(1), 43-51.

Persaud, B., Yagar, S., & Brownlee, R. (1998). Exploration of the breakdown phenomenon in freeway traffic. *Transportation Research Record*, *1634*(1), 64-69.

Laval, J. A. (2006). Stochastic processes of moving bottlenecks: Approximate formulas for highway capacity. *Transportation Research Record*, *1988*(1), 86-91.

Laval, J., Cassidy, M., & Daganzo, C. (2007). Impacts of lane changes at merge bottlenecks: a theory and strategies to maximize capacity. In *Traffic and Granular Flow'05* (pp. 577-586). Springer Berlin Heidelberg.

Laval, J. A. (2009). Effects of geometric design on freeway capacity: Impacts of truck lane restrictions. *Transportation research part B: methodological*, *43*(6), 720-728.

Laval, J. A., Toth, C. S., & Zhou, Y. (2014). A parsimonious model for the formation of oscillations in car-following models. *Transportation Research Part B: Methodological*, *70*, 228-238.

Kerner, B. S., Klenov, S. L., & Schreckenberg, M. (2011). Simple cellular automaton model for traffic breakdown, highway capacity, and synchronized flow. *Physical Review E*, *84*(4), 046110.

Nagatani, T. (1999). Jamming transitions and the modified Korteweg–de Vries equation in a two-lane traffic flow. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, *265*(1-2), 297-310.

Gupta, A. K., & Redhu, P. (2014). Analysis of a modified two-lane lattice model by considering the density difference effect. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, *19*(5), 1600-1610.

Hattam, L. (2018). Travelling wave solutions of the perturbed mKdV equation that represent traffic congestion. *Wave Motion*, *79*, 57-72.

Kotsialos, A., & Papageorgiou, M. (2004). Motorway network traffic control systems. *European Journal of Operational Research*, *152*(2), 321-333.

Kotsialos, A., Papageorgiou, M., Diakaki, C., Pavlis, Y., & Middelham, F. (2002). Traffic flow modeling of large-scale motorway networks using the macroscopic modeling tool METANET. *IEEE Transactions on intelligent transportation systems*, *3*(4), 282-292.

Carlson, R. C., Papamichail, I., Papageorgiou, M., & Messmer, A. (2010). Optimal mainstream traffic flow control of large-scale motorway networks. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, *18*(2), 193-212.

Carlson, R. C., Papamichail, I., Papageorgiou, M., & Messmer, A. (2010). Optimal motorway traffic flow control involving variable speed limits and ramp metering. *Transportation science*, *44*(2), 238-253.

Hadiuzzaman, M., Qiu, T. Z., & Lu, X. Y. (2013). Variable speed limit control design for relieving congestion caused by active bottlenecks. *Journal of Transportation Engineering*, *139*(4), 358-370.

Wang, Y., Papageorgiou, M., Sarros, G., & Knibbe, W. J. (2006). Feedback route guidance applied to a large-scale express ring road. *Transportation research record*, *1965*(1), 79-88.

Ge, H. X., Meng, X. P., Zhu, H. B., & Li, Z. P. (2014). Feedback control for car following model based on two-lane traffic flow. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, *408*, 28-39.

Zhu, W. X., & Zhang, L. D. (2016). Analysis of car-following model with cascade compensation strategy. *Physica A: Statistical Mechanics and Its Applications*, *449*, 265-274.

Van den Berg, M., Hegyi, A., De Schutter, B., & Hellendoorn, H. (2007). Integrated traffic control for mixed urban and freeway networks: A model predictive control approach. *European journal of transport and infrastructure research*, *7*(3).

Zegeye, S. K., De Schutter, B., Hellendoorn, J., Breunesse, E. A., & Hegyi, A. (2012). A predictive traffic controller for sustainable mobility using parameterized control policies. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, *13*(3), 1420-1429.

Li, Z., Liu, P., Xu, C., Duan, H., & Wang, W. (2017). Reinforcement learning-based variable speed limit control strategy to reduce traffic congestion at freeway recurrent bottlenecks. *IEEE transactions on intelligent transportation systems*, *18*(11), 3204-3217.

Wu, Y., Tan, H., Qin, L., & Ran, B. (2020). Differential variable speed limits control for freeway recurrent bottlenecks via deep actor-critic algorithm. *Transportation research part C: emerging technologies*, *117*, 102649.

Bayezit, I. (2014). Practical Coordination of Multi-Vehicle Systems in Formation.

Echeto, J., Santos, M., & Romana, M. G. (2022). Automated vehicles in swarm configuration: Simulation and analysis. *Neurocomputing*, *501*, 679-693.

Liu, L., Zhu, L., & Yang, D. (2016). Modeling and simulation of the car-truck heterogeneous traffic flow based on a nonlinear car-following model. *Applied Mathematics and Computation*, *273*, 706-717.

Wu, C., Bayen, A. M., & Mehta, A. (2018, May). Stabilizing traffic with autonomous vehicles. In *2018 IEEE international conference on robotics and automation (ICRA)* (pp. 6012-6018). IEEE.

Sala, M., & Soriguera, F. (2020). Macroscopic modeling of connected autonomous vehicle platoons under mixed traffic conditions. *Transportation Research Procedia*, *47*, 163-170.

Marjovi, A., Vasic, M., Lemaitre, J., & Martinoli, A. (2015, June). Distributed graph-based convoy control for networked intelligent vehicles. In *2015 IEEE Intelligent Vehicles Symposium (IV)* (pp. 138-143). IEEE.

Martin Gasulla, M. (2011). Estudio y mejora de la capacidad y funcionalidad de glorietas con flujos de tráfico descompensados mediante microsimulación de tráfico. Aplicación a la intersección de la CV-500 con la CV-401. *El Saler(TM Valencia). Licenciatura. UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE VALENCIA*.

Ghanbartehrani, S., Sanandaji, A., Mokhtari, Z., & Tajik, K. (2020). A novel ramp metering approach based on machine learning and historical data. Machine Learning and Knowledge Extraction, 2(4), 21.

MITMA (2023). Mapa de Tráfico de la DGC. Fuente: https://www.mitma.es/carreteras/trafico-velocidades-y-accidentes-mapa-estimacion-y-evolucion/mapas-de-trafico/2020

MACSF (2020). Linking smart sensor technologies and artificial intelligence monitoring . Fuente: https://www.future-industry.org/research/ai/from-driving-assistance-to-autonomous-vehicles/

USDOT (2019). Linking smart sensor technologies and artificial intelligence monitoring. Fuente: https://www.automobileduniya.co.in/2020/08/do-you-know-cars-can-talk-to-each-other.html

Google (2023). Google Maps. Fuente: https://www.google.es/maps

MITMA (2016). Norma 3.1-IC. Trazado. (Orden FOM/273/2016 de 19 de febrero de 2016).

DGT (2016). Carriles para desatascar, Tráfico y Seguridad Vial, nº235. Dirección General de Tráfico, Madrid.

Fixalia (2023). Sago SMS. Fuente: https://www.fixalia.com/sago_sms.html

Servei Català de Trànsit (2017). Límite de velocidad a 90 km/h en episodios de contaminación en Barcelona, econoticias.com. Fuente: https://www.ecoticias.com/co2/135831_limite-de-velocidad-a-90-km-h-en-episodios-de-contaminacion-en-barcelona

SAE (2019). SAE J3016 Levels of Driving Automation. Fuente: https://www.sae.org/news/2019/01/sae-updates-j3016-automated-driving-graphic