



Escola d'Enginyeria de Telecomunicació i  
Aeroespacial de Castelldefels

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

# TRABAJO FINAL DE GRADO

**TÍTULO DEL TFG: Modelado de tráfico urbano de vehículos conectados**

**TITULACIÓN: Grado en Ingeniería de Sistemas de Telecomunicación**

**AUTOR: Kevin Díez Sierra**

**DIRECTOR: Lluís Jofre Roca**

**FECHA: 29 de enero del 2018**

**Títol:** Modelatge de tràfic urbà de vehicles connectats

**Autor:** Kevin Díez Sierra

**Director:** Lluís Jofre Roca

**Data:** 29 de gener del 2018

## Resum

Quan parlem de vehicle connectat parlem de l'evolució del vehicle actual, afegint una connexió a internet entre tots els vehicles que formen una xarxa de trànsit. La finalitat d'això és aconseguir complir els tres objectius més importants de la xarxa de trànsit del futur. 0 retard, 0 contaminació i 0 accident.

En aquest projecte tractaré d'analitzar com es podria millorar el retard del tràfic a arribar a una destinació. S'estudiarà la comparació d'un model de densitat actual amb un altre de vehicles connectats en una petita zona de barri de ciutat. Per a això es calcularà quant podem reduir la distància de seguretat amb la tecnologia actual dels vehicles connectats, i després simularem amb aquests paràmetres en un programari de simulació vial.

**Título:** Modelado de tráfico urbano de vehículos conectados

**Autor:** Kevin Díez Sierra

**Director:** Lluís Jofre Roca

**Fecha:** 29 de enero del 2018

## Resumen

Cuando hablamos de vehículo conectado hablamos de la evolución del vehículo actual, añadiendo una conexión a internet entre todos los vehículos que forman una red de tránsito. La finalidad de esto es conseguir cumplir los tres objetivos más importantes de la red de tránsito del futuro. 0 retraso, 0 contaminación y 0 accidente.

En este proyecto trataré de analizar cómo se podría mejorar el retraso del tráfico en llegar a un destino. Se estudiará la comparación de un modelo de densidad actual con otro de vehículos conectados en una pequeña zona de barrio de ciudad. Para ello se calculará cuanto podremos reducir la distancia de seguridad con la tecnología actual de los vehículos conectados, y luego simularemos con estos parámetros en un software de simulación vial.

**Title:** Urban traffic modeling of connected vehicles

**Author:** Kevin Díez Sierra

**Director:** Lluís Jofre Roca

**Date:** January 29 rd 2018

### **Overview**

When we talk about connected vehicle we talk about the evolution of the current vehicle, adding an internet connection between all the vehicles that form a transit network. The purpose of this is to achieve the three most important objectives of the transit network of the future. 0 delay, 0 contamination and 0 accident.

In this project I will try to analyze how the traffic delay in reaching a destination could be improved. The comparison of a current density model with another vehicle connected in a small area of the city neighborhood will be studied. To do this, we will calculate how much we can reduce the safety distance with the current technology of the connected vehicles, and then simulate with these parameters in a road simulation software.

## Índice

1. Introducción .....	6
1.1. Historia del vehículo .....	6
1.2. Datos de la Congestión Mundial .....	7
1.2.1. Las 10 ciudades con más congestión.....	8
1.2.2. Congestión en las ciudades americanas.....	9
1.2.3. Congestión en las ciudades europeas.....	9
1.3. Densidad de tráfico temporal .....	11
1.3.1. Nueva York.....	11
1.3.2. Londres.....	13
1.3.3. Barcelona .....	14
1.4. Conclusión .....	16
2. Vehículo Autónomo .....	17
2.1. Origen del vehículo autónomo.....	17
2.2. Técnicas de percepción .....	18
2.2.1. GPS/IMU .....	19
2.2.2. LiDAR .....	20
2.2.3. Cámaras Ópticas.....	22
2.2.4. Radar y sonar .....	22
3. Distancia de seguridad .....	23
3.1. Estudio del entorno .....	23
3.2. Distancia de seguridad.....	25
3.3. Distancia de frenado .....	27
3.4. Tiempo de reacción.....	31
3.5. Resultados .....	32
4. Simulación Modelo Densidad .....	36
4.1. Software Aimsun .....	36
4.2. Zona de estudio de simulación.....	37
4.3. Diseño de secciones .....	38
4.4. Diseño Vehículos .....	41
4.5. Modelado del control de flujo de tráfico.....	44
4.6. Datos del entorno a simular .....	45
4.7. Simulación.....	46
4.7.1. Cola media .....	47
4.7.2. Número de cambios de carril.....	48

4.7.3. Número total de paradas .....	50
4.7.4. Tiempo de demora.....	54
4.7.5. Tiempo de viaje .....	56
4.7.6. Flujo a través del cambio de distancia de seguridad y velocidad .	58
4.7.7. Flujo a través del cambio de distancia de seguridad .....	61
5. Conclusión.....	67
Siglas. ....	68
Referencias .....	69

# 1. Introducción

En este primer apartado se pretende hacer una primera aproximación por el recorrido histórico del vehículo como transporte urbano. Además, se analizará históricamente cómo ha evolucionado la densidad de tráfico en ciudades importantes y como está actualmente la densidad a nivel de tráfico mundial.

## 1.1. Historia del vehículo.

La sociedad ha ido evolucionando a lo largo de las décadas, y con ello lo ha hecho las tecnologías y en partículas las del automóvil. Desde que se patentó en 1886 el primer coche por Karl Benz, la sociedad sufrió un gran cambio en las vidas diarias de cada persona. El coche nos permitió conectar a la gente físicamente en un corto periodo de tiempo, y eso supuso un gran avance para la comunicación global. Además, con el paso de los años las ciudades han ido evolucionando con las necesidades y las exigencias de la sociedad. Esto ha conllevado a que núcleos de ciudades separados se han unido en una misma ciudad con el paso del tiempo. Creando esa necesidad de buscar facilitar el movimiento entre el hogar y el trabajo. Finalmente, nació el movimiento moderno, que impulsaba crear una estructura de ciudad que facilite el movimiento, tanto interurbano, como conectando ciudades.

Fue a partir de la segunda guerra mundial cuando empezó la carrera por llevar el automóvil a la vida cotidiana de los núcleos urbanos.

Por un lado, surgió una Estados Unidos victoriosa de la guerra. Alrededor de 10 millones de soldados involucrados volvieron a casa en un país con una fuerte demanda de trabajo, estos factores hicieron que la natalidad se disparase, llevando a cabo un fuerte aumento de la producción en la mayoría de los sectores, y en el sector del automóvil significó un aumento en el número de producción de vehículos para consumo individual entre 1950 y 1973. Este aumento llevó a dejar en segundo plano al que hasta ahora el principal modo de transporte, el transporte público, dejándolo para la gente con menos poder adquisitivo.

El otro continente implicado en la segunda guerra mundial fue el Europa. En este caso Europa quedó devastada por la guerra. Esto llevó a la necesidad de un tiempo de recuperación, en el caso del sector de la producción de coches, también tardó en volver a reactivarse, pero en 1970 la producción había aumentado de 1 millón a 10 millones.

Pero cuando nos referimos a coches, tenemos un factor que está directamente relacionado, el petróleo. El petróleo juega un papel muy importante en la evolución del vehículo a lo largo de la historia, y en 1973 vino la primera gran crisis en la producción y en el uso del coche debido a lo que se conoció como la gran crisis del petróleo del 1973, causada por la decisión de la OPEP (Organización de Países Árabes Exportadores de Petróleo) de no exportar más petróleo a los países que habían apoyado a Israel durante la guerra de Yom Kipur, que enfrentaba a Israel con Siria y Egipto. Esta medida incluía a Estados Unidos y a sus aliados de Europa Occidental.

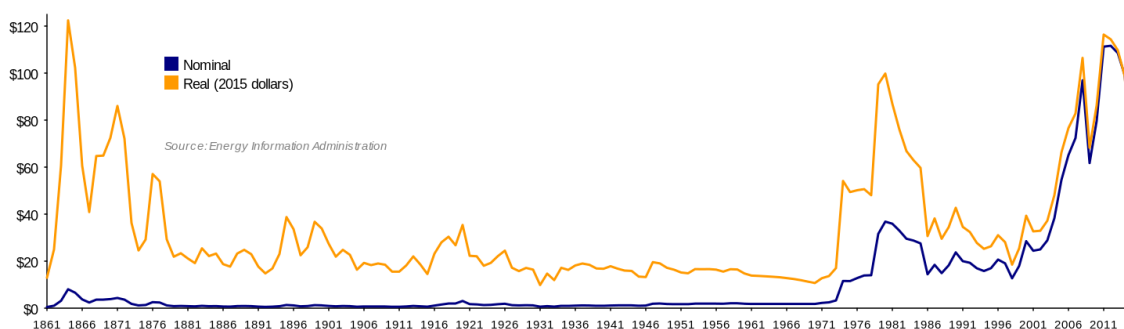


Figura 1. Gráfico de la evolución de los precios del petróleo [2].

La que mejor se adaptó a la crisis fue Japón, que, a pesar de ser también un objetivo del embargo, Japón superó especialmente bien las secuelas de la crisis del petróleo. Los fabricantes de automóviles japoneses lideraron la revolución en este sector. Los grandes automóviles de los años 50 y 60 se sustituyeron por vehículos mucho más compactos y eficientes desde un punto de vista energético. Por otra parte, en Japón había ciudades con una densidad muy alta de población y se necesitaba crear una línea de transportes públicos muy desarrollados [1].

## 1.2. Datos de la Congestión Mundial

La congestión del tráfico es una realidad para todos los conductores. TomTom utilizando los datos de su base de datos revela los últimos resultados en su ranking en “TomTom Traffic Index” [3], donde se puede estudiar los datos de la congestión de tráfico en la mayoría de las ciudades del mundo. La congestión hace referencia al tiempo total de viaje que se incrementa con referencia a un flujo libre de tráfico, en viajes de duración de 30 minutos. Por ejemplo, una



congestión del 50% significaría una suma de 15 minutos más del tiempo del viaje total por problemas de tráfico.

### 1.2.1. Las 10 ciudades con más congestión.

El primer estudio que se puede estudiar en este ranking sería el de las 10 ciudades en las que más congestión se genera a nivel mundial, con la finalidad de buscar una conclusión que nos pueda hacer ver que tipo de ciudades en el mundo son las que tienen más problemas con la circulación urbana.

Ciudad	País	Nivel de Congestión	Máximo mañanas	Máximo tardes	Densidad
México City	México	66%	96%	101%	5966 hab/km <sup>2</sup>
Bangkok	Tailandia	61%	91%	118%	5300 hab/km <sup>2</sup>
Yakarta	Indonesia	58%	63%	95%	14513,27 hab/km <sup>2</sup>
Chongqing	China	52%	90%	94%	366,07 hab/km <sup>2</sup>
Bucarest	Rumania	50%	90%	98%	8260,64 hab/km <sup>2</sup>
Estambul	Turquía	49%	63%	91%	7166,1 hab./km <sup>2</sup>
Chengdu	China	47%	74%	79%	819,42 hab/km <sup>2</sup>
Rio de Janeiro	Brasil	47%	63%	81%	5377 hab/km <sup>2</sup>
Tainan	Taiwán	46%	51%	71%	860 hab/km <sup>2</sup>
Pekín	China	46%	72%	84%	1044 hab/km <sup>2</sup>

Tabla 1. Índice TOMTOM de las 10 ciudades mundiales con más congestión en el año 2017.

Como se puede observar, el perfil de ciudad que tienen más congestión en el mundo son ciudades que no son primermundistas, y donde hay una gran densidad de habitantes por kilómetro cuadrado. El principal problema de estas ciudades es que hay una gran cantidad de coches para un espacio de circulación más pequeño o con menos rutas posibles para que un individuo llegue a su destino. Todo lo contrario que ciudades, donde se han utilizado más recursos para hacer tramos viales con más capacidad de circulación, o la utilización de autovías o autopistas que recorran la periferia de la ciudad, como pueden ser las grandes ciudades europeas o americanas.

### 1.2.2. Congestión en las ciudades americanas.

El siguiente análisis será de las 10 ciudades americanas con mayores densidades de circulación. Las ciudades americanas están caracterizadas por tener muchos núcleos residenciales en las zonas de las afueras de la ciudad, dejando el centro de la ciudad para barrios comerciales en gran parte. Todo ello ayuda a evitar congestión en gran medida.

Ciudad	País	Nivel de Congestión	Máximo mañanas	Máximo tardes	Posición Mundial
Los Ángeles	Estados Unidos	45%	62%	84%	12
San Francisco	Estados Unidos	39%	55%	73%	30
Vancouver	Canadá	39%	54%	72%	34
New York	Estados Unidos	35%	50%	62%	49
Seattle	Estados Unidos	34%	54%	77%	53
San José	Estados Unidos	32%	52%	74%	65
Toronto	Canadá	30%	50%	62%	73
Miami	Estados Unidos	30%	50%	63%	75
Portland	Estados Unidos	29%	41%	66%	82
Montreal	Canadá	29%	48%	59%	86

Tabla 2. Índice TOMTOM de las 10 ciudades americanas con más congestión en el año 2017.

El problema de la congestión se reduce en gran medida en América comparado con las ciudades más congestionadas, salvo Los Ángeles que está cerca de los números de las ciudades posicionadas entre las 10 primeras. Pero esto no significa que no exista un problema de congestión, al contrario, sigue siendo una media de un tercio del recorrido del viaje afectado por congestión.

El problema en las ciudades americanas viene dado por el crecimiento del empleo en las zonas urbanas, lo que hace que las personas se tengan que desplazar al centro de las ciudades, provocando el aumento de la congestión.

### 1.2.3. Congestión en las ciudades europeas.

En Europa, el crecimiento del coche no se pudo seguir con el entramado de pequeñas calles existentes en los viejos cascos urbanos, por eso se tuvo que hacer un remodelado en grandes partes de las ciudades cinturones de ronda, demoliciones de antiguos barrios para abrir vías rápidas al tráfico rodado, etc.

Ciudad	País	Nivel de Congestión	Máximo mañanas	Máximo tardes	Posición Mundial
Bucarest	Rumania	50%	90%	98%	5
Moscu	Rusia	44%	71%	94%	13
San Peterburgo	Rusia	41%	65%	90%	21
Londres	Reino Unido	40%	64%	68%	25
Marsella	Francia	40%	62%	75%	26
Roma	Italia	40%	74%	68%	27
Paris	Francia	38%	68%	66%	35
Bruselas	Bélgica	38%	71%	77%	37
Manchester	Reino Unido	38%	68%	79%	39
Atenas	Grecia	37%	58%	56%	41

Tabla 3. Índice TOMTOM de las 10 ciudades europeas con más congestión en el año 2017.

Como se observa, las ciudades europeas tienen, ligeramente, más nivel de congestión que las ciudades americanas.

En España, solo tenemos tres ciudades en la lista de TomTom.

Ciudad	País	Nivel de Congestión	Máximo mañanas	Máximo tardes	Posición Mundial
Barcelona	España	31%	51%	52%	68
Madrid	España	25%	48%	43%	112
Valencia	España	23%	31%	32%	126

Tabla 4. Índice TOMTOM de las 3 ciudades españolas con más congestión en el año 2017.

Los resultados nos indican que España tiene niveles de congestión muchos más bajos que el resto de las ciudades europeas. Esto es en parte debido a los planes de movilidad desplegados por las ciudades españolas, intentando conseguir mejorar la congestión de las ciudades. Creando grandes mejoras en las infraestructuras del transporte público como el tranvía y el metro o reservando rutas para uso únicamente de transporte público, reduciendo el efecto llamada delimitando la capacidad de tramos viales o creación de planes alternativos de circulación por la ciudad como el Bicing.

### 1.3. Densidad de tráfico temporal

En el siguiente punto se estudiará cómo ha mejorado o empeorado la densidad de tráfico las últimas cuatro décadas. Los datos se han extraído de las webs oficiales de los ayuntamientos de Nueva York [4], Londres [5] y Barcelona [6], y miden la media de coches que pasan anualmente en las diferentes entradas y calles.

#### 1.3.1. Nueva York.

En este caso el ayuntamiento de Nueva York garantiza información de las principales entradas de todas las ciudades y pueblos del condado de Nueva York. En este caso, se han elegido 3 entradas de Nueva York, donde hay una mayor densidad y a su vez se proporcionan la mayor cantidad de datos por año.

Estas entradas son:

- Puente George Washington (New York- New Jersey).

El Puente de George Washington es uno de los puentes más transitados del mundo. Cuenta con 14 carriles.

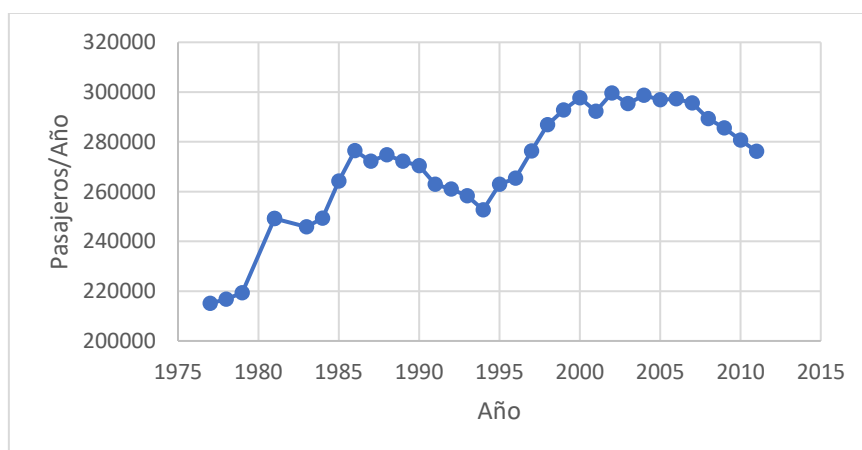


Figura 2. Densidad temporal en el puente de George Washington.

- Interestatal 95.

La Interestatal 95 (entrada norte) es una de las entradas a Nueva York es una de las entradas más concurridas durante el día. Cuenta con 3 carriles por sentido.

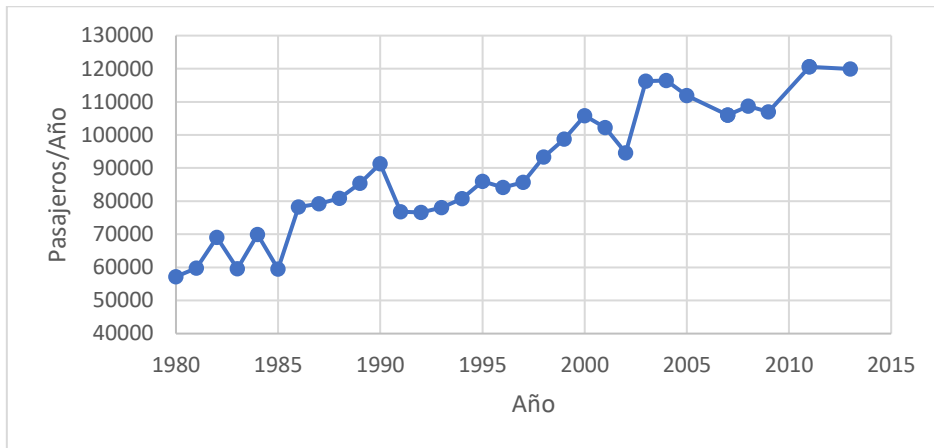


Figura 3. Densidad temporal en la entrada Nueva York Norte (I-95).

- Puente de Macombs (Manhattan-Bronx)

El puente de Macombs también es uno de los puentes de Nueva York que más circulación tiene durante el día, cuenta con 3 carriles por sentido.

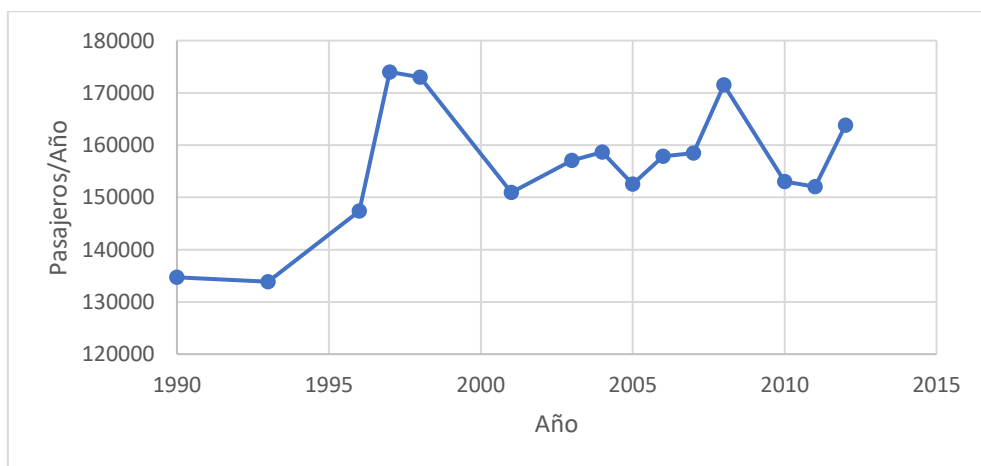


Figura 4. Densidad temporal en el Puente de Macombs.

### 1.3.2. Londres.

El ayuntamiento de Londres proporciona datos de la densidad de vehículos en todas las entradas a la ciudad solo desde 2000. Podemos analizar los cambios que ha habido en los últimos 16 años, ya que nos dan datos precisos de cada año.

- Autopista M1.

La autopista M1 es la autopista más antigua del Reino Unido, en su entrada con Londres cuenta con 3 carriles por sentido.

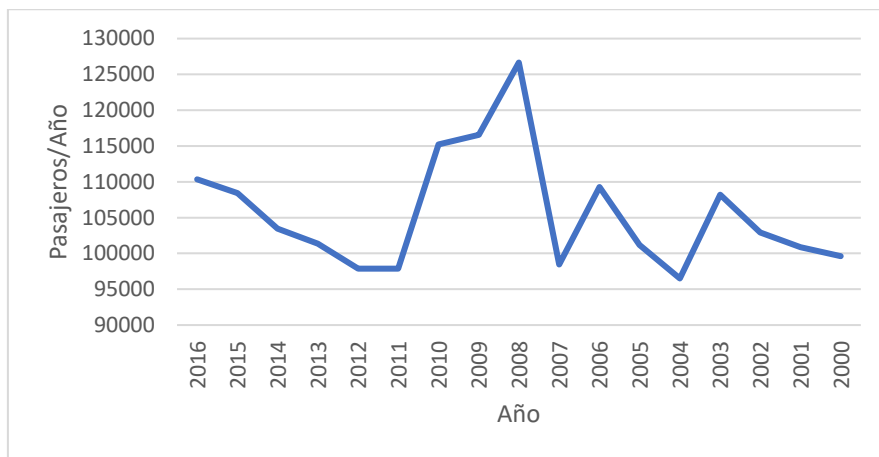


Figura 5. Densidad temporal M1.

- Autopista M4.

Es una autopista que entra por el oeste de Londres, y tiene 3 carriles por sentido.

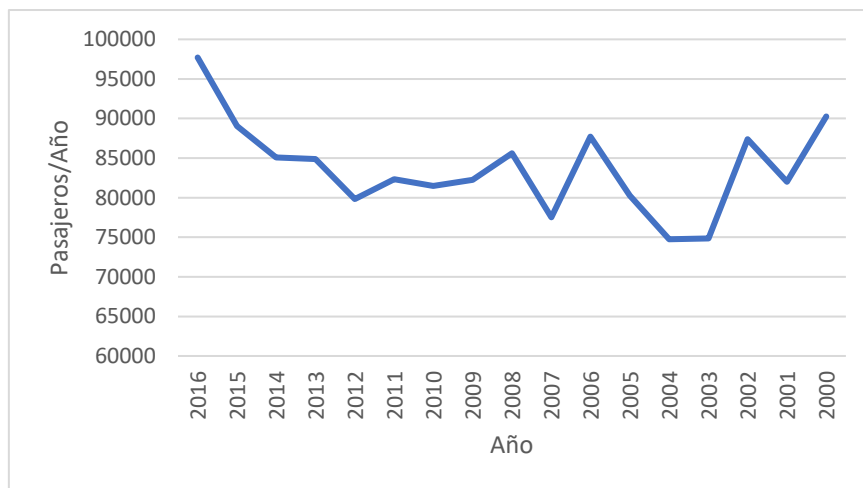


Figura 6. Densidad temporal M4.

- Autopista M25.

La autopista M25 es una autopista que circula por toda la periferia de Londres, en su gran mayoría cuenta con 3 carriles por sentido. En este caso se trata de la entrada norte con el barrio de Enfield.

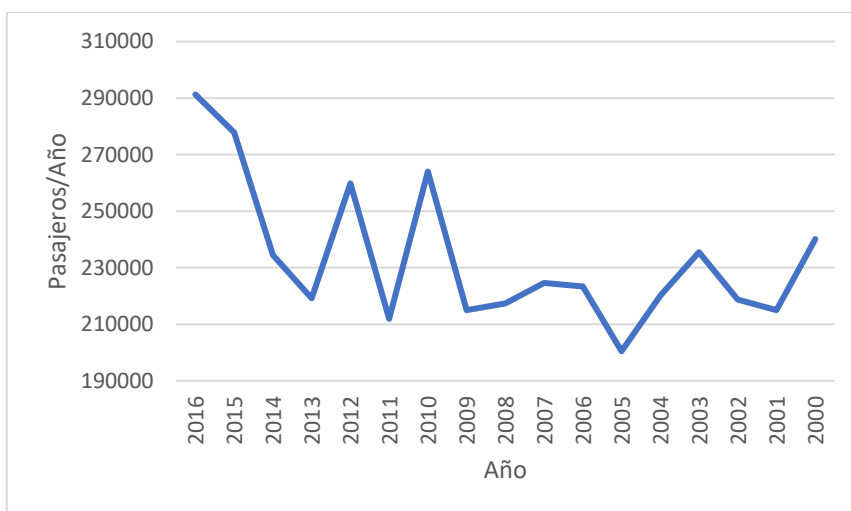


Figura 7. Densidad temporal M25.

### 1.3.3. Barcelona

Por último, se analizará la densidad de Barcelona. Para ello se utilizará los datos proporcionados por la web del ayuntamiento de Barcelona. En este caso se dispone de los tramos de densidad de entrada más importantes de la ciudad, y los datos se refieren a la media de vehículos en día laborable.

- Ronda de Dalt (Anillo de Collserola).

La primera gráfica sería el tramo del anillo de Collserola de la Ronda de Dalt, uno de los tramos que más circulación tiene en Barcelona.

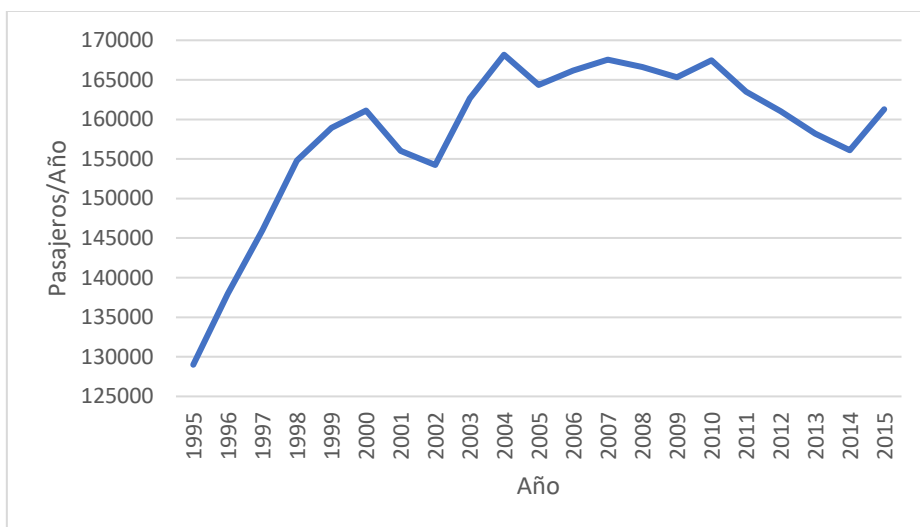


Figura 8. Densidad temporal Ronda de Dalt (Anillo de Collserola).

- Ronda de Dalt - Diagonal

El siguiente caso es el acceso más concurrida de Barcelona, la entrada a la Avenida Diagonal desde la Ronda de Dalt.

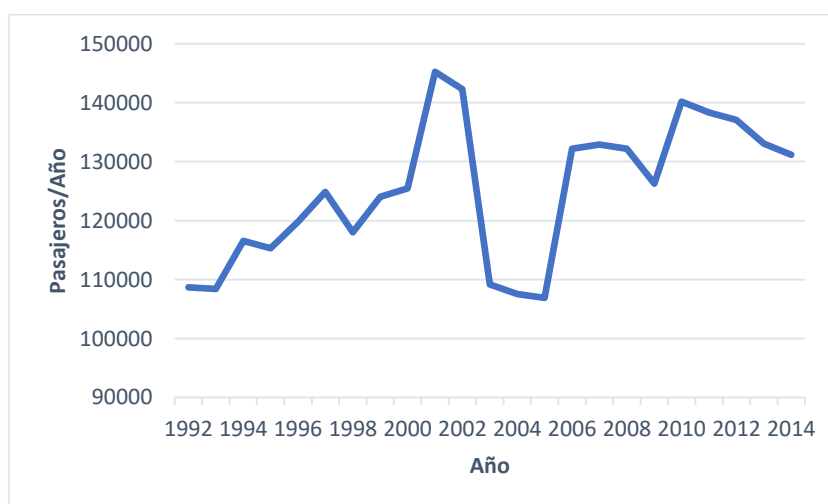


Figura 9. Densidad temporal Ronda de Dalt-Diagonal.



- Total

Aquí se representa el total de la densidad de tráfico de todos los accesos la ciudad en los tramos que hay datos.

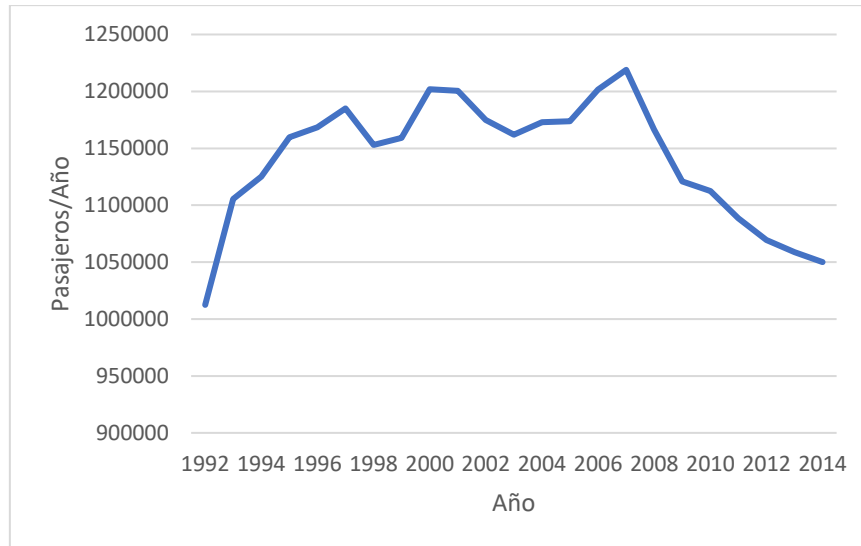


Figura 10. Densidad temporal total de los principales tramos de acceso de Barcelona.

## 1.4. Conclusión

Si se analiza tanto los gráficos expuestos, como los datos de la administración de información energética sobre el precio del barril de petróleo. Se puede observar que hay cierta similitud. Entre las razones podemos encontrar los ciclos económicos y los precios del carburante [7].

La conclusión que se obtiene es que el problema no desaparece con las distintas soluciones que se han ido proponiendo hasta el momento. Los estudios han demostrado a través de los años que la construcción de nuevas autopistas o autopistas no resuelve el problema. Llevamos 40 años dando capacidad a las vías para aumentar la cantidad de coches y la congestión no ha bajado. Cuando se aumentan los carriles, hay efecto llamada y aumentan el tráfico y la congestión y siempre que no hay crisis financieras o subidas excesivas del valor del petróleo, la densidad aumenta progresivamente. Parece llegado el momento de buscar otras aproximaciones. El cambio de paradigma que se está viendo viene reflejado por las actitudes de muchos gobiernos para transformar nuestras ciudades a nivel mundial. Están administrando la congestión con políticas inteligentes y sostenibles, como una mejor infraestructura de transporte público, la inversión en iniciativas de ciclismo y peatonales, y políticas ambiciosas que apuntan hacia el futuro de la conducción automatizada [8].

## **2. Vehículo Autónomo**

Siendo el vehículo autónomo una de las opciones que pueden contribuir a la mejora de la congestión de tráfico, en este apartado se estudiará la evolución del coche hacia el vehículo conectado, y se presentará la tecnología que usa el vehículo autónomo de cara al objetivo principal de este trabajo, mejorar la fluidez de los vehículos en la ciudad. Para ello analizaremos las tecnologías que se usan, o podrían usarse, para la identificación y la localización del entorno y de obstáculos en la carretera.

### **2.1. Origen del vehículo autónomo.**

Un vehículo autónomo puede ser un automóvil que tiene la capacidad de percibir el entorno, para luego interactuar en función las circunstancias que le rodeen tal y como lo haría un humano, es decir, que sea capaz de solucionar la problemática u obstáculos que puedan surgir en el trayecto del coche, y que sea capaz de solucionarlos y llevarlos al destino con [9].

La primera idea de vehículo conectado se dio en la feria de Futurama patrocinado por General Motors para la Exposición Universal de 1939, la idea era conectar un vehículo a un circuito eléctrico en el pavimento de la carretera [1].

Pero no fue hasta 1980 cuando Ernst Dickmanns y su equipo de la universidad de Múnich, consiguieron que rodara el primer vehículo robotizado. Este vehículo funcionaba con cálculos probabilísticos y computación paralela, permitiendo resolver varios problemas simultáneos. Desde entonces se ha lanzado una carrera por lograr ir mejorando las funciones y las prestaciones de los vehículos autónomos, aprovechando la mejora de la tecnología que va surgiendo cada día. Ha día de hoy, Delphi consiguió hacer un viaje prácticamente tripulado en su totalidad por un vehículo autónomo de 5400 kilómetros entre Nueva York y San Francisco [10].

Otro gran logro lo ha conseguido Waymo, empresa de propiedad de Google, cuyos coches autónomos circulan libremente por la ciudad de Chandler (Arizona), que llegó a un acuerdo con Waymo para permitir el uso de sus calles como circuito privado para sus coches autónomos [11].

Pero, aunque se haya avanzado de forma significativa con la conducción autónoma, aún es un campo joven y para que empiecen a circular coches totalmente autónomos aún faltan varias décadas. Además, se necesita una reforma legal que permita circular a estos vehículos sin problemas. Por el momento el pasado 4 octubre 2017, se aprobó la primera ley a favor de los vehículos autónomos [12]. Con este paso, se pretende adoptar unos criterios unitarios para todo el territorio estadounidense que no frenen el desarrollo de la implementación progresiva de vehículos en todos sus niveles de automatización. Actualmente se han catalogado por niveles según la dependencia de supervisión humana [13]:

- **Nivel 0:** Los vehículos no son tripulados automáticamente, simplemente tienen alguna advertencia de conducción.
- **Nivel 1:** Los vehículos se mantienen en el carril de forma autónoma y el control de cruceo adaptativo.
- **Nivel 2:** El coche es capaz de guiarse sin necesidad de contar con líneas delimitadoras del carril en el asfalto.
- **Nivel 3:** El vehículo puede circular en lugares medianamente controlados como es el caso de las autopistas o autovías. El sistema lo activa el conductor y tiene que estar atento.
- **Nivel 4:** Si se dispone de la información necesaria del entorno, el vehículo es capaz de navegar solo, sin necesidad de ayuda humana.
- **Nivel 5:** Representa la máxima autonomía para el coche, y no depende para nada de un conductor humano. Puede circular por cualquier tipo de carretera o ciudad con total autonomía.

## 2.2. Técnicas de percepción

La conducción autónoma no es una tecnología sola, se trata de un sistema sumamente complejo que consiste en muchos subsistemas diferentes. Los podemos clasificar en tres componentes principales: algoritmos, incluyendo la detección, la percepción, y la decisión (que requiere el razonamiento para casos complejos); sistemas de cliente, incluyendo el sistema operativo y la plataforma de hardware; y la plataforma de nube, mapas de alta definición, educación de modelo, simulación y almacenaje de datos.

Uno de los elementos críticos para mejorar la fluidez del tráfico es la distancia mínima entre vehículos que se puede mantener con seguridad. En este proyecto se realizará un estudio sobre la distancia de seguridad que los vehículos autónomos son capaces llevar con el vehículo de delante utilizando las tecnologías actuales. Para ello analizaremos la componente de algoritmos, que es el que se encarga de analizar los vehículos de delante y ajustar la distancia de seguridad permitida.

La componente de algoritmos consiste en la detección, es decir, la extracción de información significativa del sensor datos sin procesar; percepción, que es localizar el vehículo y comprender el entorno actual; y decisión, en otras palabras, tomar medidas para llegar de manera rápida y segura a los destinos objetivo.

En este punto se presentará la tecnología con la que se experimenta, analizando las ventajas y los inconvenientes [9].

### **2.2.1. GPS/IMU**

El sistema GPS/IMU (Global Positioning System / Inertial Measurement Unit) sirve para ayudar al vehículo autónomo a localizarse, mediante estimaciones inerciales y mediante una actualización de posición global. El GPS es un sensor de localización bastante preciso, pero su tasa de actualización es lenta, aproximadamente 10 Hz, y por lo tanto no es capaz de proporcionar actualizaciones en tiempo real. Por otro lado, los errores de IMU se acumulan con el tiempo, lo que lleva a una degradación correspondiente en las estimaciones de posición. No obstante, una IMU puede proporcionar actualizaciones con más frecuencia, a 200 Hz o más. Esto debería satisfacer el requisito de tiempo real. La combinación de GPS e IMU, puede proporcionar actualizaciones precisas y en tiempo real para la localización del vehículo.

GPS / IMU se puede utilizar para la localización, utilizando las técnicas del filtro de Kalman para combinar las ventajas de los dos y proporcionar actualizaciones de posición precisas y en tiempo real. Al ejecutar este modelo de propagación y actualización, la combinación de GPS / IMU puede generar resultados precisos de localización. No obstante, no podemos confiar únicamente en esta combinación para la localización por tres razones [9]:

- La precisión es de solo un metro.

- La señal de GPS tiene problemas de propagación multicamino, lo que significa que la señal puede rebotar en los edificios, introduciendo más ruido.
- GPS requiere una vista sin obstrucciones del cielo y por lo tanto no funcionaría en entornos tales como túneles.

### 2.2.2. LiDAR

LiDAR (Light Detection and Ranging or Laser Imaging Detection and Ranging) se utiliza para mapeo, localización y evitación de obstáculos. Esta tecnología funciona midiendo la distancia a un objetivo, iluminando ese objetivo con una luz láser pulsada, y midiendo los pulsos reflejados con un sensor. Diferencias en el retorno del láser, los tiempos y las longitudes de onda se pueden usar para hacer representaciones tridimensionales digitales del objetivo. El principio de funcionamiento del LiDAR es el siguiente: primero, un instrumento LiDAR dispara pulsos rápidos de láser luz en una superficie, algunas hasta 150,000 pulsos / s. Entonces, un sensor mide la cantidad de tiempo que tarda cada pulso en realizar el doble del trayecto. La luz emitida se mueve a una constante y conocida velocidad para que el instrumento LiDAR pueda calcular la distancia entre sí mismo y el objetivo con alta exactitud. Repitiendo esto en rápida sucesión, el instrumento construye un complejo "mapa" de superficie que está midiendo. Debido a su alta precisión, LiDAR se puede utilizar para producir mapas HD (High Definition), para localizar un vehículo en movimiento, para detectar obstáculos delante, etc.

Esta es la razón por la que los enfoques LiDAR generalmente recurren a técnicas de filtro de partículas. Las nubes de puntos generadas por LiDAR proporcionan una "descripción de la forma" del entorno, pero es difícil para diferenciar puntos individuales. Al usar un filtro de partículas, el sistema compara un elemento específico observado en el mapa conocido para reducir la incertidumbre. Para localizar un vehículo en movimiento en relación con estos mapas, se aplicaría un método de filtro de partículas para correlacionar las mediciones LiDAR con el mapa. Se ha demostrado que el método del filtro de partículas logra la localización en tiempo real con 10 cm precisión y puede ser efectivo en entornos urbanos. Sin embargo, LiDAR tiene su propio problema: cuando hay muchas partículas suspendidas en el aire, como gotas de lluvia y polvo, las mediciones pueden ser extremadamente ruidoso. Por lo tanto, para lograr una localización confiable y precisa, se necesita un proceso de fusión de todos los sensores que conforma LiDAR para combinar las ventajas de todos ellos.

La mayoría de los prototipos de vehículos autónomos comerciales, incluidos Waymo, Baidu, BMW, Google, etc., confían en LiDAR y HD Maps para

localización. En esta sección, estudiamos cómo funcionan LiDAR y HD Maps, y cómo combinar los dos para proporcionar una localización precisa para vehículos autónomos.

En general, hay dos tipos de métodos de detección LiDAR: detección incoherente (también conocida como detección directa de energía) y detección coherente. En detalle, cuando se emite luz incoherente, se propaga en todas las direcciones. Cuando la luz es coherente utiliza diodos altamente especializados que generan energía cerca de la porción óptica del espectro electromagnético, lo que significa que todas las ondas de energía individuales se mueven en la misma dirección, lo que resulta en un consumo de energía mucho menor.

Los láseres utilizados en LiDAR se pueden categorizar por su longitud de onda. Los láseres de 600-1000 nm son más comúnmente utilizado y, por lo general, su potencia máxima se limita a cumplir con los requisitos de categoría uno. Los láseres con una longitud de onda de 1.550 nm también se usan, ya que se pueden usar para un alcance mayor, con propósitos de menor precisión.

Un sistema LiDAR típico consta de dos grupos de componentes principales, los escáneres láser y los receptores láser. La velocidad del sistema depende de la velocidad del escaneo, para ello, una variedad de métodos de escaneo está disponible para diferentes propósitos como acimut y elevación, espejos de plano oscilantes dobles, escáner de doble eje y espejos poligonales.

En la práctica, uno de los principales problemas que enfrentan los fabricantes de LiDAR y los usuarios es la calibración. El rendimiento de los dispositivos LiDAR depende en gran medida de su calibración. Con buena calibración, se obtienen datos 3D precisos de un entorno. Por el contrario, la extracción de estas características puede ser difícil, poco fiable o imposible si el sensor está mal calibrado. El proceso de calibración es un proceso de optimización que involucra muchos parámetros, y se puede dividir en los siguientes pasos [9].

- **Elección de la parametrización:** Se requieren al menos cinco parámetros para definir un láser en un marco de coordenadas 3D, incluidos dos ángulos para definir la dirección de la línea asociada y tres parámetros para definir el origen del punto del rayo.
- **Elección de la función objetivo:** Una función objetivo, forma la base del proceso de optimización y se utiliza para comparar cuantitativamente el punto 3D adquirido con los datos en la nube y el entorno real.

- **Segmentación de datos:** Este paso consiste en extraer, a partir de datos adquiridos, los datos que en realidad corresponden al objeto de calibración para el cual se conoce la verdad del terreno. El ambiente elegido para el proceso de calibración debe ser diseñado y hecho para permitir segmentación apropiada de datos.

A medida que aumenta el número de haces, también aumenta el número de parámetros de calibración. Por lo tanto, el proceso de calibración es más difícil para dispositivos con mayor número de haces. Este es uno de los principales problemas por lo que los dispositivos con mayor número de haces son mucho más caros en comparación con los dispositivos con menor número de rayos.

### **2.2.3. Cámaras Ópticas.**

Las cámaras se utilizan principalmente para reconocimiento de objetos y tareas de seguimiento de objetos como detección de carril, detección de semáforo y detección de peatones, etc. Para mejorar la seguridad autónoma del vehículo, las implementaciones existentes generalmente incluyen ocho o más cámaras de 1080p alrededor del automóvil, de modo que podamos usar cámaras para detectar, reconocer y rastrear objetos en frente, detrás y a ambos lados del vehículo. Estas cámaras usualmente funcionan a 60 Hz, y, cuando se combinan, generarían alrededor de 1,8 GB de datos brutos por segundo.

### **2.2.4. Radar y sonar**

El sistema de radar y sonar se usa principalmente para la última línea de seguridad en la evitación de obstáculos. Los datos generados por radar y sonar muestran tanto la distancia como la velocidad del objeto más cercano al camino del vehículo. Una vez que se detecta que un objeto no está muy lejos, puede haber un peligro de colisión, entonces el vehículo autónomo debe aplicar los frenos o girar para evitar el obstáculo. Por lo tanto, los datos generados por radar y sonar no requieren mucho procesamiento y generalmente se alimentan directamente al procesador de control, y por lo tanto no a través del cómputo principal, para implementar funciones "urgentes" tales como desviar, aplicar los frenos, o pretensado de los cinturones de seguridad.

### 3. Distancia de seguridad

En este capítulo trataremos de analizar el comportamiento del tráfico en distintos tipos de carreteras, tanto carreteras donde las velocidades medias están sobre los 45 Km/h como pueden ser carreteras urbanas, como en carreteras donde las medias de velocidad son alrededor de los 120 Km/h como podrías ser autopistas.

La finalidad de este punto es encontrar un modelo predictivo, donde podamos entender como funcionaria el tráfico en el ámbito de los coches conectados, que permita garantizar la seguridad de los tripulantes en caso de frenados inesperados, maximizando los recursos necesarios para proporcionar esta seguridad, ya sean distancias de seguridad mínimas o tiempos de reacción de los sensores para el frenado.

Para acabar se tratará de buscar una fórmula que nos pueda decir la distancia de seguridad mínima que podrían aplicarse para el tráfico, entre coches consecutivos, de los vehículos autónomos, para luego poder aplicarlo en un software de simulación vial.

#### 3.1. Estudio del entorno

Lo primero que debemos hacer es analizar las variables que nos encontramos a la hora de analizar la distribución de la distancia entre dos coches, y los factores a tener en cuenta a la hora de poder realizar un frenado de emergencia seguro.

La primera variable que tenemos es la distancia que hay entre los dos coches, o lo que se denomina distancia de seguridad. Predictivamente tenemos que la distancia tiene que ser más grande a medida que se aumenta la velocidad de circulación de los vehículos, y que a medida que aumentamos la velocidad, la distancia que tardamos en frenar tiene a aumentar, así que la distancia de seguridad debería aumentar por razones de seguridad.



Figura 11. Distancia de seguridad.



La siguiente variable que tenemos que tener en cuenta son las distancias de frenados de los coches, tanto del coche delantero como el trasero. Y es que un coche no puede frenar en seco, siempre hay una distancia entre que el coche empieza a frenar, hasta que esta por completo parado. En este caso nos pondremos en el peor de las situaciones. El caso en que el coche delantero ha de realizar un frenado de emergencia, donde le coche delantero recorre el mínimo espacio posible antes de frenar, lo que provoca que el coche de atrás deba de frenar también a máxima intensidad para evitar la colisión.



Figura 12. Distancia de frenado.

La última variable que tenemos que estudiar, es el tiempo de reacción que tiene el coche trasero al identificar que el coche delantero está frenando. Esta variable es muy importante, ya que uno de los beneficios del coche conectado es pretender mejorar la reacción a circunstancias de la carretera, mejorando la velocidad de reacción que tendría el propio conductor si tuviera que actuar manualmente.



Figura 13, Tiempo de reacción.

Lo que provoca este tiempo de reacción es que el vehículo trasero avance a velocidad sostenida durante el tiempo que tarda en reaccionar, por lo tanto, avanzaría más rápido que el coche delantero, que ya está empezando a frenar.

Para calcular la distancia de frenado usaremos un modelo de Matlab llamado “*Modeling an Anti-Lock Braking System*” [15], este modelo recrea el frenado de emergencia para coches con ABS y sin él, nosotros utilizaremos el sistema de ABS, ya que es el sistema que mejor encaja en, los coches conectados a nivel de tecnología.

Por lo tanto, juntando las variables que se tiene:

$$D(t, V_{steady}) = D_0 + D_{stopping} - V_{steady} \times T_{reaction} \quad [1]$$

- $D$ : Distancia final entre los dos coches (m).
- $T$ : Tiempo total desde que frena el coche delantero hasta que se paran los dos coches (s).
- $V_{steady}$ : Velocidad estable vehículo (m/s).
- $D_0$ : Distancia de seguridad (m).
- $D_{stopping}$ : Distancia de frenado(m).
- $T_{reaction}$ : Tiempo de reacción (s).

A continuación, se entrará con más profundidad en cada punto.

### 3.2. Distancia de seguridad

La distancia de seguridad es la distancia que hay entre un vehículo, y el vehículo que precede. La norma establece que un vehículo que circule detrás de otro vehículo a una velocidad estable tiene que mantener una distancia con el otro que le permita un frenado de emergencia, sin colisionar con él, teniendo en cuenta la velocidad, condición de frenado y adherencia [14].

Para determinar cuál es la distancia de seguridad hay tener en cuenta dos factores, primero la velocidad a la que se circula ya que no se recorre la misma distancia circulando a velocidades distintas, y el otro factor es la capacidad de

reacción. Las personas tardan de media 1 segundo en reaccionar a los imprevistos que puedan surgir en la carretera. Con el coche conectado se pretende usar la tecnología para mejorar el tiempo de reacción para comenzar la frenada del vehículo automáticamente. Actualmente podemos asumir tiempos de reacción de entre 100 ms a 300 ms, con el 5G se reducirá estos tiempos a 1 ms.

¿Pero cómo sabemos qué distancia de seguridad debemos mantener con el vehículo delantero? La DGT (Dirección General de Tráfico) ha propuesto que una distancia recomendable de seguridad sería mantener una distancia equivalente a dos segundos por la velocidad estable [14].

<b>Velocidad</b>	<b>Distancia seguridad</b>
30 km/h	16,6 m
45 km/h	25 m
60 km/h	33,3 m
75 km/h	41,6 m
90 km/h	50 m
105 km/h	58,3 m
120 km/h	66,6 m

*Tabla 5. Distancias de seguridad recomendadas DGT.*

Y en circunstancias meteorológicas difíciles con lluvia o nieve, de tres segundos.

<b>Velocidad</b>	<b>Distancia seguridad</b>
30 km/h	25 m
45 km/h	37,5 m
60 km/h	50 m
75 km/h	62,5 m
90 km/h	75 m
105 km/h	87,2 m
120 km/h	100 m

*Tabla 6. Distancias de seguridad recomendadas en lluvia DGT.*

### 3.3. Distancia de frenado

La distancia de frenado es el recorrido que hace un vehículo desde el momento que empieza a frenar hasta que el vehículo queda detenido por completo. La distancia de frenado depende de muchas circunstancias. Depende de la capacidad de frenado, de los neumáticos, del pavimento, de las condiciones climatológicas, etc.

Para esta simulación utilizaremos un modelo de Matlab adaptado para nuestro caso, que permite simular de manera bastante realista como la distancia de frenado de un vehículo en caso de hacer una frenada de emergencia.

El modelo que usaremos es el siguiente:

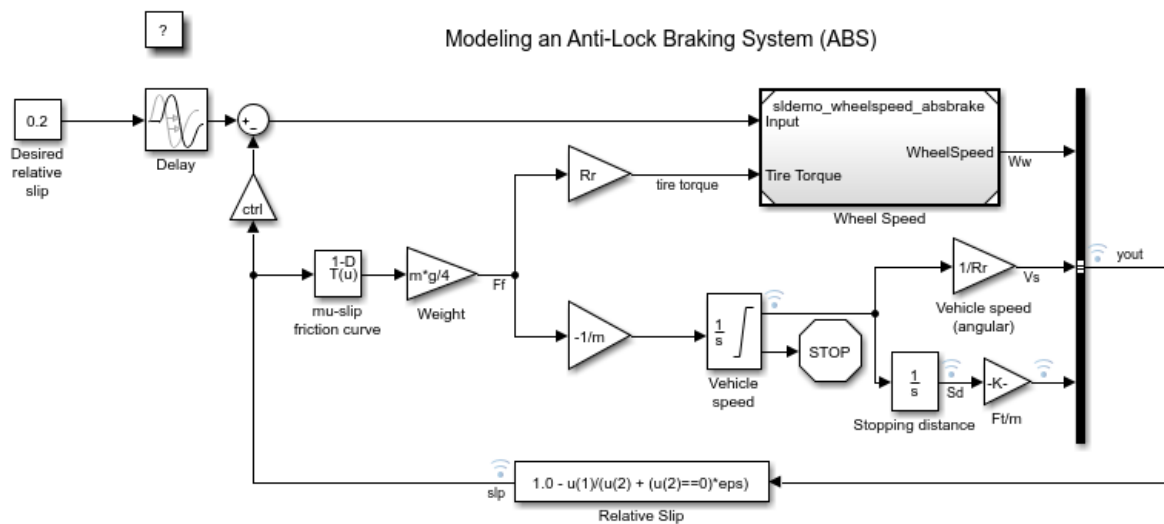


Figura 14. Diagrama bloques Anti-Lock Braking System.

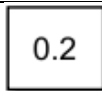
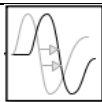
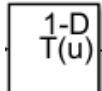

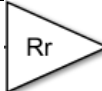
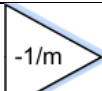
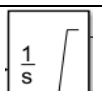

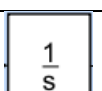
	Constante de deslizamiento deseado de la rueda.
	Retraso en el sistema para añadir un tiempo de reacción antes de empezar la frenada
	Tabla de los valores del coeficiente de fricción entre el neumático y la superficie.
	Peso del neumático. Multiplicado por el coeficiente de fricción tenemos el valor de la fuerza de fricción.
	Multiplicador por el radio del neumático. Multiplicado por la fuerza de fricción tenemos la aceleración angular del neumático.
	Divisor por la masa del circuito. Si dividimos la fuerza de fricción por la masa del circuito tenemos la desaceleración del vehículo.
	Integrador para tener la velocidad de desaceleración en función del tiempo y poder añadirla a una gráfica.
	Divisor. Dividiendo la velocidad del vehículo por el radio del neumático nos permite saber el par del neumático.
	Integrador que nos permite obtener la distancia recorrida en función del tiempo y poder añadirla a una gráfica.

Tabla 7. Leyenda bloques Anti-Lock Braking System.

El modelo funcionando utilizando integradores que calculan por separado la velocidad angular de los neumáticos y la velocidad del vehículo. Con las dos velocidades se calcula el deslizamiento de la frenada con la siguiente formula:

$$slip = 1 - \frac{W_w}{W_v} \quad [2]$$

- $W_w$ = Velocidad angular del neumático
- $W_v$ : Velocidad del vehículo dividido el radio del neumático

Este modelo da como valor de deslizamiento óptimo 0,2. Estableciendo el deslizamiento deseado en el valor de deslizamiento en el que la curva mu deslizamiento alcanza un valor máximo, siendo este el valor óptimo para la distancia de frenado mínima.

El coeficiente de fricción entre el neumático y la superficie del camino,  $\mu$ , es una función empírica de deslizamiento, conocida como la curva de  $\mu$ -slip. Creamos la curva de  $\mu$ -slip pasando variables en MATLAB en el diagrama de bloque que usa Simulink. El modelo multiplica el coeficiente de fricción,  $\mu$ , por el peso sobre la rueda,  $W$ , para conocer la fuerza de fricción,  $F_f$ , que actúa sobre la circunferencia del neumático. El  $F_f$  es dividido por la masa de vehículo para producir la desaceleración de vehículo, que el modelo integra para obtener la velocidad de vehículo.

El subsistema del ABS con el que controlamos la velocidad angular de los neumáticos es el siguiente:

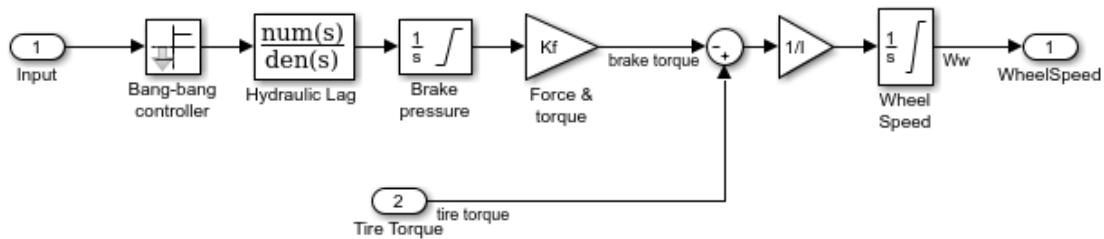


Figura 15. Diagrama de bloques del subsistema Anti-Lock Braking System..

	Controlador Bang-Bang, enciende el sistema cuando la seña de entrada es superior a 0 y cuando es inferior lo apaga.
	Tiempo de retraso por los frenos hidráulicos.
	Integrador de la velocidad de entrada. Para sacar la presión de frenada.
	Multiplicador por el área del pistón.
	Divisor por la inercia de rotación de la rueda.
	Segundo Integrador del subsistema que nos permite obtener el valor de la velocidad de la rueda.

Tabla 8. Leyenda bloques subsistema Anti-Lock Braking System.

Este subsistema tiene dos entradas. La primera entrada viene de restar el deslizamiento real del deslizamiento deseado, si el valor es positivo el controlador Bang-Bang activara el sistema hidráulico. La velocidad de activado del sistema hidráulico se calcula con la siguiente formula:

$$Hydraulic\ Lag = \frac{[100]}{[0.01\ 1]} \quad [3]$$

Después este retraso se integra para obtener la presión real del freno. Esta presión se multiplica por el área del pistón para obtener el par de frenado que se aplica a la rueda,  $K_f$ .

La segunda variable que entra por el subsistema es el par de aceleración de la superficie de la carretera en la rueda, que si restamos el par de frenado pro el par de aceleración obtenemos el par neto de la rueda. El siguiente paso es multiplicar este par por la inercia de rotación de la rueda,  $I$ , produciendo la aceleración angular de la rueda. Y para finalizar integramos en función del tiempo y obtenemos la velocidad angular,  $W_w$ .

Para calcular el deslizamiento real el modelo usa la siguiente formula:

$$Relative\ slip = 1 - \frac{W_w}{(V_v + (V_v == 0) * eps)} \quad [4]$$

- $W_w$ = Velocidad angular del neumático.
- $V_v$ : Velocidad del vehículo dividido el radio del neumático.

Por último, estas son las variables que se introducen en el modelo:

Name	Value	DataType
I	5	double (auto)
Kf	1	double (auto)
PBmax	1500	double (auto)
Rr	1.25	double (auto)
TB	0.01	double (auto)
ctrl	1	double (auto)
g	32.18	double (auto)
h	<1x1 matlab.ui.Figure>	matlab.ui.Figure
m	50	double (auto)
mu	[0 0.4 0.8 0.97 1 0.98 0.96 0.94 0.92 ...	double (auto)
slidemo_absbrake_output	<1x1 Simulink.SimulationData.Datase...>	Simulink.SimulationDat
slip	[0 0.05 0.1 0.15 0.2 0.25 0.3 0.35 0.4...	double (auto)
v0	88	double (auto)

Figura 16. Variables modelo Anti-Lock Braking System.

### 3.4. Tiempo de reacción

El tiempo de reacción es un factor muy importante en la seguridad vial. Cuanto más alto es, más posibilidades hay de sufrir un accidente. Esto se debe a que el vehículo no empieza a frenar en el momento en que hay un accidente o un obstáculo en nuestra trayectoria, si no, que el conductor entre que ve el accidente y comienza a frenar, pasa un tiempo donde recorre una distancia relacionada con la velocidad a la que se circule y el tiempo que pase hasta que se empiece a frenar. Este proceso pasa por tres etapas:

- **Percepción:** Ver, oír o sentir el obstáculo que nos puede causar un accidente lo antes posible, es esencial para aumentar el tiempo de reacción.
- **Procesamiento:** El rápido entendimiento de lo que está sucediendo en el entorno, después de sentir el obstáculo, permitirá comenzar a realizar la maniobra de seguridad antes.
- **Respuesta:** La agilidad motora es necesaria para actuar ante el estímulo recibido.

Asumiendo un vehículo que circula a una velocidad estable en el tiempo, de 45 Km/h, como se puede observar en la siguiente imagen, la distancia recorrida es lineal según el tiempo de reacción transcurrido.



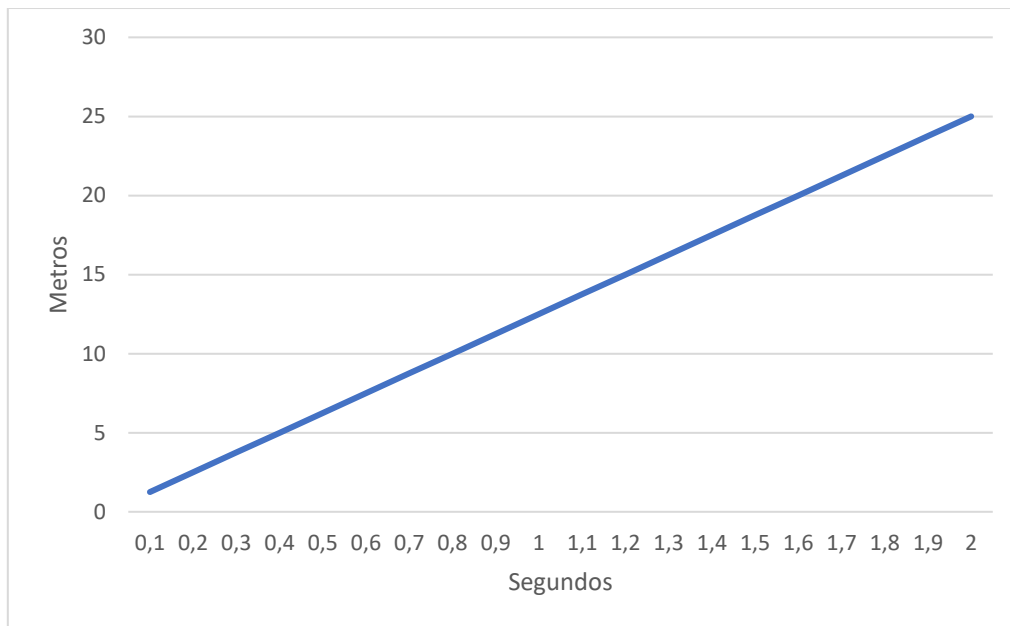


Figura 17. Distancia recorrida según el tiempo de reacción.

### 3.5. Resultados

Una vez presentadas todas las variables, hay que unirlas y aplicar la expresión necesaria, para analizar cómo se mejoraría la distancia de seguridad, cuando el modelo de circulación vial actual sea cambiado por un modelo de vehículos conectados.

En este proyecto, se buscará calcular cuánto se mejoraría la distancia de seguridad en un ámbito de coches conducidos por personas, y luego como se vería reducido al pasar a coches autónomos. Por ellos, usaremos 2 tipos de tiempo de reacción para calcular las variables.

- a) Tiempo de reacción humano: Según la mayoría de los estudios, un humano tarda alrededor de 1 segundo en reaccionar a obstáculos en carretera. Así que usaremos 1 segundo para el estudio.
- b) Tiempo de reacción de la tecnología: Actualmente, la tecnología permite asumir tiempos de reacción de 100 a 300 milisegundos, así que usaremos estos dos tiempos para el estudio.

Lo primero es calcular la distancia en metros, que se recorrería debido al tiempo de reacción. Para ellos mediremos en diferentes velocidades:

Velocidad	Tiempo de Reacción 1 Segundo	Tiempo de Reacción 0,3 Segundo	Tiempo de Reacción 0,1 Segundo
30 km/h	8,33 m	2,5 m	0,83 m
45 km/h	12,5 m	3,75 m	1,25 m
60 km/h	16,66 m	5 m	1,66 m
75 km/h	20,83 m	6,25 m	2,08 m
90 km/h	25 m	7,5 m	2,5 m
105 km/h	29,16 m	8,75 m	2,92 m
120 km/h	33,33 m	10 m	3,33 m
135 km/h	37,5 m	11,25 m	3,75 m
150 km/h	41,66 m	12,5 m	4,17 m

Tabla 9. Distancias recorridas según los tiempos de reacción.

Las primeras conclusiones que se pueden extraer son que en el modelo de vehículos autónomos se reduce en gran medida la distancia que recorre antes de reaccionar a los obstáculos, y a medida que se aumenta la velocidad se nota más, a favor de la seguridad, la poca distancia que necesita recorrer.

Aun así, como ya se ha mencionado, estas distancias no son distancias decisivas a la hora de decidir la distancia de seguridad, ya que como ya se ha visto antes, hay una distancia de frenado que significa que a medida que el coche de atrás está llegando al de delante, este está avanzado mientras frena. Por lo tanto, la distancia de seguridad puede ser inferior a la puesta con el recorrido del tiempo de reacción.

Para calcular estas distancias, usaremos el modelo de Matlab que reproduce el frenado de emergencia. La salida en el diagrama de bloques es una gráfica de la distancia en función del tiempo como la de la imagen siguiente:

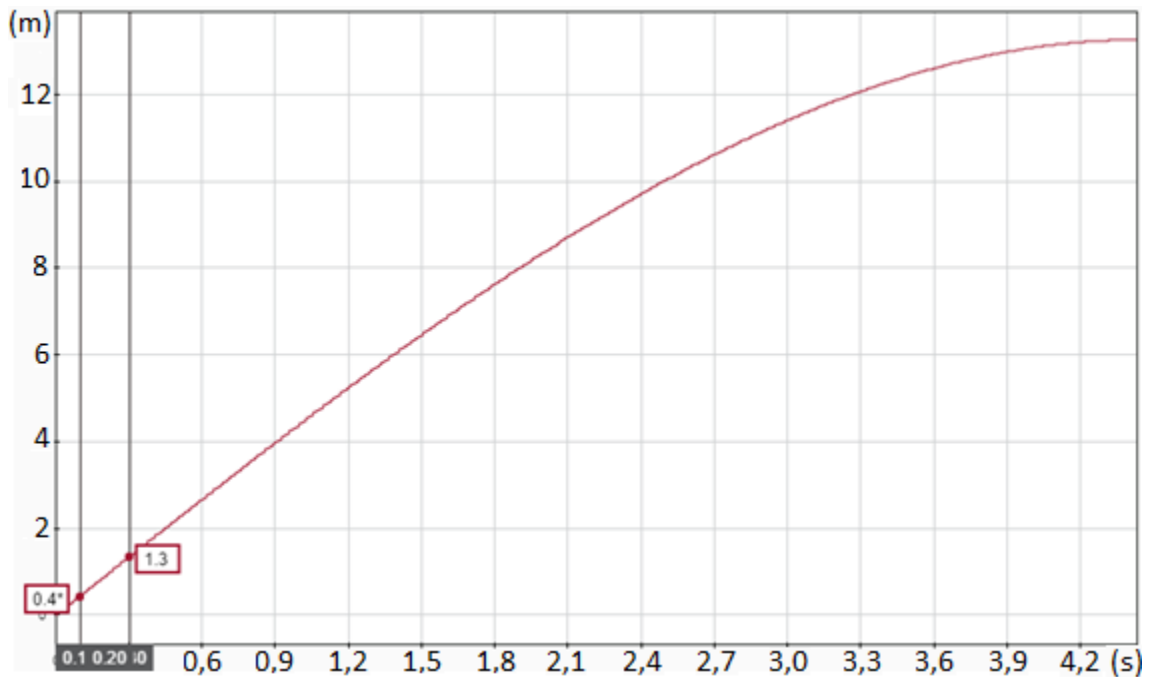


Figura 18. Distancia frenada.

En la siguiente tabla se indica los valores del recorrido de la frenada del coche delantero, para distintas velocidades, en los diferentes tiempos de reacción propuestos.

Velocidad	Recorrido Frenado para Tiempo de Reacción 1 Segundo	Recorrido Frenado para Tiempo de Reacción 0,3 Segundo	Recorrido Frenado para Tiempo de Reacción 0,1 Segundo
30 km/h	3,5 m	0,3 m	1 m
45 km/h	4,5 m	0,4 m	1,3 m
60 km/h	5,5 m	0,5 m	1,6 m
75 km/h	6,5 m	0,6 m	1,9 m
90 km/h	7,5 m	0,7 m	2,1 m
105 km/h	8,5 m	0,8 m	2,4 m
120 km/h	9,5 m	0,9 m	2,7 m
135 km/h	10,5 m	1 m	3 m
150 km/h	11,5 m	1,1 m	3,3 m

Tabla 10. Recorrido de frenada según el tiempo de reacción.

Teniendo ya estas dos variables, toca buscar con la fórmula la distancia mínima de seguridad para no colisionar:

$$D(t, V_{steady}) = D_0 + D_{stopping} - V_{steady} \times T_{reaction} = 0 \quad [5]$$

Velocidad	Distancia Seguridad Tiempo Reacción Segundo	de para de 1	Distancia Seguridad Tiempo Reacción Segundo	de para de 0,3	Distancia Seguridad Tiempo Reacción Segundo	de para de 0,1
30 km/h	4,83 m		1,5 m		0,53 m	
45 km/h	8 m		2,45 m		0,85 m	
60 km/h	11,16 m		3,4 m		1,16 m	
75 km/h	14,33 m		4,35 m		1,48 m	
90 km/h	17,5 m		5,4 m		1,8 m	
105 km/h	20,66 m		6,35 m		2,11 m	
120 km/h	23,83 m		7,3 m		2,43 m	
135 km/h	27 m		8,25 m		2,75 m	
150 km/h	30,16 m		9,2 m		3,06 m	

Tabla 11. Distancias de seguridad mínimas.

## 4. Simulación Modelo Densidad

### 4.1. Software Aimsun

El software que usaremos para realizar simulaciones de densidad de tráfico es Aimsun [16], Aimsun es un software desarrollado por los miembros del grupo LIOS de la UPC (Universidad Politécnica de Cataluña).

Las principales características del software es de hacer simulaciones de redes de transporte microscópicas, que describen el flujo vehicular a través de entidades individuales, y mesoscópicas, que definen por probabilidad la posición que estará un vehículo en un cierto tiempo, simultáneas, lo que permite simular grandes áreas para luego acercarse simulando, vehículo a vehículo, interacciones reales como adelantamientos, bloqueos de cruces, giros conflictivos, formación de colas y demás problemas que surgen en las vías. También permite definir el razonamiento del conductor para la selección de rutas antes y durante el viaje mediante diferentes algoritmos de selección basados en costes y probabilidades.

Este software de simulación se utiliza para la realización de estudios de movilidad y planificación de transporte. Es una herramienta para el diseño, reforma y mejora de la infraestructura vial, reducción de la congestión de tráfico, realización del diseño de entornos urbanos y no urbanos para vehículos y peatones y también en la reducción de emisiones contaminantes. Entre sus principales aplicaciones destacan:

- Análisis y evaluación de redes viales: ampliación de carriles, cambios de geometrías, cruces a desnivel, etc.
- Análisis del impacto de cambios en la calzada: implantación de carril bici, cambio en el sentido de las calles, aumento de carriles, desvíos, etc.
- Análisis de políticas de control: programación de semáforos fija o dinámica, desfase entre semáforos, etc.
- Modelado de transporte público: rutas, horarios, carriles reservados para transporte público, tiempos de parada, etc.

- Modelado y evaluación de sistemas ITS (Sistemas de Transporte Inteligentes): control dinámico de semáforos, señalización variable en las calles (VMS), vehículos guiados, etc.
- Modelado de incidentes viales como accidentes, trabajos en la calzada, etc.

## 4.2. Zona de estudio de simulación

Hay varias formas de crear la geometría de un modelo en Aimsun. Podemos usar un archivo de AutoCAD o una imagen como base y editar la red de carreteras en la parte superior o podemos importar la red de carreteras directamente usando OpenStreetMap, GIS u otro software.

Una vez importada los archivos para recrear la geometría del lugar, el software permite crear un sistema de capas, donde cada capa se puede controlar e editar de manera independiente a las otras. La capa principal, es la que se denomina 'red', esta capa la crea el usuario, y es donde se añaden los elementos que conforman la red. Estos elementos son las secciones, los nodos y las señales reguladoras de tráfico.

Las redes constan de tres elementos:

- Secciones: Son los tramos de carretera que están interconectados mediante intersecciones. Las secciones pueden ser curvas por rectas, además a cada tramo se le puede cambiar diversas características como el número de carriles que dispone o los tramos de líneas discontinuas o continuas.
- Nodos: Los nodos son los cruces. Aquí podemos simular la entrada de flujo desde un tramo que cruce con la sección principal, o la inversa, dar salida a flujo.
- Señales reguladoras de tráfico: Igual que en los tramos viales reales, necesitamos señales que ayuden a controlar el flujo del tráfico. Estos pueden ser stop, ceda el paso, semáforos o paso de peatones. Se colocan encima de las secciones.

Para la simulación se utilizará un entorno real, se trata del barrio de les Corts como podemos ver en la imagen.



*Figura 19. Mapa entorno.*

Para ello hemos utilizado OpenStreetMap para sacar la demografía del barrio, y luego hemos diseñado la secciones, nodos y señales que conforman la zona del barrio. Con todo esto ya tenemos la base para implementar el modelo de tráfico.

Además, hay que tener en cuenta que por el circuito circulan dos líneas de autobuses y hay dos cruces con semáforos.

### **4.3. Diseño de secciones**

El siguiente paso sería diseñar las características de las secciones, con Aimsun tenemos un amplio catálogo de posibilidades para ajustar al máximo las características del modelo que deseamos realizar.

Las principales características que tenemos que poner en una sección es la velocidad máxima a la que se puede circular y la capacidad.

La Unidad que se utiliza en la capacidad es el PCU (Passenger Car Equivalent) que expresa un valor para cada tipo de vehículo.

- Coches: 1
- Motos: 0.5
- Autobús y camiones: 3.5

Las velocidades las ajustaremos al entorno real, en cuanto a las capacidades, se tratará de ajusta el modelo a la realidad, por ello, se utilizará los datos de capacidad que nos ofrece el ayuntamiento de Barcelona de la avenida de las Corts, avenida que circula por el entorno de simulación propuesto, 53000 pasajeros de media por día. Por lo que, si lo trasladamos a pasajeros hora, nos sale una media de 2200 pasajeros a la hora.

Por otro lado, tenemos la posibilidad de ajustar las secciones añadiendo carriles y su anchura, además se puede añadir pendiente si hiciese falta. En este modelo, se ajusta el número de carriles a la realidad de la zona, dos carriles por sentido, y se ha igualado la anchura de los carriles para todos los tramos por igual. En cuanto a la pendiente la hemos despreciado ya que en el modelo de Matlab no se tiene en cuenta, así que no se ha incluido en ninguna sección pendiente.

Como podemos ver en la Figura 20, hay una variedad de características que podemos poner en la sección que influirán en el comportamiento de los vehículos que circulen por ellas, desde el porcentaje de cooperación y agresividad al intercambiar carriles, la congestión, tiempos de reacción.

La finalidad del modelo es analizar cómo mejoraríamos el modelo de flujo vial actual, a un modelo en la que participan en la circulación vehículos conectados. Para ello utilizaremos la misma congestión en todas las secciones de las simulaciones, en este caso usaremos una congestión que se podría similar a la de la hora punta, 200 veh/km.

Para hacer los modelos más reales a los que queremos simular, deberíamos introducir un grado de agresividad a la hora de hacer un modelo actual, y en cambio en el modelo de vehículos conectados la cooperación sería del 100%.

Por último, podríamos añadir al modelo actual tiempos adicionales de reacción, que podrían ser por falta de visibilidad de la señales o zonas de conflicto. Pero



en este caso añadiremos estos tiempos de reacción directamente más adelante, cuando diseñemos los vehículos.

The image shows a screenshot of the Aimsun software interface, specifically the 'Modelos Dinámicos' (Dynamic Models) section. The interface is organized into several panels:

- Micro:**
  - Cambio de Carril (Lane Change):** Cooperación: 80,00 %, Agresividad: 0,00 %, Intensidad de Frenado: Normal. There is a checkbox for 'Cambio de Carril Imprudente' which is unchecked.
  - Descarga de la Cola (Queue Discharge):** Factor para la Aceleración: Sin Cambio, Tiempo Adicional de Reacción en Parada: 0,00 sec, Tiempo Adicional de Reacción en un Semáforo: 0,00 sec.
  - HCM Settings (Categoría: Ninguna):** Two checkboxes: 'Área de Trenzado' and 'Punto de Inicio de Bifuración/Confluencia', both unchecked.
  - Carril Lateral (Lateral Lane):** Distancia de Cooperación: Todo el Carril, Distancia de Incorporación: Por Defecto. A checked checkbox: 'Incorporación: el Primer Vehículo en Llegar es el Primero en Salir'.
  - Modelo de Adelantamiento en Vías de Dos Sentidos y Dos Carriles (Two-Way Two-Lane Passing Model):** Sección Espejo: Ninguno, Distancia de Visibilidad: 300,00 m, Factor de Visibilidad: 1,50.
  - Modelo de Seguimiento de Vehículos a Dos Carriles (Two-Lane Vehicle Following Model):** A checked checkbox: 'Considerar el Modelo de Seguimiento de Vehículos a Dos Carriles'.
- Meso:**
  - Densidad de Congestión (por Carril): 200,00 veh/km, Factor del Tiempo de Reacción: 1,00.
  - Modelo de Selección de Carril (Lane Selection Model):** Two checkboxes: 'Penalizar Carriles Compartidos' and 'Tener en Cuenta Carriles Rápidos/Lentos', both unchecked.
- Ajuste OD Dinámico (Dynamic OD Adjustment):** Ratio para el Cálculo del Umbral de la Velocidad de Congestión: 0,50.

Figura 20. Diseño sección.

Para el control de los semáforos, Aimsun cuenta con una opción que permite crear diferentes grupos, y controlar el tiempo de verde, ámbar y rojo, de cada uno. En este entorno existen dos cruces con semáforos, por lo que se ha creado un solo grupo con una duración de 30 segundos cada estado de verde y rojo y 5 segundos en ámbar.

Para la línea de autobuses, en esta zona contamos con la línea 54 y la L12. Aimsun cuenta con la opción de planificar líneas de autobuses. Primero se deben crear en la sección, marcando su longitud y si son fuera o dentro de la calzada, después, se debe crear el horario de parada donde se deben definir otros parámetros temporales como la franja horaria en la que actúa, los intervalos de salida y los tiempos de parada. En este modelo se han seguido los tiempos de parada de la web de horarios de autobuses del grupo Baixbus, que es el grupo que se encarga del transporte público de autobuses [17]. Y se ha seleccionado una media de 20 segundos, con una desviación de 5 segundos arriba y abajo, entre que llega a la parada y sale de ella.

## 4.4. Diseño Vehículos

Una vez tenemos las secciones por donde circulará el flujo vial, tenemos que diseñar los vehículos. Para ello Aimsun permite crear vehículos que sean y se comporten de una manera muy realista.

Actualmente hay una gran diversidad de medios de transporte, con este software recrearemos un escenario introduciendo diferentes tipos de vehículos como coches, camiones, autobuses o taxis.

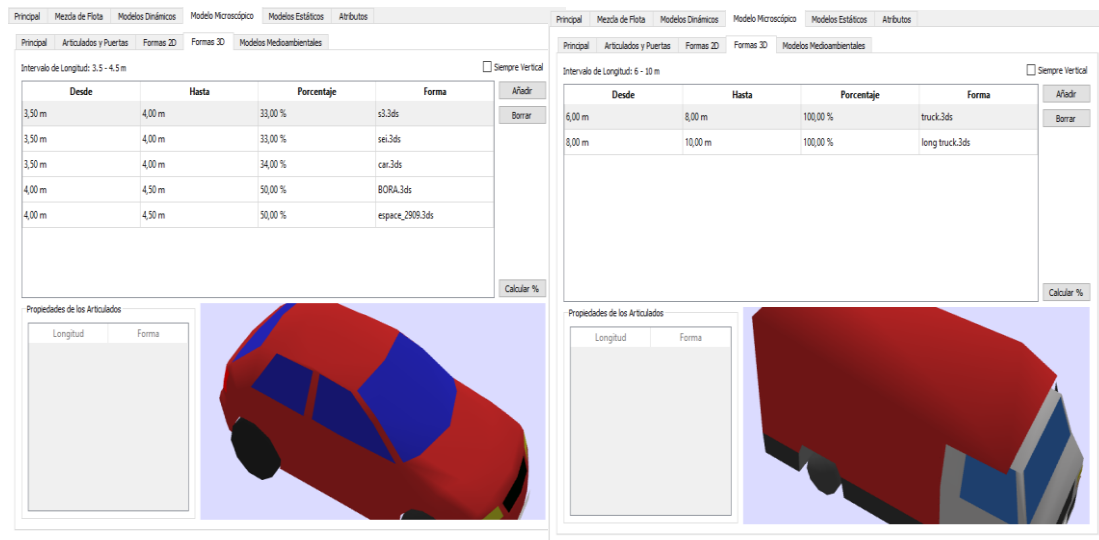


Figura 21. Diseño vehículos.

Como podemos observar, Aimsun tiene un editor de vehículos, donde podemos seleccionar la anchura y la longitud de los vehículos, y una desviación para que cada vehículo sea diferente al resto. Además, podemos indicar un porcentaje de aparición cuando se vayan generando los vehículos del mismo tipo, que como observamos en la imagen, tenemos tres tipos de coches con un porcentaje de aparición del 33 % cada uno, Y dos coches familiares con 50 %. Por último, hay varias plantillas en Aimsun para la simulación en 3D.

Una vez construidos los vehículos, corresponde de indicar las características de cada uno. Lo primero es indicar la velocidad máxima que puede lograr el vehículo, en este caso al ser un circuito urbano, se ha seleccionado para coches 70 Km/h y para camiones y autobuses de 60 Km/h. Con la velocidad máxima de los vehículos, ahora hay que seleccionar la aceleración y desaceleración con la que los vehículos actuaran en la simulación.

Principal	Mezcla de Flota	Modelos Dinámicos	Modelo Microscópico	Modelos Estáticos	Atributos
Principal	Articulados y Puertas	Formas 2D	Formas 3D	Modelos Medioambientales	
		Media	Desviación	Mínimo	Máximo
Aceleración Máxima		3,00 m/s <sup>2</sup>	0,20 m/s <sup>2</sup>	2,60 m/s <sup>2</sup>	3,40 m/s <sup>2</sup>
Desaceleración Normal		4,00 m/s <sup>2</sup>	0,25 m/s <sup>2</sup>	3,50 m/s <sup>2</sup>	4,50 m/s <sup>2</sup>
Desaceleración Máxima		6,00 m/s <sup>2</sup>	0,50 m/s <sup>2</sup>	5,00 m/s <sup>2</sup>	7,00 m/s <sup>2</sup>
Agresividad en el Tiempo entre Vehículos		0,00	0,00	-1,00	1,00
Modelo de Seguimiento de Vehículos					
		Media	Desviación	Mínimo	Máximo
Factor de Sensibilidad	1,00	0,00	1,00	1,00	
Hueco	0,00 segs	0,00 segs	0,00 segs	0,00 segs	0,00 segs
<input type="checkbox"/> Favorece Aparición de Atascos					
Modelo de Cambio de Carril					
<input type="checkbox"/> Permanencia en el Carril de Adelantamiento					
<input type="checkbox"/> Cambio de Carril Imprudente					
Modelo de Adelantamiento en Vías de Dos Sentidos					
		Media	Desviación	Mínimo	Máximo
Margen para la Maniobra de Adelantamiento		5,00 segs	3,00 segs	1,00 segs	10,00 segs

Figura 22. Diseño características vehículo.

Ahora hay que introducir como actúan los vehículos dentro del modelo. Para ello se dispone de opciones para modificar la conducta en el modelo de adelantamiento. Podemos variar el tiempo que emplean en el adelantamiento, además de poder indicar la agresividad en adelantar o cambiar carril, en este entorno las secciones no son muy grandes al ser un circuito urbano, por lo que una conducta realista no se realizarían muchos adelantamientos y eso se debería de tener en cuenta a la hora de realizar el modelo.

Por último, corresponde modificar la variable principal que queremos estudiar en este modelo, la distancia de seguridad entre los vehículos.

Principal		Parámetros por Defecto del Experimento			
	Media	Desviación	Mínimo	Máximo	
Aceptación de Velocidad	1,10	0,10	0,90	1,30	
Espacio Libre	1,00 m	0,30 m	0,50 m	1,50 m	
Tiempo Máximo de Ceda el Paso	10,00 segs	2,50 segs	5,00 segs	15,00 segs	
Aceptación de Guiado	100,00 %	0,00 %	100,00 %	100,00 %	
Valor del Tiempo	0,00 \$/h	0,00 \$/h	0,00 \$/h	0,00 \$/h	
Vehículos Equipados: 0,00 %					
<input type="checkbox"/> Velocidad en Pendientes Afectada por el Peso					
	Media	Desviación	Mínimo	Máximo	
Peso	13608 kg	9072 kg	4536 kg	40823 kg	
Peso/Caballos de Vapor	58 kg/cv	23 kg/cv	34 kg/cv	121 kg/cv	
Peso/Área Frontal	1387 kg/m2	732 kg/m2	771 kg/m2	3027 kg/m2	

Figura 23. Características modelo.

Para ello tenemos una opción que nos permite modificar directamente la distancia que tendrán de margen dos coches que estén uno delante del otro, y permitiéndonos una desviación. Para estudiar el modelo de flujo, simularemos tantos casos reales, donde no se suele cumplir con la distancia de seguridad recomendada, y casos para vehículos conectados teniendo en cuenta los factores calculados previamente para determinar las distancias de seguridad mínima para evitar colisiones.

Una de las principales y mayores diferencias que hay entre el modelo de tráfico actual al del modelo de tráfico con vehículos conectados, es la gran mejora que se consigue, en el caso de los vehículos conectados, en la capacidad de reaccionar a obstáculos.

Principal Parámetros por Defecto del Experimento

Tiempos de Reacción para Simulaciones Microscópicas

Tiempo de Reacción	Tiempo de Reacción en Parada	acción para el Primer Vehículo er	Probabilidad (0,1]
0.8	1.2	1.6	1

Añadir  
Borrar

Tiempos de Reacción para Simulaciones Mesoscópicas

Tiempo de Reacción	de Reacción para el Primer Vehículo en un S	Probabilidad (0,1]
1.2	1.6	1

Añadir  
Borrar

Asignación Dinámica de Tráfico

Siguiendo Rutas OD: 100,00 % Siguiendo los Resultados de una Asignación de Caminos: 100,00 %

Reasignación para Seguir un Camino del Modelo de Elección de Ruta

Inicialmente Siguiendo Rutas OD: 0,00 % Inicialmente Siguiendo los Resultados de una Asignación de Caminos: 100,00 %

Inicialmente Siguiendo Modelos de Elección de Ruta: 100,00 %

Figura 24. Características modelo.

## 4.5. Modelado del control de flujo de tráfico

Para empezar a simular el entorno, necesitamos introducir un control al flujo que creamos en el modelo. Con esto queremos conseguir que los vehículos actúen como en un circuito real, teniendo cada vehículo individualmente un comportamiento diferente al resto, haciendo que cada uno tome distintas rutas.

Para la simulación se utilizará un sistema de control de flujos de matrices O/D (Origen/Destino). Este sistema funciona colocando unos puntos de origen y destino llamados centroides y mediante una matriz relacionar el número de vehículos que parten desde un origen a cada destino. Una vez creada, se generarán vehículos desde cada centroide, e individualmente, la matriz O/D se encarga de seleccionar un centroide destino para cada uno. Y es el propio vehículo el que se encarga de elegir la ruta para llegar al destino

El sistema para elegir la ruta es un sistema similar al que se estudia y se investiga utilizar en los sistemas de vehículos conectados. Un sistema que recrea de manera similar el algoritmo de Dijkstra. En este caso el coste por sección, Aimsun lo calcula utilizando la siguiente formula:

$$Cost = Tt + Tt \cdot Y \cdot \left(1 - \frac{A}{A_{max}}\right) + K \quad [6]$$

- $Tt$  (seg): Tiempo total del viaje
- $Y$ : Constante
- $A$ (pcu/h): Capacidad de la sección a medir
- $A_{max}$ (pcu/h): Capacidad máxima (pcu/h)
- $K$ : Coste definido por el usuario

Por lo tanto, podemos ver que la ruta que elegirá el vehículo dependerá del tiempo del viaje, de la capacidad de la ruta y del coste que les pone el usuario a las secciones.

#### 4.6. Datos del entorno a simular

Una vez trabajado y representado el entorno del modelo de flujo de tráfico que queremos simular, solo falta estudiarlo. Para ello simularemos 2 modelos diferentes, las principales diferencias que tendrán cada uno, son las del área que queremos estudiar: Velocidades, Distancia de seguridad y tiempo de reacción. Habrá, también, otro modelo que trataremos un modelo realista, donde se ha introducido diversidad de vehículos y redes de transporte público y tranvía. Y por otro lado introduciremos un modelo de vehículos conectados, dos de ellos serán simulando tecnología actual, y el otro será un modelo no realista, en el cual simplemente se quiere ver cómo afectaría a tráfico seguir el estándar al 100% en cuanto a distancia de seguridad recomendable y tiempos de reacción humanos. Para estos tres modelos solo utilizaremos coches.

A continuación, se explicará las características principales que tiene cada modelo:

El primer escenario será un escenario realista, donde generaremos diversidad de tipos de vehículos, además de una pequeña red de transporte público para poder acercarlo el máximo a la realidad. Como se puede observar, en cualquier entorno urbano, la distancia de seguridad no se suele mantener con la recomendada con la DGT, y menos en una zona urbana. Así, que se utilizará una de un intervalo entre [1,5m – 3m].

Velocidad máxima vehículos	50 Km/h
Distancia de seguridad	1.5 m a 3m
Tiempo de reacción	1 segundo

*Tabla 12. Valores modelo real.*

El segundo escenario se añadirán las tecnologías que supone que hará mejorar la congestión de tráfico, tanto tiempos de reacción de la tecnología actual, como la distancia de seguridad calcula en el apartado anterior. Por otro lado, simularemos para varias velocidades para ver también como afecta o como mejora.

Velocidad máxima vehículos	30, 45, 60 Km/h
Distancia de seguridad 1	0.5, 0.85, 1.6 m
Tiempo de reacción 1	0.1 segundos
Distancia de seguridad 2	1.5, 2.45, 3.4 m
Tiempo de reacción 2	0.3 segundos

*Tabla 13. Valores modelo vehículos conectados.*

## **4.7. Simulación**

Con estas simulaciones, pretendemos analizar los datos que obtenemos para ver como mejoraría el uso de vehículos autónomos en el ámbito de la densidad de tráfico y en el ámbito de la seguridad.

Para ello se pretende analizar cómo se mejoraría respecto al modelo actual y después se estudiará como se ve afectado el modelo de vehículos autónomos, a diferentes velocidades de circulación y distancias de seguridad.

Con este estudio, lo que se pretende es analizar como mejorarían la entrada en circulación de vehículos autónomos, en un ámbito real. Para ello analizaremos el entorno creado anteriormente, dando entrada por un lado al modelo real y luego al de vehículos autónomos.

### 4.7.1. Cola media

La primera característica que se medirá es la cola media que se genera en el circuito, esta cola viene dada por la densidad y hace referencia a la cantidad de coches que esperan fuera del circuito.

En este caso, la cola media es la de cada 10 minutos, que se genera en el circuito.

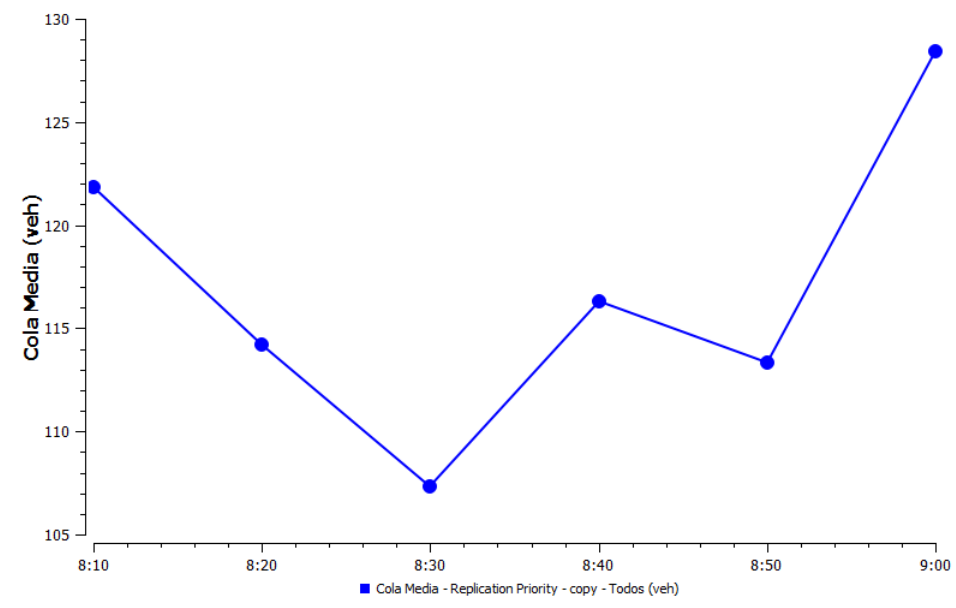


Figura 25. Cola media modelo real.

La cola media, en un modelo realista, oscilaría entre 107 y 129 coches.

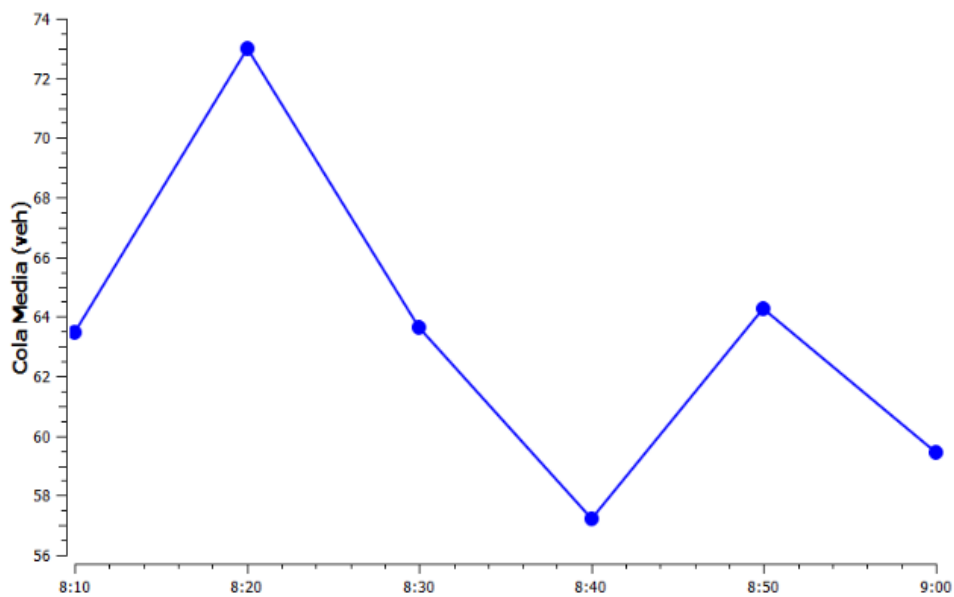


Figura 26. Cola media modelo vehículo conectados para tiempo de reacción 0,3.



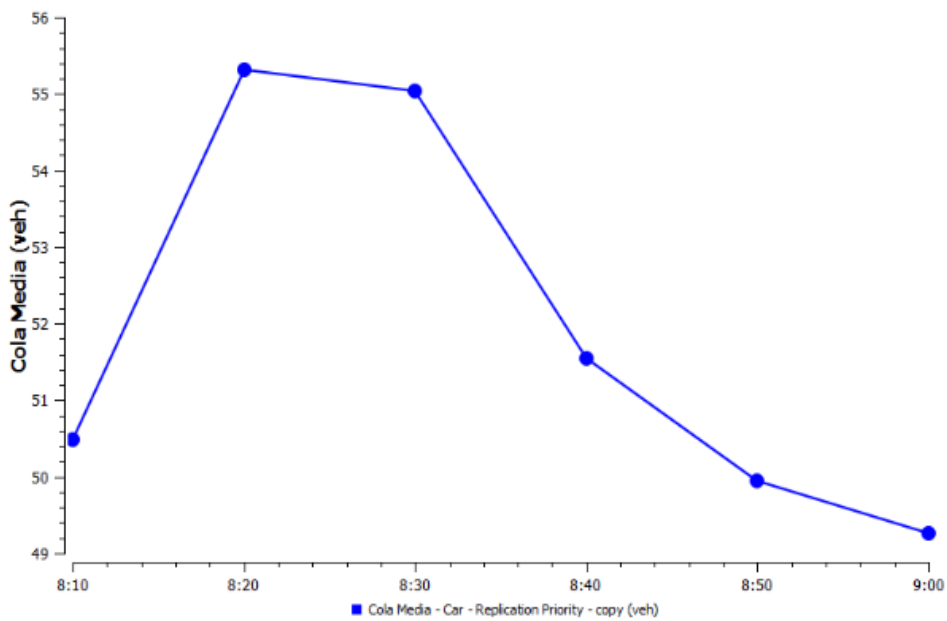


Figura 27. Cola media modelo vehículo conectados para tiempo de reacción 0,1.

En el modelo de vehículo conectados, la cola media oscila entre 57 y 74 con una cola máxima de cuando el tiempo de reacción es de 0,3 segundos y entre 49 y 55 cuando es 0,1.

El modelo de vehículos conectados mejora más del 50%, por lo que mejoramos la densidad de vehículos que circulan en el circuito.

#### 4.7.2. Número de cambios de carril

Un ámbito que podemos estudiar con Aimsun es el número de cambios de carril que se producen por kilómetro, con esto se podrá hacer un estudio de qué modelo necesita menos interacción en ciudad para llegar mejor a su destino.

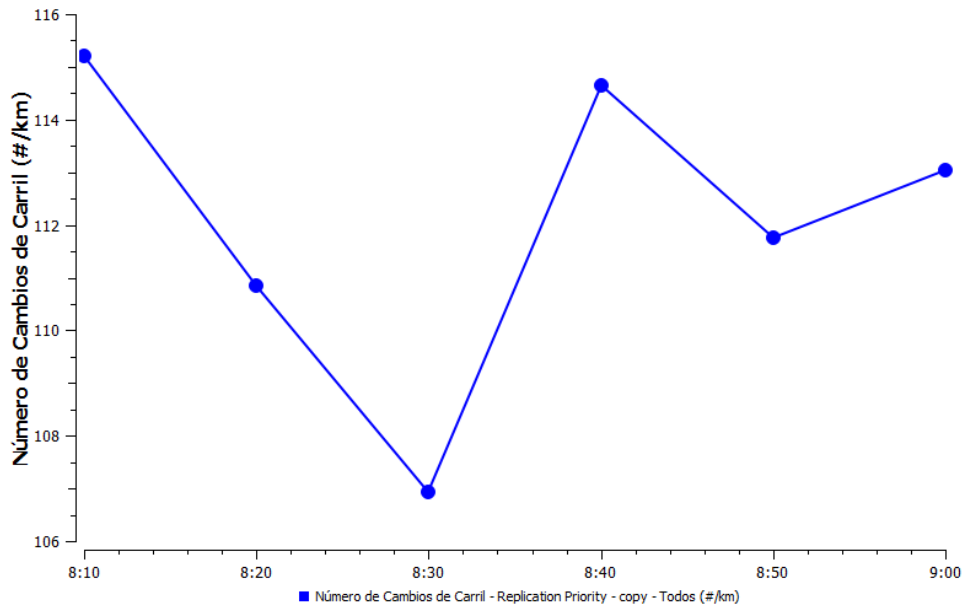


Figura 28. Cambios de carril en modelo real.

En el modelo realista se producen entre 107 y 115 cambios de carril por km.

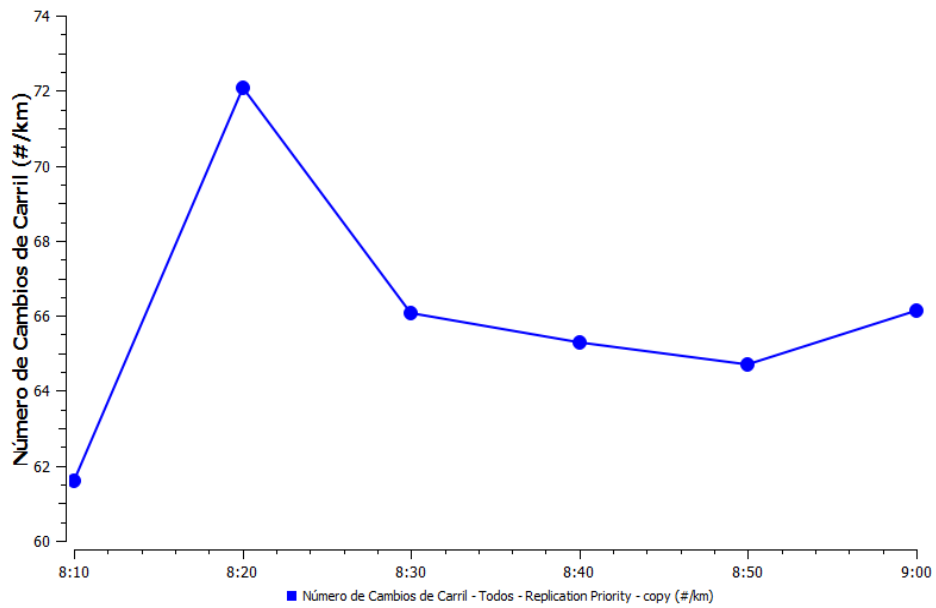


Figura 29. Cambios de carril en modelo vehículo conectado para tiempo de reacción 0,3.

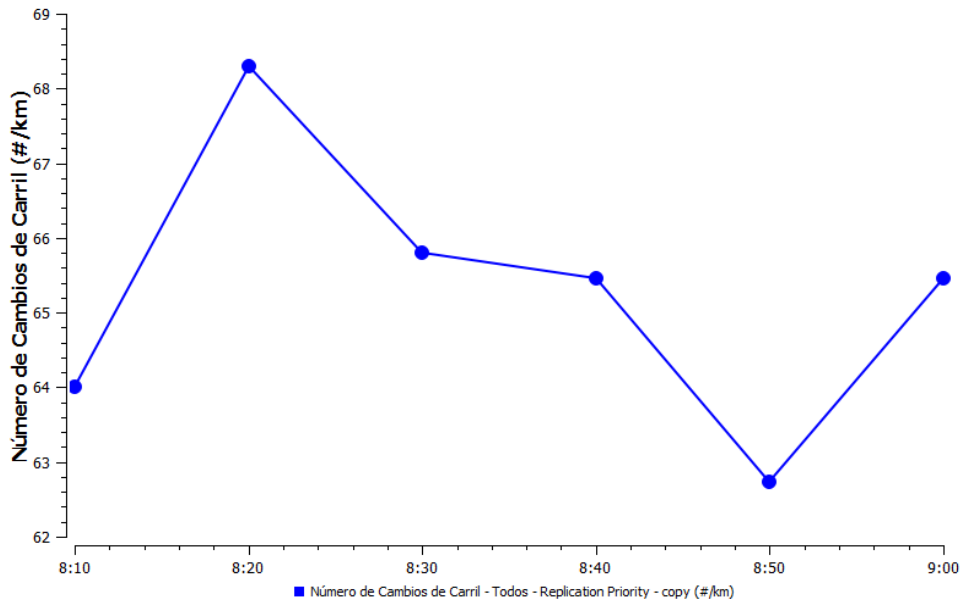


Figura 30. Cambios de carril en modelo vehículo conectado para tiempo de reacción 0,1.

En el modelo realista se realizan entre 62 y 72 cambios de carril para 0,3 segundos de tiempo de reacción y entre 63 y 68 para 0,1 segundos.

Como se observa, el modelo de vehículo conectado reduce en un 40 % los cambios de carril que se producen, esto se debe a que el modelo de vehículos conectados está diseñado para mantener una velocidad y que no se produzcan adelantamientos. Esto ayuda a la hora de la circulación y de la seguridad del trayecto, ya que hay menos movimientos entre carriles.

Entre los diferentes cambios de tiempo de reacción en el modelo de vehículos conectados, los valores son prácticamente los mismos solo cambian porque los modelos se generan aleatoriamente.

#### 4.7.3. Número total de paradas

El siguiente análisis es el del número de paradas que se producen cada 10 minutos en el circuito por todos los vehículos que circulan, en este entorno, aun no siendo una zona muy grande, es una zona con varios semáforos y cruces, por lo que debería haber valores altos.

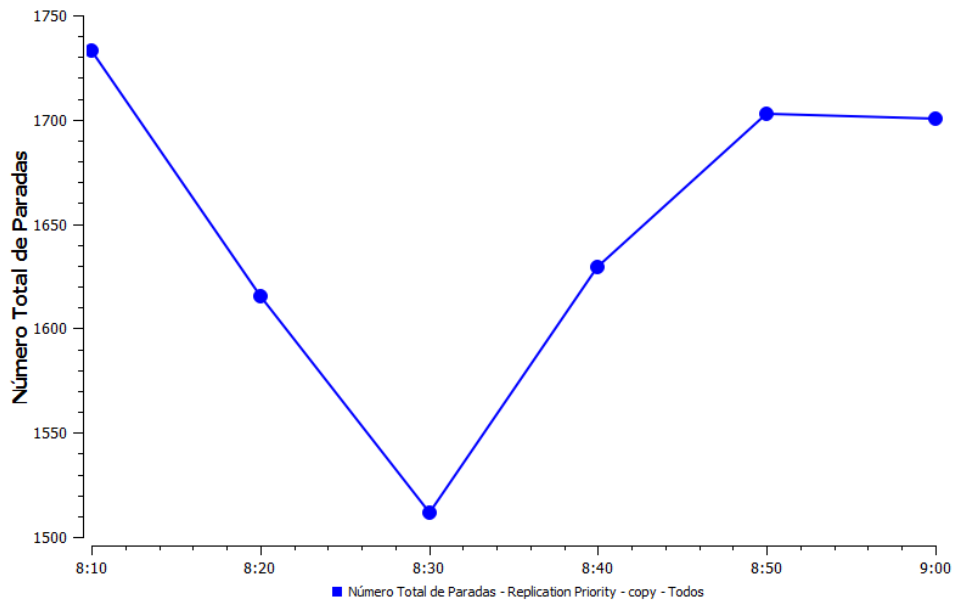


Figura 31. Número de paradas modelo real.

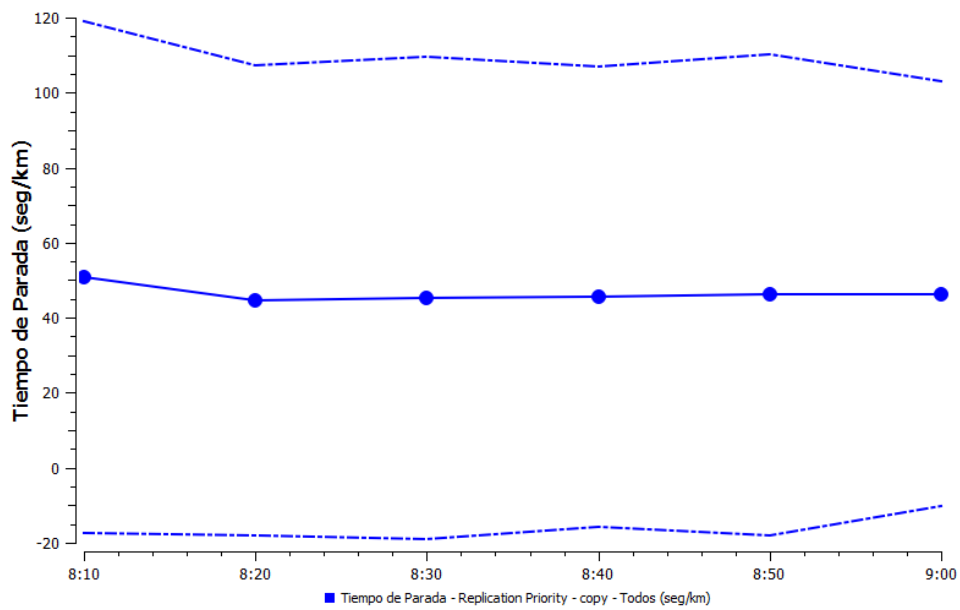


Figura 32. Tiempo de para modelo real.

En el modelo realista el total de paradas cada 10 minutos esta entre 1518 y 1733 y el tiempo de parada en el circuito, está entre los 45-50 segundos.

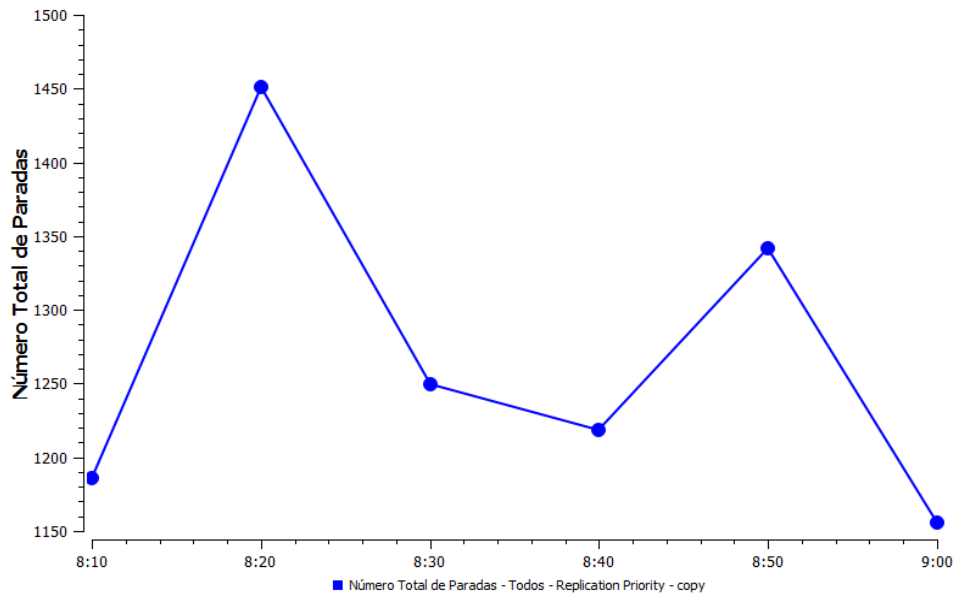


Figura 33. Número de paradas modelo vehículo conectado para tiempo de reacción 0,3.

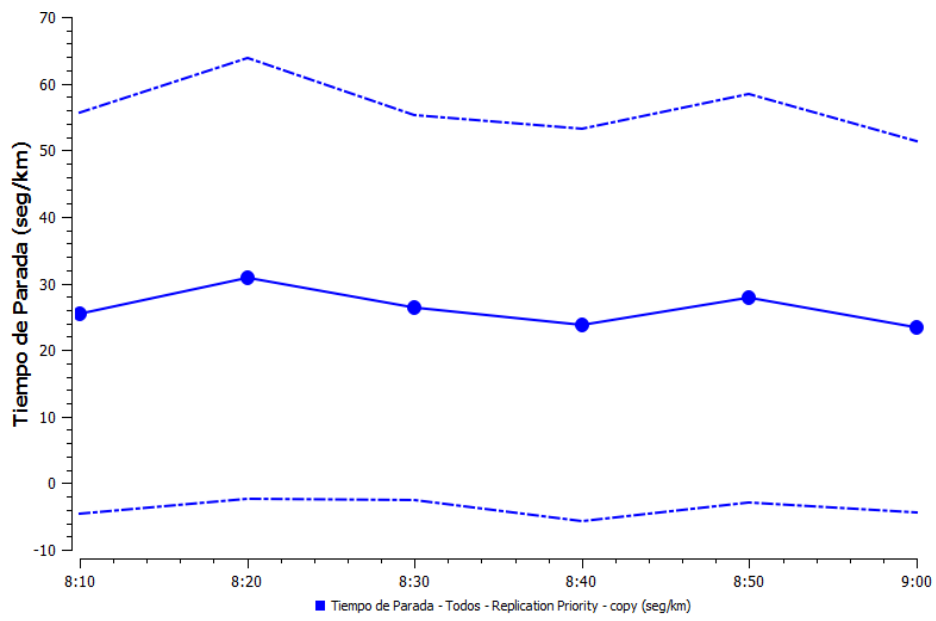


Figura 34. Tiempo de parada modelo vehículo conectado para tiempo de reacción 0,3.

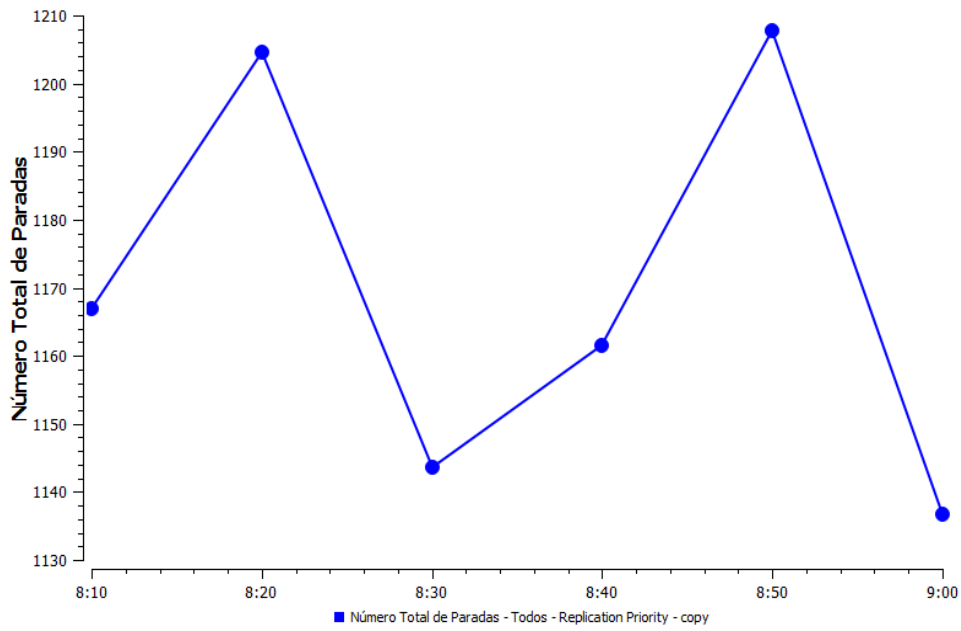


Figura 35. Número de paradas modelo vehículo conectado para tiempo de reacción 0,1.

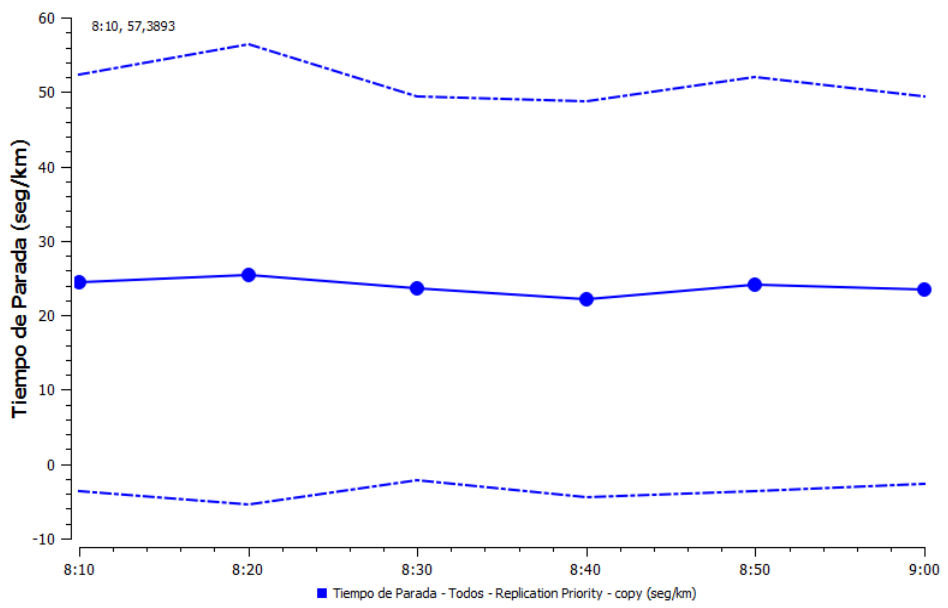


Figura 36. Tiempo de parada modelo vehículo conectado para tiempo de reacción 0,1.

En el caso del vehículo conectado, las paradas se reducen a 1155 de mínimo y 1456 de máximo para 0,3 y 1137 y 1208 para 0,1. En cuanto al tiempo de parada, para 0,3 segundos de tiempo de reacción la media es de 28 segundos, y para 0,1 segundos de tiempo de reacción es de 24 segundos.

En los resultados, podemos ver que se las paradas se reducen entre un 15 % y un 25%, y el tiempo de parada a la mitad. Esto es debido a que, en el modelo de vehículos conectados, al reducir el tiempo de reacción considerablemente con el humano, se necesita menos tiempo para iniciar la marcha, y por lo tanto se necesitan menos paradas. Además, se puede observar, que a medida que reducimos el tiempo de reacción, se mejora el modelo.

#### 4.7.4. Tiempo de demora

El siguiente estudio se trata del tiempo de demora que se pierde un vehículo cada kilómetro por culpa de la congestión en llegar al destino. Se tiene en cuenta el tiempo perdido por culpa del tráfico.

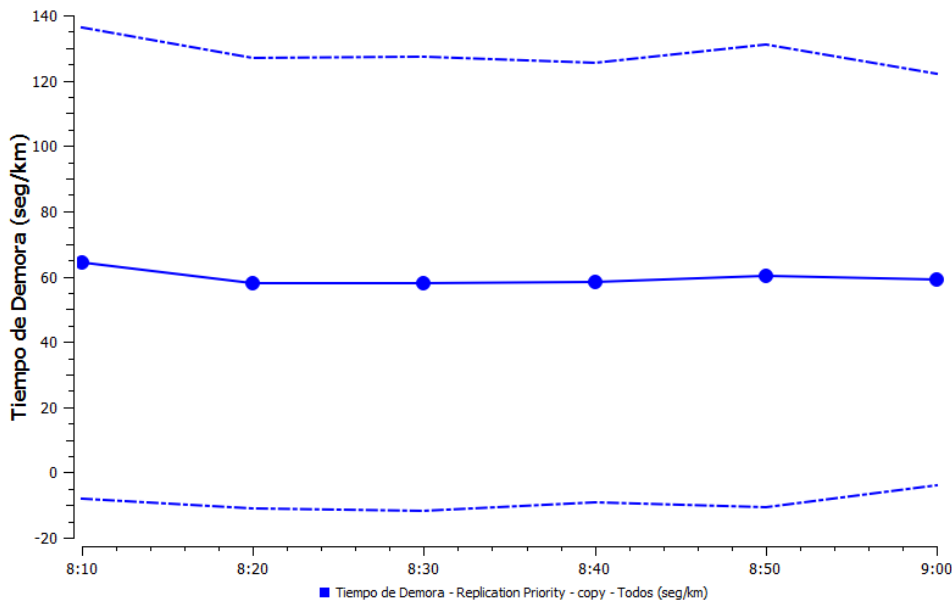


Figura 37. Tiempo de demora en modelo real.

En el modelo real, el tiempo de demora por congestión asciende a 60-65 segundos.

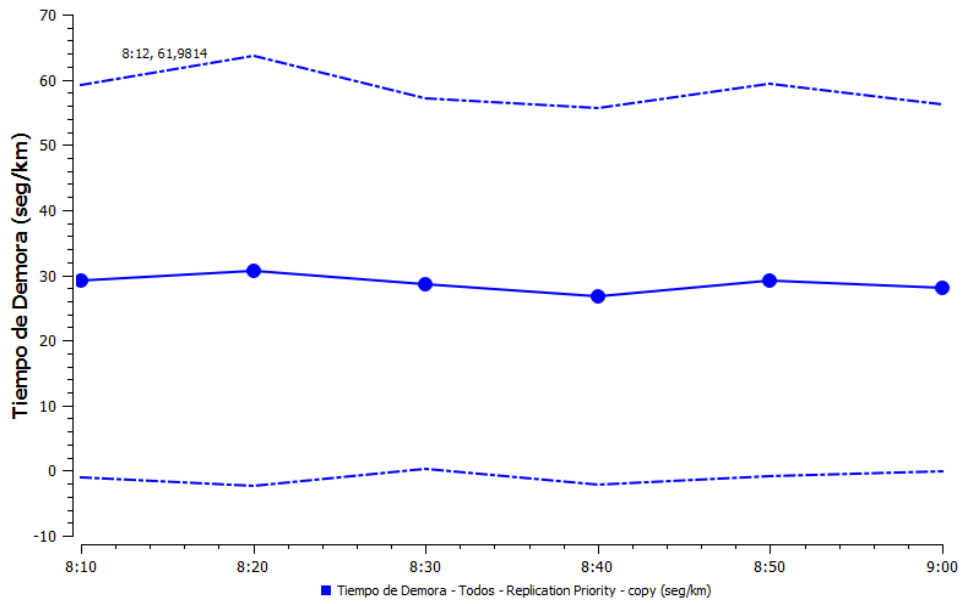


Figura 38. Tiempo de demora en modelo vehículo conectado para tiempo de reacción 0,3.

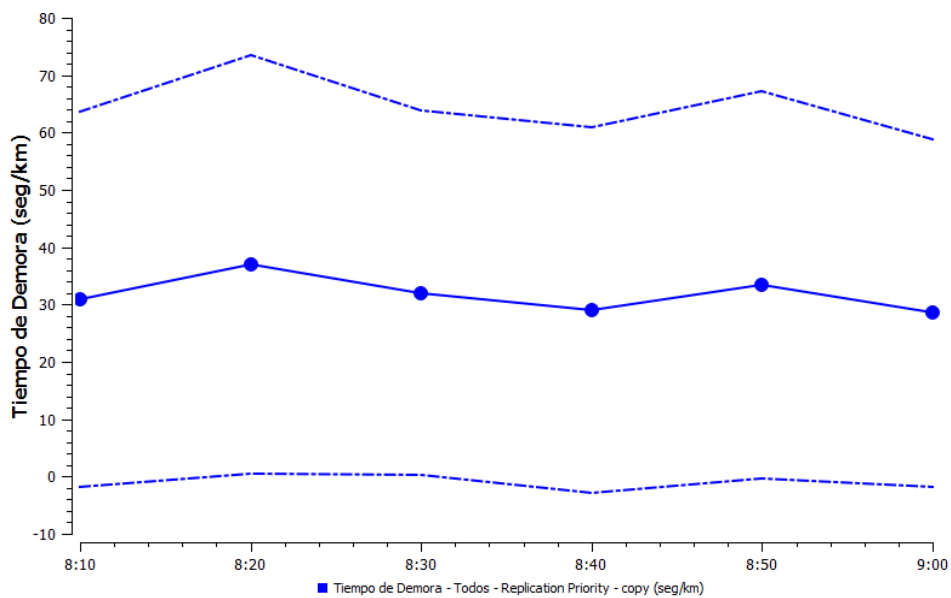


Figura 39. Tiempo de demora en modelo vehículo conectado para tiempo de reacción 0,1.

En el modelo de vehículo urbanos, para tiempos de reacción de 0,3 segundos tenemos un tiempo de demora de 30-36 segundos. Y para tiempo de reacción de 0,1 segundos lo tenemos de 28-32 segundos.

Los resultados nos dicen que el modelo actual, pierde el doble de tiempo en demoras por congestión en llegar a su destino que el modelo de vehículos



autónomos. Además, también tenemos mejora a medida que mejoramos el tiempo de reacción.

#### 4.7.5. Tiempo de viaje

El último factor que analizaremos es el tiempo de viaje medio por kilómetro. El problema es que ningún tramo de origen/destino, cumple el kilómetro de distancia, Por eso el equivalente de esta gráfica, sería la media del trayecto final de los vehículos en el circuito presentado.

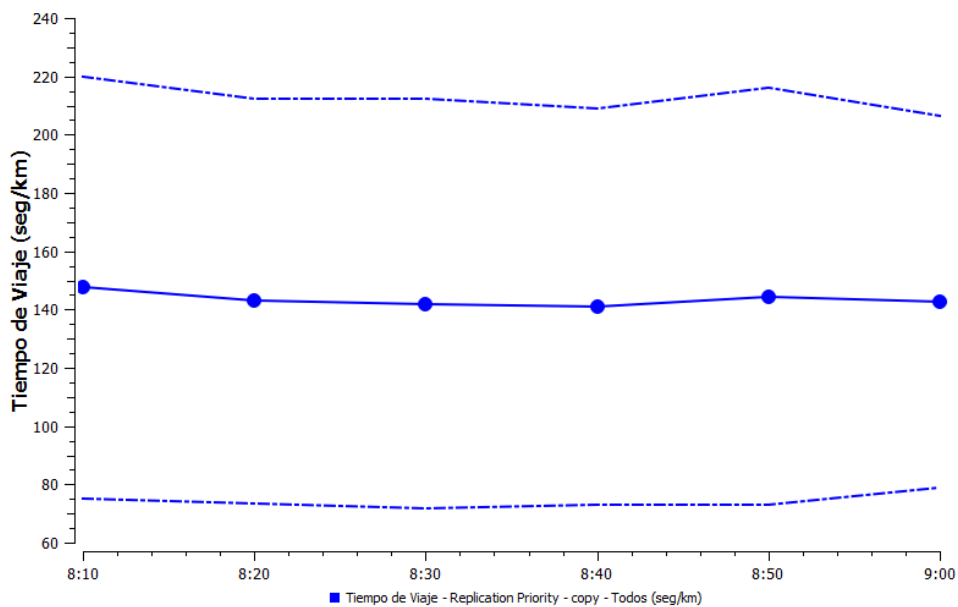


Figura 40. Tiempo de viaje en modelo real.

En el modelo real, tenemos un tiempo de viaje total de los vehículos en llegar a su destino de 145-150 segundos.

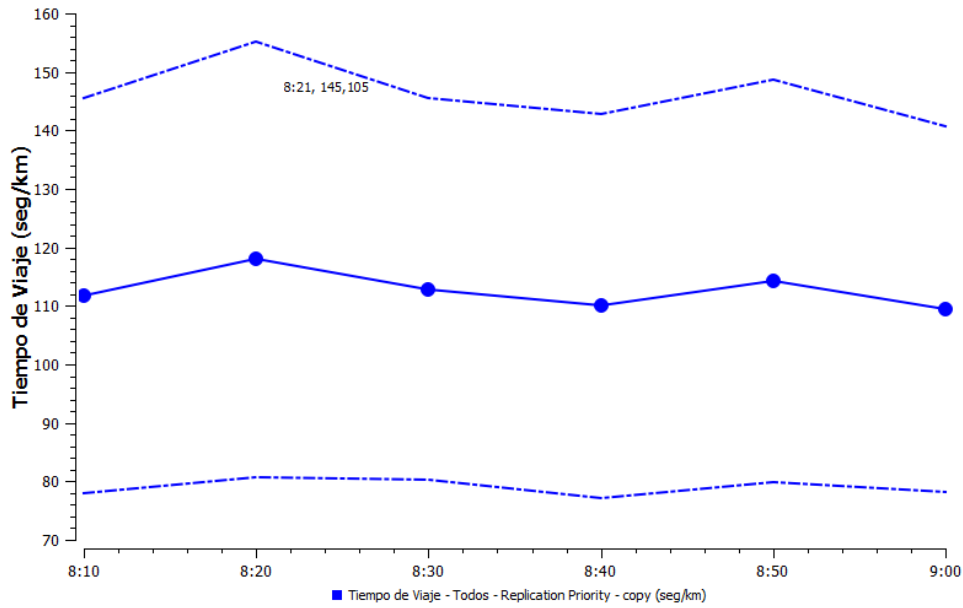


Figura 41. Tiempo de viaje en modelo vehículo conectado para tiempo de reacción 0,3.

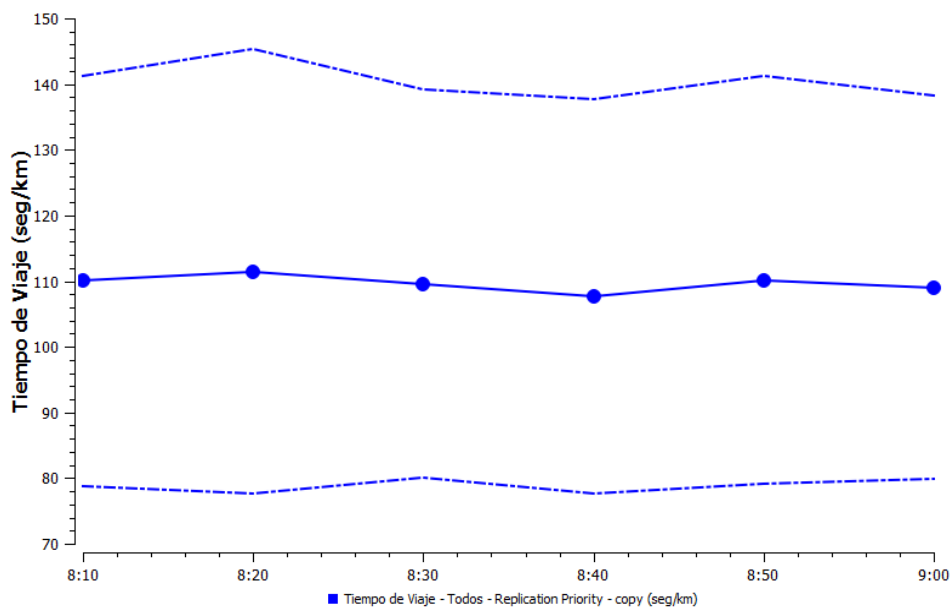


Figura 42. Tiempo de viaje en modelo vehículo conectado para tiempo de reacción 0,1.

En el modelo de vehículos conectados, el tiempo total de viaje asciende a 112-118 para 0,3 y 109-112 para 0,1.

Se reduce 30 segundos del modelo actual. Teniendo en cuenta que tenemos el mismo flujo, y el mismo entorno con los mismo semáforos y cruces. En un circuito pequeño como el que estamos midiendo de un barrio, ya podemos mejorar la circulación final en 30 segundos.

#### 4.7.6. Flujo a través del cambio de distancia de seguridad y velocidad

El siguiente punto que se quiere medir es la relación que tiene la distancia de seguridad con el aumento de fluidez con los datos que se han calculado en el apartado anterior.

Se tendrá en cuenta que tenemos que medir distancias urbanas, por ello mediremos a velocidades de 30 Km/h, 45 Km/h y 60 Km/h. Se medirá para los dos tiempos de reacción

**Tiempo de reacción: 0.1 segundos.**

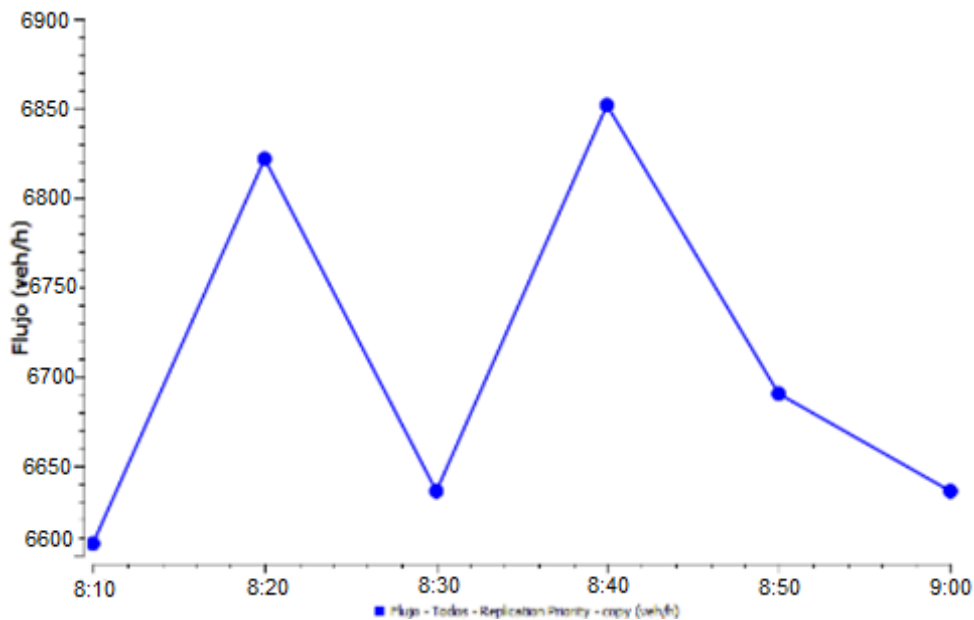


Figura 43. Flujo a 30 Km/h.

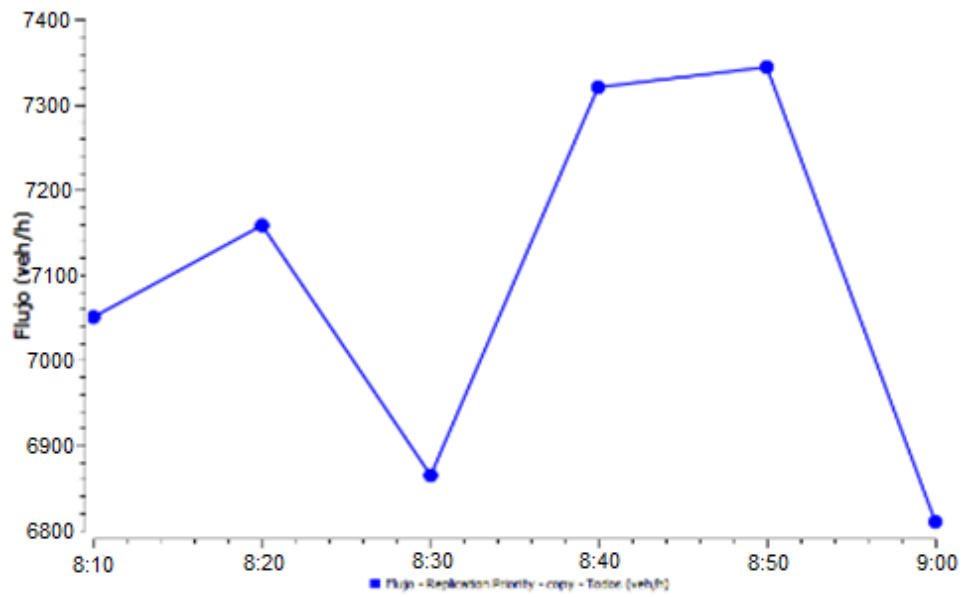


Figura 44. Flujo a 45 Km/h.

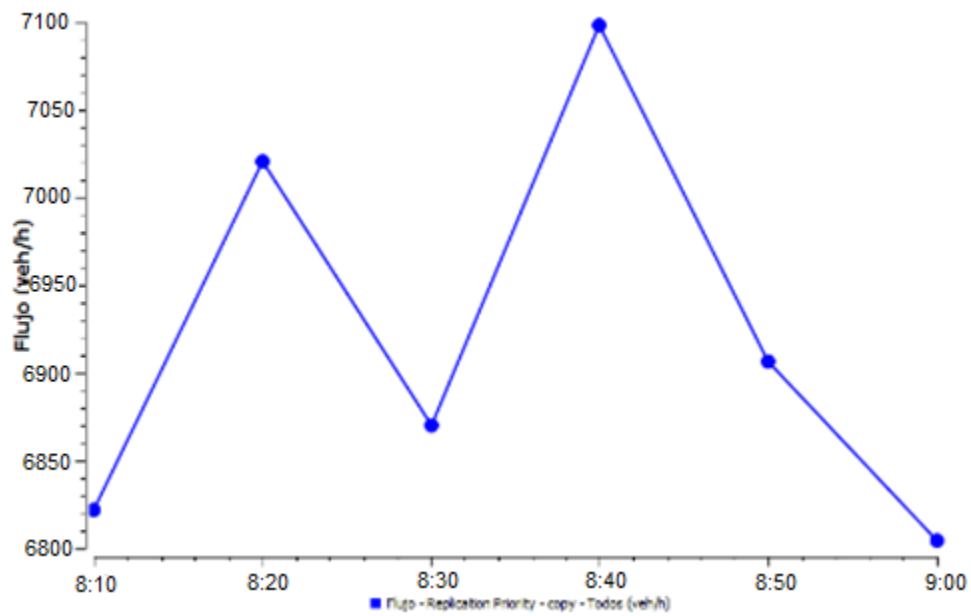


Figura 45. Flujo a 60 Km/h.

**Tiempo de reacción: 0.3 segundos.**

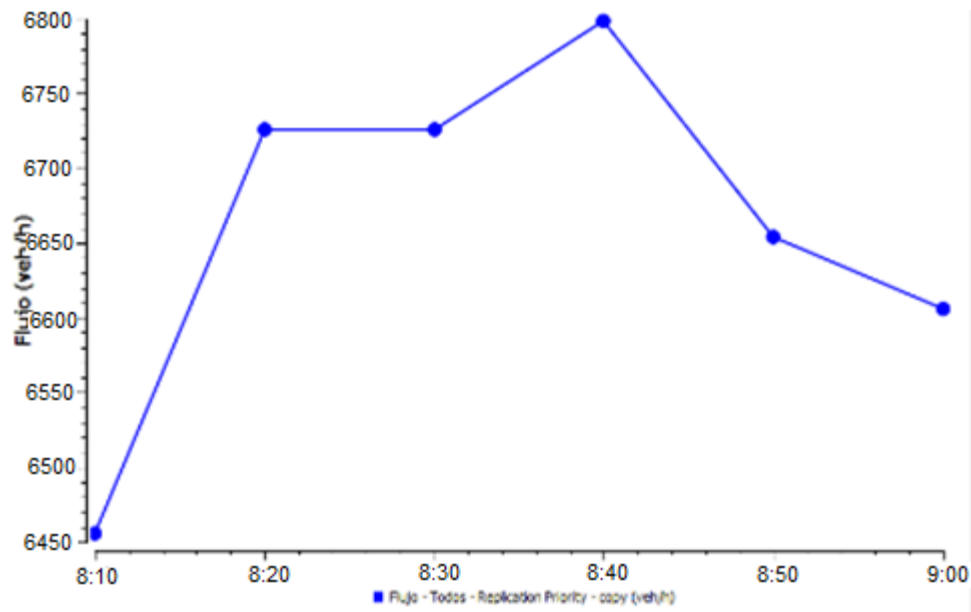


Figura 46. Flujo a 30 Km/h.

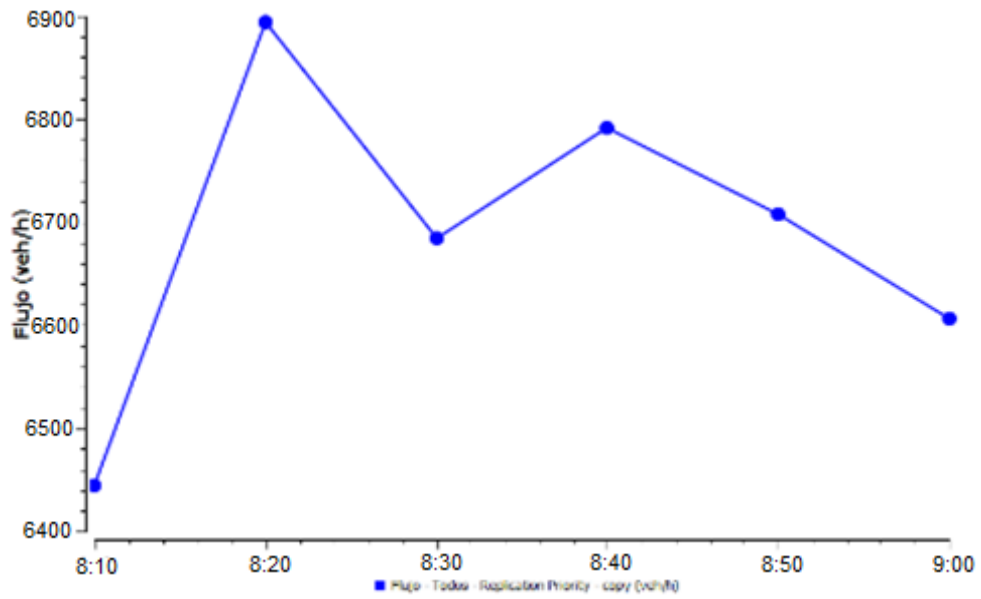


Figura 47. Flujo a 45 Km/h.

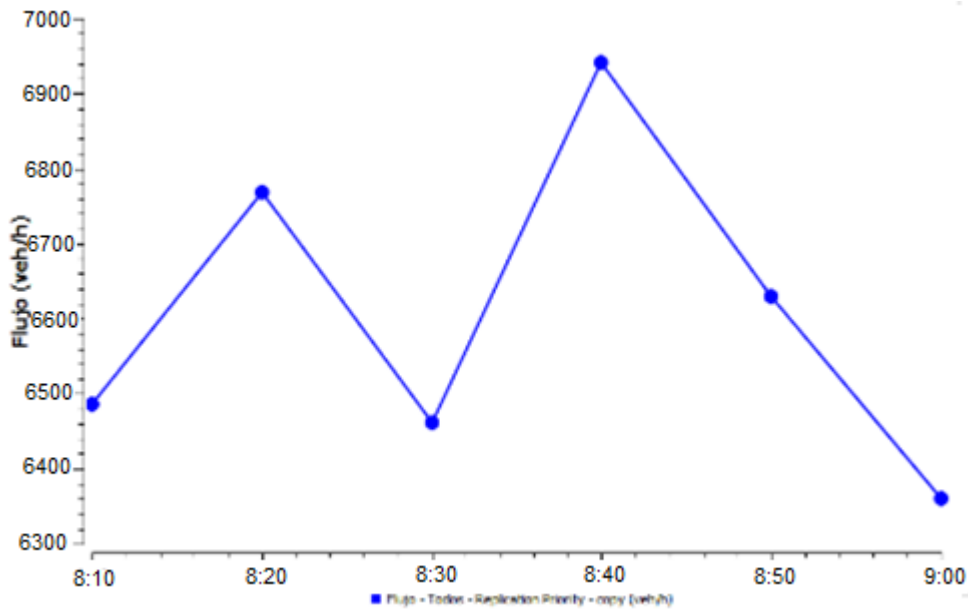


Figura 48. Flujo a 60 Km/h.

Como se puede observar, en los dos casos a medida que aumentamos la velocidad, tenemos mejor densidad en el circuito, es decir, circulan más circuitos a lo largo de la hora. Esto se debe a que los vehículos aceleran y frenan más rápido, además de que hay menos distancia entre ellos por lo que hay más capacidad de coches por sección.

#### 4.7.7. Flujo a través del cambio de distancia de seguridad

Para finalizar, se estudiará cómo afectaría el cambio de distancia de seguridad en una misma velocidad. Para ello se utilizará la velocidad tipo que hemos utilizado para definir el modelo urbano, 45 Km/h.

Las distancias de seguridad, que se emplearán serán de 1, 3 y 5 metros.

**Distancia de seguridad: 1 metro.**

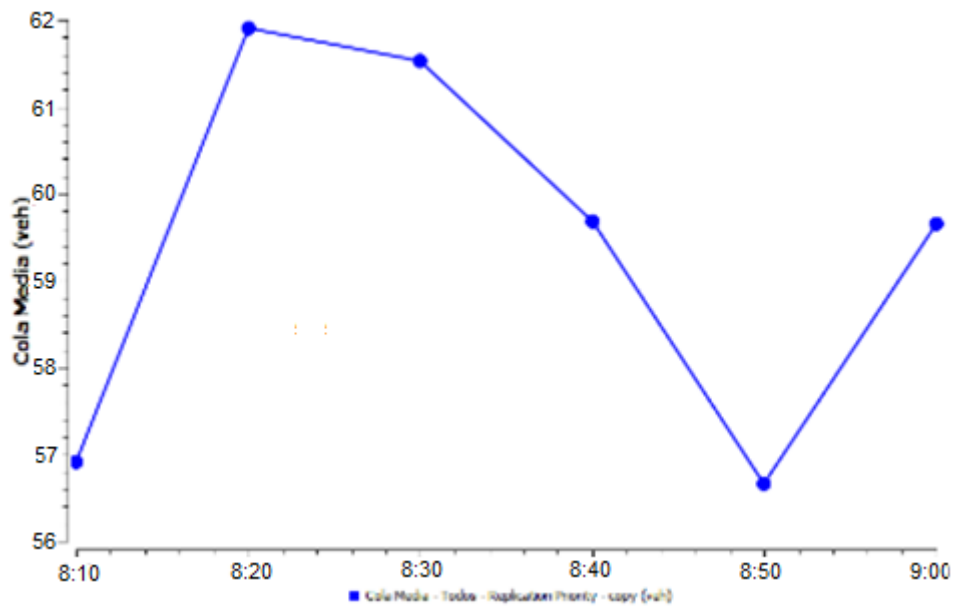


Figura 49. Cola media con distancia de seguridad 1 metro.

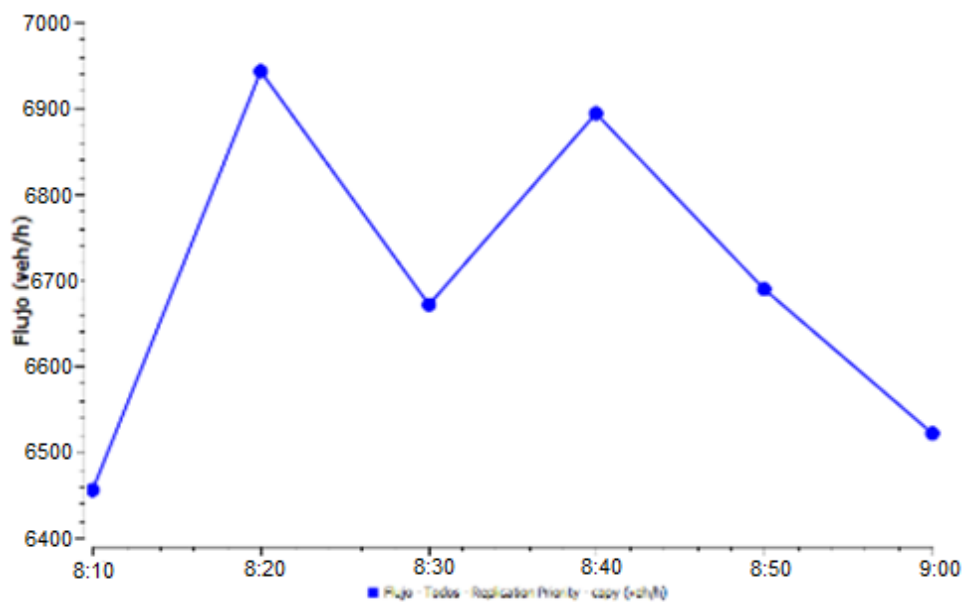


Figura 50. Flujo con distancia de seguridad 1 metro.

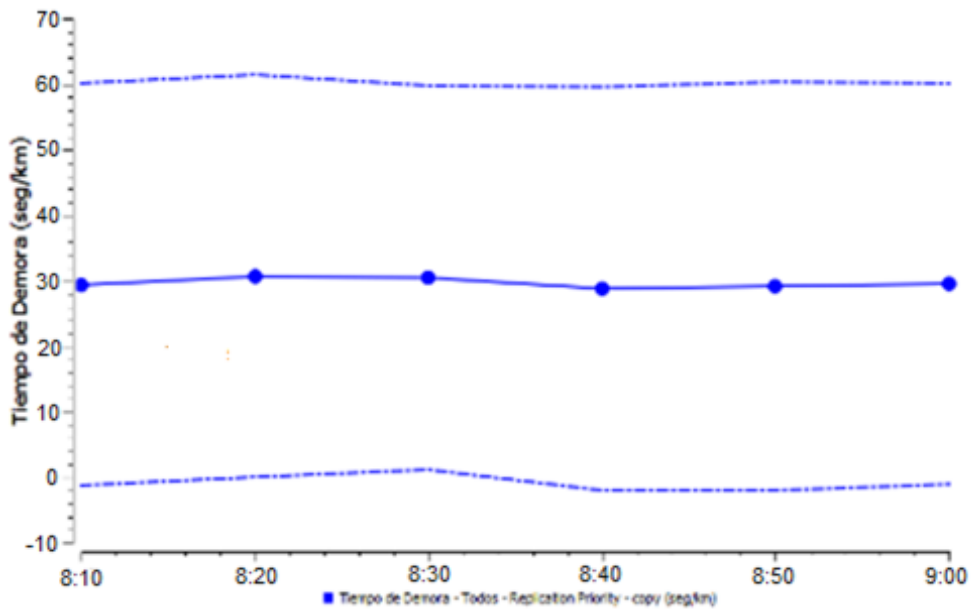


Figura 51. Estudio Tiempo de Demora para distancia de seguridad de 1 metro.

**Distancia de seguridad: 3 metros.**

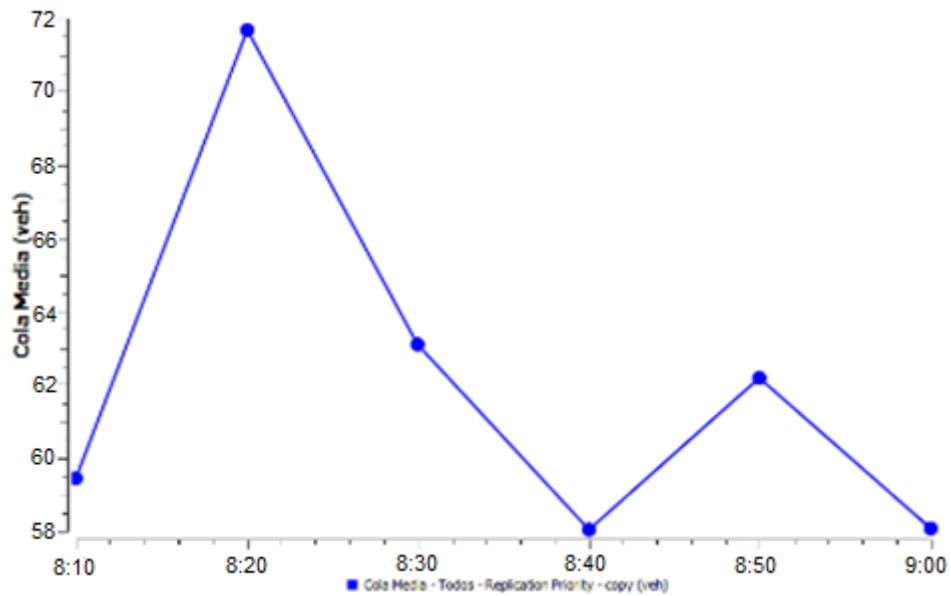


Figura 52. Cola media con distancia de seguridad 3 metro.



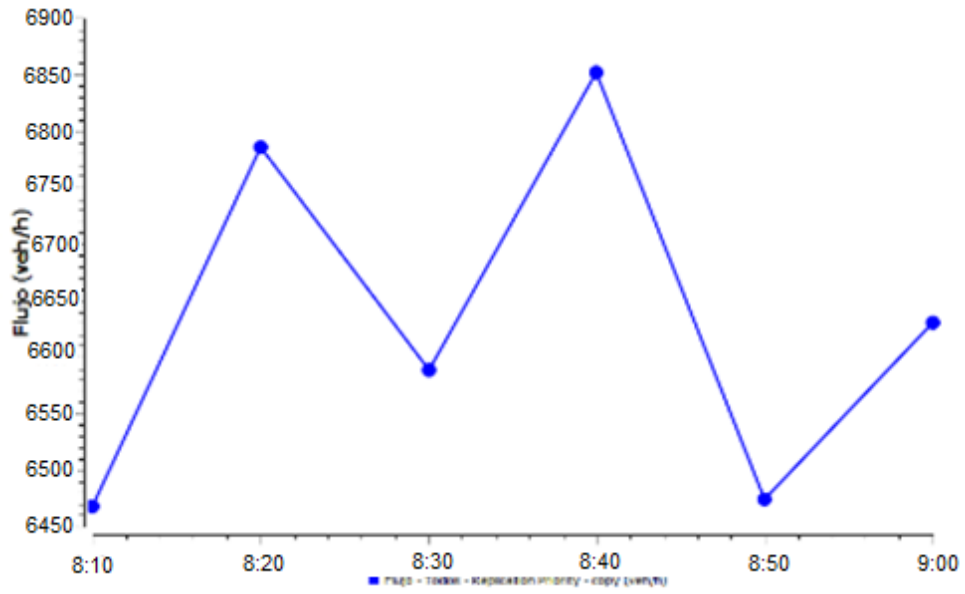


Figura 53. Flujo con distancia de seguridad 3 metro.

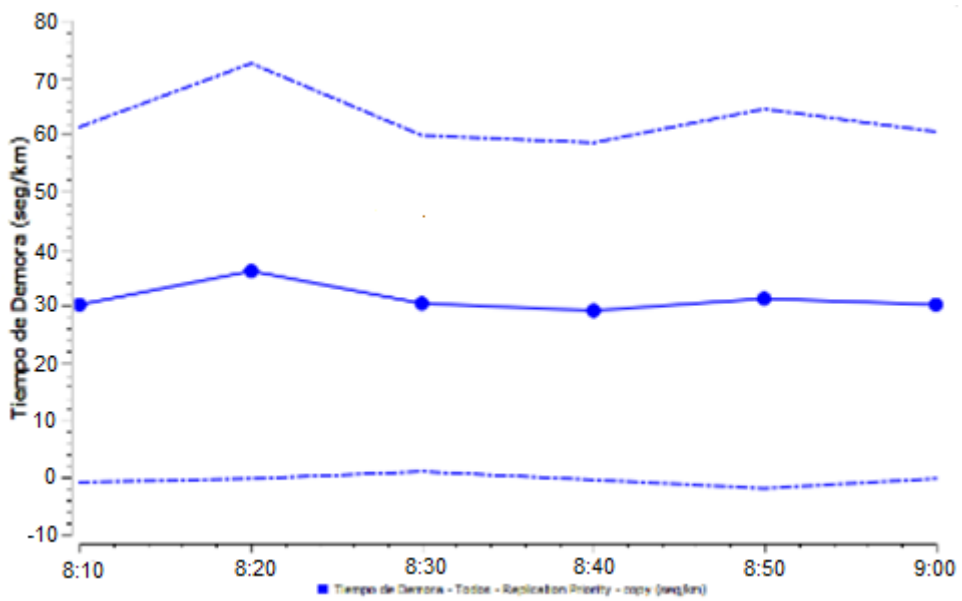


Figura 54. Estudio Tiempo de Demora para distancia de seguridad de 3 metro.

**Distancia de seguridad: 5 metros.**

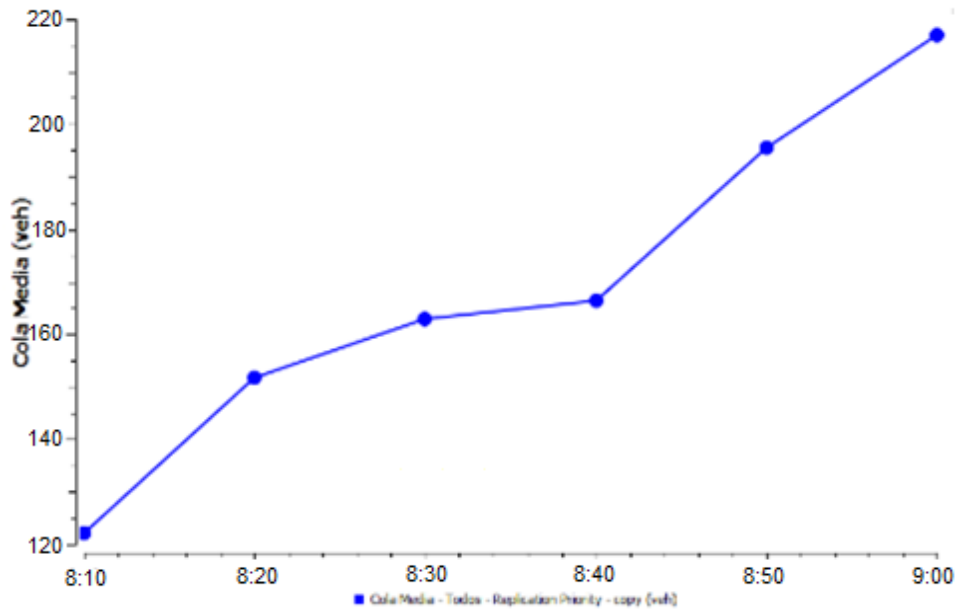


Figura 55. Cola media con distancia de seguridad 5 metro.

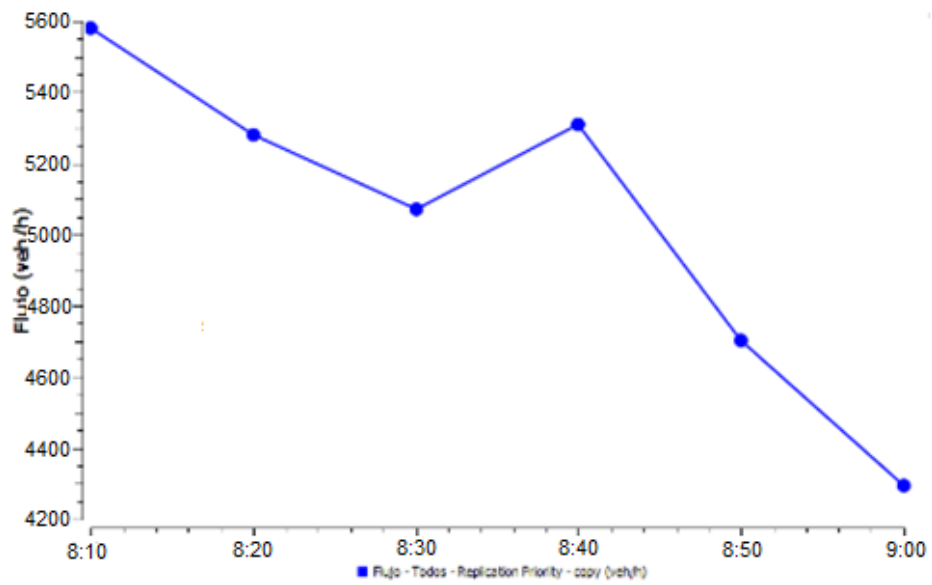


Figura 56. Flujo con distancia de seguridad 5 metro.

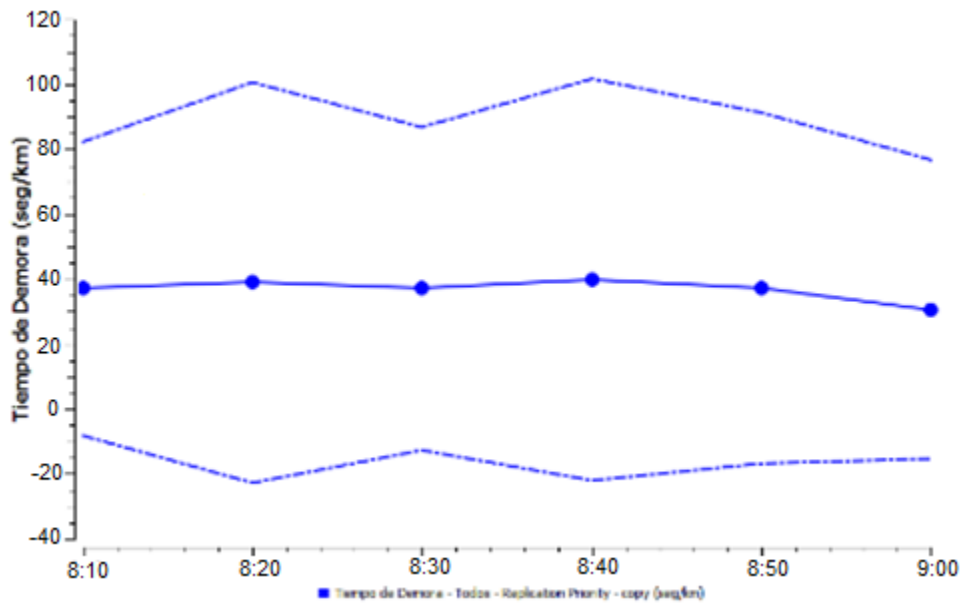


Figura 57. Estudio Tiempo de Demora para distancia de seguridad de 5 metro.

Los resultados que se pueden observar son que a medida que aumentamos la distancia de seguridad, tenemos más cola media de coches lo que provoca que el flujo baje en el circuito, por otro lado cada 2 metros que aumentamos la distancia de seguridad, el tiempo total del viaje de los vehículos aumenta unos 5 segundos.

## 5. Conclusión.

Una vez realizada las diferentes simulaciones podemos extraer las siguientes conclusiones del proyecto realizado:

- La densidad de tráfico en las ciudades ha ido aumentando en los últimos años. Algunos factores como los ciclos económicos y las subidas de precio de los carburantes han sido los causantes de variaciones significativas en la densidad de tráfico, pero por lo general la densidad sube cada vez más, y los cambios en infraestructuras con finalidad de mejorar esta situación no han conseguido estabilizar esta situación.
- El vehículo conectado aún es una idea que está en progreso. Ya hay experimentaciones positivas. Le han conseguido circular con vehículos autónomos sin soporte humano. El principal problema viene dado por la parte legislativa, y puede ser la principal causa del retraso en introducir al público.
- La mejora del tiempo de reacción de los vehículos autónomos que conseguiríamos con la tecnología actual permitirá mejorar de manera significativa el tiempo de reacción de los humanos. Esto permitirá mejorar la distancia de seguridad entre vehículos de manera importante.
- Una vez realizado la simulación de los modelos de tráfico, se ha constatado que con un modelo de vehículos conectados se reducirá en más de un 50 % la densidad de tráfico, y con ello el tiempo de viaje necesario un 25% cada kilómetro.

## **Siglas.**

OPEP- Organización de Países Árabes Exportadores de Petróleo.

GPS - Global Positioning System.

IMU - Inertial Measurement Unit.

LiDAR - Light Detection and Ranging or Laser Imaging Detection and Ranging.

ABS - Anti-Lock Braking System.

DGT - Dirección General de Tráfico.

AIMSUN - Advanced Interactive Microscopic Simulator for Urban and Nonurban Networks.

LIOS - Simulation and Operations Research Laboratory.

UPC - Universidad Politécnica de Cataluña.

GIS - Sistema de Información Geográfica.

PCU - Passenger Car Equivalent.

## Referencias

- [1] Owen, W.; The cities in the motor age
- [2] <https://www.eia.gov/>
- [3] [https://www.tomtom.com/en\\_gb/trafficindex/](https://www.tomtom.com/en_gb/trafficindex/)
- [4] <https://www.dot.ny.gov/divisions/engineering/technical-services/highway-data-services>
- [5] <https://data.london.gov.uk/dataset/traffic-flows-borough>
- [6] <http://www.bcn.cat/estadistica/castella/dades/anuaris/index.htm>
- [7] <http://www.idealauto.com>, Analisis del mercado VO
- [8] <https://www.nhtsa.gov/technology-innovation/automated-vehicles-safety>
- [9] Shaoshan Liu, Liyun Li, Jie Tang, Shuang Wu, and Jean-Luc Gaudiot; Creating Autonomous Vehicle Systems
- [10] <https://www.mirror.co.uk/news/technology-science/technology/delphi-driverless-car-completes3400-mile-road-5466306>
- [11] <https://waymo.com/>
- [12] <https://www.theverge.com/2017/9/6/16259170/self-drive-act-autonomous-cars-legislation>
- [13] <https://www.techrepublic.com/article/autonomous-driving-levels-0-to-5-understanding-the-differences/>
- [14] <https://www.seguridad-vial.net/conduccion/reglas-circulacion/66-distancia-de-seguridad>
- [15] <https://es.mathworks.com/help/simulink/examples/modeling-an-anti-lock-braking-system.html?requestedDomain=true>
- [16] <https://www.aimsun.com/>
- [17] <http://www.baixbus.cat/ca>