

Trabajo Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías  
Industriales

Control dinámico de sistemas de tráfico en autovías:  
comparación de controladores.

Autor: Francisco de Asís de la Vega León

Tutor: José Ramón Domínguez Frejo

**Dpto. Ingeniería de Sistemas y Automática**  
**Escuela Técnica Superior de Ingeniería**  
**Universidad de Sevilla**

Sevilla, 2022





Proyecto Fin de Grado  
Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales

# **Control dinámico de sistemas de tráfico en autovías: comparación de controladores.**

Autor:

Francisco de Asís de la Vega León

Tutor:

José Ramón Domínguez Frejo  
(Juan de la Cierva – Incorporación)

Dpto. de Ingeniería de Sistemas y Automática  
Escuela Técnica Superior de Ingeniería  
Universidad de Sevilla  
Sevilla, 2022



Proyecto Fin de Grado: Control dinámico de sistemas de tráfico en autovías: comparación de controladores.

Autor: Francisco de Asís de la Vega León

Tutor: José Ramón Domínguez Frejo

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

Presidente:

Vocales:

Secretario:

Acuerdan otorgarle la calificación de:

Sevilla, 2022

El Secretario del Tribunal

*A mi familia*  
*A mis maestros*  
*A mis compañeros*



# Agradecimientos

---

En primer lugar, gracias a mi familia; en especial a mi padre, a mi madre y a mi hermana, por ayudarme y motivarme a lo largo de toda mi etapa universitaria. Siempre os agradeceré esos ánimos cuando más se necesitaban, esos consejos cuando no sabía a dónde dirigirme y esa comprensión en los momentos más difíciles; sin vosotros no habría llegado hasta aquí. Gracias al resto de familiares, a los que seguís aquí y a los que no, por vuestro continuo interés en mis estudios y mi formación; sé cuánto os alegráis por mí.

En segundo lugar, gracias a mi tutor, José Ramón. Gracias por tus consejos, tus certeras instrucciones y tu completa disponibilidad. Ha sido un placer y me siento muy afortunado de haber podido trabajar contigo.

Por último, gracias a mis compañeros; por servirme de apoyo y motivación en muchos momentos. Juntos, lo hemos conseguido.

Familia, maestros, amigos; simplemente, gracias.

*Francisco de Asís de la Vega León*

*Alumno del Grado en Ingeniería de las Tecnologías Industriales de la Universidad de Sevilla.*

*Sevilla, 2022.*



# Resumen

---

La congestión vehicular siempre ha sido un impedimento para el desarrollo diario de la economía y la sociedad. Este lastre para el desarrollo social se da a diario tanto en los centros de las grandes ciudades como en los trayectos entre núcleos urbanos. Son numerosos los efectos que provoca la congestión de vehículos, algunos de ellos muy preocupantes para la sociedad como lo son la contaminación y las pérdidas económicas debidas a elevados gastos de combustible. A lo largo de los años se han tomado diferentes medidas con el objetivo de crear redes de transporte más eficientes y seguras.

En los últimos años, se han implementado con éxito técnicas provenientes del Control Automático, con el fin de tratar de generar un modelo fidedigno de la red vial y aplicar diferentes estrategias que regulen el flujo de vehículos. Modelos macroscópicos, como METANET, son muy útiles a la hora de describir las características y variables principales del sistema. Técnicas de control tales como el MPC o el control óptimo han mostrado muy buenos resultados.

En este trabajo se utilizarán ecuaciones propias del modelo macroscópico METANET y, posteriormente, se estudiarán los resultados que se obtienen al aplicar controladores que actúan sobre las incorporaciones (control sobre rampas de acceso) y sobre la red principal (límites de velocidad variables, 'VSL'). Concretamente, analizaremos los resultados obtenidos de aplicar a nuestro modelo los controladores ALINEA, MTFC y LBTFC.

El objetivo final de este trabajo es promover la utilización del control dinámico del tráfico como herramienta para la reducción del tiempo de espera de los vehículos congestionados en un tramo de red. Los resultados obtenidos nos reflejan una clara mejoría en la situación de congestión del tráfico, por lo que se espera que sirva de motivación para aplicaciones futuras en situaciones reales.



# Abstract

---

Traffic congestion has always been an impediment to the daily development of the economy and society. This ballast for social development occurs daily both in the centers of large cities and on the routes between urban centers. There are numerous effects caused by vehicle congestion, some of them very worrying for society, such as pollution and economic losses due to high fuel costs. Over the years, different measures have been taken with the aim of creating more efficient and safer transport networks.

In recent years, techniques from Automatic Control have been successfully implemented in order to try to generate a reliable model of the road network and apply different strategies to regulate the flow of vehicles. Macroscopic models, such as METANET, are very useful when describing the main characteristics and variables of the system. Control techniques such as MPC or optimal control have shown very good results.

In this work, own equations of the METANET macroscopic model will be used and, subsequently, the results obtained by applying controllers that act on the incorporations (control on access ramps) and on the main network (variable speed limits, 'VSL '). Specifically, we will analyze the results obtained from applying the ALINEA, MTFC and LBTFC controllers to our model.

The final objective of this work is to promote the use of dynamic traffic control as a tool to reduce the waiting time of congested vehicles in a section of the network. The results obtained reflect a clear improvement in the traffic congestion situation, so it is expected that it will serve as motivation for future applications in real situations.



<b>Agradecimientos</b>	<b>ix</b>
<b>Resumen</b>	<b>xi</b>
<b>Abstract</b>	<b>xiii</b>
<b>Índice</b>	<b>xv</b>
<b>Índice de Tablas</b>	<b>xviii</b>
<b>Índice de Figuras</b>	<b>xiv</b>
<b>Notación</b>	<b>xxii</b>

## **1 Introducción y Objetivos del Proyecto**

- 1.1. Congestión vehicular*
- 1.2. Causas*
- 1.3. Efectos*
- 1.4. Principales soluciones*
  - 1.4.1. Soluciones convencionales*
  - 1.4.2. Control dinámico del tráfico*
  - 1.4.3. Solución adoptada en este trabajo*

## **2 Modelo**

- 2.1. Introducción y clasificación de los modelos*
- 2.2. Ecuaciones comunes*
- 2.3. METANET*

## **3 Controladores**

- 3.1. ALINEA*
- 3.2. MTFC*
- 3.3. LB-TFC*

## **4 Resultados**

- 4.1. Resultados del modelo (caso sin controlar)*
- 4.2. Resultados ALINEA*
- 4.3. Resultados MTFC*
- 4.4. Resultados LB-TFC*
- 4.5. Conclusiones*

## **Referencias**

## **Anexos**



# ÍNDICE DE TABLAS

---

Tabla 4-1. Parámetros característicos del tramo de red.

Tabla 4-2. Resultados.



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

- Figura 1-1. Puente de Chaoyang, Pekín.
- Figura 1-2. Gases contaminantes producidos por los vehículos.
- Figura 1-3. Esquema típico de sistemas de control de tráfico.
- Figura 1-4. Semáforo instalado en una incorporación.
- Figura 2-1. Esquema de tramo de carretera.
- Figura 2-2. Diagrama fundamental.
- Figura 3-1. Esquema de control 'feedback'.
- Figura 3-2. Esquema del funcionamiento del control MTFC.
- Figura 3-3. Efecto en la densidad crítica al aplicar VSL.
- Figura 3-4. Esquema de control tipo cascada.
- Figura 3-5. Estructura del control LB-TFC.
- Figura 3-6. Diagrama de flujo del control LB-TFC.
- Figura 4-1. Tramo de carretera objeto de estudio.
- Figura 4-2. Demanda de vehículos.
- Figura 4-3. Evolución de la densidad en el caso sin controlar.
- Figura 4-4. Evolución de la velocidad en el caso sin controlar.
- Figura 4-5. Evolución del flujo en el caso sin controlar.
- Figura 4-6. Colas de vehículos que se forman en el caso sin controlar.
- Figura 4-7. Evolución de la densidad en el caso de aplicar 'ramp-metering' (ALINEA).
- Figura 4-8. Evolución de la velocidad en el caso de aplicar 'ramp-metering' (ALINEA).
- Figura 4-9. Evolución del flujo en el caso de aplicar 'ramp-metering' (ALINEA).
- Figura 4-10. Colas de vehículos que se forman en el caso de aplicar 'ramp-metering' (ALINEA).
- Figura 4-11. Evolución temporal del valor de 'ramp-metering'.
- Figura 4-12. Evolución de la densidad en el caso de aplicar VSL (MTFC).
- Figura 4-13. Evolución de la velocidad en el caso de aplicar VSL (MTFC).
- Figura 4-14. Evolución del flujo en el caso de aplicar VSL (MTFC).
- Figura 4-15. Colas de vehículos que se forman en el caso de aplicar VSL (MTFC).
- Figura 4-16. Evolución temporal del valor de VSL.
- Figura 4-17. Evolución de la densidad en el caso de aplicar VSL (MTFC) -suavizado-.
- Figura 4-18. Evolución de la velocidad en el caso de aplicar VSL (MTFC) -suavizado-.
- Figura 4-19. Evolución del flujo en el caso de aplicar VSL (MTFC) -suavizado-.
- Figura 4-20. Colas de vehículos que se forman en el caso de aplicar VSL (MTFC) -suavizado-.
- Figura 4-21. Evolución temporal del valor de VSL -suavizado-.
- Figura 4-22. Evolución de la densidad en el caso de aplicar ALINEA y VSL (MTFC).
- Figura 4-23. Evolución de la velocidad en el caso de aplicar ALINEA y VSL (MTFC).

Figura 4-24. Evolución del flujo en el caso de aplicar ALINEA y VSL (MTFC).

Figura 4-25. Colas de vehículos que se forman en el caso de aplicar ALINEA Y VSL (MTFC).

Figura 4-26. Evolución temporal del valor de VSL en el caso de aplicar ALINEA y VSL (MTFC).

Figura 4-27. Evolución temporal del valor de 'ramp-metering' en el caso de aplicar ALINEA y VSL (MTFC).

Figura 4-28. Evolución de la densidad en el caso de aplicar LB-TFC.

Figura 4-29. Evolución de la velocidad en el caso de aplicar LB-TFC.

Figura 4-30. Evolución del flujo en el caso de aplicar LB-TFC.

Figura 4-31. Colas de vehículos que se forman en el caso de aplicar LB-TFC.

Figura 4-32. Evolución temporal del valor de VSL1 en el caso de aplicar LB-TFC.

Figura 4-33. Evolución temporal del valor de VSL2 en el caso de aplicar LB-TFC.

Figura 4-34. Evolución temporal del valor de 'ramp-metering' en el caso de aplicar LB-TFC.

Figura 4-35. Evolución del flujo en el cuello de botella en los distintos casos.

MPC	Model Predictive Control
RM	Ramp Metering
VSL	Variable Speed Limit
TTS	Total Time Spent
$m$	Enlace
$N_m$	Numero de segmentos
$\lambda$	Número de carriles
$i$	Índice que indica el segmento en cuestión
$\rho_i$	Densidad de vehículos
$v_i$	Velocidad media de los vehículos
$k_m$	Instante de tiempo
$T_m$	Período de simulación
$v_{free,i}$	Velocidad durante flujo libre de congestión
$q_i$	Flujo de vehículos
$\beta_i$	Ratio de salida
$w_i$	Número de vehículos acumulados en una cola
$D_i$	Demanda de vehículos
$q_{ramp,i}$	Flujo de vehículos en una incorporación
$V(\rho_i(k_m))$	Velocidad deseada por los conductores
$V_{C,i}$	Velocidad límite aplicada
$V_{wVSL}$	Velocidad deseada en ausencia de VSL
$\rho_{crit,i}$	Densidad crítica
$C_{ramp,i}$	Capacidad de vehículos de una incorporación
$\rho_{max,i}$	Densidad máxima
$r_i$	Tasa aplicada de ‘ramp-metering’
$w_o$	Número de vehículos acumulados en el origen
$q_{max,o}$	Flujo máximo en el origen
ALINEA	Asservissement linéaire d’entrée autoroutière
MTFC	Mainstream Traffic Flow Control
LBTFC	Logic Based Traffic Flow Control
$K_{ALINEA}$	Ganancia del controlador ALINEA
$b$	Tasa aplicada de VSL
$K_{MTFC}$	Ganancia del controlador MTFC
$K_P$	Ganancia proporcional
$K_I$	Ganancia integral
$V_{hold}$	Vehículos retenidos
$V_{rel}$	Vehículos liberados
$C_B$	Capacidad del cuello de botella



# 1 INTRODUCCIÓN Y OBJETIVOS DEL PROYECTO

---

Actualmente, uno de los mayores inconvenientes al que se enfrentan los ciudadanos a diario son las aglomeraciones de vehículos que se dan a lo largo del día en diferentes puntos de la red de tráfico. Este fenómeno puede provocar diferentes factores que empeorarán el bienestar social y económico de la población, tal y como expondremos más adelante.

En el presente capítulo describiremos con detalle este problema, tanto sus causas como sus efectos, y propondremos diferentes soluciones para solventarlo. Por último, expondremos una pequeña introducción a la solución propuesta en este trabajo, apoyándonos en técnicas de control que se vienen implementando en los últimos años.

## 1.1. Congestión vehicular.

Una definición que podemos encontrar en la conocida página web ‘Wikipedia’ es la siguiente: “La congestión vehicular, embotellamiento o atasco se refiere, tanto urbana como interurbanamente, a la condición de un flujo vehicular que se ve saturado debido al exceso de demanda de las vías, produciendo incrementos en los tiempos de viajes y atochamientos. Este fenómeno se produce comúnmente en las horas punta y horas pico, y resultan frustrantes para los automovilistas, ya que resultan en pérdidas de tiempo y consume excesivo de combustible.”



Figura 1-1. Puente de Chaoyang, Pekín.

Este fenómeno lo podemos encontrar, independientemente, tanto en países desarrollados como en vías de desarrollo, por lo que deducimos que es un problema global. Son famosas las imágenes que podemos encontrar en las autopistas norteamericanas o en los centros urbanos de países asiáticos [Figura 1-1]. Este problema, que se da en todo el mundo, afecta de forma negativa al día a día de los ciudadanos, dando lugar a factores que empeoran la actividad económica y el bienestar social.

El aumento en el flujo de vehículos provoca atascos que en general pueden llevarnos a pasar demasiado tiempo en el vehículo, derivando esto en diversos problemas que enumeraremos más adelante. Desde hace varias décadas, tanto la longitud como el número de atascos en la red de tráfico han aumentado debido a diferentes causas.

En la web del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda urbana del Gobierno de España (MITMA) [1], podemos encontrar datos sobre la evolución del tráfico en un periodo comprendido entre los años 2000 y 2018. Si bien los datos nos muestran que en este periodo de tiempo han incrementado numerosas variables, las previsiones para los futuros años pueden no seguir esta tendencia. El incremento de la contaminación y del precio de los carburantes pueden llevar a que se adopten políticas que busquen reducir el flujo de vehículos a lo largo de las redes de tráfico, sobre todo en núcleos urbanos.

En [2] podemos encontrar como las políticas de la Unión Europea llevan varios años tratando de mitigar el claro problema que afrontan los ciudadanos europeos en el ámbito del transporte. Sin embargo, es notable que actualmente, en el año 2022, seguimos encontrándonos con situaciones de congestión vehicular en las ciudades que provocan situaciones de descontrol.

Hechos como el aumento de la población en las grandes ciudades y el incompleto desarrollo de la mayoría de las redes de transporte público hacen que los ciudadanos opten más por escoger el vehículo propio como forma principal de transporte. Esta situación incrementa claramente el número de usuarios en las carreteras.

Por lo tanto, hoy en día, este problema de las congestiones de tráfico es una de las mayores dificultades a la que se enfrentan los ciudadanos a la hora de desplazarse de un lugar a otro. Estas acumulaciones temporales de vehículos tienden a producirse, a determinadas horas del día y a lo largo de ciertos días de la semana; coincidiendo, por ejemplo, con el inicio o el final de la jornada laboral, días festivos, eventos culturales y deportivos, o en las operaciones de ida y retorno que se dan en los periodos vacacionales. Son en todos estos casos en los que la capacidad de la red se ve desbordada debido a la alta demanda de vehículos y se disminuye el flujo de vehículos deseable.

En los próximos dos apartados abordaremos con más detalle tanto las causas como los principales efectos que generan los atascos.

## 1.2. Causas.

La primera pregunta que se nos puede pasar por la cabeza podría ser, ¿cómo y por qué se llega a la situación de congestión vehicular? A continuación, comentaremos varios escenarios que pueden terminar provocando un atasco indeseable en la red vial.

### **Elevada demanda.**

La principal causa que provoca que el flujo de vehículos genere una congestión o atasco es la alta demanda a la que se puede enfrentar la red en determinadas ocasiones. Esta alta demanda viene dada por el aumento en la flota de vehículos en los últimos años. Si nos dirigimos de nuevo a [1], podemos encontrar que cada año nos encontramos con un leve aumento porcentual en la demanda de vehículos que utilizan las vías de transporte por carretera.

El auge de empresas que proporcionan servicios de transporte personal aumenta el número de personas que optan por el transporte privado o unipersonal, dejando de lado el transporte público. Un aumento en el uso del transporte público descongestionaría los centros urbanos. La disponibilidad de una amplia y eficiente red de transporte público juega un papel muy importante en este sentido.

**Horas punta.**

Los atascos se suelen generar principalmente en las conocidas como horas punta u horas pico, coincidiendo con la entrada o salida del trabajo, por ejemplo. Son en estas horas cuando se concentra esa alta demanda, a la que nos venimos refiriendo, de numerosas personas queriendo hacer uso de la red vial en un pequeño tramo horario. Cuando los desplazamientos se realizan a estas horas, se puede llegar a una situación de congestión que haga que aumente el tiempo transcurrido desde un origen a un destino.

El caso más típico y que se da con más frecuencia es el provocado en el acceso a las grandes ciudades, que soportan la entrada y salida de ciudadanos cuyo domicilio se encuentra a las afueras de la ciudad o en otra localidad y se trasladan en vehículo propio para asistir a su puesto de trabajo. Otros escenarios clave los comentaremos a continuación.

**Puntos críticos.**

Por otro lado, en ocasiones no es tan importante la hora a la que se produce el atasco, sino el lugar. En este caso nos encontramos con el problema de la concentración de una alta demanda en un espacio reducido o limitado.

Hay lugares que son más propensos a albergar una congestión vehicular, debido a su situación o al estado de la red en ese punto. Los accesos a aeropuertos, estaciones de tren, centros comerciales, playas, estaciones de esquí, ..., son claros ejemplos. Cabe también destacar las aglomeraciones de vehículos en periodos de trayectos vacacionales o eventos culturales.

**Conducción anómala.**

La conducción imprudente o la existencia de vehículos lentos en la red puede también generar atascos en cualquier instante. En ocasiones, la mala conducción llevada a cabo por algunos conductores puede ser la detonante de que se produzcan frenazos, aceleraciones bruscas o adelantamientos innecesarios. Esto puede provocar accidentes y la posterior saturación de la vía debido a ellos.

Otro factor que se genera debido a una conducción insegura son las conocidas como “ondas de choque”, las cuales se trasladan a lo largo de la red provocando caídas en la capacidad de ciertos tramos.

**Infraestructura.**

En la mayoría de los casos, el hecho de que la capacidad de la vía no sea la adecuada es un gran causante de la formación de un atasco. El uso de la red de transporte por una cantidad de vehículos para la cual no fue diseñada hace que dispongamos de un conjunto de redes “infra dimensionadas”. En estos casos la capacidad se ve desbordada por el elevado flujo de vehículos que ingresan en la red.

**Condiciones meteorológicas.**

Las condiciones adversas en el ambiente también son un gran problema a la hora de conducir un vehículo. Las intensas lluvias, por ejemplo, hacen que se reduzca considerablemente la velocidad de circulación de todos los vehículos. Esto, acompañado del peligro de la pérdida de adherencia al asfalto, provoca que se adopten velocidades más reducidas.

Otras condiciones, como la niebla o la nieve, afectan claramente a la conducción, generando en esta una actitud más prudente a la hora de circular.

### **1.3. Efectos.**

Como ya sabemos y hemos comentado, el elevado tráfico es el causante de numerosos problemas que conciernen a la ciudadanía. Destacaremos los efectos económicos, los medioambientales y los que afectan al desarrollo de la congestión, incrementando estos últimos el tiempo de mitigación de un atasco.

#### **Mayor probabilidad de accidentes.**

La concentración al volante puede verse disminuida al encontrarnos parados en la carretera. Esta idea puede agravar el comportamiento a la hora de la conducción generando un descontento al ver que no llegaremos al destino en el tiempo deseado. En estos casos, la tendencia de algunos conductores es la de una conducción más brusca y por ello más peligrosa, llegando a producirse adelantamientos inesperados que pueden desembocar en un accidente.

Algunos conductores, en estos escenarios de impotencia y aburrimiento, tienden también encender la radio, reproducir música o mirar el móvil; conductas que son una clara distracción más que provoca despistes. Esto puede terminar produciendo un accidente debido a un alcance vehículo-vehículo.

Todo lo anterior puede conllevar a elevar las distracciones al volante, la ira, la fatiga, etc. Además, el cansancio puede verse incrementado al estar demasiado tiempo parado, lo que puede hacer que disminuya considerablemente nuestra atención al volante.

Los vehículos voluminosos, como los camiones de transportistas, son más vulnerables en los cambios de velocidad, dado que necesitan más tiempo para acelerar o frenar. Este hecho, sumado a los anteriores, son claros factores que pueden llegar a producir un accidente de tráfico.

#### **Retrasos.**

La primera preocupación con la que se encuentra un conductor es cuando se plantea si va a llegar o no a tiempo su destino. Este fenómeno lo encontramos principalmente a la hora de acudir al trabajo. El tiempo que van a utilizar los conductores para desplazarse de un punto a otro es, en determinadas ocasiones, crucial dado que un tiempo excesivo puede llegar a ser un tiempo perdido e improductivo.

Por otra parte, los retrasos de los camiones de empresas transportistas pueden generar pérdidas debido a las demoras en las entregas de suministros.

#### **Contaminación y gasto de combustible.**

Otra consecuencia que provoca el elevado tráfico y que a la vez es preocupación para todos es el impacto en el medio ambiente que tiene. Es conocido que un vehículo a bajas velocidades consume más que manteniendo una velocidad constante en su trayecto, debido a los cambios de marcha.

A su vez, al consumir más combustible se incurren en más costes a la hora de comprar gasolina, y sobre todo en estos tiempos en los que precio del combustible se encuentra en máximos históricos. Todo este impacto en la actividad económica provoca descontento general en la población.

El conjunto de vehículos emitiendo gases contaminantes se conoce como foco de línea, ya que solo se produce en determinadas horas y la lo largo de un tramo de carretera determinado, pero esta exposición es suficiente para producir una elevada contaminación. Toda esta contaminación afecta en gran medida a la calidad de vida.

Las elevadas emisiones de dióxido de carbono afectan a la salud. La gran concentración de vehículos suele también venir de la mano de grandes ruidos de los motores y cláxones que afectan a la contaminación acústica. La contaminación sonora también es clave en este contexto.



Figura 1-2. Gases contaminantes producidos por los vehículos.

Todos estos efectos adversos nos llevan a idear soluciones que disminuyan tanto las emisiones contaminantes como los tiempos empleados por los conductores.

## 1.4. Principales soluciones.

Han sido muy diversas las soluciones propuestas a lo largo de los años, algunas más acertadas y otras menos. Por ello, en este capítulo mencionaremos algunas de ellas. Comenzaremos mencionando varias alternativas y en el segundo apartado daremos una introducción al control dinámico del tráfico [3, 2], concepto en el que se basa todo el estudio de este trabajo. Por último, expondremos brevemente lo defendido en este trabajo basándonos en el ya comentado control dinámico del tráfico.

### 1.4.1. Soluciones convencionales.

El problema de la congestión vehicular ha sido recientemente un claro ámbito de preocupación social. Han sido muy numerosos los intentos por reducir estos escenarios que se generan diariamente en torno a los núcleos urbanos. A continuación, mencionaremos diferentes medidas clave que se han ido adoptando con el fin de mitigar estos atascos o bien reducir su impacto en el día a día de los ciudadanos.

#### **Aumento de la capacidad de la red.**

Para empezar, la primera solución que se nos viene a la cabeza es el aumento de los carriles y ramales o la creación de nuevos accesos a las ciudades. La idea de expandir la red no es la solución más económica. Esto conlleva una elevadísima inversión y demasiado tiempo para que se lleve a cabo. Los elevados costes que se prevén nos llevan a pensar en idear otras posibles soluciones. Esta idea poco práctica de extender la red añadiendo carriles o generando nuevas conexiones es además una solución que provoca un gran impacto visual y medioambiental, además de que en algunos núcleos urbanos el aumento de la red se hace imposible debido a la falta de espacio. Por otro lado, son inversiones a largo plazo, dado que la construcción de este tipo de infraestructuras puede alargarse meses e incluso años. Estas elevadas inversiones nos hacen tener que pensar en soluciones que se basen en un mejor uso de las instalaciones disponibles.

### **Disminución de la demanda.**

En los últimos años se ha intentado también limitar el acceso de determinados vehículos a algunas zonas. El principal ejemplo es el de la prohibición a entrar en algunos núcleos urbanos a vehículos propulsados por combustible, dejando entrar solo a vehículos eléctricos o a vehículos con matrículas pares e impares. Esto, en un principio, reduciría el número de vehículos en determinadas zonas. Sin embargo, esto no mejora mucho la situación de congestión en muchas ocasiones.

### **Aumento del transporte público.**

Otra medida ha sido la apuesta por los gobiernos de aumentar la oferta de transporte público urbano e interurbano. El hecho de elegir el transporte público como principal medio de transporte supondría un respiro para las redes viales puesto que reduciría considerablemente el uso del medio de transporte particular.

Han sido numerosas las medidas optadas para captar la atención y promocionar e incentivar el uso del transporte público. Medidas como la propulsión de autobuses mediante energías limpias o la creación de carriles exclusivos para el uso de este tipo de transporte.

### **1.4.2. Control dinámico del tráfico.**

Por su parte y, hablando sobre el tema que nos concierne, el control dinámico del tráfico usa medidas de las condiciones del tráfico y calcula señales de control dinámicas para aplicarlas con el fin generar un cambio en el comportamiento de los conductores y ver así mejorado el comportamiento de la red.

Como postula [3], el control dinámico del tráfico es una alternativa cuyo principal objetivo es el incremento de la seguridad y la eficiencia de la red de tráfico existente. Este autor defiende la necesidad de un control orientado a la red completa, puesto que la situación de un punto de la red puede afectar a otro que esté más alejado. La fuerte correlación entre las diferentes medidas hace necesario un control coordinado que asegure que todas las medidas tomadas sirvan al mismo objetivo.

El hecho de aumentar el número de variables de control incrementa la controlabilidad del sistema, pero a su vez aumenta su complejidad. Por ello, este autor propone el control de tráfico orientado a la red, con dos fundamentos principales: la coordinación y la predicción. Anticiparse a eventos futuros puede prevenir problemas en vez de tener que conformarnos con reaccionar a ellos.

Por otro lado, si los sensores no proporcionan los datos necesarios, entonces es cuando se hace uso de técnicas de estimación de datos. Por último, este autor comenta que la adaptabilidad es el último de los aspectos que debería perseguir este tipo de técnicas de control.

Los sistemas de control dinámico suelen operar de acuerdo con sistemas lineales y locales. Técnicas como el control MPC ('Model Predictive Control') [2] pueden ser muy útiles a la hora de implementarlos. El principal problema de estas técnicas es el elevado coste computacional que acarrear cuando son aplicadas a redes de gran tamaño. Un controlador tipo MPC requiere de un modelo preciso y a su vez rápido, de manera que pueda ser usado en aplicaciones en línea. Por otro lado, encontramos controladores mucho más sencillos de implementar, que son los que aplicaremos en este trabajo.

En los últimos años, los datos históricos sobre el tráfico han sido utilizados en los centros de control de tráfico que trabajan según un razonamiento heurístico.

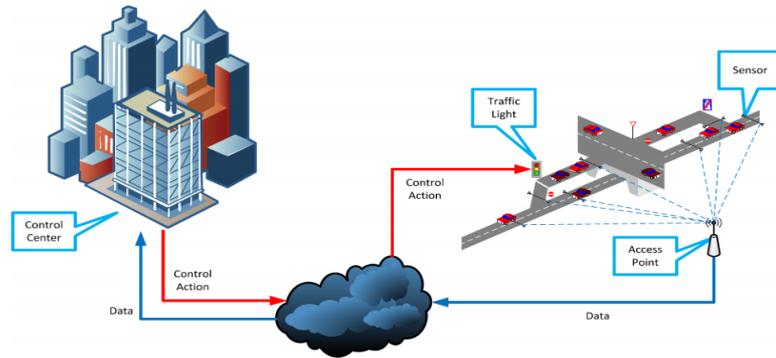


Figura 1-3. Esquema típico de sistemas de control de tráfico.

Por último, [2] explica que una técnica muy utilizada en ingeniería es el control ‘feed-forward’, que se utiliza cuando perturbaciones impredecibles actúan sobre el proceso de control. El control ‘feed-forward’ examina el estado de la salida del sistema que, entre otras cosas, da información sobre las perturbaciones presentes. Conocidas estas perturbaciones se aplica una señal apropiada al proceso.

Los principales objetivos que persigue el control del tráfico son la eficiencia, la seguridad, la fiabilidad y las bajas tasas de consumo de carburante y contaminación. La eficiencia de la red es exigida por los usuarios dado que buscan un tiempo empleado en los trayectos lo menor posible. La seguridad puede llegar a verse como una restricción del sistema, puesto que las medidas aplicadas que resultan del control nunca deben resultar en situaciones peligrosas para el tráfico. La fiabilidad puede entenderse también en términos de tiempo empleado por los conductores, que desean que este tiempo sea a la vez que eficiente, predecible. Por último, el objetivo de conseguir un bajo consumo y unas bajas emisiones conciernen a áreas sobre todo cercanas a los núcleos urbanos.

Para hacer realidad la idea del control dinámico del tráfico necesitaremos de sensores y actuadores, es decir, medidas para el control del tráfico. Las medidas principales y más utilizadas hasta la fecha son el ‘ramp-metering’ y los límites variables de velocidad.

### Ramp-metering.

El ‘ramp-metering’ consiste en determinar la ratio de flujo según la que se permite a los vehículos incorporarse a la red principal. El flujo en la incorporación es controlado por un semáforo situado en la intersección de la incorporación con la vía principal. Esta medida de control puede usarse de dos modos diferentes y hace uso de varias estrategias. En [2] [3] podemos encontrar una explicación más exhaustiva de este tipo de medida de control del tráfico.



Figura 1-4. Semáforo instalado en una incorporación.

### **Límites de velocidad variables.**

Por su parte, los límites variables de velocidad tienen como principal objetivo reducir la velocidad aguas arriba de las zonas de congestión vehicular. Existen dos variantes, una que se centra en el efecto de la homogenización de la velocidad y otra que enfoca el estudio en la prevención de la formación del atasco reduciendo el flujo en el tramo de la red.

Estas dos acciones de control comentadas anteriormente son las que utilizaremos en adelante en nuestro trabajo para conseguir una mejora en la red de tráfico. En el siguiente capítulo desglosaremos como conseguiremos esto.

### **1.4.3. Solución propuesta en este trabajo.**

La solución propuesta en este trabajo es simple. La gestión dinámica del tráfico, presentada en el capítulo anterior, gracias a la coordinación y adaptación que proporciona esta metodología. En primer lugar, trataremos de modelar la red vial de la manera más fidedigna posible para después poder controlar y responder a los aumentos en la demanda de tráfico. El fin es conseguir la situación óptima en la que los conductores empleen el menor tiempo posible en la conducción.

El objetivo principal del trabajo es programar un modelo a partir de METANET y sus ecuaciones, y en segundo lugar hacer uso de varios algoritmos de control para modificar las variables densidad, velocidad y por ello el disminuir la congestión de vehículos.

La gestión dinámica del tráfico que se propone en este trabajo y en muchos otros, es una alternativa para afrontar el problema de la congestión vehicular y todos los demás que esta genera. En nuestro caso utilizaremos un tramo de autopista, el cual modelaremos y trataremos de controlar con ayuda de técnicas como el 'ramp-metering' o los límites variables de velocidad.

El aumento de las variables de control facilita la controlabilidad, pero a su vez aumenta la complejidad del sistema a controlar. Por ello, a modo de primera aproximación, tan solo tendremos en cuenta en nuestro modelo una única incorporación y un sistema de control de límite de velocidad.

En este trabajo nos centraremos en la eficiencia, que consistirá en reducir el tiempo total que emplean los conductores en promedio en circular a lo largo del tramo de red. Las técnicas de control que implementaremos perseguirán reducir este término, comúnmente conocido como TTS ('Total Time Spent').

## 2 MODELO

---

**A** la hora de controlar un sistema, lo primero que debemos hacer es elaborar un modelo que represente de la mejor forma posible al sistema real. Las tres principales aproximaciones que se han utilizado para modelar sistemas de tráfico han sido: modelos macroscópicos, modelos mesoscópicos y modelos microscópicos. En este capítulo hablaremos brevemente de estos modelos y posteriormente nos adentraremos en formular las ecuaciones utilizadas para modelar nuestro caso de estudio.

### 2.1. Introducción y clasificación de los modelos.

A lo largo de los años han sido numerosos los modelos de tráfico que se han desarrollado, en [4] podemos encontrar varios ejemplos. La simulación de un modelo es siempre más rápida y barata que la puesta en marcha de pruebas en el sistema real. Además, podemos repetir la simulación bajo exactamente las mismas condiciones de perturbación, por ejemplo. Por otra parte, sabemos que algunos tipos de modelos han sido también usados como entrenamiento para los operadores de tráfico. Podemos concluir pues, que el modelado de la red vial sirve de gran ayuda para multitud de finalidades.

Son numerosos autores, como por ejemplo [5] los que defienden la idea de que un modelo debe ser lo suficientemente descriptivo como para reproducir los fenómenos más importantes que se dan en la red de tráfico. Otro criterio muy importante es el tiempo de ejecución de la simulación, que deberá ser el menor posible.

Una primera clasificación sería la siguiente, que divide los tipos de modelo según el nivel de detalle [3] [2]:

- Los **modelos microscópicos** tratan de describir tanto el movimiento longitudinal y lateral de cada vehículo, como las interacciones con el resto de los vehículos. De este modo, resulta más sencillo asignar diferentes características a cada vehículo, las cuales pueden estar relacionadas con el estilo de conducción, el tipo de vehículo o incluso el destino. La principal idea de estos modelos es acercarse lo máximo posible a una representación real de los movimientos e interacciones de cada vehículo. Estos modelos son difíciles de implementar debido al elevado esfuerzo computacional necesario. Para una comparación de los diferentes modelos microscópicos consultar [6].
- Los **modelos mesoscópicos** describen el comportamiento de cada vehículo en términos probabilísticos. En este tipo de modelos, son pequeños grupos de vehículos lo que son estudiados, en vez de tener en cuenta cada vehículo como una sola partícula. Los modelos ejemplos más conocidos de este tipo de modelos son los modelos de gas cinético [7, 8, 9].
- Los **modelos macroscópicos**, conocidos desde 1955 [10], modelan el tráfico estudiándolo mediante analogías hidrodinámicas. Por tanto, modelan el tráfico como si fuera un fluido, con sus características propias tales como la densidad, la velocidad y el flujo. Así, los movimientos e interacciones de cada vehículo con su entorno no son tenidos en cuenta. Los modelos macroscópicos son los más adecuados para aplicaciones de tiempo real dado que son relativamente rápidos y proporcionan una definición analítica de las variables que intervienen. En nuestro caso de estudio, aplicaremos lo correspondiente a este tipo de modelos.

Otras clasificaciones [3] pueden ser las que diferencian entre modelos que brindan una representación estocástica o determinista del proceso y los que representan los datos de manera continua o discreta.

## 2.2. Ecuaciones comunes.

En este capítulo mostraremos las principales ecuaciones comunes a la mayoría de los diferentes modelos macroscópicos que podemos encontrar. Como sabemos, los modelos macroscópicos son discretos tanto en espacio como en tiempo, por lo que dividen la red en secciones [2].

Para poder explicar y dar sentido a las ecuaciones que se proponen en este capítulo, primero debemos entender las siguientes premisas. Primero, se entiende la red como una división de enlaces  $m$  ('links') que corresponden a diferentes tramos de la red. Cada enlace  $m$  está dividido su vez en  $N_m$  segmentos de longitud  $L_m$  y con  $\lambda_m$  número de carriles.

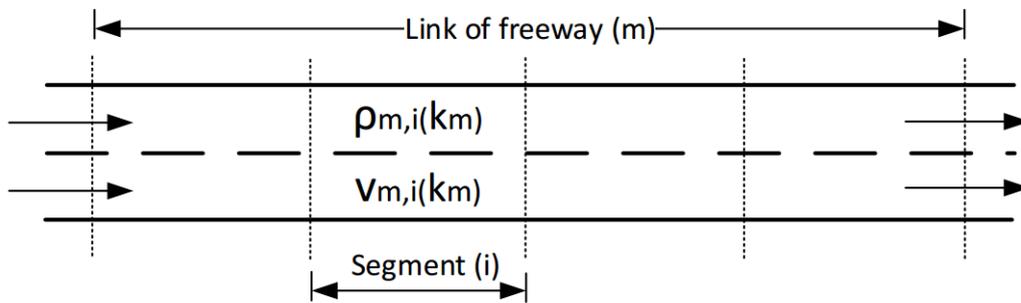


Figura 2-1. Esquema de tramo de carretera.

Para simplificar, los segmentos serán considerados de longitud similar por lo que será innecesario diferenciar entre el concepto de enlace y segmento. Por lo tanto, el índice  $i$  será usado para enumerar los segmentos.

Cada segmento vendrá dinámicamente caracterizado por su densidad de tráfico  $\rho_i(k_m)$  (número de vehículos que ocupan el segmento, por cada carril) y su velocidad media  $v_i(k_m)$  (media de las velocidades instantáneas de los vehículos que ocupan el segmento). Donde  $k_m$  es el instante de tiempo que satisface que  $t = k_m * T_m$ , donde  $T_m$  es el periodo de simulación.

### 2.2.1. Estabilidad numérica.

Para conseguir estabilidad numérica a lo largo de la simulación, será necesario implementar la siguiente restricción:

$$T_m * v_{free,i} \leq L_i$$

donde  $v_{free,i}$  es la velocidad que alcanzan los vehículos durante un flujo libre, es decir en ausencia de congestión.

### 2.2.2. Flujo de tráfico.

El flujo  $q_i(k_m)$  es el número de vehículos que pasan por un punto en un instante dado. Por lo que el flujo de vehículos que sale de cada segmento en cada instante de tiempo puede expresarse de la siguiente forma:

$$q_i(k_m) = \lambda_i * \rho_i(k_m) * v_i(k_m)$$

### 2.2.3. Densidad.

A esta ecuación se le conoce como ecuación de conservación, que representa el hecho del cambio en el número de vehículos dentro de un segmento debido al flujo que entra y que sale por los extremos:

$$\rho_i(k_m + 1) = \rho_i(k_m) + \frac{T}{\lambda_i * L_i} * (q_{i-1}(k_m) - q_i(k_m) + q_{ramp,i}(k_m) - \beta_i(k_m) * q_{i-1}(k_m))$$

donde  $q_{ramp,i}$  es el flujo que entra a la red por una incorporación y  $\beta_i$  es el ratio de una salida, es decir el porcentaje de vehículos que abandonan la red en el segmento en cuestión. Para los segmentos que no dispongan ni de incorporaciones ni de salidas, los valores anteriores serán igual a cero.

### 2.2.4. Dinámicas de las colas en las incorporaciones.

Esta ecuación representa cómo evoluciona la longitud de la cola de coches en una incorporación:

$$w_i(k_m + 1) = w_i(k_m) + T_m * (D_i(k_m) - q_{ramp,i}(k_m))$$

donde  $D_i(k_m)$  es la demanda, es decir el flujo de vehículos que llega por la incorporación.

## 2.3. METANET.

METANET [11, 12, 13, 14] es un modelo macroscópico de segundo orden que proporciona un tiempo de simulación aceptable y bastante exactitud para implementarlo en situaciones en línea. Es un modelo determinista adecuado para la simulación de sistemas de tráfico en autopistas de cualquier tipología y característica. Este modelo permita muchas condiciones y la posibilidad del tratamiento y respuesta ante perturbaciones. Además, pueden añadirse acciones de control, como el ‘ramp-metering’, el control de ruta o los límites de velocidad variables.

En este capítulo haremos uso de las ecuaciones de METANET que necesitaremos para nuestro modelado de la red. Para una mayor descripción del modelo se recomienda al lector consultar los siguientes escritos [11, 12, 15, 16].

### 2.3.1. Velocidad media.

METANET usa la densidad y la velocidad como variables con dos ecuaciones principales que describen las dinámicas del sistema. La primera es la ecuación de conservación que hemos tratado en el apartado anterior.

La segunda ecuación expresa la velocidad media como la suma de la velocidad media anterior, un término de relajación, un término de convección y un término de anticipación. El término de relajación modela la tendencia a acelerar o decelerar de los conductores; por su parte, tanto el término de convección como el de anticipación reflejan la influencia de la velocidad de los vehículos aguas arriba:

$$v_i(k_m + 1) = v_i(k_m) + \frac{T_m}{\tau_i} * (V(\rho_i(k_m)) - v_i(k_m)) + \frac{T_m}{L_i} * v_i(k_m) * (v_{i-1}(k_m) - v_i(k_m)) - \frac{\mu_i(k_m) * T_m * (\rho_i(k_m + 1) - \rho_i(k_m))}{\tau_i * L_i * (\rho_i(k_m) + K_i)}$$

donde  $K_i$ ,  $\tau_i$  y  $\mu_i$  son parámetros del modelo que deben ser estimados.  $V(\rho_i(k_m))$  es la velocidad deseada por los conductores.

### 2.3.2. Incorporaciones.

Cuando en el segmento nos encontramos con una incorporación, el siguiente término deberá incluirse en la ecuación de la velocidad. Este término modela la pérdida de velocidad debido a la existencia de dicha incorporación y su unión con la red principal:

$$\nabla_r v_i(k_m) = - \frac{\delta_i * T_m * q_{ramp,i}(k_m) * v_i(k_m)}{L_i * \lambda_i * (\rho_i(k_m) + K_i)}$$

donde  $\delta_i$  es un parámetro intrínseco al modelo el cual es positivo si existe una incorporación al final del segmento en cuestión.

### 2.3.3. Salidas.

Del mismo modo, si nos encontramos que hay una pérdida de carril, añadiremos el siguiente término negativo, que modela la pérdida de velocidad debido a este fenómeno:

$$\nabla_d v_i(k_m) = - \frac{\emptyset_i * T_m * \Delta_\lambda * \rho_{i-1}(k_m) * v_{i-1}^2(k_m)}{L_{i-1} * \lambda * \rho_{crit,i-1}}$$

Donde  $\emptyset_i$  es un parámetro propio del modelo que es positivo si existe una salida al final del segmento en cuestión.

### 2.3.4. Otras ecuaciones.

A continuación, explicaremos algunas expresiones que habrá que añadir a nuestro conjunto de ecuaciones.

En primer lugar, tenemos la ecuación que estima la velocidad deseada por cada conductor:

$$V(\rho_i(k_m)) = \min (V_{wVSL}(\rho_i(k_m)), (1 + \alpha_i) * V_{c,i}(k_m))$$

donde  $\alpha_i$  es un parámetro del modelo,  $V_{c,i}(k_m)$  es la velocidad límite aplicada en el segmento  $i$  y  $V_{wVSL}$  es la velocidad deseada en el caso de que no existieran VSL (límites variables de velocidad):

$$V_{wVSL}(\rho_i(k_m)) = v_{free,i} * \exp\left(-\frac{1}{a_i} * \left(\frac{\rho_i(k_m)}{\rho_{crit,i}}\right)^{a_i}\right)$$

donde  $a_i$  es un parámetro del modelo y  $\rho_{crit,i}$  es la densidad crítica, es decir, la correspondiente al flujo máximo según el Diagrama Fundamental. Este diagrama puede obtenerse representando el flujo deseado a partir de la velocidad deseada, sin considerar límites variables de velocidad. El Diagrama Fundamental nos proporciona la característica estática del sistema:

$$Q(\rho_i(k_m)) = V(\rho_i(k_m)) * \rho_i(k_m)$$

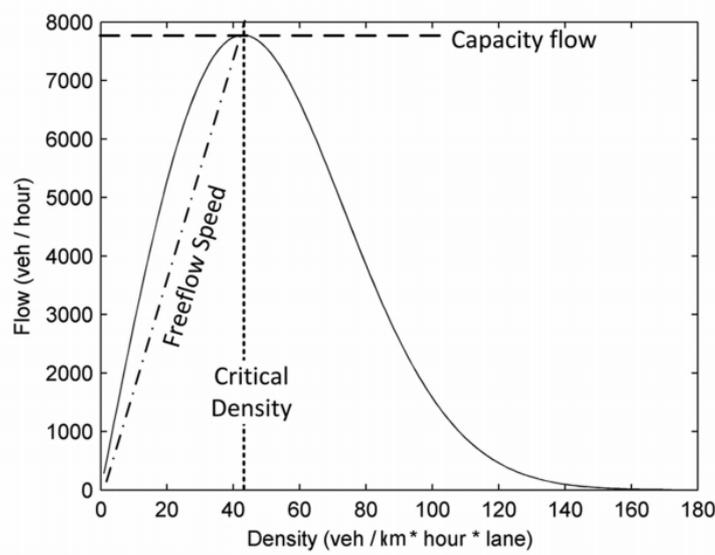


Figura 2-2. Diagrama fundamental.

Finalmente, la siguiente ecuación modela el flujo de vehículos que entran por una incorporación:

$$q_{ramp,i}(k_m) = \min\left(r_i(k_m) * C_{ramp,i}, D_i(k_m) + \frac{w_i(k_m)}{T}, C_{ramp,i} * \frac{\rho_{max,i} - \rho_i(k_m)}{\rho_{max,i} - \rho_{crit,i}}\right)$$

donde  $C_{ramp,i}$  es la capacidad en el origen de la rampa,  $\rho_{max,i}$  es la densidad máxima y  $r_i(k_m)$  es la tasa de 'ramp-metering'.

### 2.3.5. Ecuaciones de contorno.

Dado que en nuestro caso tenemos en cuenta la situación del tráfico tanto aguas arriba como aguas abajo, debemos definir las siguientes ecuaciones de contorno. En particular, METANET tiene en cuenta la velocidad y el flujo aguas arriba y la densidad aguas abajo.

En primer lugar, el flujo en el origen que vendrá limitado por la velocidad límite de dicho segmento:

$$v_{lim}(k_m) = \min(V_{c,1}(k_m), v_1(k_m))$$

El flujo en el origen puede ser modelado teniendo en cuenta las ecuaciones que relacionan la velocidad con el flujo, lo que nos deriva en la siguiente expresión:

$$q_{o,i}(k_m) = \min \left( D_o(k_m) + \frac{w_o(k_m)}{T}, q_{max,o}(k_m) \right)$$

donde  $q_{max,o}(k_m)$  puede tomar estos valores:

$$q_{max,o}(k_m) = \begin{cases} \lambda_o * v_{lim}(k_m) * \rho_{crit,1} * (-a_o * \ln(\frac{v_{lim}(k_m)}{v_{free,i}}))^{\frac{1}{a_o}} & \text{si } v_{lim}(k_m) < V(\rho_{crit,1}) \\ \lambda_o * V(\rho_{crit,1}) * \rho_{crit,1} & \text{c. c.} \end{cases}$$

Para la velocidad en el origen tenemos diferentes situaciones. Puede ser definida por el programador o escogida a partir de datos reales. Por otro lado, en el caso de que no esté especificada, se puede tomar igual a la velocidad del primer segmento:

$$v_o(k_m) = v_1(k_m)$$

Por último, nos queda la ecuación de contorno para la densidad aguas abajo. En general, se asume que no existe congestión en el destino; pero puede existir el caso en que la densidad venga impuesta por el programador. En el caso en el que se asume que no existe congestión en el destino, utilizaremos la siguiente expresión:

$$\rho_{N+1}(k_m) = \min (\rho_N(k_m), \rho_{crit,N})$$

donde N denota el ultimo segmento.

Al igual que en los estudios que hemos utilizado de referencia, en este trabajo no utilizaremos otras extensiones del modelo METANET, por lo que volvemos a referenciar al lector a otros escritos en los que se profundiza más en este modelo.

# 3 CONTROLADORES

---

A lo largo de este capítulo describiremos las ecuaciones que conforman cada uno de los controladores que hemos aplicado en este trabajo. Todos y cada uno de ellos han sido probados, aplicándolos al modelo de red que satisface las ecuaciones del capítulo anterior.

Cada uno de los siguientes controladores tiene un fin determinado. Comenzaremos tratando el controlador ALINEA, que lo aplicaremos para calcular la tasa de ‘ramp-metering’ para aplicar en la incorporación. En segundo lugar, hablaremos sobre el control MTFC que se aplica a los límites de velocidad variables. Por último, estudiaremos las ecuaciones que nos aporta el control LBTFC y sus principales características.

## 3.1 ALINEA.

Este controlador es uno de los más implementados en las técnicas de control inteligentes de sistemas de transporte. ALINEA [17] responde a las siglas de “Asservissement linéaire d’entrée autoroutière”, que se puede traducir al español como “Control lineal de entrada a autopista”.

La ley de control es lineal y con estructura ‘feedback’ en bucle cerrado, que proviene de los métodos clásicos del control automático. El controlador ALINEA es aplicado para calcular los valores adecuados que debe tomar la ratio ‘r’, que se entiende como la tasa de vehículos que se permitirá dejar pasar en cada instante de tiempo.

ALINEA es un controlador simple basado en el control proporcional. La ecuación que hemos usado para este trabajo ha sido la siguiente:

$$r(k_m) = r(k_m - 1) + K_{ALINEA} * (\rho_{crit,ALINEA} - \rho_i(k_m))$$

donde  $K_{ALINEA}$  es la ganancia proporcional del controlador,  $\rho_{crit,i}$  la densidad crítica (deseada) y  $\rho_i(k_m)$  es la densidad del segmento que recibe la incorporación formando el cuello de botella.

La interpretación heurística de la ecuación nos lleva a conocer que si la densidad del cuello de botella en un instante dado es inferior (superior) que la densidad crítica -la deseada-, el segundo término a la derecha de la igualdad se convierte en positivo (negativo) y la tasa ‘r’ pasa a incrementarse (decrementarse). Como se puede observar, ALINEA actuará siempre que la densidad del cuello de botella se aleje del valor de densidad deseado. Las principales razones de ser uno de los controladores más usados son su simpleza, los mínimos requerimientos necesarios para obtener las variables de control (detectores) y su facilidad para ajustar su único parámetro de control. Para más información sobre ALINEA se propone al lector que se dirija a los documentos [17]

Existen numerosas opciones que proponen también un algoritmo de control para las incorporaciones [18], sin embargo, la mayoría de ellas son relativamente equivalentes a lo que propone ALINEA.

ALINEA se postula como una estrategia de control local que implementa una estructura ‘feedback’ y que se caracteriza por su simplicidad, su alta eficiencia y su robustez. En [17] podemos ver como esta estrategia ha sido probada comparándola con otras conocidas estrategias [19, 20].

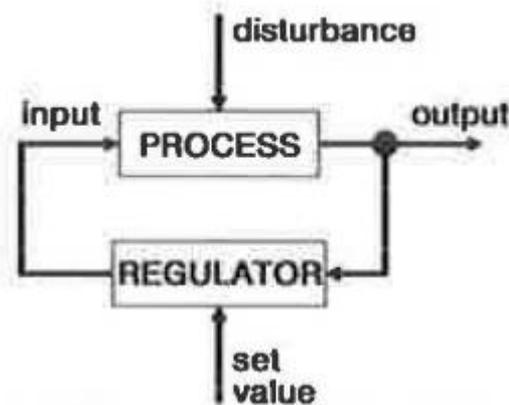


Figura 3-1. Esquema de control 'feedback'.

### 3.2 MTFC.

Las siglas MTFC [21] responden al concepto de 'Mainstream Traffic Flow Control', es decir, control del flujo principal de vehículos. Este tipo de controlador busca mejorar el estado del tráfico modificando el valor de las señales de los límites de velocidad que se encuentran a lo largo de la red. En nuestro caso, el controlador hace uso de los límites de velocidad variables que se encuentran aguas arriba del cuello de botella. El principal objetivo del control de los límites de velocidad variables es el aumento de la seguridad, sin embargo, su uso más común y, el que nos concierne, es con el fin de incrementar el flujo de vehículos y disminuir el tiempo de viaje.

La idea del MTFC es tratar de incrementar el valor del flujo en la red principal de manera que se establezcan unas condiciones de flujo óptimas para las demandas que se generen en un instante determinado. Los límites de velocidad variables son usados principalmente para disminuir el flujo que llega al cuello de botella. En la siguiente figura podemos comprender este concepto:

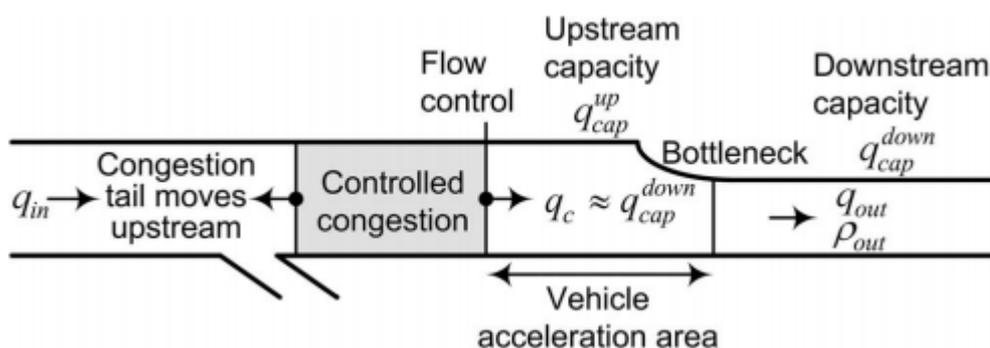


Figura 3-2. Esquema del funcionamiento del control MTFC.

El resultado que se busca es que el flujo de salida en el caso de aplicar MTFC sea mayor que en el caso no controlado, de manera que se evite la pérdida de capacidad de la red. La ventaja que nos brinda este control frente al control de acceso de las incorporaciones es que no se encuentra limitado por la capacidad de la cola de vehículos en la rampa de acceso.

El control de VSL nos modifica la distribución de densidades críticas, como podemos ver en la siguiente figura:

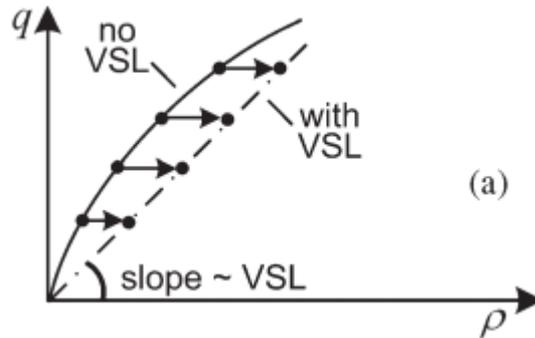


Figura 3-3. Efecto en la densidad crítica al aplicar VSL.

En nuestro caso, el objetivo será calcular el valor óptimo de la ratio 'b' que lo obtenemos dividiendo la velocidad a implementar entre la velocidad máxima permitida en el tramo de la red. Esta ratio 'b' nos ayudará a poder calcular el valor de límite de velocidad a implementar. Utilizaremos una estructura de control en cascada:

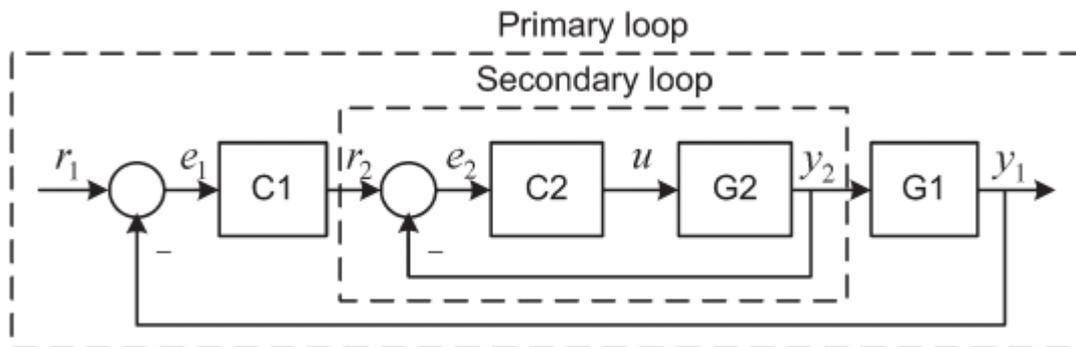


Figura 3-4. Esquema de control tipo cascada.

Para este controlador contaremos con las siguientes dos expresiones:

$$b(k_m) = b(k_m - 1) + K_{MTFC} * (\rho_{des} - \rho_i(k_m))$$

donde  $K_{MTFC}$  es el parámetro para diseñar del primer controlador.

$$\rho_{des}(k_m) = \rho_{des}(k_m - 1) + (K_P + K_I) * (\rho_{crit,MTFC} - \rho_i(k_m)) - K_P * (\rho_{crit,MTFC} - \rho_i(k_m - 1))$$

donde  $K_P$  y  $K_I$  son las ganancias proporcional e integral del segundo controlador.

Dentro de las técnicas que pueden usar el concepto de MTFC, otros actuadores que se podrían tener en cuenta son los semáforos o los sistemas ‘IntelliDrive’ aplicado a los vehículos. Se propone al lector consultar los documentos [22, 23] para más información sobre el control MTFC.

### 3.3 LB-TFC.

El controlador LB-TFC (‘Logic-Based Traffic Flow Control’) [24, 25] propone un algoritmo de control que integra el ‘ramp-metering’ con el control de límites de velocidad variables (VSL). Este controlador estima el número de vehículos que deben ser retenidos o no por los actuadores (‘ramp-metering’ o VSL) con el fin de evitar la pérdida de capacidad del tramo de la red. De tal modo, las ratios de ‘ramp-metering’ o VSL son incrementados o reducidos de la forma que establecen las ecuaciones de este controlador.

El controlador se anticipa a la futura evolución del cuello de botella usando una estructura ‘feed-forward’, que utiliza el valor de la densidad en el cuello de botella y las medias de flujo y velocidad disponibles. Lo que podemos destacar de este controlador es su resultado enormemente eficiente, su tiempo de ejecución casi instantáneo y su facilidad para escoger sus parámetros.

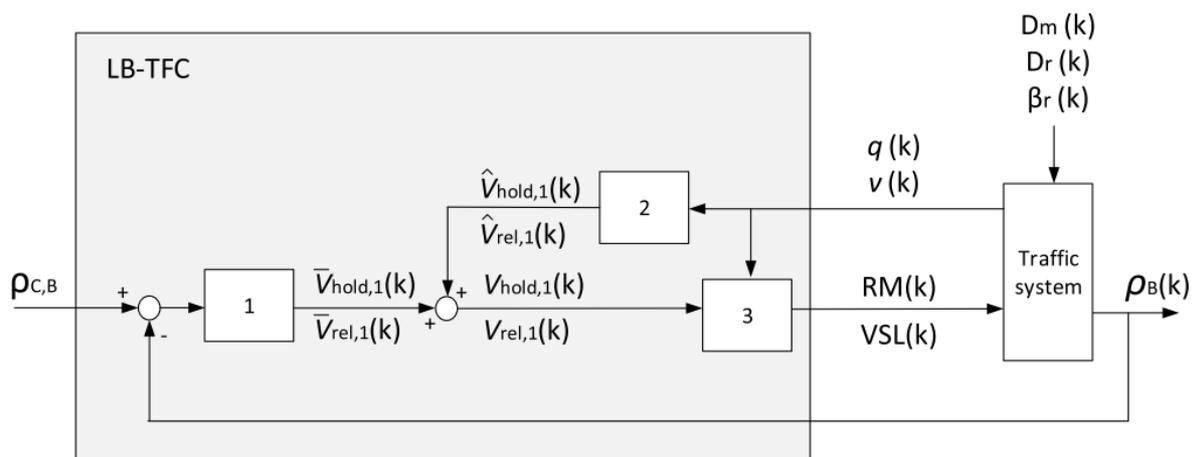


Figura 3-5. Estructura del control LB-TFC.

En [24] se postula que este controlador es el primero de cálculo rápido e implementación sencilla integra control de tipo ‘ramp-metering’ y control VSL y es capaz de acercarse a los resultados derivados de un control óptimo. Las ecuaciones de este controlador están basadas en las ecuaciones usadas para los controladores FF-ALINEA [26] y LB-VSL [27].

A continuación, pasamos a describir las ecuaciones usadas en este trabajo. En primer lugar, debemos calcular en número de vehículos que deberán ser retenidos o liberados en cada instante de tiempo. Para ello utilizaremos las siguientes dos ecuaciones:

$$V_{hold,1}(k) = \max \left( 0, \frac{L_A}{\hat{v}_A(k)} * (Q_{iB}(k) - \overline{C_B}) - \lambda_B * L_B * (\rho_{c,B} - \rho_B(k)) \right)$$

donde  $L_A$  es la distancia entre el primer actuador y el cuello de botella;  $v_A(k)$  es la velocidad media previa al cuello de botella;  $Q_{iB}(k)$  es el flujo en el tramo donde se produce el cuello de botella;  $C_B$  es la capacidad del cuello de botella y  $\rho_{c,B}$  es la densidad crítica.

$$V_{rel,1}(k) = \max \left( 0, -\frac{L_A}{\hat{v}_A(k)} * (Q_{iB}(k) - C_B) + \lambda_B * L_B * (\rho_{c,B} - \rho_B(k)) \right)$$

donde  $C_B$ , en este caso, es la capacidad del cuello de botella menos el ‘capacity drop’.

Una vez obtenidos estos valores, los siguientes pasos a seguir son incrementar o decrementar las ratios del ‘ramp-metering’ y los VSL. Por último, habrá que actualizar los valores respectivos de  $V_{hold}$  y  $V_{rel}$ . Para una mejor comprensión de las ecuaciones de este controlador y del funcionamiento del controlador en general, se recomienda al lector acudir a los documentos [24, 25].

Aun así, el siguiente diagrama de flujo, que podemos encontrar en [24], describe a la perfección la operativa de cálculo de este controlador:

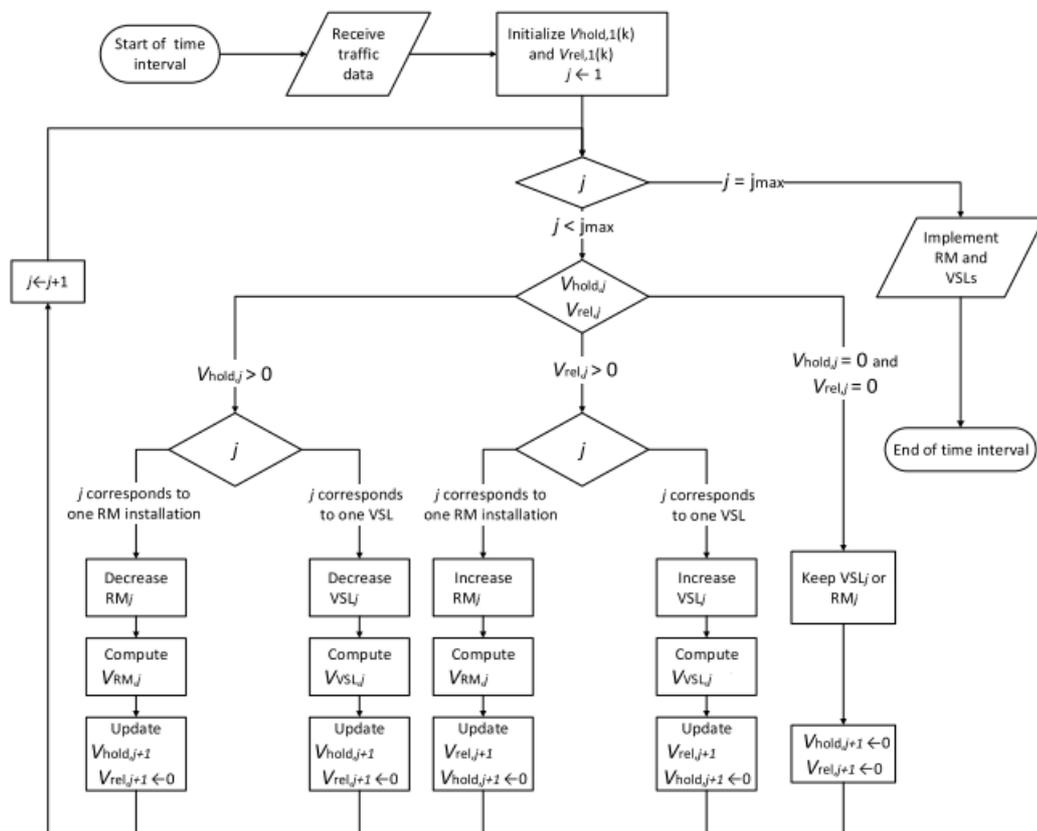


Figura 3-6. Diagrama de flujo del control LB-TFC.



# 4 RESULTADOS

En este capítulo vamos a discutir los resultados que obtenemos al aplicar los diferentes controladores expuestos en el apartado anterior. En primer lugar, expondremos el caso de estudio que hemos utilizado para aplicar los conceptos aplicados anteriormente. Posteriormente analizaremos los resultados que nos brindan cada uno de los controladores aplicados. En cada caso, analizaremos la respuesta temporal las variables que nos interesan (densidad, velocidad y flujo de los vehículos en el tramo de red) y, al mismo tiempo, veremos en cuanto se mejora nuestra función objetivo, es decir, el tiempo total empleado ('TTS').

## 4.1 Resultados del modelo (caso sin controlar).

Antes que nada, lo primero que haremos será describir el caso de estudio sobre el que aplicaremos todo lo expuesto en los capítulos anteriores. Nuestro tramo de carretera está compuesto por 6 segmentos ( $N_m=6$ ) de 1 kilómetro de distancia cada uno ( $L_i=1\text{km}$ ), lo que nos da una distancia total de 6 kilómetros. Todos los segmentos constan de 2 carriles ( $\lambda=2$ ). En el segmento número 5, nos encontramos con una incorporación de un solo carril. A continuación, mostramos un esquema que representa nuestro caso de estudio:

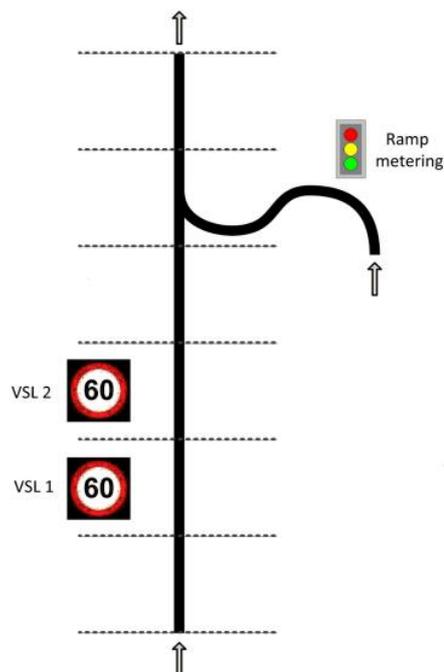


Figura 4-1. Tramo de carretera objeto de estudio.

Además, se muestran en la siguiente tabla los parámetros característicos del tramo de red, que han sido obtenidos gracias a estudios previos que podemos encontrar en [2, 3]:

Tabla 4-1. Parámetros característicos del tramo de red.

Parámetro	Valor
$\tau$	0.005 horas
$\alpha$	0.1
$\mu$	60 km*km/h
$C_0$	4000 veh/h
$K$	40 veh/km*carril
$a$	1.867
$\delta$	0.0122
$C_{\text{ramp}}$	2000 veh/h
$\rho_{\text{crit}}$	33.5 veh/km*carril
$V_{\text{free}}$	102 km/h
$\rho_{\text{max}}$	180 veh/km*carril

Utilizando estos parámetros y aplicando las ecuaciones que expusimos en el capítulo 2, podemos llegar a obtener una simulación de la respuesta sin controlar del tramo de red de carretera. El tiempo de simulación será de 2.5 horas, con un tiempo de muestreo de 10 segundos.

El valor de las demandas también es conocido y presenta la siguiente evolución temporal:

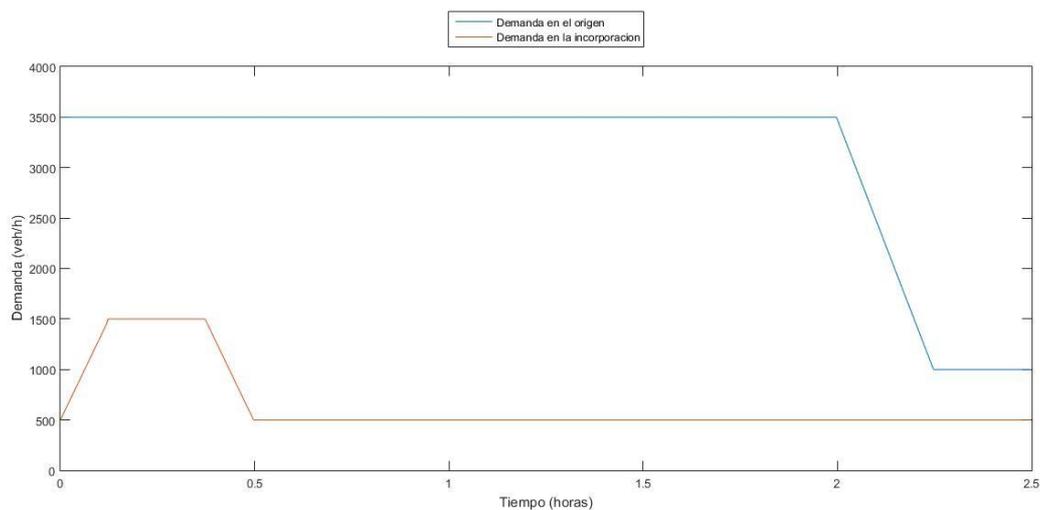


Figura 4-2. Demandas de vehículos.

Con todo lo anterior obtenemos los siguientes resultados de simulación:

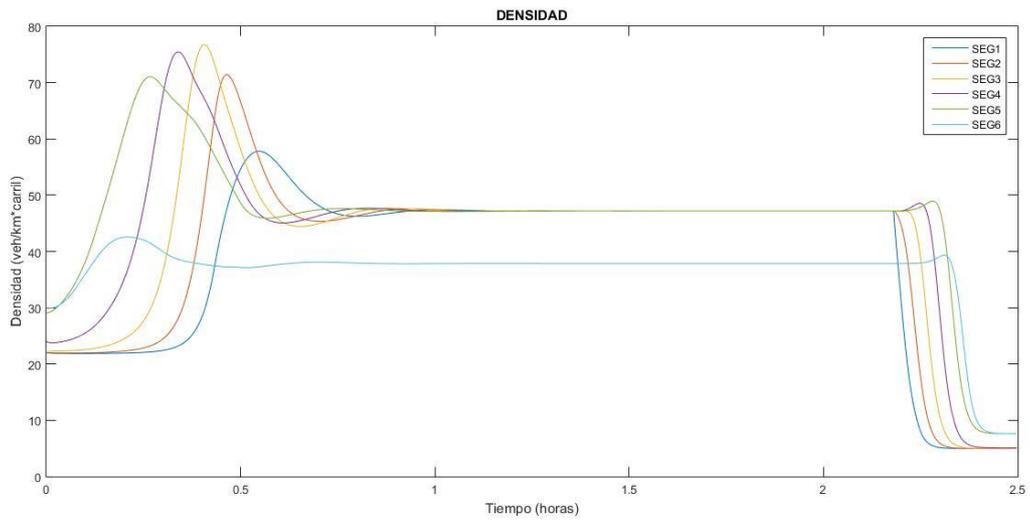


Figura 4-3. Evolución de la densidad en el caso sin controlar.

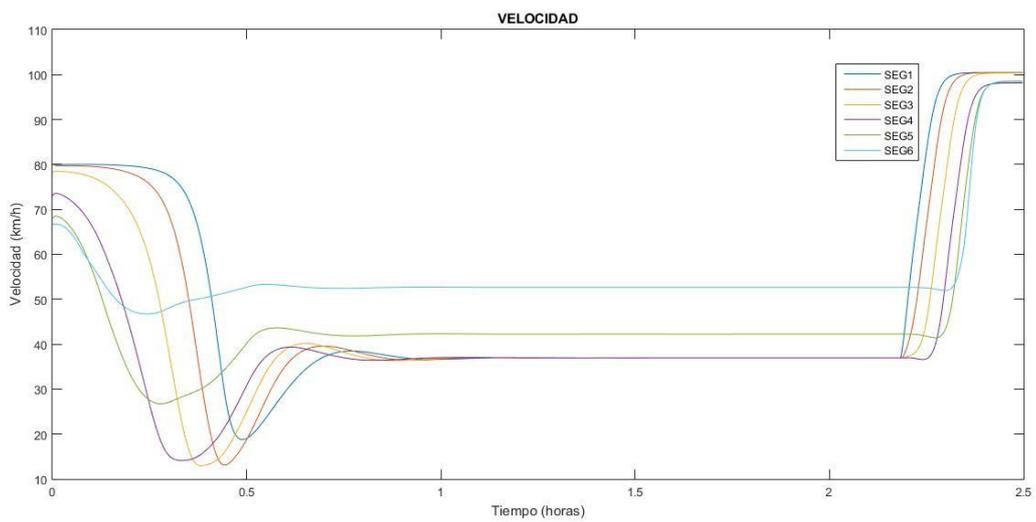


Figura 4-4. Evolución de la velocidad en el caso sin controlar.

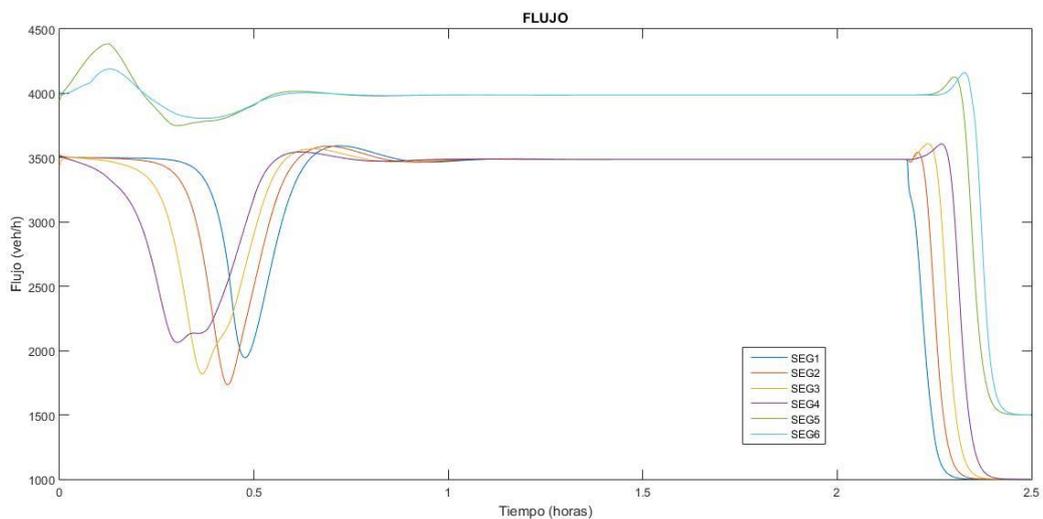


Figura 4-5. Evolución del flujo en el caso sin controlar.

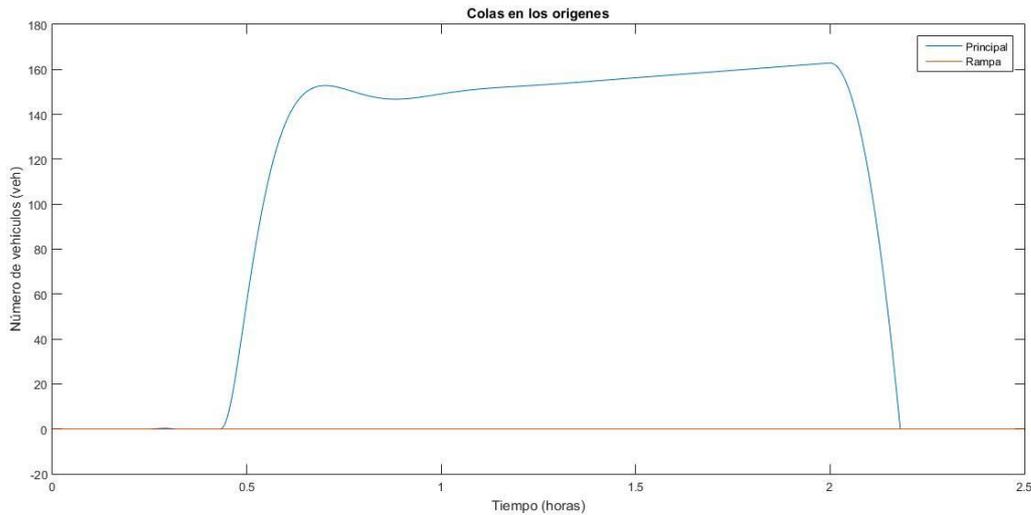


Figura 4-6. Colas de vehículos que se forman en el caso sin controlar.

Como podemos observar en las anteriores figuras, se aprecia como en la primera media hora la densidad de vehículos en todos los segmentos aumenta y, por consiguiente, tanto la velocidad como el flujo se ven reducidos. Esto se debe a un aumento de la demanda de la incorporación durante ese periodo de tiempo, lo que genera un cuello de botella en la intersección con la vía principal, esto es, en el segmento 5. Este hecho provoca también, como podemos observar en la Fig. 4-6, un aumento del número de vehículos en la vía principal.

Una vez disminuyen ambas demandas, observamos como la densidad disminuye y la velocidad tiende a alcanzar valores cercanos a la velocidad deseada por los conductores, limitada por la velocidad máxima de la vía. A su vez, las colas de vehículos disminuyen y se llega a una situación de tráfico estable.

Una vez obtenido el valor de todas las variables características de nuestro sistema, podemos pasar a calcular el valor de 'TTS' ('Total Time Spent'). Este valor refleja el tiempo medio que emplean los vehículos en transportarse a lo largo de un tramo determinado de carretera, además del tiempo que los vehículos esperan en las colas. Al reducir este valor, significara que los vehículos han empleado menos tiempo para recorrer el mismo espacio. Este valor lo obtenemos de la siguiente función objetivo, que como hemos dicho, trataremos de minimizar:

$$TTS = \sum_{i=1}^{T/T_m} T_m * \left[ \sum_{j=1}^{Nm} (\rho_j(i) * L * \lambda) + w_{ramp}(i) + w_o(i) \right]$$

donde  $\rho_j(i)$  es la densidad del segmento 'j' en el instante 'i';  $w_{ramp}(i)$  y  $w_o(i)$  son las colas de vehículos en la rampa y en el origen, respectivamente. La expresión anterior podemos encontrarla más desarrollada en [JR].

En el caso sin controlar, obtenemos un valor de 'TTS' de 1482 veh\*h. Este es un valor muy cercano a los resultados obtenidos en [2, 3]. Por lo tanto, este valor deberá ser reducido aplicando las técnicas de control que introducimos en el capítulo anterior y que pasaremos a simular a continuación.

## 4.2 Resultados ALINEA.

En este apartado vamos a analizar los resultados que obtenemos al aplicar lo correspondiente a lo estudiado en el capítulo explicativo de este controlador. Como ya sabemos, ALINEA se ocupa de controlar la rampa de incorporación con ayuda de un semáforo, que es el que permite pasar o no a cierto número de vehículos.

Los valores característicos de este controlador que hemos usado han sido obtenidos mediante un proceso de ajuste de parámetros utilizando un mallado con diferentes valores. Con varias iteraciones se han escogido los valores que minimizaban el valor 'TTS'. Así, tras este proceso, nos resultaron unos valores de  $K_{ALINEA}=0.3$  y  $\rho_{crit,ALINEA}=40.5$  veh/km\*carril. Esto nos reduce el valor de TTS a 1409.6 veh\*h, provocando una reducción de en torno al 4.89%.

Por lo tanto, deducimos que la implementación de este controlador logra reducir nuestra función objetivo. Este hecho lo podemos ver reflejado también en las siguientes respuestas gráficas:

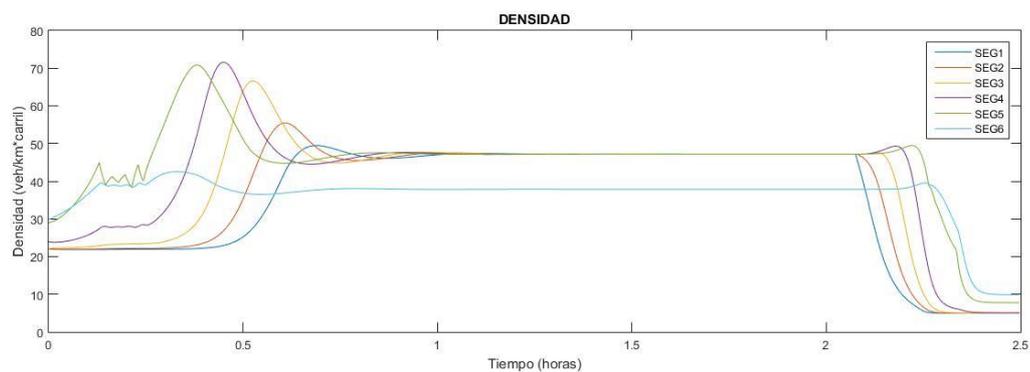


Figura 4-7. Evolución de la densidad en el caso de aplicar 'ramp-metering' (ALINEA).

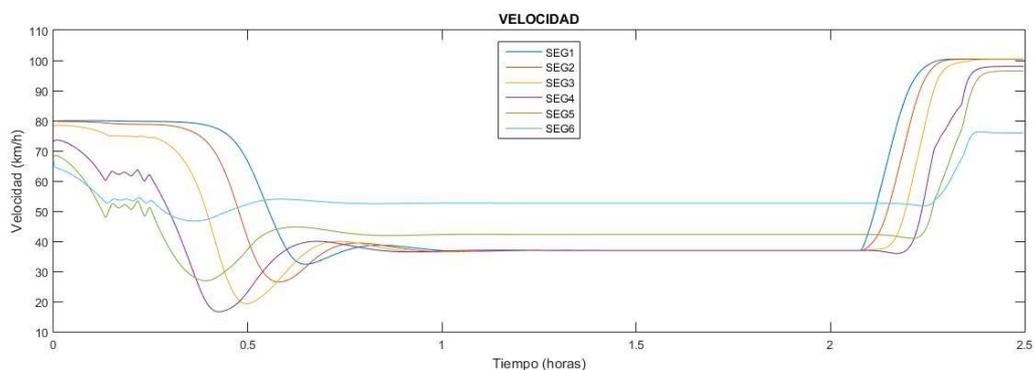


Figura 4-8. Evolución de la velocidad en el caso de aplicar 'ramp-metering' (ALINEA).

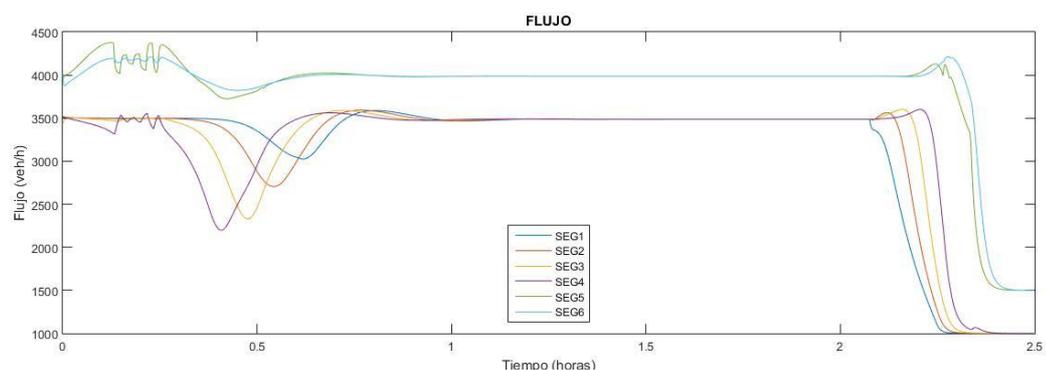


Figura 4-9. Evolución del flujo en el caso de aplicar 'ramp-metering' (ALINEA).

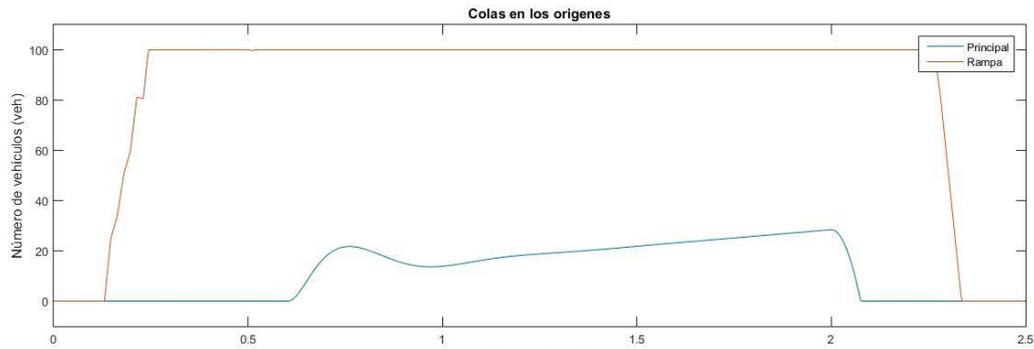


Figura 4-10. Colas de vehículos que se forman en el caso de aplicar 'ramp-metering' (ALINEA).

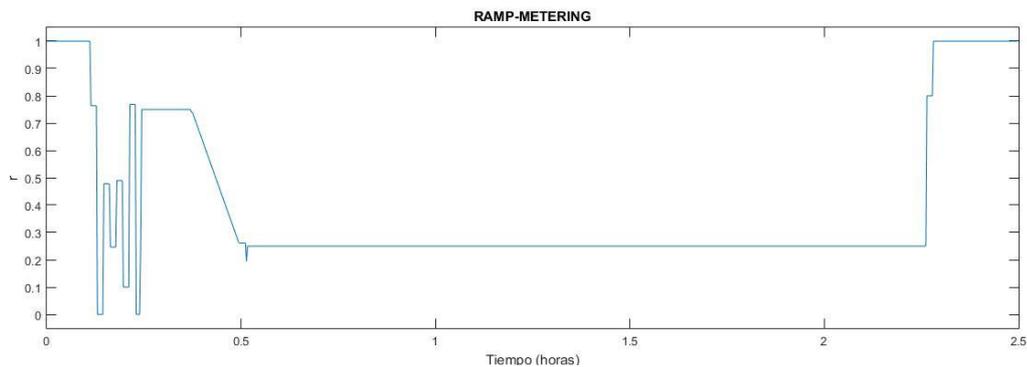


Figura 4-11. Evolución temporal del valor de 'ramp-metering'.

Como podemos observar, el valor de 'r' toma un valor importante en la primera media hora, que es cuando se da el aumento de demanda proveniente de la incorporación. Durante la siguiente hora y media toma un valor estable de en torno a 0.3, debido a que la cola está en su valor máximo, lo que no permite usar valores de 'r' menores. Finalmente, toma el valor unidad que significa que el controlador no trabaja en esos instantes, dejando pasar a todos los vehículos.

Por último, hay que comentar que, como podemos observar en la Fig.10, la cola de vehículos de la incorporación ha sido limitada a un valor máximo de 100 vehículos. Esta medida ha sido tomada debido a que no nos interesa crear acumulaciones de vehículos muy extensas que puedan afectar a otros puntos de la red. Aun así, por mera curiosidad, en el caso de que no tuviéramos en cuenta esta limitación, el 'TTS' se reduciría hasta un valor de 1002.5 veh\*h, resultando en una reducción de hasta un 32.35%.

Para comprobar de mejor forma el resultado de este controlador, no hemos tenido en cuenta la puesta en marcha de los límites variables de velocidad. Veremos el funcionamiento de estos, tanto aplicados de forma individual como combinada con ALINEA en el siguiente capítulo.

### 4.3 Resultados MTFC.

En este caso, analizaremos los resultados obtenidos a partir de implementar el control MTFC. Como ya sabemos, en este contexto del MTFC, utilizaremos los límites de velocidad variables para, conseguir una vez más, reducir nuestra función objetivo 'TTS'.

Los parámetros que debemos sintonizar para este controlador son cuatro, y los hemos hallado de forma idéntica que anteriormente, ejecutando un proceso de minimización que nos da como resultado los siguientes valores propios de este controlador:  $K_{MTFC}=80$ ,  $K_P=380$ ,  $K_I=0.015$ ,  $\rho_{crit,MTFC}=42$  veh/km\*carril. Simulando nuestro caso de estudio aplicando estos parámetros, conseguimos reducir el 'TTS' hasta un valor de 1360.5 veh\*h, significando esto una reducción del 8.2%.

A continuación, se muestra la evolución temporal de las diferentes variables características de nuestro sistema, donde podemos apreciar gráficamente la mejora que nos concede la reducción del 'TTS':

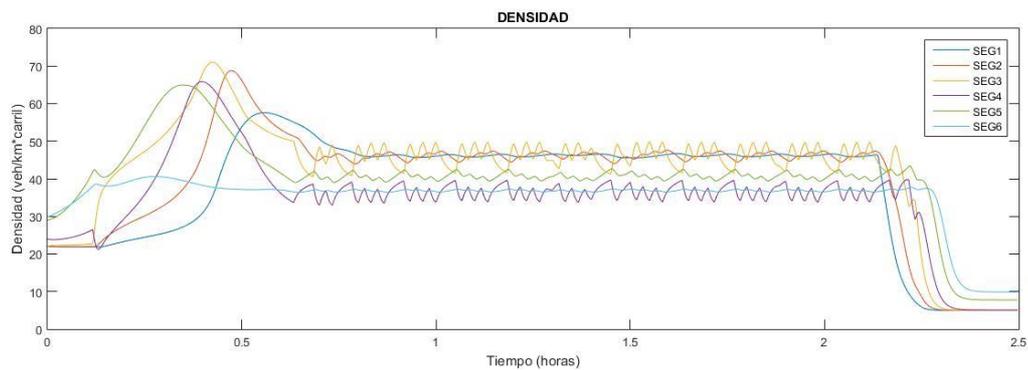


Figura 4-12. Evolución de la densidad en el caso de aplicar VSL (MTFC).

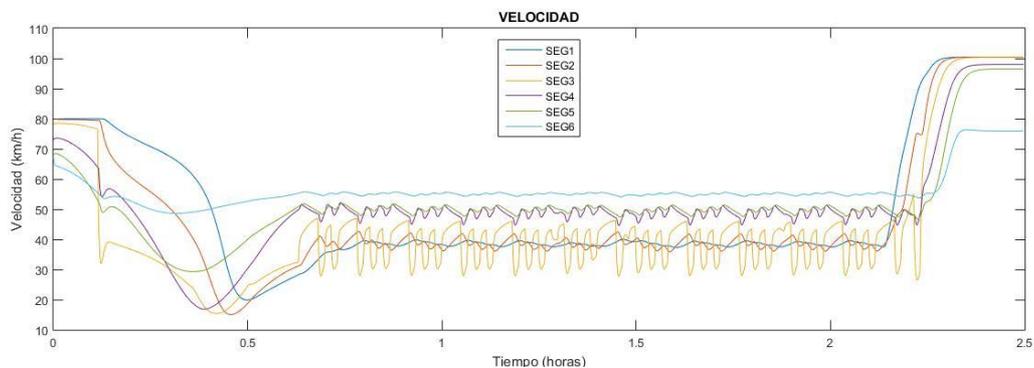


Figura 4-13. Evolución de la velocidad en el caso de aplicar VSL (MTFC).

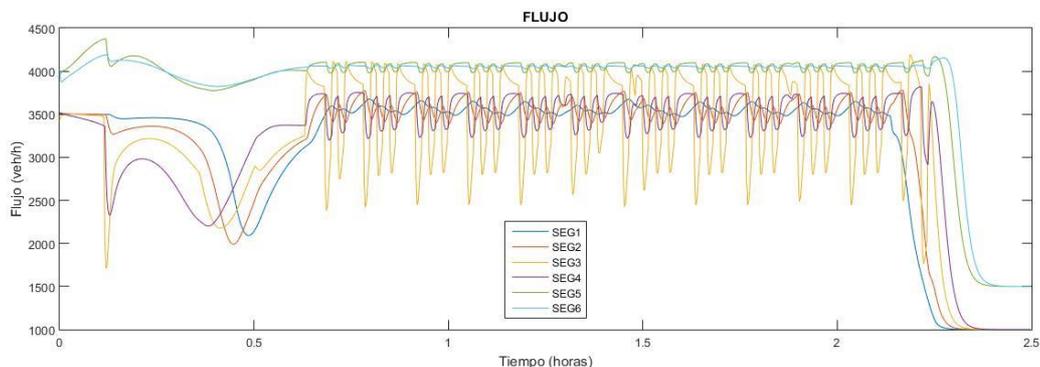


Figura 4-14. Evolución del flujo en el caso de aplicar VSL (MTFC).

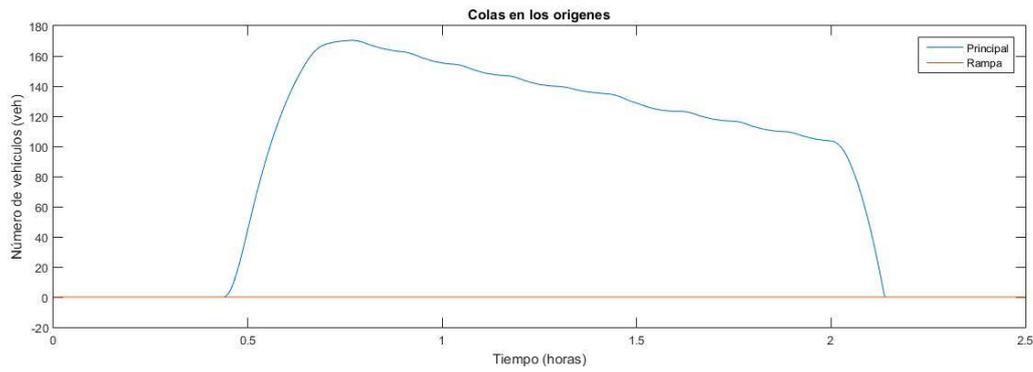


Figura 4-15. Colas de vehículos que se forman en el caso de aplicar VSL (MTFC).

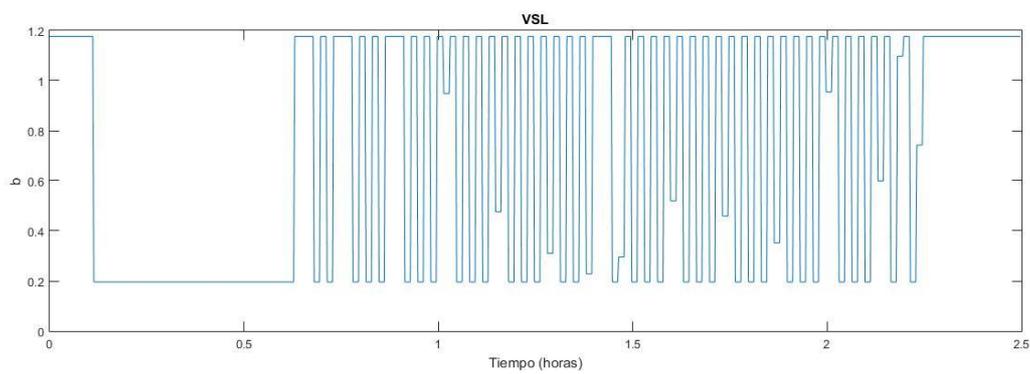


Figura 4-16. Evolución temporal del valor de VSL.

Como podemos apreciar en los resultados anteriores, estamos ante una respuesta un tanto ruidosa, por lo que, aplicando un término de suavizado a la función objetivo, podemos mejorar este resultado a cambio de ver empeorado el valor de ‘TTS’. La expresión de la función objetivo quedaría entonces de la siguiente manera:

$$TTS = \sum_{i=1}^{T/Tm} T_m * \left[ \sum_{j=1}^{Nm} (\rho_j(i) * L * \lambda) + w_{ramp}(i) + w_o(i) \right] + \sum_{k=1}^{T/Tm} \epsilon_{VSL} * [b(k) - b(k - 1)]^2$$

donde  $\epsilon_{VSL}$  es un término que pondera la variación del valor de ‘b’ aplicado en cada instante de tiempo. Aplicando un valor de 50, obtenemos los resultados que mostramos a continuación. Como hemos comentado, obtenemos un peor resultado en valor del ‘TTS’, siendo este de 1371.1 veh\*h, brindando una reducción del 7.48%.

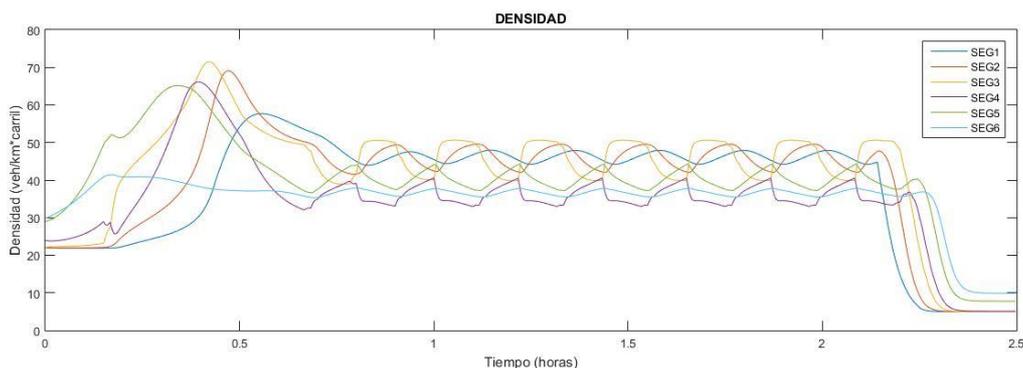


Figura 4-17. Evolución de la densidad en el caso de aplicar VSL (MTFC) -suavizado-.

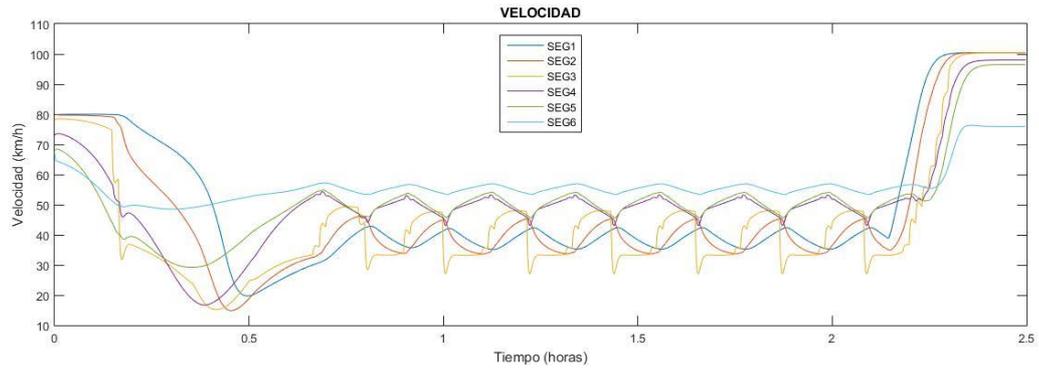


Figura 4-18. Evolución de la velocidad en el caso de aplicar VSL (MTFC) -suavizado-.

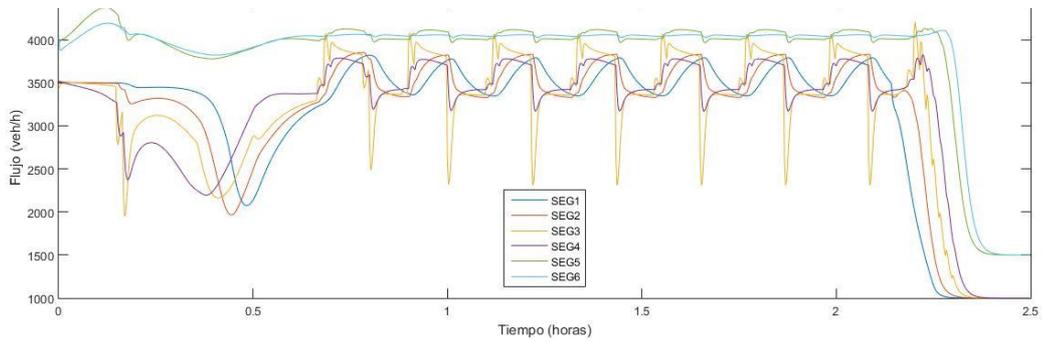


Figura 4-19. Evolución del flujo en el caso de aplicar VSL (MTFC) -suavizado-.

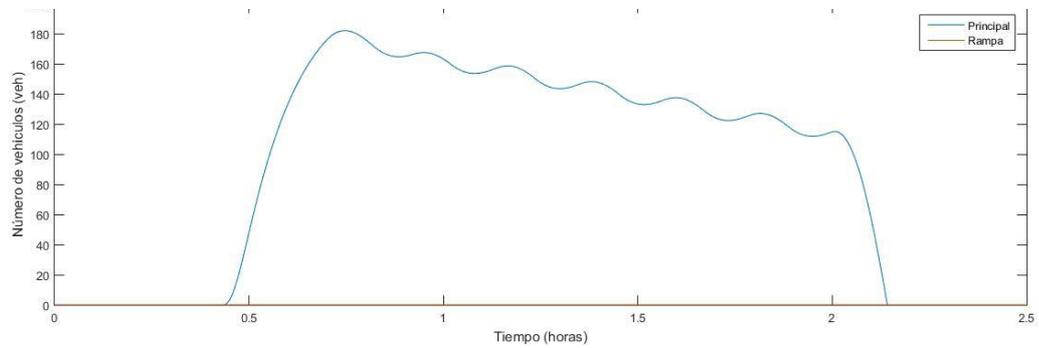


Figura 4-20. Colas de vehículos que se forman en el caso de aplicar VSL (MTFC) -suavizado-.

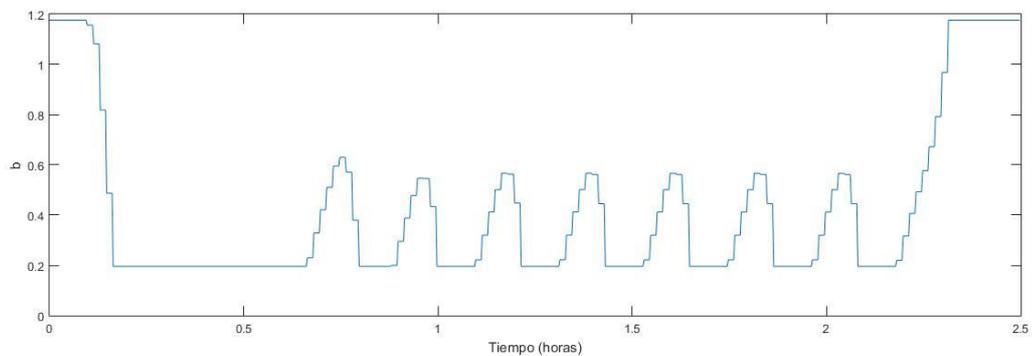


Figura 4-21. Evolución temporal del valor de VSL -suavizado-.

Por otro lado, sería buena idea fusionar los dos controladores, MTFC y ALINEA. Y así es. La aplicación conjunta de ambos controladores nos devuelve un resultado altamente mejorado, resultando en un 'TTS' de 1310.8 veh\*h generando una reducción hasta del 11.55% y generando los siguientes resultados gráficos.

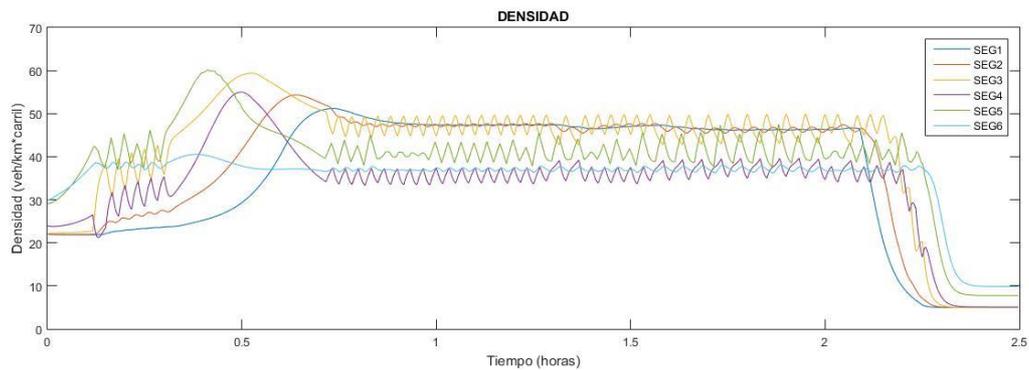


Figura 4-22. Evolución de la densidad en el caso de aplicar ALINEA y VSL (MTFC).

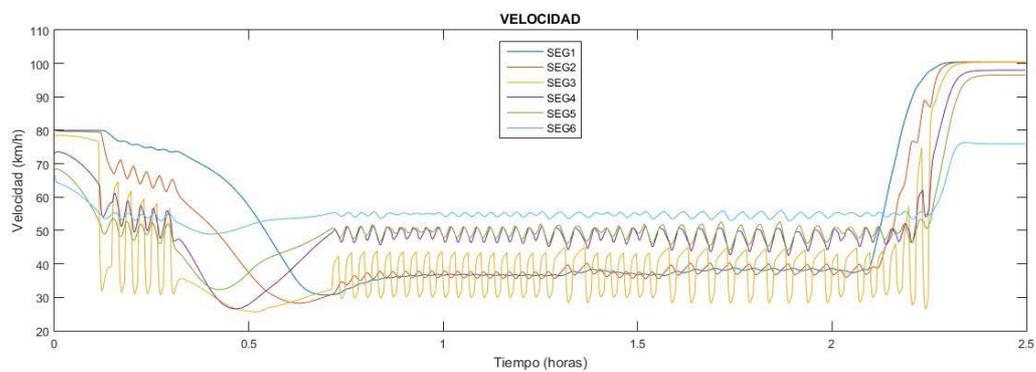


Figura 4-23. Evolución de la velocidad en el caso de aplicar ALINEA y VSL (MTFC).

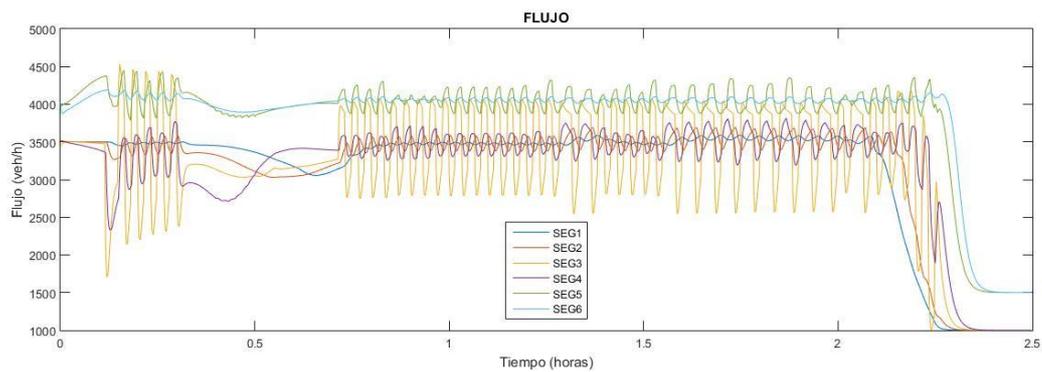


Figura 4-24. Evolución del flujo en el caso de aplicar ALINEA y VSL (MTFC).

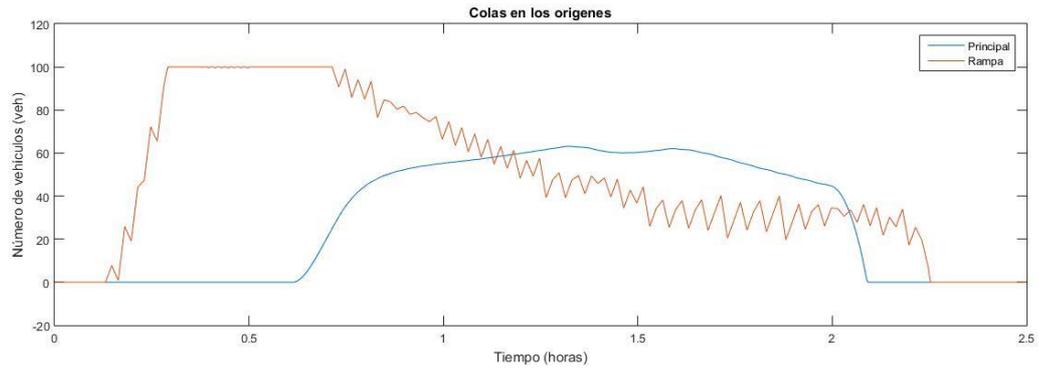


Figura 4-25. Colas de vehículos que se forman en el caso de aplicar ALINEA y VSL (MTFC).

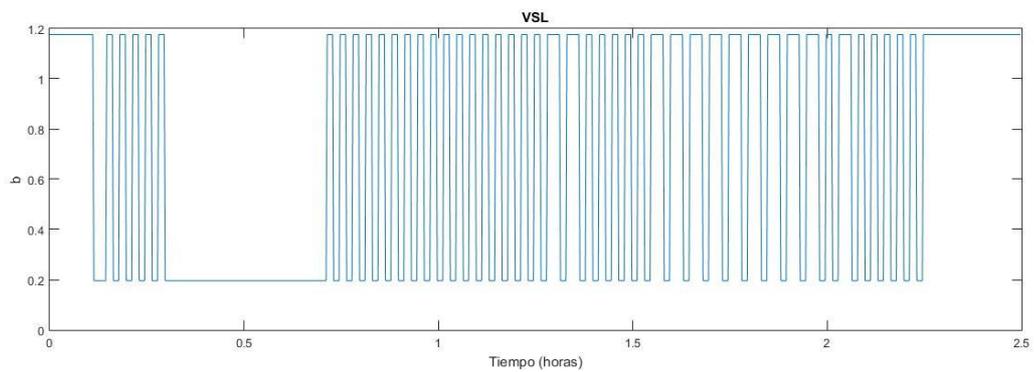


Figura 4-26. Evolución temporal del valor de VSL en el caso de aplicar ALINEA y VSL (MTFC).

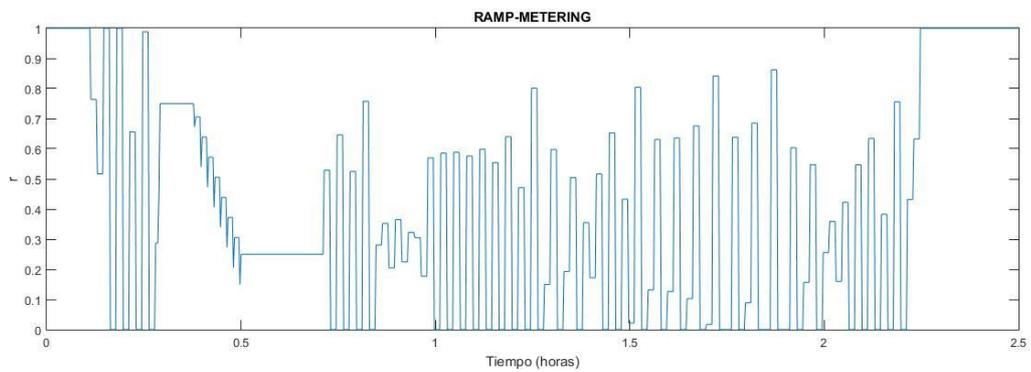


Figura 4-27. Evolución temporal del valor de 'ramp-metering' en el caso de aplicar ALINEA y VSL (MTFC).

## 4.4 Resultados LB-TFC.

En este apartado pasaremos a estudiar los resultados obtenidos aplicando el último de los controladores que estamos teniendo en cuenta en este trabajo. En este caso, los parámetros a diseñar para este controlador son los valores superior e inferior de la capacidad del cuello de botella y la densidad crítica o deseada de este controlador. Los valores obtenidos que minimizan nuestra función objetivo han sido de 4000 veh/h y 3800 veh/h para las capacidades superior e inferior del cuello de botella, respectivamente; y de 44 veh/km\*carril para la densidad deseada.

Este controlador nos reporta un mejor funcionamiento comparado con los otros dos controladores expuestos con anterioridad, puesto que nos devuelve una reducción de hasta un 18.65%, lo que corresponde con un valor del 'TTS' de 1205.6 veh\*h.

Los resultados gráficos obtenidos al aplicar este controlador a nuestro sistema son los que se muestran a continuación:

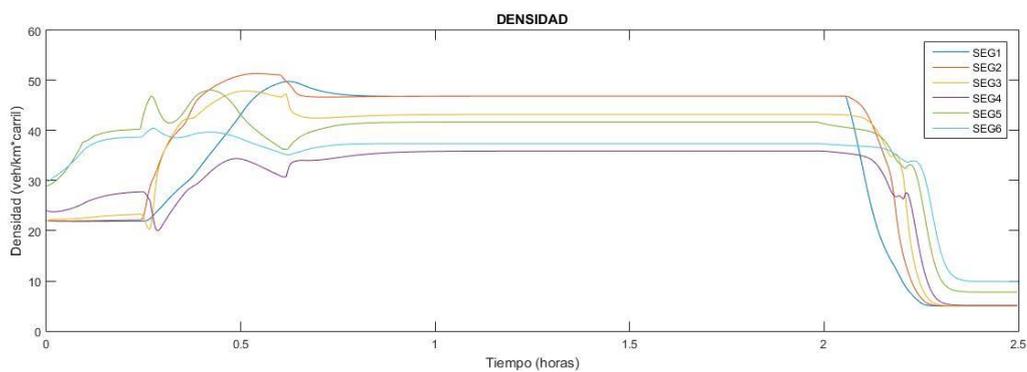


Figura 4-28. Evolución de la densidad en el caso de aplicar LB-TFC.

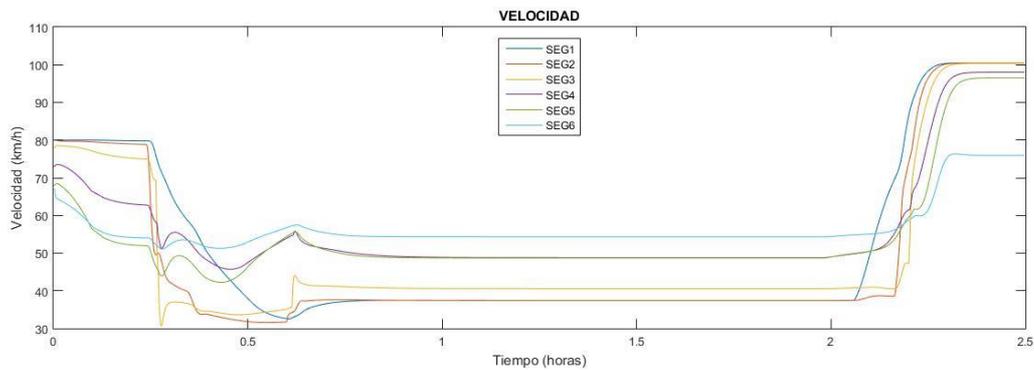


Figura 4-29. Evolución de la velocidad en el caso de aplicar LB-TFC.

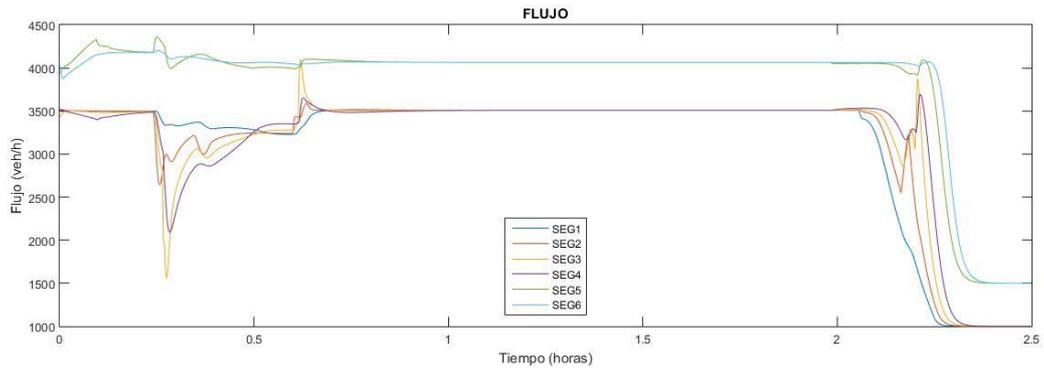


Figura 4-30. Evolución del flujo en el caso de aplicar LB-TFC.

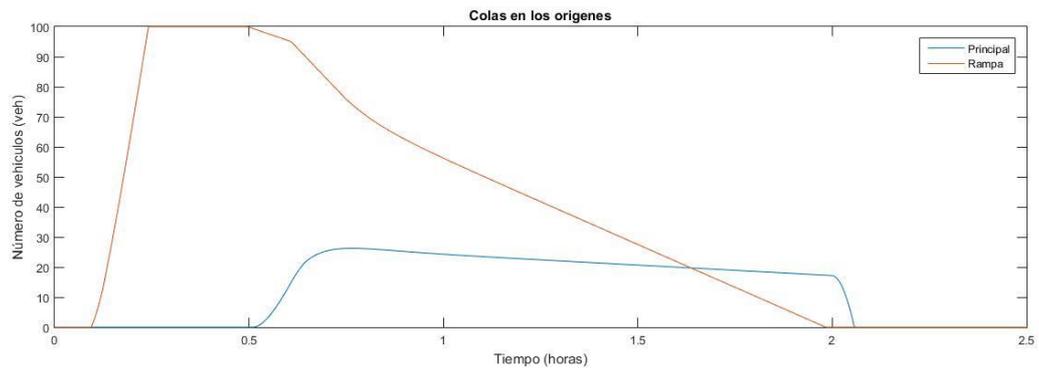


Figura 4-30. Colas de vehículos que se forman en el caso de aplicar LB-TFC.

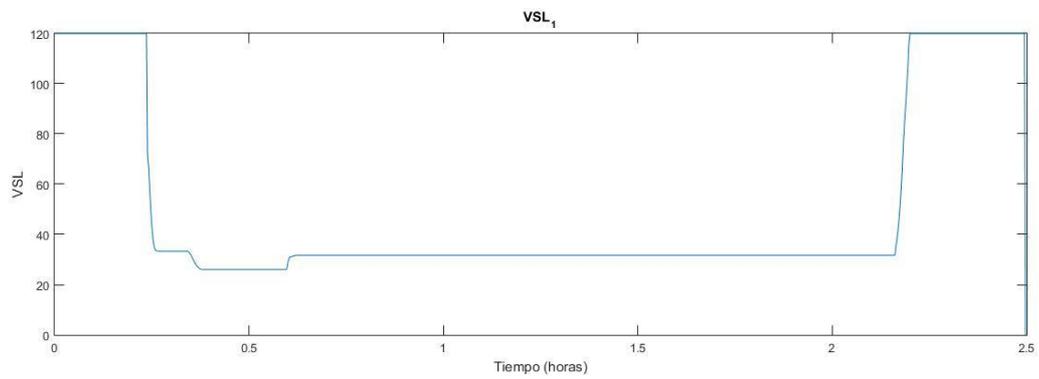


Figura 4-32. Evolución temporal del valor de VSL1 en el caso de aplicar LB-TFC.

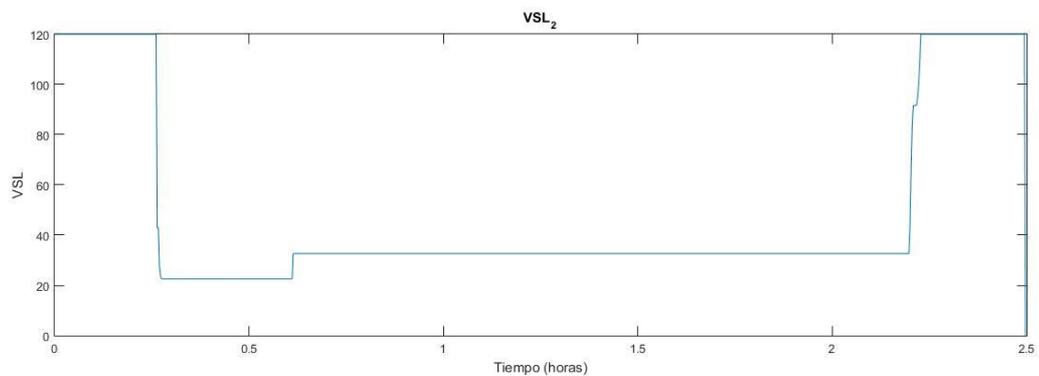


Figura 4-33. Evolución temporal del valor de VSL2 en el caso de aplicar LB-TFC.

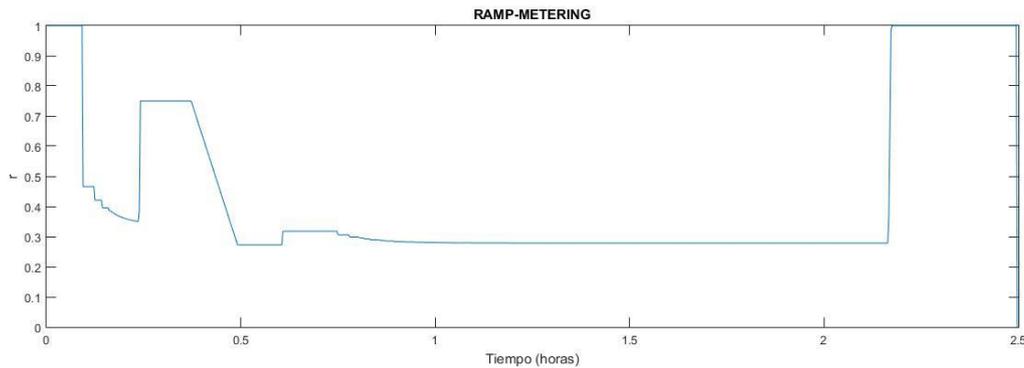


Figura 4-34. Evolución temporal del valor de 'ramp-metering' en el caso de aplicar LB-TFC.

## 4.5 Conclusiones.

Finalmente, a modo de conclusión, se mostrarán los diferentes resultados de 'TTS' que nos proporciona cada controlador y, así, poder compararlos:

Tabla 4-2. Resultados.

Controlador	'TTS' (veh*h)	Reducción (%)
-Sin controlar-	1482	-
ALINEA	1409.6	4.89
MTFC	1360.5	8.2
ALINEA+MTFC	1310.8	11.55
LB-TFC	1205.6	18.65

Como podemos observar en la tabla anterior, lo primero que podemos deducir es que la ejecución conjunta del control de acceso por incorporaciones ('ramp-metering') y los límites de velocidad variable, es la mejor opción de las estudiadas en este trabajo. Si bien cada técnica por separado provoca una considerable reducción, el uso simultáneo de ambos controladores nos genera la mayor reducción en el 'TTS'.

Por su parte, como ya sabemos, ALINEA centra su acción de control en la incorporación. Esta acción de control se encuentra limitada por la restricción de que la cola de vehículos que se forma en la incorporación no debe exceder un valor. En el caso ideal, esta restricción no existiría y disfrutaríamos de una mayor reducción de 'TTS'. Sin embargo, en una aplicación real, la excesiva acumulación de vehículos en la incorporación puede derivar en congestiones en otros puntos de la red. Por ello, la limitación del número de vehículos acumulados en la incorporación es una medida que debemos adoptar para futuras aplicaciones reales.

El control basado en límites de velocidad variable (MTFC) nos brinda una mejor respuesta en comparación con los resultados propios de ALINEA. Como ya sabemos, el fin de este controlador es aumentar el flujo a la salida del cuello de botella [Fig. 3-2], cosa que no podemos conseguir con ALINEA. Este hecho lo conseguimos controlando la velocidad del tramo principal de la red, consiguiendo un flujo de vehículos más constante que evite las aglomeraciones que se generarían si los vehículos alcanzasen el cuello de botella a mayores velocidades. Ahora bien, uniendo lo bueno de cada controlador (ALINEA + MTFC), obtenemos un mejor resultado.

El algoritmo de control LBTF, a parte de hacer uso de ambas acciones de control ('VSL' y 'RM'), introduce lo correspondiente a una estructura de control 'feed-forward'. Esta estrategia nos ayuda a conocer el número de vehículos que deberán ser retenidos o liberados por la acción de control de forma que se obtenga una mejor respuesta del sistema.

Como podemos observar en la tabla anterior, la combinación de las estrategias de control ALINEA y MTFC utilizando límites variables de velocidad es la situación que nos brinda una mejor respuesta. Al mismo tiempo, obtenemos una respuesta igualmente buena con los resultados que nos refleja en control LB-TFC.

A continuación, en la Figura 4-35, podemos observar el efecto que nos proporciona el control LB-TFC. Como podemos ver, el flujo varía antes que en los demás casos; y este es el principal efecto que genera la estrategia de control 'feed-forward'. Además, como ya comentamos en el capítulo 3, se trata de un controlador muy sencillo de implementar y cuyos resultados se acercan mucho a los resultados obtenidos a partir de implementar un control óptimo.

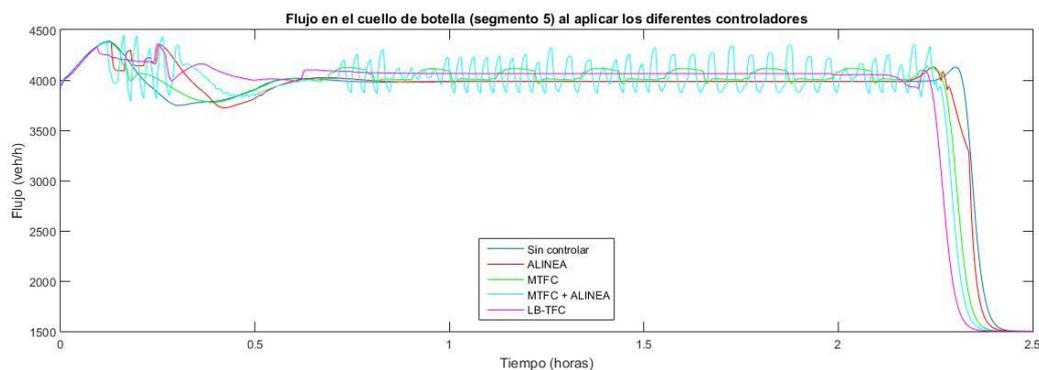


Figura 4-35. Evolución del flujo en el cuello de botella en los distintos casos.

Por lo tanto, después de analizar los resultados, concluimos que la aplicación del control dinámico sobre sistemas de redes de tráfico llega a mejorar las situaciones de congestión vehicular, reduciendo el tiempo que emplean los conductores y aumentando el flujo en torno a los cuellos de botella que se generan como causa de dicha congestión.

Un posible trabajo futuro sería comprobar el funcionamiento de estos controladores en diferentes escenarios. Esto es, estudiar su respuesta ante diferentes tipologías de redes de transporte; y ver cómo se comportan. Al mismo tiempo, sería buena idea probar con diferentes demandas, reales o no, y durante un periodo de tiempo más extendido. Esto nos ayudaría a comprobar el resultado que podemos obtener a lo largo de un día, por ejemplo.



## REFERENCIAS

---

- [1] Web del Ministerio de Transportes, Movilidad y Agenda urbana del Gobierno de España (MITMA).
- [2] J.R.D. Frejo. Model Predictive Control for Freeway Traffic Networks. Universidad de Sevilla.
- [3] A.Hegyí. Model Predictive Control for Integrating Traffic Control Measures. PhD thesis, Delft Center of Systems and Control, Delft University of Technology, February 2004.
- [4] S.P. Hoogendoorn and P.H.L. Bovy, "State-of-the-art of vehicular traffic flow modelling," *Journal of Systems Control Engineer - Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part I*, vol. 215, no.14, pp. 283-303, 2001.
- [5] M. Papageorgiou, "Some remarks on macroscopic traffic flow modelling," *Transportation Research Part A*, vol. 32, no. 5, pp. 323–329, 1998.
- [6] S. Algers, E. Bernauer, M. Boero, L. Breheret, C. Di Taranto, M. Dougherty, K. Fox, and J.F. Gabard, "SMARTTEST - Final report for publication." Tech. rep., ITS, University of Leeds, <http://www.its.leeds.ac.uk/smartest>, 2000.
- [7] S.L. Paveri-Fontana, "On Boltzman-like treatments for traffic flow: A critical review of the basic model and an alternative proposal for dilute traffic analysis," *Transportation Research Part B*, vol. 9, pp. 225-235, 1975.
- [8] D. Helbing, *Verkehrsdynamik - Neue physikalische Modellierungskonzepte*. Berlin: Springer-Verlag, 1997.
- [9] S. P. Hoogendoorn and P. H. L. Bovy, "Modelling multiple user-class traffic flow," *Transportation Research B*, vol. 34, no. 2, pp.123-146, 2000.
- [10] M. J. Lighthill and G. B. Whitham, "On kinematic waves, II. a theory of traffic flow on long crowded roads," *Proc. of the Royal Society*, vol. 229, May 1955.
- [11] A. Messner and M. Papageorgiou. METANET: A macroscopic simulation program for motorway networks. *Traffic Engineering & Control*, 31 (8-9): 466-470, 1990.
- [12] M. Papageorgiou, I. Papamichail, A. Messner, and Y. Wang. *Traffic Simulation with METANET*, volume 145 of *International Series in Operations Research and Management Science*. Springer, 2010.
- [13] J. R. D. Frejo, I. Papamichail, M. Papageorgiou and B. De Schutter. Macroscopic modeling of variable speed limits on freeways. *Transportation Research part C: emerging technologies*, vol. 100, pp. 15-33, 2019
- [14] A. Spiliopoulou, M. Kontorinaki, M. Papageorgiou, and P. Kopelias. Macroscopic traffic flow model validation at congested freeway off-ramp areas. *Transportation Research part C*, 41:18-29, 2014.

- 
- [15] A. Hegyi, B. De Schutter, and H. Hellendoorn. Model predictive control for optimal coordination of ramp metering and variable speed limits. *Transportation Research part C*, 13(3):185-209, June 2005.
- [16] A. Hegyi. *Model Predictive Control for Integrating Traffic Control Measures*. PhD thesis, Delf Center of Systems and Control, Delft University of Technology, February 2004.
- [17] M. Papageorgiou, H. Hadj-Salem, and J-M. Blosseville. ALINEA: A local feedback control law for on-ramp metering. *Transportation Research Record*, (1320), 1991.
- [18] H. Taale and F. Middelham. Ten years of ramp-metering in the Netherlands. In *Road Transport Information and Control, 2000. Tenth International Conference on (Conf. Publ. No. 472)*, pages 106-110, 2000.
- [19] M. Papageorgiou. *Applications of Automatic Control Concepts to Traffic Flow Modeling and Control*. Springer-Verlag, New York, 1983.
- [20] M. Papageorgiou. *Freeway On-Ramp Control Strategies: Overview, Discussion, and Possible Application to Boulevard Peripheriqu de Paris*. Internal Report, INRETS, DART, Arcueil, France, 1986.
- [21] R.C. Carlson, I. Papamichail, and M. Papageorgiou, Fellow. Local Feedback-Based Mainstream Traffic Flow Control on Motorways Using Variable Speed Limits .IEEE.
- [22] R. C. Carlson, I. Papamichail, M. Papageorgiou, and A. Messmer, " Optimal motorway traffic flow control involving variable speed limits and ramp metering," *Transp. Sci.*, vol. 44, no. 2, pp. 238-253, May 2010.
- [23] R. C. Carlson, I. Papamichail, M. Papageorgiou, and A. Messmer, " Optimal mainstream traffic flow control of large-scale motorway networks," *Transp. Res. Part C*, vol. 18, no. 2, pp. 193–212, Apr. 2010.
- [24] J. R. D. Frejo, B. De Schutter. Logic-Based Traffic Flow Control for Ramp Metering and Variable Speed Limits - Part 1: Controller., IEEE, 2020.
- [25] J. R. D. Frejo, B. De Schutter. Logic-Based Traffic Flow Control for Ramp Metering and Variable Speed Limits - Part 2: Simulation and Comparison, IEEE, 2020.
- [26] J. R. D. Frejo and B. De Schutter, "Feed-forward ALINEA: A ramp metering control algorithm for nearby and distant bottlenecks," *IEEE Trans. Intell. Transp. Syst.*, vol. 20, no. 7, pp. 2448-2458, Jul. 2019.
- [27] J. R. D. Frejo and B. De Schutter, "A logic-based speed limit control algorithm for Variable Speed Limits to reduce traffic congestion at bottlenecks," in *Proc. IEEE Conf. Decis. Control (CDC)*, Dec. 2018, pp. 198-204.

Se añaden en esta sección los códigos utilizados durante este trabajo.

### MODELO (CASO SIN CONTROLAR)

```

%DATOS TEMPORALES
Tm=10/3600; %Tm minutos de "step-size" /
Tener en cuenta restricción para estabilidad
numérica
T=2.5; %Tiempo total de simulación (HORAS)

%ESPECIFICACIONES DE LA RED
Nm=6; %Número de segmentos
L=1; %km
lambda=2; %carriles
tau=0.005; %h
alpha=0.1;
mu=60; % (km*km)/h
Co=4000; %veh/h
K=40; %veh/(km*carril)
a=1.867;
delta=0.0122;
Cramp=2000; %veh/h
rho_crit=33.5; %veh/(km*carril)
v_free=102; %km/h
rho_max=180; %veh/(km*carril)

%VARIABLES DINAMICAS: Matrices =
(segmento,instante de tiempo)
q=zeros(Nm,T/Tm);
rho=zeros(Nm,T/Tm);
v=zeros(Nm,T/Tm);

%VARIABLES DINAMICAS AUXILIARES
wo=zeros(T/Tm,1);
qo=zeros(T/Tm,1);
vo=zeros(T/Tm,1);
qmax_o=zeros(T/Tm,1);
V_LIM=zeros(T/Tm,1);
V_LIM_AP=zeros(T/Tm,1);
qramp=zeros(T/Tm,1);
wramp=zeros(T/Tm,1);
V_DES_VSL=zeros(Nm,T/Tm);
V_DES=zeros(Nm,T/Tm);

%DEMANDAS
Do=ones(T/Tm,1); %veh/h
Dramp=ones(T/Tm,1); %veh/h

for i=1:(2/Tm)
Do(i,1)=3500;
end
for i=(2/Tm):(2.25/Tm)
Do(i,1)=3500-2500*(i-2/Tm)/(0.25/Tm);
end
for i=(2.25/Tm):(2.5/Tm)
Do(i,1)=1000;
end

for i=1:(0.125/Tm)
Dramp(i,1)=500+1000*(i-1)/(0.125/Tm);
end
for i=(0.125/Tm):(0.375/Tm)
Dramp(i,1)=1500;
end
for i=(0.375/Tm):(0.5/Tm)
Dramp(i,1)=1500-1000*(i-
0.375/Tm)/(0.125/Tm);
end
for i=(0.5/Tm):(2.5/Tm)
Dramp(i,1)=500;
end

%CONDICIONES INICIALES
rho(1:3,1)=22;
rho(4,1)=24;
rho(5,1)=29;
rho(6,1)=30;

v(1:2,1)=80;
v(3,1)=78;
v(4,1)=73;
v(5,1)=68;
v(6,1)=67;

q(:,1)=lambda*rho(:,1).*v(:,1);

wo(1,1)=0;
wramp(1,1)=0;

%Variables auxiliares para el calculo de
qmax_o
V_DES_VSL_CRIT=v_free*exp((-1/a)); %Evaluado
en rho(1,km)=rho_crit; fuera del bucle
porque no depende de km

%Inicio bucle temporal hasta T-Tm
for km=1:T/Tm

%SEGMENTO_1

%V_LIM(km,1)=min([V_LIM_AP(km,1),v(1,km)]);
V_LIM(km,1)=v(1,km); %Así porque no tenemos
velocidad limite aplicada

%Aquí iría el calculo de V_DES_VSL_CRIT,
pero se ha sacado del bucle al ser un valor
constante

%V_DES_CRIT=min([V_DES_VSL_CRIT,(1+a)*V_LIM_
AP(km,1)]);
V_DES_CRIT=V_DES_VSL_CRIT;

if V_LIM(km,1)<V_DES_CRIT

qmax_o(km,1)=lambda*V_LIM(km,1)*rho_crit*(-
a*log((V_LIM(km,1))/(v_free)))^(1/a);
else
qmax_o(km,1)=lambda*V_DES_CRIT*rho_crit;
end

qo(km,1)=min([Do(km,1) + wo(km,1)/Tm ,
qmax_o(km,1)]);

wo(km+1,1)=wo(km,1) + Tm*(Do(km,1) -
qo(km,1));

```

```

rho(1, km+1)=rho(1, km) +
(Tm/(lambda*L)) * (qo(km,1) - q(1, km));

V_DES_VSL(1, km)=v_free*exp((-
1/a)*((rho(1, km)/rho_crit)^a));
%V_DES(km,1)=min([V_DES_VSL(km,1), (1+alpha)*
V_LIM_AP(km,1)]);
V_DES(1, km)=V_DES_VSL(1, km);
vo(km,1)=v(1, km);

v(1, km+1)=v(1, km) + (Tm/tau)*(V_DES(1, km) -
v(1, km)) + (Tm/L)*v(1, km)*(vo(km,1)-v(1, km)) -
((mu*Tm)/(tau*L))*((rho(2, km)-
rho(1, km))/(rho(1, km)+K));

q(1, km+1)=lambda*rho(1, km+1)*v(1, km+1);

%SEGMENTO_2

rho(2, km+1)=rho(2, km) +
(Tm/(lambda*L)) * (q(1, km) - q(2, km));

V_DES_VSL(2, km)=v_free*exp((-
1/a)*((rho(2, km)/rho_crit)^a));
%V_DES(km,1)=min([V_DES_VSL(km,1), (1+a)*V_LI
M_AP(km,1)]);
V_DES(2, km)=V_DES_VSL(2, km);

v(2, km+1)=v(2, km) + (Tm/tau)*(V_DES(2, km) -
v(2, km)) + (Tm/L)*v(2, km)*(v(1, km)-v(2, km)) -
((mu*Tm)/(tau*L))*((rho(3, km)-
rho(2, km))/(rho(2, km)+K));

q(2, km+1)=lambda*rho(2, km+1)*v(2, km+1);

%SEGMENTO_3

rho(3, km+1)=rho(3, km) +
(Tm/(lambda*L)) * (q(2, km) - q(3, km));

V_DES_VSL(3, km)=v_free*exp((-
1/a)*((rho(3, km)/rho_crit)^a));
%V_DES(km,1)=min([V_DES_VSL(km,1), (1+a)*V_LI
M_AP(km,1)]);
V_DES(3, km)=V_DES_VSL(3, km);

v(3, km+1)=v(3, km) + (Tm/tau)*(V_DES(3, km) -
v(3, km)) + (Tm/L)*v(3, km)*(v(2, km)-v(3, km)) -
((mu*Tm)/(tau*L))*((rho(4, km)-
rho(3, km))/(rho(3, km)+K));

q(3, km+1)=lambda*rho(3, km+1)*v(3, km+1);

%SEGMENTO_4

rho(4, km+1)=rho(4, km) +
(Tm/(lambda*L)) * (q(3, km) - q(4, km));

V_DES_VSL(4, km)=v_free*exp((-
1/a)*((rho(4, km)/rho_crit)^a));
%V_DES(km,1)=min([V_DES_VSL(km,1), (1+a)*V_LI
M_AP(km,1)]);
V_DES(4, km)=V_DES_VSL(4, km);

v(4, km+1)=v(4, km) + (Tm/tau)*(V_DES(4, km) -
v(4, km)) + (Tm/L)*v(4, km)*(v(3, km)-v(4, km)) -
((mu*Tm)/(tau*L))*((rho(5, km)-
rho(4, km))/(rho(4, km)+K));

q(4, km+1)=lambda*rho(4, km+1)*v(4, km+1);

%SEGMENTO_5

qramp(km,1)=min([1*Cramp, Dramp(km,1) +
(wramp(km,1)/Tm), Cramp*((rho_max-
rho(5, km))/(rho_max-rho_crit))]; %r=1
porque no aplicamos ramp-metering
wramp(km+1,1)=wramp(km,1) + Tm*(Dramp(km,1) -
qramp(km,1));

rho(5, km+1)=rho(5, km) +
(Tm/(lambda*L)) * (q(4, km) - q(5, km) +
qramp(km,1));

V_DES_VSL(5, km)=v_free*exp((-
1/a)*((rho(5, km)/rho_crit)^a));
%V_DES(km,1)=min([V_DES_VSL(km,1), (1+a)*V_LI
M_AP(km,1)]);
V_DES(5, km)=V_DES_VSL(5, km);

v(5, km+1)=v(5, km) + (Tm/tau)*(V_DES(5, km) -
v(5, km)) + (Tm/L)*v(5, km)*(v(4, km)-v(5, km)) -
((mu*Tm)/(tau*L))*((rho(6, km)-
rho(5, km))/(rho(5, km)+K)) -
((delta*Tm*qramp(km,1)*v(5, km))/(L*lambda*(r
ho(5, km)+K)));

q(5, km+1)=lambda*rho(5, km+1)*v(5, km+1);

%SEGMENTO_6

rho(6, km+1)=rho(6, km) +
(Tm/(lambda*L)) * (q(5, km) - q(6, km));

V_DES_VSL(6, km)=v_free*exp((-
1/a)*((rho(6, km)/rho_crit)^a));
%V_DES(km,1)=min([V_DES_VSL(km,1), (1+a)*V_LI
M_AP(km,1)]);
V_DES(6, km)=V_DES_VSL(6, km);

rho(7, km)=min([rho(6, km), rho_crit]);
%rho(7, km)= rho_crit;

v(6, km+1)=v(6, km) + (Tm/tau)*(V_DES(6, km) -
v(6, km)) + (Tm/L)*v(6, km)*(v(5, km)-v(6, km)) -
((mu*Tm)/(tau*L))*((rho(7, km)-
rho(6, km))/(rho(6, km)+K));

q(6, km+1)=lambda*rho(6, km+1)*v(6, km+1);

end

TTS=0;
for i=1:T/Tm
    s=0;
    for j=1:Nm
        s=s+rho(j, i)*L*lambda;
    end
    sum=s + wramp(i,1) + wo(i,1);
    TTS=TTS+Tm*sum;
end

%Representación gráfica
%t=1/6:1/6:T/(6*Tm);
t=0:2.5/900:2.5;
t=t(1:900);
figure(1)
plot(t, rho(1,1:(T/Tm))', t, rho(2,1:(T/Tm))', t
, rho(3,1:(T/Tm))', t, rho(4,1:(T/Tm))', t, rho(5
,1:(T/Tm))', t, rho(6,1:(T/Tm))')
title('DENSIDAD')
legend({'SEG1', 'SEG2', 'SEG3', 'SEG4', 'SEG5', '
SEG6',})
figure(2)
plot(t, v(1,1:(T/Tm))', t, v(2,1:(T/Tm))', t, v(3
,1:(T/Tm))', t, v(4,1:(T/Tm))', t, v(5,1:(T/Tm)
)', t, v(6,1:(T/Tm))')
title('VELOCIDAD')
legend({'SEG1', 'SEG2', 'SEG3', 'SEG4', 'SEG5', '
SEG6',})
figure(3)

```

```
plot(t,q(1,1:(T/Tm))',t,q(2,1:(T/Tm))',t,q(3,1:(T/Tm))',t,q(4,1:(T/Tm))',t,q(5,1:(T/Tm))',t,q(6,1:(T/Tm))')
title('FLUJO')
legend({'SEG1','SEG2','SEG3','SEG4','SEG5','SEG6'},)
```

```
figure(4)
plot(t,wo(1:(T/Tm),1)',t,wramp(1:(T/Tm),1))
title('Colas en los orígenes')
legend({'Principal','Rampa'})
```

## CONTROL ALINEA

```
%DATOS TEMPORALES
Tm=10/3600; %Tm horas de "step-size" /
Tener en cuenta restricción para estabilidad
numérica
T=2.5; %Tiempo total de simulación (HORAS)
Tc=60/3600; %Tc horas de control
```

```
%ESPECIFICACIONES DE LA RED
Nm=6; %Número de segmentos
L=1; %km
lambda=2; %carriles
tau=0.005; %h
alpha=0.1;
mu=60; % (km*km)/h
Co=4000; %veh/h
K=40; %veh/(km*carril)
a=1.867;
delta=0.0122;
Cramp=2000; %veh/h
rho_crit=33.5; %veh/(km*carril) %33.5
v_free=102; %km/h
rho_max=180; %veh/(km*carril)
```

```
%VARIABLES DINAMICAS: Matrices =
(segmento,instante de tiempo)
q=zeros(Nm,T/Tm);
rho=zeros(Nm,T/Tm);
v=zeros(Nm,T/Tm);
```

```
%VARIABLES DINAMICAS AUXILIARES
wo=zeros(T/Tm,1);
qo=zeros(T/Tm,1);
vo=zeros(T/Tm,1);
qmax_o=zeros(T/Tm,1);
V_LIM=zeros(T/Tm,1);
V_LIM_AP=zeros(T/Tm,1);
qramp=zeros(T/Tm,1);
wramp=zeros(T/Tm,1);
V_DES_VSL=zeros(Nm,T/Tm);
V_DES=zeros(Nm,T/Tm);
r=zeros(T/Tm,1);
```

```
%DEMANDAS
Do=ones(T/Tm,1); %veh/h
Dramp=ones(T/Tm,1); %veh/h
```

```
for i=1:(2/Tm)
    Do(i,1)=3500;
end
for i=(2/Tm):(2.25/Tm)
    Do(i,1)=3500-2500*(i-2/Tm)/(0.25/Tm);
end
for i=(2.25/Tm):(2.5/Tm)
    Do(i,1)=1000;
end
for i=1:(0.125/Tm)
    Dramp(i,1)=500+1000*(i-1)/(0.125/Tm);
end
for i=(0.125/Tm):(0.375/Tm)
    Dramp(i,1)=1500;
end
for i=(0.375/Tm):(0.5/Tm)
    Dramp(i,1)=1500-1000*(i-0.375/Tm)/(0.125/Tm);
```

```
end
for i=(0.5/Tm):(2.5/Tm)
    Dramp(i,1)=500;
end
```

```
%CONDICIONES INICIALES
rho(1:3,1)=22;
rho(4,1)=24;
rho(5,1)=29;
rho(6,1)=30;
```

```
v(1:2,1)=80;
v(3,1)=78;
v(4,1)=73;
v(5,1)=68;
v(6,1)=67;
```

```
q(:,1)=lambda*rho(:,1).*v(:,1);
```

```
wo(1,1)=0;
wramp(1,1)=0;
```

```
%Control
r(1,1)=1;
kc=1;
K_Alinea=0.2;
rho_crit_A=41; %veh/(km*carril)
```

```
%Variables auxiliares para el calculo de
qmax_o
V_DES_VSL_CRIT=v_free*exp((-1/a)); %Evaluado
en rho(1,km)=rho_crit; fuera del bucle
porque no depende de km
```

```
%Inicio bucle temporal hasta T-Tm
for km=1:T/Tm
```

```
%SEGMENTO_1
```

```
%V_LIM(km,1)=min([V_LIM_AP(km,1),v(1,km)]);
V_LIM(km,1)=v(1,km); %Así porque no tenemos
velocidad limite aplicada
```

```
%Aquí iría el calculo de V_DES_VSL_CRIT,
pero se ha sacado del bucle al ser un valor
constante
```

```
%V_DES_CRIT=min([V_DES_VSL_CRIT,(1+a)*V_LIM_
AP(km,1)]);
V_DES_CRIT=V_DES_VSL_CRIT;
```

```
if V_LIM(km,1)<V_DES_CRIT
```

```
qmax_o(km,1)=lambda*V_LIM(km,1)*rho_crit*(-
a*log((V_LIM(km,1))/(v_free)))^(1/a);
else
    qmax_o(km,1)=lambda*V_DES_CRIT*rho_crit;
end
```

```
qo(km,1)=min([Do(km,1) + wo(km,1)/Tm ,
qmax_o(km,1)]);
```

```
wo(km+1,1)=wo(km,1) + Tm*(Do(km,1) -
qo(km,1));
```

```

rho(1, km+1)=rho(1, km) +
(Tm/(lambda*L)) * (qo(km,1) - q(1, km));

V_DES_VSL(1, km)=v_free*exp((-
1/a) * ((rho(1, km)/rho_crit)^a));
%V_DES(km,1)=min([V_DES_VSL(km,1), (1+alpha)*
V_LIM_AP(km,1)]);
V_DES(1, km)=V_DES_VSL(1, km);
vo(km,1)=v(1, km);

v(1, km+1)=v(1, km) + (Tm/tau) * (V_DES(1, km) -
v(1, km)) + (Tm/L) * v(1, km) * (vo(km,1) - v(1, km)) -
((mu*Tm)/(tau*L)) * ((rho(2, km) -
rho(1, km))/(rho(1, km)+K));

q(1, km+1)=lambda*rho(1, km+1) * v(1, km+1);

%%SEGMENTO_2

rho(2, km+1)=rho(2, km) +
(Tm/(lambda*L)) * (q(1, km) - q(2, km));

V_DES_VSL(2, km)=v_free*exp((-
1/a) * ((rho(2, km)/rho_crit)^a));
%V_DES(km,1)=min([V_DES_VSL(km,1), (1+alpha)*
V_LIM_AP(km,1)]);
V_DES(2, km)=V_DES_VSL(2, km);

v(2, km+1)=v(2, km) + (Tm/tau) * (V_DES(2, km) -
v(2, km)) + (Tm/L) * v(2, km) * (v(1, km) - v(2, km)) -
((mu*Tm)/(tau*L)) * ((rho(3, km) -
rho(2, km))/(rho(2, km)+K));

q(2, km+1)=lambda*rho(2, km+1) * v(2, km+1);

%%SEGMENTO_3

rho(3, km+1)=rho(3, km) +
(Tm/(lambda*L)) * (q(2, km) - q(3, km));

V_DES_VSL(3, km)=v_free*exp((-
1/a) * ((rho(3, km)/rho_crit)^a));
%V_DES(km,1)=min([V_DES_VSL(km,1), (1+alpha)*
V_LIM_AP(km,1)]);
V_DES(3, km)=V_DES_VSL(3, km);

v(3, km+1)=v(3, km) + (Tm/tau) * (V_DES(3, km) -
v(3, km)) + (Tm/L) * v(3, km) * (v(2, km) - v(3, km)) -
((mu*Tm)/(tau*L)) * ((rho(4, km) -
rho(3, km))/(rho(3, km)+K));

q(3, km+1)=lambda*rho(3, km+1) * v(3, km+1);

%%SEGMENTO_4

rho(4, km+1)=rho(4, km) +
(Tm/(lambda*L)) * (q(3, km) - q(4, km));

V_DES_VSL(4, km)=v_free*exp((-
1/a) * ((rho(4, km)/rho_crit)^a));
%V_DES(km,1)=min([V_DES_VSL(km,1), (1+alpha)*
V_LIM_AP(km,1)]);
V_DES(4, km)=V_DES_VSL(4, km);

v(4, km+1)=v(4, km) + (Tm/tau) * (V_DES(4, km) -
v(4, km)) + (Tm/L) * v(4, km) * (v(3, km) - v(4, km)) -
((mu*Tm)/(tau*L)) * ((rho(5, km) -
rho(4, km))/(rho(4, km)+K));

q(4, km+1)=lambda*rho(4, km+1) * v(4, km+1);

%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
if km>1
    if km==6*kc
        r(km,1)=r(km-1,1) +
K_Alinea*(rho_crit_A - rho(5, km));
        if r(km,1)>1
            r(km,1)=1;
        elseif r(km,1)<0
            r(km,1)=0;
        end
        kc=kc+1;
    else
        r(km,1)=r(km-1,1);
    end

end

%%SEGMENTO_5

qramp(km,1)=min([r(km,1)*Cramp, Dramp(km,1)
+ (wramp(km,1)/Tm), Cramp*((rho_max-
rho(5, km))/(rho_max-rho_crit))]);
wramp(km+1,1)=wramp(km,1) + Tm*(Dramp(km,1) -
qramp(km,1));

%Saturation para que la cola no supere los
100 vehiculos
if wramp(km+1,1)>=100
    wramp(km+1,1)=100;

    r(km,1)=(Dramp(km+1,1) - ((wramp(km+1,1) -
wramp(km,1))/Tm)/Cramp;

    if r(km,1)>1
        r(km,1)=1;
    elseif r(km,1)<0
        r(km,1)=0;
    end

    qramp(km,1)=min([r(km,1)*Cramp,
Dramp(km,1) + (wramp(km,1)/Tm),
Cramp*((rho_max-rho(5, km))/(rho_max-
rho_crit))]);
    wramp(km+1,1)=wramp(km,1) +
Tm*(Dramp(km,1) - qramp(km,1));
end

rho(5, km+1)=rho(5, km) +
(Tm/(lambda*L)) * (q(4, km) - q(5, km) +
qramp(km,1));

V_DES_VSL(5, km)=v_free*exp((-
1/a) * ((rho(5, km)/rho_crit)^a));
%V_DES(km,1)=min([V_DES_VSL(km,1), (1+alpha)*
V_LIM_AP(km,1)]);
V_DES(5, km)=V_DES_VSL(5, km);

v(5, km+1)=v(5, km) + (Tm/tau) * (V_DES(5, km) -
v(5, km)) + (Tm/L) * v(5, km) * (v(4, km) - v(5, km)) -
((mu*Tm)/(tau*L)) * ((rho(6, km) -
rho(5, km))/(rho(5, km)+K)) -
((delta*Tm*qramp(km,1) * v(5, km))/(L*lambda*(r
ho(5, km)+K)));

q(5, km+1)=lambda*rho(5, km+1) * v(5, km+1);

%%SEGMENTO_6

rho(6, km+1)=rho(6, km) +
(Tm/(lambda*L)) * (q(5, km) - q(6, km));

V_DES_VSL(6, km)=v_free*exp((-
1/a) * ((rho(6, km)/rho_crit)^a));
%V_DES(km,1)=min([V_DES_VSL(km,1), (1+alpha)*
V_LIM_AP(km,1)]);
V_DES(6, km)=V_DES_VSL(6, km);

rho(7, km)=min([rho(6, km), rho_crit]);
rho(7, km)= rho_crit;

```

## Control dinámico de sistemas de tráfico en autovías: comparación de controladores.

```
v(6, km+1)=v(6, km) + (Tm/tau) * (V_DES(6, km) -
v(6, km)) + (Tm/L) * v(6, km) * (v(5, km) - v(6, km))
- ((mu*Tm) / (tau*L)) * ((rho(7, km) -
rho(6, km)) / (rho(6, km) + K));

q(6, km+1)=lambda*rho(6, km+1) * v(6, km+1);

end

TTS_ALINEA=0;
J=0;
for i=1:T/Tm
    s=0;
    for j=1:Nm
        s=s+rho(j, i) * L * lambda;
    end
    sum=s + wramp(i, 1) + wo(i, 1);
    TTS_ALINEA=TTS_ALINEA+Tm*sum;
    if i>1
        J=J + Tm*sum + 0.5 * (r(i, 1) - r(i-1, 1))^2;
    else
        J=J+Tm*sum;
    end
end

%Representación gráfica
%t=1/6:1/6:T/(6*Tm);
t=0:2.5/900:2.5;
t=t(1:900);

figure(1)
plot(t, rho(1, 1:(T/Tm)), t, rho(2, 1:(T/Tm)), t,
rho(3, 1:(T/Tm)), t, rho(4, 1:(T/Tm)), t, rho(5,
1:(T/Tm)), t, rho(6, 1:(T/Tm)))
title('DENSIDAD')
legend({'SEG1', 'SEG2', 'SEG3', 'SEG4', 'SEG5', '
SEG6', })
figure(2)
plot(t, v(1, 1:(T/Tm)), t, v(2, 1:(T/Tm)), t, v(3,
1:(T/Tm)), t, v(4, 1:(T/Tm)), t, v(5, 1:(T/Tm))
', t, v(6, 1:(T/Tm)))
title('VELOCIDAD')
legend({'SEG1', 'SEG2', 'SEG3', 'SEG4', 'SEG5', '
SEG6', })
figure(3)
plot(t, q(1, 1:(T/Tm)), t, q(2, 1:(T/Tm)), t, q(3,
1:(T/Tm)), t, q(4, 1:(T/Tm)), t, q(5, 1:(T/Tm))
', t, q(6, 1:(T/Tm)))
title('FLUJO')
legend({'SEG1', 'SEG2', 'SEG3', 'SEG4', 'SEG5', '
SEG6', })
figure(4)
plot(t, wo(1:(T/Tm), 1), t, wramp(1:(T/Tm), 1))
title('Colas en los origenes')
legend({'Principal', 'Rampa'})
figure(5)
plot(t, r(1:(T/Tm), 1))
title('RAMP-METERING')
```

## CONTROL MTEC.

```
%DATOS TEMPORALES
Tm=10/3600; %Tm minutos de "step-size" /
Tener en cuenta restricción para estabilidad
numérica
T=2.5; %Tiempo total de simulación (HORAS)

%ESPECIFICACIONES DE LA RED
Nm=6; %Número de segmentos
L=1; %km
lambda=2; %carriles
tau=0.005; %h
alpha=0.1;
mu=60; % (km*km)/h
Co=4000; %veh/h
K=40; %veh/(km*carril)
a=1.867;
delta=0.0122;
Cramp=2000; %veh/h
rho_crit=33.5; %veh/(km*carril)
v_free=102; %km/h
rho_max=180; %veh/(km*carril)

%VARIABLES DINAMICAS: Matrices =
(segmento, instante de tiempo)
q=zeros(Nm, T/Tm);
rho=zeros(Nm, T/Tm);
v=zeros(Nm, T/Tm);

%VARIABLES DINAMICAS AUXILIARES
wo=zeros(T/Tm, 1);
qo=zeros(T/Tm, 1);
vo=zeros(T/Tm, 1);
qmax_o=zeros(T/Tm, 1);
V_LIM=zeros(T/Tm, 1);
V_LIM_AP=zeros(T/Tm, 1);
qramp=zeros(T/Tm, 1);
wramp=zeros(T/Tm, 1);
V_DES_VSL=zeros(Nm, T/Tm);
V_DES=zeros(Nm, T/Tm);

q_3_gorro=zeros(T/Tm, 1);
b=zeros(T/Tm, 1);

%DEMANDAS
Do=ones(T/Tm, 1); %veh/h
Dramp=ones(T/Tm, 1); %veh/h

for i=1:(2/Tm)
    Do(i, 1)=3500;
end
for i=(2/Tm):(2.25/Tm)
    Do(i, 1)=3500-2500*(i-2/Tm)/(0.25/Tm);
end
for i=(2.25/Tm):(2.5/Tm)
    Do(i, 1)=1000;
end

for i=1:(0.125/Tm)
    Dramp(i, 1)=500+1000*(i-1)/(0.125/Tm);
end
for i=(0.125/Tm):(0.375/Tm)
    Dramp(i, 1)=1500;
end
for i=(0.375/Tm):(0.5/Tm)
    Dramp(i, 1)=1500-1000*(i-
0.375/Tm)/(0.125/Tm);
end
for i=(0.5/Tm):(2.5/Tm)
    Dramp(i, 1)=500;
end

%CONDICIONES INICIALES
rho(1:3, 1)=22;
rho(4, 1)=24;
rho(5, 1)=29;
rho(6, 1)=30;

v(1:2, 1)=80;
v(3, 1)=78;
v(4, 1)=73;
v(5, 1)=68;
v(6, 1)=67;

q(:, 1)=lambda*rho(:, 1) .* v(:, 1);
```

```

wo(1,1)=0;
wramp(1,1)=0;

%Control
kc=1;
q_3_gorro(1,1)=q(3,1);
b(1,1)=120/v_free;

Kp1=30;
Ki1=380;
Ki2=0.0001;
rho_crit_MTFC=40;

%Variables auxiliares para el calculo de
qmax_o
V_DES_VSL_CRIT=v_free*exp((-1/a)); %Evaluado
en rho(1,km)=rho_crit; fuera del bucle
porque no depende de km

%Inicio bucle temporal hasta T-Tm
for km=1:T/Tm

%SEGMENTO_1

%V_LIM(km,1)=min([V_LIM_AP(km,1),v(1,km)]);
V_LIM(km,1)=v(1,km); %Así porque no tenemos
velocidad limite aplicada

%Aquí iría el calculo de V_DES_VSL_CRIT,
pero se ha sacado del bucle al ser un valor
constante

%V_DES_CRIT=min([V_DES_VSL_CRIT,(1+alpha)*V_
LIM_AP(km,1)]);
V_DES_CRIT=V_DES_VSL_CRIT;

if V_LIM(km,1)<V_DES_CRIT

qmax_o(km,1)=lambda*V_LIM(km,1)*rho_crit*(-
a*log((V_LIM(km,1))/(v_free)))^(1/a);
else
qmax_o(km,1)=lambda*V_DES_CRIT*rho_crit;
end

qo(km,1)=min([Do(km,1) + wo(km,1)/Tm ,
qmax_o(km,1)]);

wo(km+1,1)=wo(km,1) + Tm*(Do(km,1) -
qo(km,1));

rho(1,km+1)=rho(1,km) +
(Tm/(lambda*L))*(qo(1,km) - q(1,km));

V_DES_VSL(1,km)=v_free*exp((-
1/a)*((rho(1,km)/rho_crit)^a));
%V_DES(km,1)=min([V_DES_VSL(km,1),(1+alpha)*
V_LIM_AP(km,1)]);
V_DES(1,km)=V_DES_VSL(1,km);
vo(km,1)=v(1,km);

v(1,km+1)=v(1,km) + (Tm/tau)*(V_DES(1,km) -
v(1,km)) + (Tm/L)*v(1,km)*(vo(km,1)-v(1,km))
- ((mu*Tm)/(tau*L))*((rho(2,km)-
rho(1,km))/(rho(1,km)+K));

q(1,km+1)=lambda*rho(1,km+1)*v(1,km+1);

%SEGMENTO_2

rho(2,km+1)=rho(2,km) +
(Tm/(lambda*L))*(q(1,km) - q(2,km));

V_DES_VSL(2,km)=v_free*exp((-
1/a)*((rho(2,km)/rho_crit)^a));
%V_DES(km,1)=min([V_DES_VSL(km,1),(1+alpha)*
V_LIM_AP(km,1)]);

V_DES(2,km)=V_DES_VSL(2,km);

v(2,km+1)=v(2,km) + (Tm/tau)*(V_DES(2,km) -
v(2,km)) + (Tm/L)*v(2,km)*(v(1,km)-v(2,km))
- ((mu*Tm)/(tau*L))*((rho(3,km)-
rho(2,km))/(rho(2,km)+K));

q(2,km+1)=lambda*rho(2,km+1)*v(2,km+1);

%SEGMENTO_3

%%MFTFC%%

if km>1
if km==6*kc
q_3_gorro(km,1)=q_3_gorro(km-1,1) +
(Kp1 + Ki1)*(rho_crit_MTFC - rho(5,km)) -
Kp1*(rho_crit_MTFC - rho(5,km-1));

if q_3_gorro(km,1)>5000
q_3_gorro(km,1)=5000;
elseif q_3_gorro(km,1)<1000
q_3_gorro(km,1)=1000;
end

b(km,1)=b(km-1,1) +
Ki2*(q_3_gorro(km,1) - q(5,km));

if b(km,1)>120/v_free
b(km,1)=120/v_free;

q_3_gorro(km,1)=min([5000,max([1000,q(3,km)+
(b(km,1)-b(km-1,1))/Ki2])]);

elseif b(km,1)<20/v_free;
b(km,1)=20/v_free;

q_3_gorro(km,1)=min([5000,max([1000,q(3,km)+
(b(km,1)-b(km-1,1))/Ki2])]);

end
kc=kc+1;

else
q_3_gorro(km,1)=q_3_gorro(km-1,1);
b(km,1)=b(km-1,1);
end

end

rho(3,km+1)=rho(3,km) +
(Tm/(lambda*L))*(q(2,km) - q(3,km));

V_DES_VSL(3,km)=v_free*exp((-
1/a)*((rho(3,km)/rho_crit)^a));
V_DES(3,km)=min([V_DES_VSL(3,km),(1+alpha)*b
(km,1)*v_free]);
%V_DES(km,1)=min([V_DES_VSL(km,1),(1+alpha)*
V_LIM_AP(km,1)]);
%V_DES(3,km)=V_DES_VSL(3,km);

v(3,km+1)=v(3,km) + (Tm/tau)*(V_DES(3,km) -
v(3,km)) + (Tm/L)*v(3,km)*(v(2,km)-v(3,km))
- ((mu*Tm)/(tau*L))*((rho(4,km)-
rho(3,km))/(rho(3,km)+K));

q(3,km+1)=lambda*rho(3,km+1)*v(3,km+1);

%SEGMENTO_4

rho(4,km+1)=rho(4,km) +
(Tm/(lambda*L))*(q(3,km) - q(4,km));

V_DES_VSL(4,km)=v_free*exp((-
1/a)*((rho(4,km)/rho_crit)^a));

```

## Control dinámico de sistemas de tráfico en autovías: comparación de controladores.

```
V_DES(4, km) = min([V_DES_VSL(4, km), (1+alpha)*v_free]);
%V_DES(4, km) = V_DES_VSL(4, km);

v(4, km+1) = v(4, km) + (Tm/tau)*(V_DES(4, km) - v(4, km)) + (Tm/L)*v(4, km)*(v(3, km) - v(4, km)) - ((mu*Tm)/(tau*L))*((rho(5, km) - rho(4, km))/(rho(4, km) + K));

q(4, km+1) = lambda*rho(4, km+1)*v(4, km+1);

%SEGMENTO_5

qramp(km, 1) = min([1*Cramp, Dramp(km, 1) + (wramp(km, 1)/Tm), Cramp*((rho_max - rho(5, km))/(rho_max - rho_crit))]);
wramp(km+1, 1) = wramp(km, 1) + Tm*(Dramp(km, 1) - qramp(km, 1));

rho(5, km+1) = rho(5, km) + (Tm/(lambda*L))*(q(4, km) - q(5, km) + qramp(km, 1));

V_DES_VSL(5, km) = v_free*exp((-1/a)*((rho(5, km)/rho_crit)^a));
%V_DES(5, km) = min([V_DES_VSL(km, 1), (1+alpha)*b(km, 1)*v_free]);
V_DES(5, km) = V_DES_VSL(5, km);

v(5, km+1) = v(5, km) + (Tm/tau)*(V_DES(5, km) - v(5, km)) + (Tm/L)*v(5, km)*(v(4, km) - v(5, km)) - ((mu*Tm)/(tau*L))*((rho(6, km) - rho(5, km))/(rho(5, km) + K)) - ((delta*Tm*qramp(km, 1)*v(5, km))/(L*lambda*(rho(5, km) + K)));

q(5, km+1) = lambda*rho(5, km+1)*v(5, km+1);

%SEGMENTO_6

rho(6, km+1) = rho(6, km) + (Tm/(lambda*L))*(q(5, km) - q(6, km));

V_DES_VSL(6, km) = v_free*exp((-1/a)*((rho(6, km)/rho_crit)^a));
%V_DES(km, 1) = min([V_DES_VSL(km, 1), (1+alpha)*V_LIM_AP(km, 1)]);
V_DES(6, km) = V_DES_VSL(6, km);

rho(7, km) = min([rho(6, km), rho_crit]);
rho(7, km) = rho_crit;

v(6, km+1) = v(6, km) + (Tm/tau)*(V_DES(6, km) - v(6, km)) + (Tm/L)*v(6, km)*(v(5, km) - v(6, km)) - ((mu*Tm)/(tau*L))*((rho(7, km) - rho(6, km))/(rho(6, km) + K));

q(6, km+1) = lambda*rho(6, km+1)*v(6, km+1);

end

TTS_MTFC=0;
J=0;
for i=1:T/Tm
    s=0;
    for j=1:Nm
        s=s+rho(j, i)*L*lambda;
    end
    sum=s + wramp(i, 1) + wo(i, 1);
    TTS_MTFC=TTS_MTFC+Tm*sum;
    if i>1
        J=J + Tm*sum + 50*(b(i, 1)-b(i-1, 1))^2;
    else
        J=J+Tm*sum;
    end
end

%Representación gráfica
%t=1/6:1/6:T/(6*Tm);
t=0:2.5/900:2.5;
t=t(1:900);
figure(1)
plot(t, rho(1, 1:(T/Tm)), t, rho(2, 1:(T/Tm)), t, rho(3, 1:(T/Tm)), t, rho(4, 1:(T/Tm)), t, rho(5, 1:(T/Tm)), t, rho(6, 1:(T/Tm)))
title('DENSIDAD')
legend({'SEG1', 'SEG2', 'SEG3', 'SEG4', 'SEG5', 'SEG6',})
figure(2)
plot(t, v(1, 1:(T/Tm)), t, v(2, 1:(T/Tm)), t, v(3, 1:(T/Tm)), t, v(4, 1:(T/Tm)), t, v(5, 1:(T/Tm)), t, v(6, 1:(T/Tm)))
title('VELOCIDAD')
legend({'SEG1', 'SEG2', 'SEG3', 'SEG4', 'SEG5', 'SEG6',})
figure(3)
plot(t, q(1, 1:(T/Tm)), t, q(2, 1:(T/Tm)), t, q(3, 1:(T/Tm)), t, q(4, 1:(T/Tm)), t, q(5, 1:(T/Tm)), t, q(6, 1:(T/Tm)))
title('FLUJO')
legend({'SEG1', 'SEG2', 'SEG3', 'SEG4', 'SEG5', 'SEG6',})
figure(4)
plot(t, wo(1:(T/Tm), 1), t, wramp(1:(T/Tm), 1))
title('Colas en los origenes')
legend({'Principal', 'Rampa'})
figure(5)
plot(t, b(1:(T/Tm), 1))
title('VSL')
```

## CONTROL COMBINADO (ALINEA + MTFC)

```
%DATOS TEMPORALES
Tm=10/3600; %Tm minutos de "step-size" /
Tener en cuenta restricción para estabilidad
numérica
T=2.5; %Tiempo total de simulación (HORAS)

%ESPECIFICACIONES DE LA RED
Nm=6; %Número de segmentos
L=1; %km
lambda=2; %carriles
tau=0.005; %h
alpha=0.1;
mu=60; % (km*km)/h
Co=4000; %veh/h

K=40; %veh/(km*carril)
a=1.867;
delta=0.0122;
Cramp=2000; %veh/h
rho_crit=33.5; %veh/(km*carril)
v_free=102; %km/h
rho_max=180; %veh/(km*carril)

%VARIABLES DINAMICAS: Matrices =
(segmento, instante de tiempo)
q=zeros(Nm, T/Tm);
rho=zeros(Nm, T/Tm);
v=zeros(Nm, T/Tm);
```

```

%VARIABLES DINAMICAS AUXILIARES
wo=zeros(T/Tm,1);
qo=zeros(T/Tm,1);
vo=zeros(T/Tm,1);
qmax_o=zeros(T/Tm,1);
V_LIM=zeros(T/Tm,1);
V_LIM_AP=zeros(T/Tm,1);
qramp=zeros(T/Tm,1);
wramp=zeros(T/Tm,1);
V_DES_VSL=zeros(Nm,T/Tm);
V_DES=zeros(Nm,T/Tm);
r=zeros(T/Tm,1);

q_3_gorro=zeros(T/Tm,1);
b=zeros(T/Tm,1);

%DEMANDAS
Do=ones(T/Tm,1); %veh/h
Dramp=ones(T/Tm,1); %veh/h

for i=1:(2/Tm)
    Do(i,1)=3500;
end
for i=(2/Tm):(2.25/Tm)
    Do(i,1)=3500-2500*(i-2/Tm)/(0.25/Tm);
end
for i=(2.25/Tm):(2.5/Tm)
    Do(i,1)=1000;
end

for i=1:(0.125/Tm)
    Dramp(i,1)=500+1000*(i-1)/(0.125/Tm);
end
for i=(0.125/Tm):(0.375/Tm)
    Dramp(i,1)=1500;
end
for i=(0.375/Tm):(0.5/Tm)
    Dramp(i,1)=1500-1000*(i-0.375/Tm)/(0.125/Tm);
end
for i=(0.5/Tm):(2.5/Tm)
    Dramp(i,1)=500;
end

%CONDICIONES INICIALES
rho(1:3,1)=22;
rho(4,1)=24;
rho(5,1)=29;
rho(6,1)=30;

v(1:2,1)=80;
v(3,1)=78;
v(4,1)=73;
v(5,1)=68;
v(6,1)=67;

q(:,1)=lambda*rho(:,1).*v(:,1);

wo(1,1)=0;
wramp(1,1)=0;

%Control MTFC
kc1=1;
q_3_gorro(1,1)=q(3,1);
b(1,1)=120/v_free;

Kp1=80;
Ki1=380;
Ki2=0.015;
rho_crit_MTFC=42;

%Control ALINEA
kc2=1;
r(1,1)=1;
K_Alinea=0.3;
rho_crit_A=40.5; %veh/(km*carril)

%Variables auxiliares para el calculo de
qmax_o
V_DES_VSL_CRIT=v_free*exp((-1/a)); %Evaluado
en rho(1,km)=rho_crit; fuera del bucle
porque no depende de km

%Inicio bucle temporal hasta T-Tm
for km=1:T/Tm

%SEGMENTO_1

%V_LIM(km,1)=min([V_LIM_AP(km,1),v(1,km)]);
V_LIM(km,1)=v(1,km); %Así porque no tenemos
velocidad limite aplicada

%Aquí iría el calculo de V_DES_VSL_CRIT,
pero se ha sacado del bucle al ser un valor
constante

%V_DES_CRIT=min([V_DES_VSL_CRIT,(1+alpha)*V
LIM_AP(km,1)]);
V_DES_CRIT=V_DES_VSL_CRIT;

if V_LIM(km,1)<V_DES_CRIT

qmax_o(km,1)=lambda*V_LIM(km,1)*rho_crit*(-
a*log((V_LIM(km,1))/(v_free)))^(1/a);
else
    qmax_o(km,1)=lambda*V_DES_CRIT*rho_crit;
end

qo(km,1)=min([Do(km,1) + wo(km,1)/Tm ,
qmax_o(km,1)]);

wo(km+1,1)=wo(km,1) + Tm*(Do(km,1)-
qo(km,1));

rho(1,km+1)=rho(1,km) +
(Tm/(lambda*L))*(qo(km,1) - q(1,km));

V_DES_VSL(1,km)=v_free*exp((-
1/a)*((rho(1,km)/rho_crit)^a));
%V_DES(km,1)=min([V_DES_VSL(km,1),(1+alpha)*
V_LIM_AP(km,1)]);
V_DES(1,km)=V_DES_VSL(1,km);
vo(km,1)=v(1,km);

v(1,km+1)=v(1,km) + (Tm/tau)*(V_DES(1,km) -
v(1,km)) + (Tm/L)*v(1,km)*(vo(km,1)-v(1,km)) -
((mu*Tm)/(tau*L))*((rho(2,km)-
rho(1,km))/(rho(1,km)+K));

q(1,km+1)=lambda*rho(1,km+1)*v(1,km+1);

%SEGMENTO_2

rho(2,km+1)=rho(2,km) +
(Tm/(lambda*L))*(q(1,km) - q(2,km));

V_DES_VSL(2,km)=v_free*exp((-
1/a)*((rho(2,km)/rho_crit)^a));
%V_DES(km,1)=min([V_DES_VSL(km,1),(1+alpha)*
V_LIM_AP(km,1)]);
V_DES(2,km)=V_DES_VSL(2,km);

v(2,km+1)=v(2,km) + (Tm/tau)*(V_DES(2,km) -
v(2,km)) + (Tm/L)*v(2,km)*(v(1,km)-v(2,km)) -
((mu*Tm)/(tau*L))*((rho(3,km)-
rho(2,km))/(rho(2,km)+K));

q(2,km+1)=lambda*rho(2,km+1)*v(2,km+1);

%SEGMENTO_3

%%% _____ MTFC _____ %%%

if km>1

```

## Control dinámico de sistemas de tráfico en autovías: comparación de controladores.

```

    if km==6*kc1
        q_3_gorro(km,1)=q_3_gorro(km-1,1) +
        (Kp1 + Ki1)*(rho_crit_MTFC - rho(5,km)) -
        Kp1*(rho_crit_MTFC - rho(5,km-1));

        if q_3_gorro(km,1)>5000
            q_3_gorro(km,1)=5000;
        elseif q_3_gorro(km,1)<1000
            q_3_gorro(km,1)=1000;
        end

        b(km,1)=b(km-1,1) +
        Ki2*(q_3_gorro(km,1) - q(5,km));

        if b(km,1)>120/v_free
            b(km,1)=120/v_free;
        end

        q_3_gorro(km,1)=min([5000,max([1000,q(3,km) +
        ((b(km,1)-b(km-1,1))/Ki2)])]);
        elseif b(km,1)<20/v_free
            b(km,1)=20/v_free;
        end

        q_3_gorro(km,1)=min([5000,max([1000,q(3,km) +
        ((b(km,1)-b(km-1,1))/Ki2)])]);
        end
        kc1=kc1+1;

    else
        q_3_gorro(km,1)=q_3_gorro(km-1,1);
        b(km,1)=b(km-1,1);
    end
end

rho(3,km+1)=rho(3,km) +
(Tm/(lambda*L))*(q(2,km) - q(3,km));

V_DES_VSL(3,km)=v_free*exp((-
1/a)*(rho(3,km)/rho_crit)^a);
V_DES(3,km)=min([V_DES_VSL(3,km), (1+alpha)*b
(km,1)*v_free]);
%V_DES(km,1)=min([V_DES_VSL(km,1), (1+alpha)*
V_LIM_AP(km,1)]);
%V_DES(3,km)=V_DES_VSL(3,km);

v(3,km+1)=v(3,km) + (Tm/tau)*(V_DES(3,km) -
v(3,km)) + (Tm/L)*v(3,km)*(v(2,km)-v(3,km))
- ((mu*Tm)/(tau*L))*(rho(4,km)-
rho(3,km))/(rho(3,km)+K));

q(3,km+1)=lambda*rho(3,km+1)*v(3,km+1);

%SEGMENTO_4

rho(4,km+1)=rho(4,km) +
(Tm/(lambda*L))*(q(3,km) - q(4,km));

V_DES_VSL(4,km)=v_free*exp((-
1/a)*(rho(4,km)/rho_crit)^a);
V_DES(4,km)=min([V_DES_VSL(4,km), (1+alpha)*v
_free]);
%V_DES(4,km)=V_DES_VSL(4,km);

v(4,km+1)=v(4,km) + (Tm/tau)*(V_DES(4,km) -
v(4,km)) + (Tm/L)*v(4,km)*(v(3,km)-v(4,km))
- ((mu*Tm)/(tau*L))*(rho(5,km)-
rho(4,km))/(rho(4,km)+K));

q(4,km+1)=lambda*rho(4,km+1)*v(4,km+1);

%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%
if km>1
    if km==6*kc2
        r(km,1)=r(km-1,1) +
        K_Alinea*(rho_crit_A - rho(5,km));
        if r(km,1)>1
            r(km,1)=1;
        elseif r(km,1)<0
            r(km,1)=0;
        end
        kc2=kc2+1;
    else
        r(km,1)=r(km-1,1);
    end
end

%SEGMENTO_5

qramp(km,1)=min([r(km,1)*Cramp, Dramp(km,1)
+ (wramp(km,1)/Tm), Cramp*((rho_max-
rho(5,km))/(rho_max-rho_crit))]);
wramp(km+1,1)=wramp(km,1) + Tm*(Dramp(km,1)-
qramp(km,1));

%Satuacion para que la cola no supere los
100 vehiculos
if wramp(km+1,1)>100
    wramp(km+1,1)=100;
end

r(km,1)=(Dramp(km+1,1)-((wramp(km+1,1)-
wramp(km,1))/Tm))/Cramp;

if r(km,1)>1
    r(km,1)=1;
elseif r(km,1)<0
    r(km,1)=0;
end

qramp(km,1)=min([r(km,1)*Cramp,
Dramp(km,1) + (wramp(km,1)/Tm),
Cramp*((rho_max-rho(5,km))/(rho_max-
rho_crit))]);
wramp(km+1,1)=wramp(km,1) +
Tm*(Dramp(km,1)-qramp(km,1));
end

rho(5,km+1)=rho(5,km) +
(Tm/(lambda*L))*(q(4,km) - q(5,km) +
qramp(km,1));

V_DES_VSL(5,km)=v_free*exp((-
1/a)*(rho(5,km)/rho_crit)^a);
%V_DES(5,km)=min([V_DES_VSL(km,1), (1+alpha)*
b(km,1)*v_free]);
V_DES(5,km)=V_DES_VSL(5,km);

v(5,km+1)=v(5,km) + (Tm/tau)*(V_DES(5,km) -
v(5,km)) + (Tm/L)*v(5,km)*(v(4,km)-v(5,km))
- ((mu*Tm)/(tau*L))*(rho(6,km)-
rho(5,km))/(rho(5,km)+K) -
((delta*Tm*qramp(km,1)*v(5,km))/(L*lambda*(r
ho(5,km)+K)));

q(5,km+1)=lambda*rho(5,km+1)*v(5,km+1);

%SEGMENTO_6

rho(6,km+1)=rho(6,km) +
(Tm/(lambda*L))*(q(5,km) - q(6,km));

V_DES_VSL(6,km)=v_free*exp((-
1/a)*(rho(6,km)/rho_crit)^a);
%V_DES(km,1)=min([V_DES_VSL(km,1), (1+a)*V_LI
M_AP(km,1)]);
V_DES(6,km)=V_DES_VSL(6,km);

rho(7,km)=min([rho(6,km), rho_crit]);
rho(7,km)=rho_crit;

v(6,km+1)=v(6,km) + (Tm/tau)*(V_DES(6,km) -
v(6,km)) + (Tm/L)*v(6,km)*(v(5,km)-v(6,km))
- ((mu*Tm)/(tau*L))*(rho(7,km)-
rho(6,km))/(rho(6,km)+K));

```

```

q(6, km+1)=lambda*rho(6, km+1)*v(6, km+1);
end

TTS_COMB=0;
J=0;
for i=1:T/Tm
    s=0;
    for j=1:Nm
        s=s+rho(j, i)*L*lambda;
    end
    sum=s + wramp(i,1) + wo(i,1);
    TTS_COMB=TTS_COMB+Tm*sum;
    if i>1
        J=J + Tm*sum + 0.5*(b(i,1)-b(i-1,1))^2 +
        0.5*(r(i,1)-r(i-1,1))^2;
    else
        J=J+Tm*sum;
    end
end

%Representación gráfica
%t=1/6:1/6:T/(6*Tm);
t=0:2.5/900:2.5;
t=t(1:900);
figure(1)
plot(t, rho(1,1:(T/Tm)), t, rho(2,1:(T/Tm)), t,
rho(3,1:(T/Tm)), t, rho(4,1:(T/Tm)), t, rho(5,
1:(T/Tm)), t, rho(6,1:(T/Tm)))

title('DENSIDAD')
legend({'SEG1', 'SEG2', 'SEG3', 'SEG4', 'SEG5', '
SEG6'},)
figure(2)
plot(t, v(1,1:(T/Tm)), t, v(2,1:(T/Tm)), t, v(3,
1:(T/Tm)), t, v(4,1:(T/Tm)), t, v(5,1:(T/Tm))
', t, v(6,1:(T/Tm)))
title('VELOCIDAD')
legend({'SEG1', 'SEG2', 'SEG3', 'SEG4', 'SEG5', '
SEG6'},)
figure(3)
plot(t, q(1,1:(T/Tm)), t, q(2,1:(T/Tm)), t, q(3,
1:(T/Tm)), t, q(4,1:(T/Tm)), t, q(5,1:(T/Tm))
', t, q(6,1:(T/Tm)))
title('FLUJO')
legend({'SEG1', 'SEG2', 'SEG3', 'SEG4', 'SEG5', '
SEG6'},)
figure(4)
plot(t, wo(1:(T/Tm), 1), t, wramp(1:(T/Tm), 1))
title('Colas en los origenes')
legend({'Principal', 'Rampa'})
figure(5)
plot(t, b(1:(T/Tm), 1))
title('VSL')
figure(6)
plot(t, r(1:(T/Tm), 1))
title('RAMP-METERING')

```

## CONTROL LB-TFC.

```

%DATOS TEMPORALES
Tm=10/3600; %Tm minutos de "step-size" /
Tener en cuenta restricción para estabilidad
numérica
T=2.5; %Tiempo total de simulación (HORAS)

%ESPECIFICACIONES DE LA RED
Nm=6; %Número de segmentos
L=1; %km
La=2*L;
lambda=2; %carriles
tau=0.005; %h
alpha=0.1;
mu=60; % (km*km)/h
Co=4000; %veh/h
K=40; %veh/(km*carril)
a=1.867;
delta=0.0122;
Cramp=2000; %veh/h
rho_crit=33.5; %veh/(km*carril)
v_free=102; %km/h
rho_max=180; %veh/(km*carril)

%VARIABLES DINAMICAS: Matrices =
(segmento, instante de tiempo)
q=zeros(Nm, T/Tm);
rho=zeros(Nm, T/Tm);
v=zeros(Nm, T/Tm);

%VARIABLES DINAMICAS AUXILIARES
wo=zeros(T/Tm, 1);
qo=zeros(T/Tm, 1);
vo=zeros(T/Tm, 1);
qmax_o=zeros(T/Tm, 1);
V_LIM=zeros(T/Tm, 1);
V_LIM_AP=zeros(T/Tm, 1);
qramp=zeros(T/Tm, 1);
wramp=zeros(T/Tm, 1);
V_DES_VSL=zeros(Nm, T/Tm);
V_DES=zeros(Nm, T/Tm);

V_hold=zeros(3, T/Tm);
V_rel=zeros(3, T/Tm);
va_gorro=zeros(T/Tm, 1);

VSL_hold_1=zeros(T/Tm, 1);
VSL_rel_1=zeros(T/Tm, 1);
VSL_1=zeros(T/Tm, 1);
V_VSL_1=zeros(T/Tm, 1);
Y_1=zeros(T/Tm, 1);

VSL_hold_2=zeros(T/Tm, 1);
VSL_rel_2=zeros(T/Tm, 1);
VSL_2=zeros(T/Tm, 1);
V_VSL_2=zeros(T/Tm, 1);
Y_2=zeros(T/Tm, 1);

RM_hold=zeros(T/Tm, 1);
RM_rel=zeros(T/Tm, 1);
RM=zeros(T/Tm, 1);
RM_lim=zeros(T/Tm, 1);
V_RM=zeros(T/Tm, 1);
%Hay que poner los primeros valores a 1 y
120
RM(1,1)=1;
VSL_1(1,1)=120;
VSL_2(1,1)=120;
%Capacidades en el bottleneck (variables a
modificar para controlar)
Cb=4500;
Cb_=500;
% % %
rho_crit_LBTFC=34;

%Cola máxima en la rampa
wramp_med=100;

%DEMANDAS
Do=ones(T/Tm, 1); %veh/h
Dramp=ones(T/Tm, 1); %veh/h

for i=1:(2/Tm)
    Do(i,1)=3500;
end
for i=(2/Tm):(2.25/Tm)
    Do(i,1)=3500-2500*(i-2/Tm)/(0.25/Tm);
end
for i=(2.25/Tm):(2.5/Tm)

```

## Control dinámico de sistemas de tráfico en autovías: comparación de controladores.

```

Do(i,1)=1000;
end
for i=1:(0.125/Tm)
    Dramp(i,1)=500+1000*(i-1)/(0.125/Tm);
end
for i=(0.125/Tm):(0.375/Tm)
    Dramp(i,1)=1500;
end
for i=(0.375/Tm):(0.5/Tm)
    Dramp(i,1)=1500-1000*(i-0.375/Tm)/(0.125/Tm);
end
for i=(0.5/Tm):(2.5/Tm)
    Dramp(i,1)=500;
end

%CONDICIONES INICIALES
rho(1:3,1:2)=22;
rho(4,1:2)=24;
rho(5,1:2)=29;
rho(6,1:2)=30;

v(1:2,1:2)=80;
v(3,1:2)=78;
v(4,1:2)=73;
v(5,1:2)=68;
v(6,1:2)=67;

q(:,1:2)=lambda*rho(:,1:2).*v(:,1:2);

wo(1,1)=0;
wramp(1,1)=0;

%Variables auxiliares para el calculo de
qmax_o
V_DES_VSL_CRIT=v_free*exp((-1/a)); %Evaluado
en rho(1,km)=rho_crit; fuera del bucle
porque no depende de km

%Inicio bucle temporal hasta T-Tm
for km=2:(T/Tm)-1

%%% _____ LBTFC _____ %%%

va_gorro(km,1)=(v(2,km)+v(3,km) +
v(4,km))/3;

La=3*L;

%j=VSL_1
V_hold(3,km)=max(0,
(La/va_gorro(km,1))*(q(5,km) - Cb) -
lambda*L*(rho_crit_LBTFC - rho(5,km))); %Cb
es la capacidad del bottleneck
V_rel(3,km)=max(0, (-
La/va_gorro(km,1))*(q(5,km) - Cb) +
lambda*L*(rho_crit_LBTFC - rho(5,km))); %Cb_
es la capacidad del bottleneck menos el
capacity drop

%j=RM

if V_hold(3,km)>0
    q_ramp(km,1)=min([RM(km-1,1)*Cramp ,
Dramp(km,1) + (wramp(km,1)/Tm) ,
Cramp*((rho_max-rho(5,km))/(rho_max-
rho_crit))]); %estabas calculando con un
q_ramp a 0

    RM_hold(km,1)=min(RM(km-1,1),max(
(Tm*q_ramp(km,1) - V_hold(3,km))/(Tm*Cramp) ,
Dramp(km,1)/Cramp + (wramp(km,1) -
wramp_med)/(Cramp*Tm))); %Cj capacidad de la
rampa

    RM(km,1)=min([1,max([0,RM_hold(km,1),
Dramp(km,1)/Cramp + (wramp(km,1) -
wramp_med)/(Cramp*Tm)])]); %Saturamos el
ramp_metering

    if RM(km)~=RM(km-1,1)
        V_RM(km,1)=max(Tm*(q_ramp(km,1) -
Cramp*RM(km,1)) , -wramp(km,1));
    else
        V_RM(km,1)=0;
    end

    V_hold(4,km)=max(0 , V_hold(3,km) -
V_RM(km,1));
    V_rel(4,km)=0;

    if(V_hold(4,km)<0.001)
        V_hold(4,km)=0;
    end

elseif V_rel(3,km)>0
    RM_rel(km,1)=max([ Dramp(km,1)/Cramp +
(wramp(km,1)-wramp_med)/(Cramp*Tm) , RM(km-
1) , (Tm*q_ramp(km,1) +
V_rel(3,km))/(Tm*Cramp) ]); %wramp_med ???

    RM(km,1)=min([1,max([0,RM_rel(km,1)])]);%Sat
uramos el ramp_metering

    if RM(km)~=RM(km-1,1)
        V_RM(km,1)=max(Tm*(q_ramp(km,1) -
Cramp*RM(km,1)) , -wramp(km,1));
    else
        V_RM(km,1)=0;
    end

    V_rel(4,km)=max(0 , V_rel(3,km) +
V_RM(km,1));
    V_hold(4,km)=0;

    if(V_rel(4,km)<0.001)
        V_rel(4,km)=0;
    end

elseif V_hold(3,km)==0 && V_rel(3,km)==0

    RM(km,1)=min([1,max([0,RM(km-
1,1),Dramp(km,1)/Cramp + (wramp(km,1) -
wramp_med)/(Cramp*Tm)])]); %Saturamos el
ramp_metering
    V_hold(4,km)=0;
    V_rel(4,km)=0;

end

if V_hold(4,km)>0
    VSL_hold_1(km,1)=min(VSL_1(km-1,1) ,
(L*lambda*v(2,km)*rho(2,km))/((1+alpha)*(L*1
ambda*rho(2,km) + V_hold(4,km))));

VSL_1(km,1)=min([120,max([20,VSL_hold_1(km,1
)])]);%Saturamos el VSL

    if VSL_1(km,1)~=VSL_1(km-1,1)
        V_VSL_1(km,1)=lambda*L*((v(2,km)*rho(2,km))/
((1+alpha)*VSL_1(km,1) - rho(2,km)));
    else
        V_VSL_1(km,1)=0;
    end

    V_hold(2,km)=max(0 , V_hold(4,km) -
V_VSL_1(km,1));

```

```

V_rel(2, km)=0;

if(V_hold(2, km)<0.001)
    V_hold(2, km)=0;
end

elseif V_rel(4, km)>0
    if rho(2, km) <= V_rel(4, km)/(L*lambda)
        Y_1(km, 1)=v_free;
    else
        Y_1(km, 1)=(L*lambda*v(2, km)*rho(2, km))/((1+alpha)*
        (L*lambda*rho(2, km) - V_rel(4, km)));
        end

        VSL_rel_1(km, 1)=max(VSL_1(km-1, 1) ,
        Y_1(km, 1));

        VSL_1(km, 1)=min([120, max([20, VSL_rel_1(km, 1)
        ])]); %Saturamos el VSL

        if VSL_1(km, 1)~=VSL_1(km-1, 1)

        V_VSL_1(km, 1)=lambda*L*(v(2, km)*rho(2, km))/
        ((1+alpha)*VSL_1(km, 1) - rho(2, km));
        else
            V_VSL_1(km, 1)=0;
        end

        V_rel(2, km)=max(0 , V_rel(4, km) +
        V_VSL_1(km, 1));
        V_hold(2, km)=0;

        if(V_rel(2, km)<0.001)
            V_rel(2, km)=0;
        end

elseif V_hold(4, km)==0 && V_rel(4, km)==0
    VSL_1(km, 1)=min([120, max([20, VSL_1(km-
    1, 1)]]]); %Saturamos el VSL
    V_hold(2, km)=0;
    V_rel(2, km)=0;

end

%j=VSL_2

if V_hold(2, km)>0
    VSL_hold_2(km, 1)=min(VSL_2(km-1, 1) ,
    (L*lambda*v(3, km)*rho(3, km))/((1+alpha)*(L*lambda*rho(3, km) +
    V_hold(2, km))));

    VSL_2(km, 1)=min([120, max([20, VSL_hold_2(km, 1)
    ])]); %Saturamos el VSL

    if VSL_1(km, 1)~=VSL_1(km-1, 1)

    V_VSL_1(km, 1)=lambda*L*(v(2, km)*rho(2, km))/
    ((1+alpha)*VSL_1(km, 1) - rho(2, km));
    else
        V_VSL_1(km, 1)=0;
    end

    if VSL_2(km, 1)~=VSL_2(km-1, 1)

    V_VSL_2(km, 1)=lambda*L*(v(3, km)*rho(3, km))/
    ((1+alpha)*VSL_2(km, 1) - rho(3, km));

    else
        V_VSL_2(km, 1)=0;
    end

elseif V_rel(2, km)>0
    if rho(3, km) <= V_rel(2, km)/(L*lambda)
        Y_2(km, 1)=v_free;
    else
        Y_2(km, 1)=(L*lambda*v(3, km)*rho(3, km))/((1+alpha)*
        (L*lambda*rho(3, km) - V_rel(2, km)));
        end

        VSL_rel_2(km, 1)=max(VSL_2(km-1, 1) ,
        Y_2(km, 1));

        VSL_2(km, 1)=min([120, max([20, VSL_rel_2(km, 1)
        ])]); %Saturamos el VSL

        if VSL_2(km, 1)~=VSL_2(km-1, 1)

        V_VSL_2(km, 1)=lambda*L*(v(3, km)*rho(3, km))/
        ((1+alpha)*VSL_2(km, 1) - rho(3, km));
        else
            V_VSL_2(km, 1)=0;
        end

elseif V_hold(2, km)==0 && V_rel(2, km)==0
    VSL_2(km, 1)=min([120, max([20, VSL_2(km-
    1, 1)]]]); %Saturamos el VSL
    % V_hold(3, km)=0;
    % V_rel(3, km)=0;

end

%%% _____ MODELO _____
%%%
%SEGMENTO_1

%V_LIM(km, 1)=min([V_LIM_AP(km, 1), v(1, km)]);
V_LIM(km, 1)=v(1, km); %Así porque no tenemos
velocidad limite aplicada

%Aquí iría el calculo de V_DES_VSL_CRIT,
pero se ha sacado del bucle al ser un valor
constante

%V_DES_CRIT=min([V_DES_VSL_CRIT, (1+a)*V_LIM_
AP(km, 1)]);
V_DES_CRIT=V_DES_VSL_CRIT;

if V_LIM(km, 1)<V_DES_CRIT

qmax_o(km, 1)=lambda*V_LIM(km, 1)*rho_crit*(
-a*log((V_LIM(km, 1))/(v_free)))^(1/a);
else
    qmax_o(km, 1)=lambda*V_DES_CRIT*rho_crit;
end

qo(km, 1)=min([Do(km, 1) + wo(km, 1)/Tm ,
qmax_o(km, 1)]);

wo(km+1, 1)=wo(km, 1) + Tm*(Do(km, 1) -
qo(km, 1));

rho(1, km+1)=rho(1, km) +
(Tm/(lambda*L))*(qo(km, 1) - q(1, km));

V_DES_VSL(1, km)=v_free*exp((-
1/a)*(rho(1, km)/rho_crit^a));
%V_DES(km, 1)=min([V_DES_VSL(km, 1), (1+alpha)*
V_LIM_AP(km, 1)]);
V_DES(1, km)=V_DES_VSL(1, km);
vo(km, 1)=v(1, km);

v(1, km+1)=v(1, km) + (Tm/tau)*(V_DES(1, km) -
v(1, km)) + (Tm/L)*v(1, km)*(vo(km, 1)-v(1, km))
- ((mu*Tm)/(tau*L))*(rho(2, km) -
rho(1, km))/(rho(1, km)+K);

q(1, km+1)=lambda*rho(1, km+1)*v(1, km+1);

%SEGMENTO_2

```

## Control dinámico de sistemas de tráfico en autovías: comparación de controladores.

```

rho(2, km+1)=rho(2, km) +
(Tm/(lambda*L)) * (q(1, km) - q(2, km));

V_DES_VSL(2, km)=v_free*exp((-
1/a) * ((rho(2, km)/rho_crit)^a));
%V_DES(km,1)=min([V_DES_VSL(km,1), (1+a)*V_LI
M_AP(km,1)]);
V_DES(2, km)=min([V_DES_VSL(2, km), (1+alpha)*V
SL_1(km,1)]);

v(2, km+1)=v(2, km) + (Tm/tau) * (V_DES(2, km) -
v(2, km)) + (Tm/L) * v(2, km) * (v(1, km) - v(2, km))
- ((mu*Tm)/(tau*L)) * ((rho(3, km) -
rho(2, km))/(rho(2, km)+K));

q(2, km+1)=lambda*rho(2, km+1) * v(2, km+1);

%SEGMENTO_3

rho(3, km+1)=rho(3, km) +
(Tm/(lambda*L)) * (q(2, km) - q(3, km));

V_DES_VSL(3, km)=v_free*exp((-
1/a) * ((rho(3, km)/rho_crit)^a));
V_DES(3, km)=min([V_DES_VSL(3, km), (1+alpha)*V
SL_2(km,1)]);
%V_DES(3, km)=V_DES_VSL(3, km);

v(3, km+1)=v(3, km) + (Tm/tau) * (V_DES(3, km) -
v(3, km)) + (Tm/L) * v(3, km) * (v(2, km) - v(3, km))
- ((mu*Tm)/(tau*L)) * ((rho(4, km) -
rho(3, km))/(rho(3, km)+K));

q(3, km+1)=lambda*rho(3, km+1) * v(3, km+1);

%SEGMENTO_4

rho(4, km+1)=rho(4, km) +
(Tm/(lambda*L)) * (q(3, km) - q(4, km));

V_DES_VSL(4, km)=v_free*exp((-
1/a) * ((rho(4, km)/rho_crit)^a));
V_DES(4, km)=V_DES_VSL(4, km);
%V_DES(4, km)=V_DES_VSL(4, km);

v(4, km+1)=v(4, km) + (Tm/tau) * (V_DES(4, km) -
v(4, km)) + (Tm/L) * v(4, km) * (v(3, km) - v(4, km))
- ((mu*Tm)/(tau*L)) * ((rho(5, km) -
rho(4, km))/(rho(4, km)+K));

q(4, km+1)=lambda*rho(4, km+1) * v(4, km+1);

%SEGMENTO_5

qramp(km, 1)=min([RM(km, 1)*Cramp ,
Dramp(km, 1) + (wramp(km, 1)/Tm) ,
Cramp * ((rho_max - rho(5, km))/(rho_max -
rho_crit))]);
wramp(km+1, 1)=wramp(km, 1) + Tm * (Dramp(km, 1) -
qramp(km, 1));

rho(5, km+1)=rho(5, km) +
(Tm/(lambda*L)) * (q(4, km) - q(5, km) +
qramp(km, 1));

V_DES_VSL(5, km)=v_free*exp((-
1/a) * ((rho(5, km)/rho_crit)^a));
%V_DES(km,1)=min([V_DES_VSL(km,1), (1+a)*V_LI
M_AP(km,1)]);
V_DES(5, km)=V_DES_VSL(5, km);

v(5, km+1)=v(5, km) + (Tm/tau) * (V_DES(5, km) -
v(5, km)) + (Tm/L) * v(5, km) * (v(4, km) - v(5, km))
- ((mu*Tm)/(tau*L)) * ((rho(6, km) -
rho(5, km))/(rho(5, km)+K)) -
((delta*Tm*qramp(km, 1)*v(5, km))/(L*lambda*(r
ho(5, km)+K)));

q(5, km+1)=lambda*rho(5, km+1) * v(5, km+1);

%SEGMENTO_6

rho(6, km+1)=rho(6, km) +
(Tm/(lambda*L)) * (q(5, km) - q(6, km));

V_DES_VSL(6, km)=v_free*exp((-
1/a) * ((rho(6, km)/rho_crit)^a));
%V_DES(km,1)=min([V_DES_VSL(km,1), (1+a)*V_LI
M_AP(km,1)]);
V_DES(6, km)=V_DES_VSL(6, km);

rho(7, km)=min([rho(6, km) , rho_crit]);
rho(7, km)=rho_crit;

v(6, km+1)=v(6, km) + (Tm/tau) * (V_DES(6, km) -
v(6, km)) + (Tm/L) * v(6, km) * (v(5, km) - v(6, km))
- ((mu*Tm)/(tau*L)) * ((rho(7, km) -
rho(6, km))/(rho(6, km)+K));

q(6, km+1)=lambda*rho(6, km+1) * v(6, km+1);

end

TTS_LBTFC=0;
J=0;
for i=1:T/Tm
s=0;
for j=1:Nm
s=s+rho(j, i) * L * lambda;
end
sum=s + wramp(i, 1) + wo(i, 1);
TTS_LBTFC=TTS_LBTFC+Tm*sum;
if i>1
J=J + Tm*sum + 0.0035*(VSL_1(i, 1) -
VSL_1(i-1))^2 + 0.0035*(VSL_2(i, 1) - VSL_2(i-
1))^2 + 40*(RM(i, 1) - RM(i-1))^2;
else
J=J+Tm*sum;
end
end

if(1==1)
%Representación gráfica
%t=1/6:1/6:T/(6*Tm);
t=0:2.5/900:2.5;
t=t(1:900);
figure(1)
plot(t, rho(1, 1:(T/Tm)), t, rho(2, 1:(T/Tm)), t,
rho(3, 1:(T/Tm)), t, rho(4, 1:(T/Tm)), t, rho(5,
1:(T/Tm)), t, rho(6, 1:(T/Tm)))
title('DENSIDAD')
legend({'SEG1', 'SEG2', 'SEG3', 'SEG4', 'SEG5', '
SEG6'},)
figure(2)
plot(t, v(1, 1:(T/Tm)), t, v(2, 1:(T/Tm)), t, v(3,
1:(T/Tm)), t, v(4, 1:(T/Tm)), t, v(5, 1:(T/Tm))
', t, v(6, 1:(T/Tm)))
title('VELOCIDAD')
legend({'SEG1', 'SEG2', 'SEG3', 'SEG4', 'SEG5', '
SEG6'},)
figure(3)
plot(t, q(1, 1:(T/Tm)), t, q(2, 1:(T/Tm)), t, q(3,
1:(T/Tm)), t, q(4, 1:(T/Tm)), t, q(5, 1:(T/Tm))
', t, q(6, 1:(T/Tm)))
title('FLUJO')
legend({'SEG1', 'SEG2', 'SEG3', 'SEG4', 'SEG5', '
SEG6'},)
figure(4)

```

```
plot(t,wo(1:(T/Tm),1)',t,wramp(1:(T/Tm),1)')
title('Colas en los origenes')
legend({'Principal','Rampa'})
figure(5)
plot(t,VSL_1(1:(T/Tm),1)')
% hold on
% plot(t,V_hold(4,1:(T/Tm))','r')
% plot(t,V_hold(2,1:(T/Tm))','g')
% plot(t,V_rel(4,1:(T/Tm))','c')
% plot(t,V_rel(2,1:(T/Tm))','m')
title('VSL_1')
figure(6)
plot(t,VSL_2(1:(T/Tm),1)')
% hold on

% plot(t,V_hold(2,1:(T/Tm))','r')
%
% plot(t,V_rel(2,1:(T/Tm))','c')
title('VSL_2')
figure(7)
plot(t,RM(1:(T/Tm),1)')
% hold on
% plot(t,V_hold(3,1:(T/Tm))','r')
% plot(t,V_hold(4,1:(T/Tm))','g')
% plot(t,V_rel(3,1:(T/Tm))','c')
% plot(t,V_rel(4,1:(T/Tm))','m')
title('RAMP-METERING')
end
```