



**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE  
TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

**Red de semáforos  
inteligentes para la  
reducción de partículas  
contaminantes y mejoras de  
tiempos de tránsito.**

Autor: Lawrence Javier Minguillán Van Kapel

Director: Atilano Fernández-Pacheco Sánchez-Migallón

Madrid



Declaro, bajo mi responsabilidad, que el Proyecto presentado con el título  
Red de semáforos inteligentes para la reducción de partículas contaminantes y mejoras de  
tiempos de tránsito, en la ETS de Ingeniería - ICAI de la Universidad Pontificia Comillas  
en el

curso académico 2021/22 es de mi autoría, original e inédito y

no ha sido presentado con anterioridad a otros efectos.

El Proyecto no es plagio de otro, ni total ni parcialmente y la información que ha sido

tomada de otros documentos está debidamente referenciada.



Fdo.: Lawrence Javier Minguillán Van Kapel. Fecha: 04 / 06 / 2022

Autorizada la entrega del proyecto

**EL DIRECTOR DEL PROYECTO**

Fdo.: Atilano Fernández-Pacheco Sánchez-Migallón. Fecha: 04 / 06 / 2022





**COMILLAS**  
UNIVERSIDAD PONTIFICIA

ICAI

GRADO EN INGENIERÍA EN TECNOLOGÍAS DE  
TELECOMUNICACIÓN

TRABAJO FIN DE GRADO

**Red de semáforos  
inteligentes para la  
reducción de partículas  
contaminantes y mejoras de  
tiempos de tránsito.**

Autor: Lawrence Javier Minguillán Van Kapel

Director: Atilano Fernández-Pacheco Sánchez-Migallón

Madrid



## *Agradecimientos*

Agradecer a mi director de trabajo de fin de grado Atilano Fernández-Pacheco Sánchez-Migallón por la dedicación, motivación e interés que ha tenido con el desarrollo del proyecto y su gran criterio de toma de decisiones en puntos de inflexión.

A los profesores de la universidad que me han ayudado en momentos de duda en aspectos decisivos para el desarrollo del trabajo.

A mis compañeros de grado por proporcionarme diferentes puntos de vista, motivación y ambición.

A mis amigos por su apoyo y paciencia.

Y a mi familia, a quienes dedico mi trabajo realizado. A mi padre por ser la persona que me motiva para seguir mejorando y avanzando. A mi madre por ser mi guía y estar siempre dispuesta a ayudarme a navegar entre todas mis decisiones. A mi hermana mayor por compartir conmigo su interés en el mundo y entusiasmo. Y a mi hermana pequeña por enseñarme el valor de la autosuperación y determinación.





# **RED DE SEMÁFOROS INTELIGENTES PARA LA REDUCCIÓN DE PARTÍCULAS CONTAMINANTES Y MEJORAS DE TIEMPOS DE TRÁNSITO.**

**Autor: Minguillán Van Kapel, Lawrence Javier.**

Director: Fernández-Pacheco Sánchez-Migallón, Atilano.

Entidad Colaboradora: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## **RESUMEN DEL PROYECTO**

Sistema de detección del flujo de tráfico basado en simulación, escalable a un entorno real. En función de la densidad de tráfico detectado en los diferentes sentidos de la vía, se toman una serie de decisiones mediante el uso de un algoritmo desarrollado, que permitirá la descongestión del tráfico. Consecuentemente esta descongestión llevará a cambios medioambientales reduciendo las partículas contaminantes producidas por los vehículos, debido a la reducción de tiempo de su uso. Esto se consigue a través de un sistema que mediante el procesamiento de un vídeo de tráfico de una intersección, determina en qué sentido se están dirigiendo los automóviles y en función del flujo de tráfico, ejecuta unas instrucciones predefinidas que se envían a los semáforos.

**Palabras clave:** desarrollo urbanístico, descongestión, eficaz, retroalimentación, etapas.

### **1. Introducción**

El sistema desarrollado de red de semáforos cuyo objetivo es la descongestión de tráfico mediante la mejora de tiempos de tránsitos para poder reducir partículas contaminantes para un desarrollo sostenible de nuevas áreas de desarrollo urbanístico.

El problema que se plantea es la gran congestión de automóviles en las vías y la poca eficiencia de los sistemas actuales para su descongestión.

En ámbito global, lo que se busca con este trabajo es desarrollar un sistema que consiga la reducción de tiempos de tránsito y a la vez su descongestión, implantado un algoritmo para un control de los semáforos de manera dinámica, basándose en el entorno de una intersección de la vía.

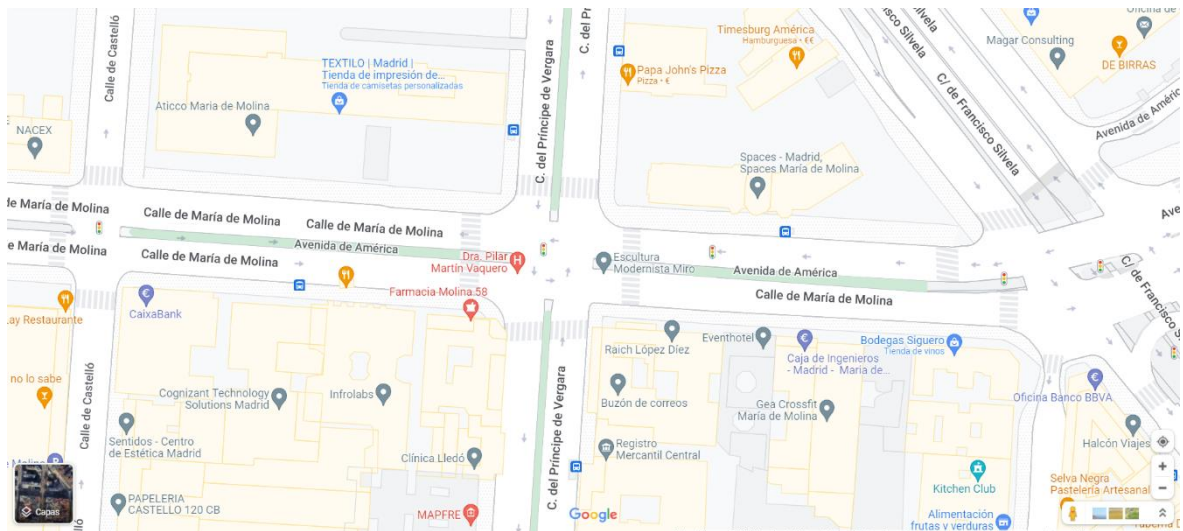
### **2. Definición del proyecto**

Esta solución toma un enfoque distinto al de la mayoría de los proyectos que intentan realizar una función similar de descongestión. El inconveniente de los sistemas que

actualmente existen es que se basan en la redirección de tráfico pudiendo causar nodos de congestión en otros puntos distintos de la vía, sin realmente afrontar el problema en un punto en particular.

La ventaja que presenta este tipo de sistema es que es completamente objetiva y eficaz. Si los tiempos obtenidos no son los esperados es muy fácil poder introducir nuevos parámetros para mejorar los resultados de la salida. Un posible parámetro para modificar es el tiempo de análisis entre instrucciones. Esto permitirá procesar una mayor o menor cantidad de frames del vídeo en cuestión y de esta manera se obtendrán diferentes posibles instrucciones para los diferentes tiempos.

Para el desarrollo del entorno, en el que se basará el proyecto, se toma como referencia la intersección situada en la calle María de Molina con Príncipe de Vergara (Ilustración 1).



**Ilustración 1. Intersección c/ María de Molina con c/ del Príncipe de Vergara.**

Se han cronometrado, físicamente, los tiempos de los semáforos en esta intersección y se ha estimado que, de media, los semáforos de este nodo pasan 94 segundos en estado verde, en ambas direcciones. Por motivos de procesamiento en la simulación se emplearán 40 segundos en estado verde.

### **3. Descripción del modelo/sistema/herramienta**

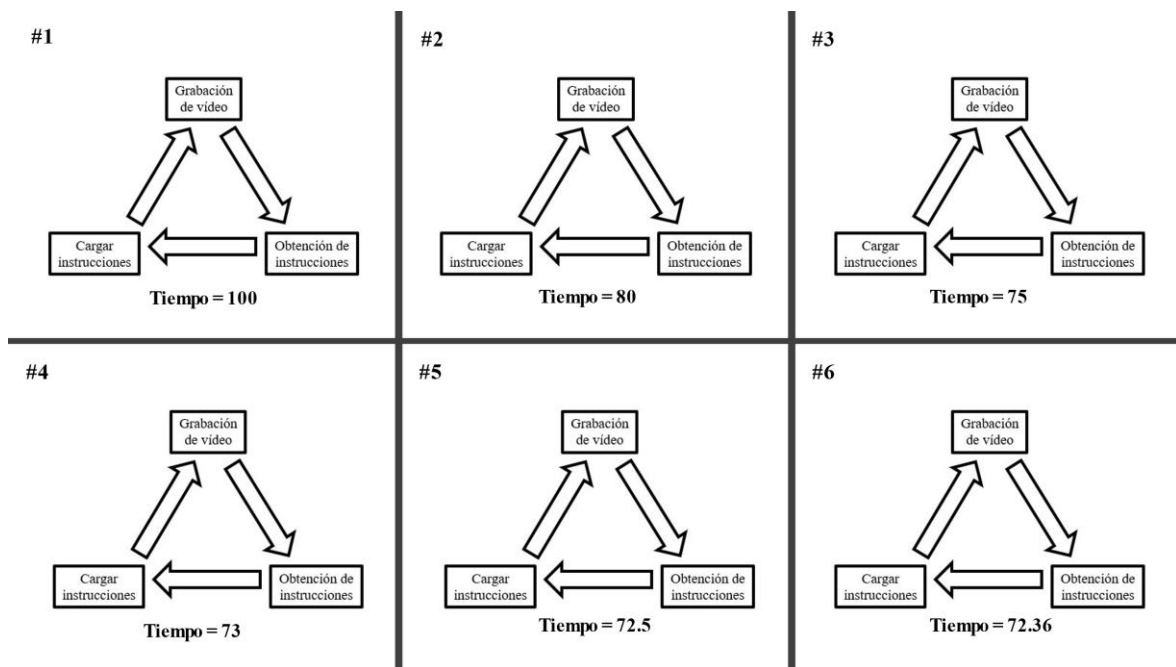
El sistema que se plantea está compuesto por diversos módulos. Entre estos podemos encontrar los módulos de: detección de coches, identificación y *tracking*, asignación

vectorial en función de direcciones y conexión entre servidor (simulador Aimsun) y cliente (modulo externo de scripts).

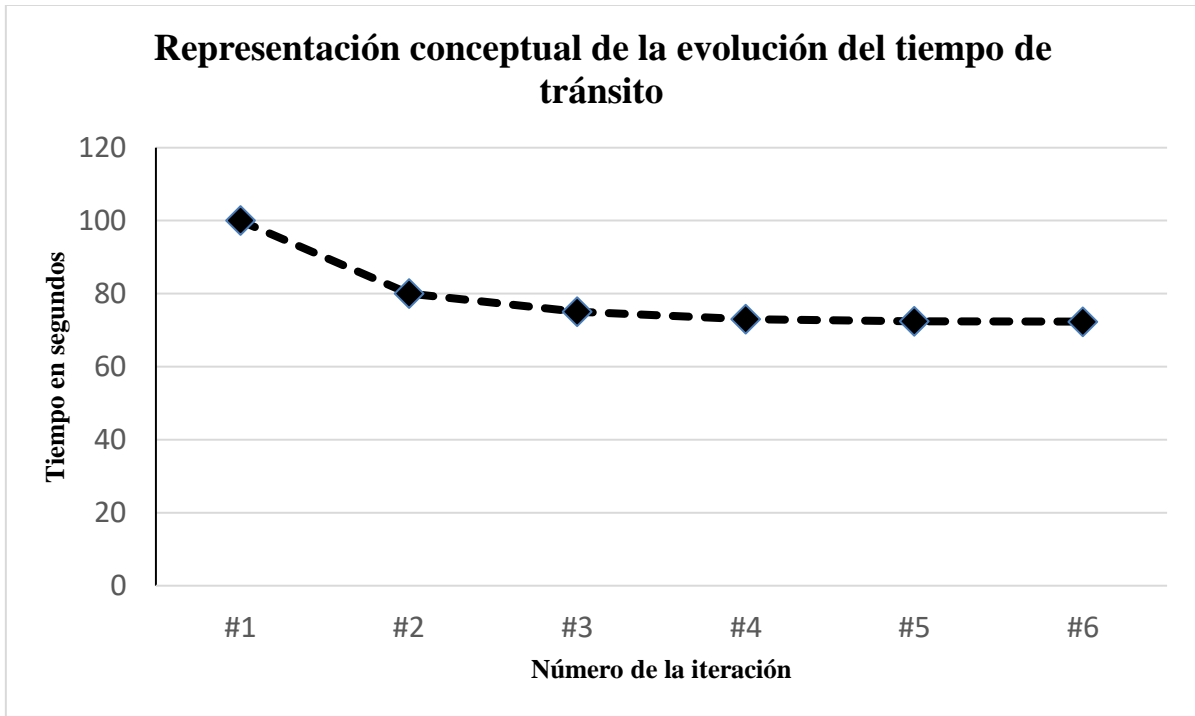
El funcionamiento del sistema planteado se basa en un modelo de retroalimentación que toma como entrada la simulación de la etapa anterior con nuevas instrucciones semafóricas que permitirán la reducción de tiempos de tránsito.

El sistema está formado por diferentes etapas. La primera etapa consta en la obtención del video de la simulación. En la siguiente etapa, se realiza el procesamiento de las imágenes y determinación de las instrucciones. En la etapa final se cargan las instrucciones que se han obtenido al simulador, para poder efectuar el proceso una vez más.

El objetivo que se quiere alcanzar con la reiteración de estas tres etapas es poder reducir con cada bucle el tiempo de tránsito de los coches (Ilustración 2 y Gráfica1).



***Ilustración 2. Representación conceptual del objetivo del proyecto.***

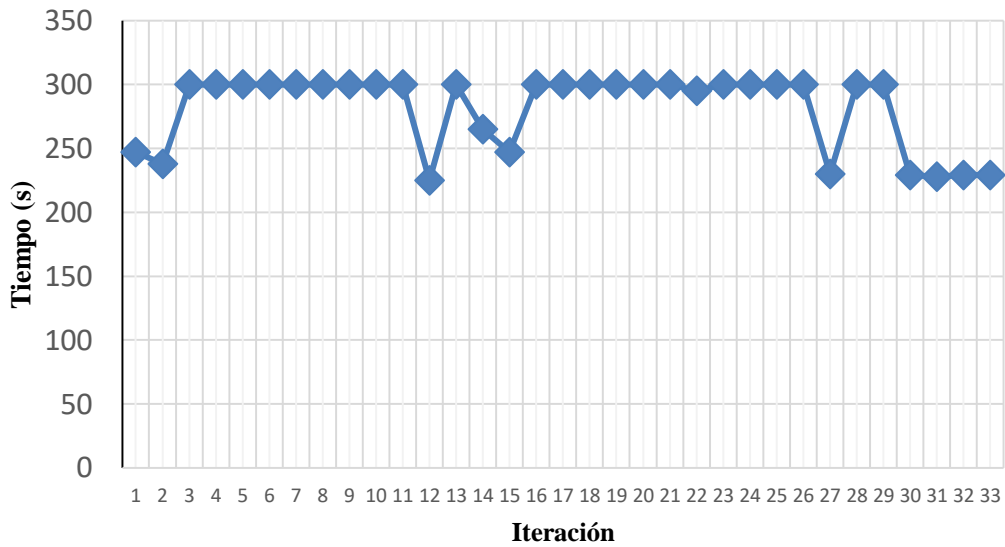


*Gráfica 1. Representación conceptual de la evolución del tiempo de tránsito.*

#### 4. Resultados

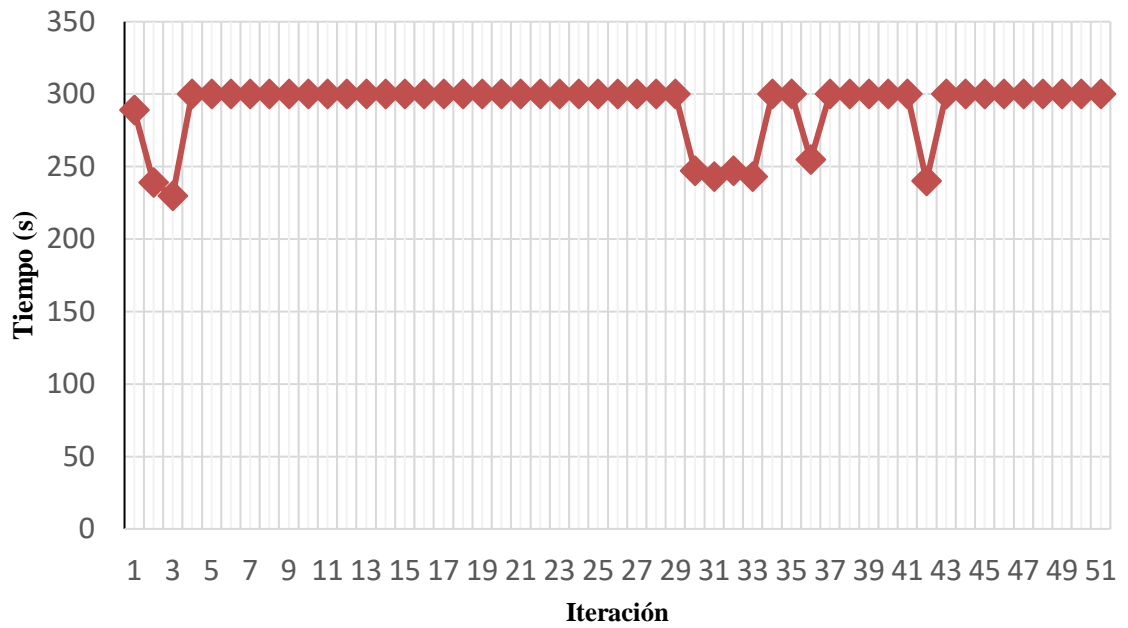
A continuación, se muestran en las gráficas 2, 3, 4 y 5; y las tablas 1, 2, 3 y 4 los resultados obtenidos de la simulación y estudio del presente trabajo.

#### **Evolución temporal de modelo de alta densidad y 20 segundos entre instrucción.**



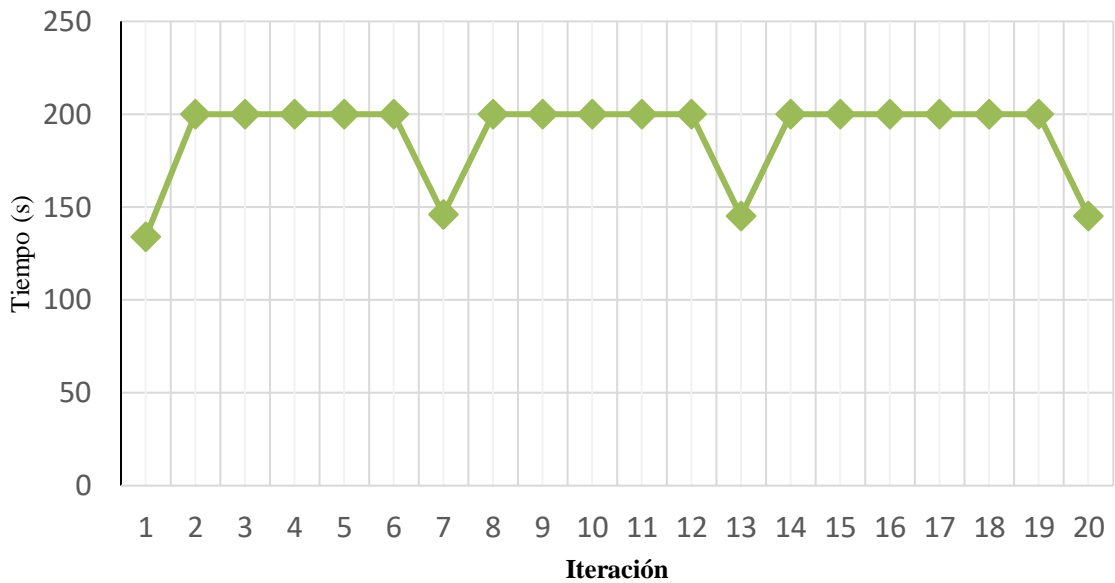
*Gráfica 2. Evolución temporal de modelo de alta densidad y 20 segundos entre instrucción.*

**Evolución temporal de modelo de alta densidad y 10 segundos entre instrucción.**



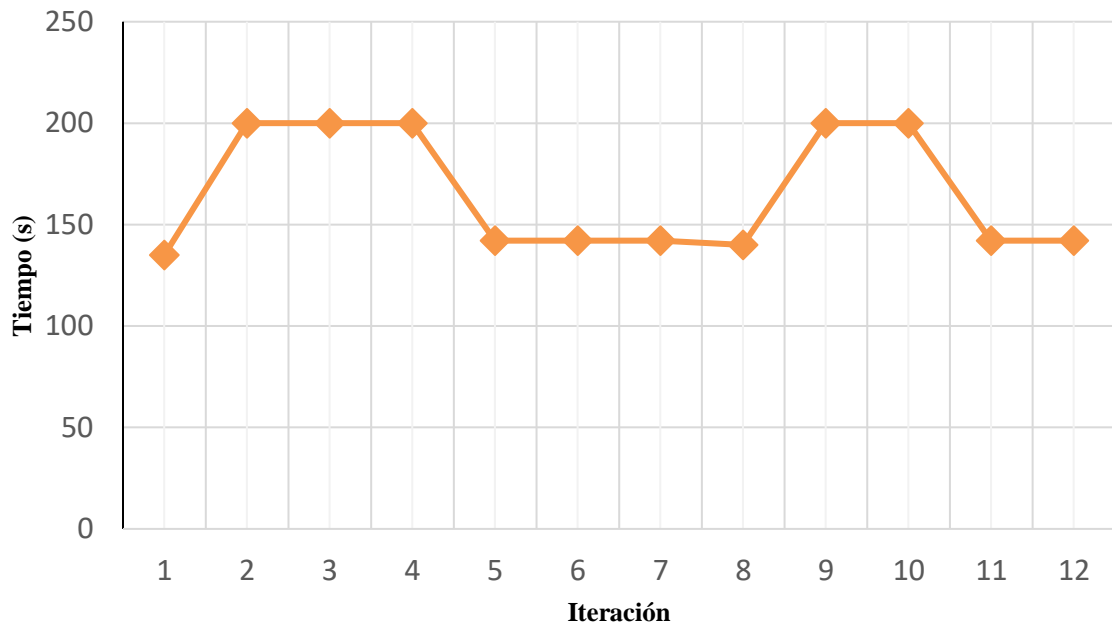
*Gráfica 3. Evolución temporal de modelo de alta densidad y 10 segundos entre instrucción.*

**Evolución temporal de modelo de baja densidad y 10 segundos entre instrucción.**



*Gráfica 4. Evolución temporal de modelo de baja densidad y 10 segundos entre instrucción.*

**Evolución temporal de modelo de baja densidad y 20 segundos entre instrucción.**



*Gráfica 5. Evolución temporal de modelo de baja densidad y 20 segundos entre instrucción.*

Eficiencia en resultados dinámicos			
		Densidad	
		Alta	Baja
Tiempo	10	17.3	-
	20	3.6	-

*Tabla 1. Eficiencia obtenida de la segunda iteración..*

Eficiencia en resultados retroalimentados			
		Densidad	
		Alta	Baja
Tiempo	10	Indeterminado (52)	-8.21
	20	7.7	-5.18

*Tabla 2. Eficiencia obtenida del estado de reposo.*

Modelo de alta densidad		
Sistema dinámico		Sistema retroalimentado
10	20	20
16.33 Toneladas	2.91 Toneladas	6.22 Toneladas

*Tabla 3. Reducción en Toneladas de CO2.*

Modelo de baja densidad	
Sistema retroalimentado	
10	20
-3.5 Toneladas	-2.1 Toneladas

*Tabla 4. Reducción en Toneladas de CO2.*

Con las ecuaciones 29, 30 y 31 del proyecto se muestra un **5.08%** de ahorro en emisiones de CO2 (véase en [Índice de ecuaciones](#), página IX).

## 5. Conclusiones

La primera conclusión que se puede obtener de este desarrollo es que se observan mejoras en la gestión del tráfico, a nivel temporal, con tan solo una iteración del sistema en un modelo de alta densidad, correspondiente con un sistema de gestión dinámica. Estas mejoras en eficiencia se pueden observar en la columna “Alta” de la Tabla 1.

La siguiente conclusión que se puede obtener es que los resultados recursivos (Tabla 2) no presentan ventajas frente a los resultados dinámicos (Tabla 1) con excepción del modelo de alta densidad y 20 segundos entre instrucciones, ni presentan ventajas frente a un sistema convencional.

La tercera conclusión obtenida, relacionada con los modelos de alta densidad, establece que es mejor implementar un sistema dinámico de 10 segundos entre instrucciones frente a cualquier otro, debido a que el modelo remarcado consigue la mayor reducción de gases en 16.3 Toneladas. Este resultado se puede apreciar en la Tabla 3.

La cuarta conclusión que se puede extraer de este proyecto es que, para modelos con baja densidad, tanto si son en la segunda iteración, como si son en búsqueda del régimen

estacionario, no presentan ventajas frente a un sistema convencional con el algoritmo establecido.

Finalmente, la última conclusión que se puede obtener es que, la mejor implementación del sistema, tal cual se encuentra, sería un sistema híbrido que permite actuar de manera dinámica, basándonos en las segundas iteraciones, en entornos de alta densidad tomando instrucciones cada 10 segundos y permite actuar de manera estándar en entornos de baja densidad. Esta conclusión se ha obtenido comparando las tablas 1 y 2. La Tabla 3 se ha usado para obtener el mejor caso, en el que se ahorran 16.33 Toneladas de CO<sub>2</sub>.

Al implementar un sistema híbrido, como el planteado en la anterior conclusión, podemos obtener una reducción de emisiones de un **5.08%** de CO<sub>2</sub> por día en la ciudad de Madrid.

## 6. Referencias

- [1] “GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM TRANSPORT IN THE EU, BY TRANSPORT MODE AND SCENARIO”, European environment agency, 2018, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-greenhouse-gases-7/assessment>
- [2] Gutiérrez-Domènech, M.. “¿CUÁNTO CUESTA IR AL TRABAJO? EL COSTE EN TIEMPO Y EN DINERO”, Caixabankresearch.com, 2008. [https://www.caixabankresearch.com/sites/default/files/content/file/2016/09/de11\\_esp.pdf](https://www.caixabankresearch.com/sites/default/files/content/file/2016/09/de11_esp.pdf)
- [3] “CONSUMO Y EMISIONES DE CO<sub>2</sub>”, Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía, 2014. <https://coches.idae.es/consumo-de-carburante-y-emisiones>
- [4] Orús, A, “EVOLUCIÓN ANUAL DEL NÚMERO DE AUTOMÓVILES MATRICULADOS EN LA COMUNIDAD DE MADRID ENTRE 2011 Y 2021”, Statista, 2022. <https://es.statista.com/estadisticas/812484/numero-anual-de-matriculaciones-de-automoviles-comunidad-de-madrid/>
- [5] “EL 48% DE LOS ESPAÑOLES UTILIZA EL COCHE A DIARIO PARA TRABAJAR, SEGÚN EASYPARK”, Europapress, 2017. <https://www.europapress.es/motor/coches-00640/noticia-48-espanoles-utiliza-coche-diario-trabajar-easypark-20170823142811.html>
- [6] Olguin, N, “¿CUÁNTA GASOLINA SE GASTA POR KILÓMETRO?”, el motor el país, 2022. <https://manitec.es/gasolina-auto/un-auto-gasta-8-litros-de-gasolina-cada-100-kilometros/>
- [7] “DIESEL VS GASOLINA EN LOS GASTOS EN COMBUSTIBLE”, Grupo Gil, 2020. <https://www.grupogil.es/actualidad/comparativa-diesel-vs-gasolina-que-es-mejor#:~:text=%C2%BFConsume%20m%C3%A1s%20un%20motor%20gasolina,menos%20que%20uno%20de%20gasolina.>



- [8] Castro Rodríguez, L, REORDENAMIENTO VIAL EN EL SUR DEL CASCO CENTRAL DE SAN JOSÉ: ANÁLISIS DE TRÁNSITO ANTES-DESPUÉS, National Academies, 1998. <https://trid.trb.org/view/965393>
- [9] Woong Shin, S, Hickman, M, “EFFECTIVENESS OF THE KATY FREEWAY HOV-LANE PRICING PROJECT PRELIMINARY ASSESSMENT”, Sage Journals, 1999, [https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.3141/1659-12?casa\\_token=yP-UEyLoSv8AAAAA%3AvYxMvCIwOHJLisCUKXN2KOGGrN8SGiHkhlFA6k4yzJXeyAEsWryDC-x4TcFA7Dpo8EiHH9VgjVNFx&](https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.3141/1659-12?casa_token=yP-UEyLoSv8AAAAA%3AvYxMvCIwOHJLisCUKXN2KOGGrN8SGiHkhlFA6k4yzJXeyAEsWryDC-x4TcFA7Dpo8EiHH9VgjVNFx&)
- [10] W. Wen, “AN INTELLIGENT TRAFFIC MANAGEMENT EXPERT SYSTEM WITH RFID TECHNOLOGY, EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS”, 2010, Science direct, 2010. [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417409008112?casa\\_token=AGPSNCY4YUwAAAAA: MEEAr3o0uL2fYlhQI6FNp7N7TIHJMbs4fjk6hj7UnM0Q2-HVcIbnr2sjNI\\_vpPekA4rmIoh6w](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417409008112?casa_token=AGPSNCY4YUwAAAAA: MEEAr3o0uL2fYlhQI6FNp7N7TIHJMbs4fjk6hj7UnM0Q2-HVcIbnr2sjNI_vpPekA4rmIoh6w)
- [11] Sharif, A., Li, J.P. & Sharif, M.I. “INTERNET OF THINGS NETWORK COGNITION AND TRAFFIC MANAGEMENT SYSTEM”, Springer Link, 2019. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10586-018-1722-1>
- [12] Olivares Gallego, R, “MODELO DE SIMULACIÓN Y PLANIFICACIÓN DE TRÁFICO URBANO MEDIANTE SEMÁFOROS INTELIGENTES Y SUMO”, 2015. [https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/23170/TFG\\_Ricardo\\_Olivares\\_Gallego.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/23170/TFG_Ricardo_Olivares_Gallego.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [13] Monterrey Cañas, A.M. y Sosa Ramírez, C. A., “DISEÑO DE UN SISTEMA DE SEMAFORIZACIÓN INTELIGENTE PARA CONTROLAR FLUJO VEHICULAR A PARTIR DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES”, Institutional Repository Universidad Piloto de Colombia, 2020. <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/9865>
- [14] González Pombo, A., “VARIANTE NORTE-SUR PARA LA DESCONGESTIÓN DEL TRÁFICO PESADO EN EL NÚCLEO DE CARBALLO”, Repositorio Universidad de Coruña, 2019. <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/22395>
- [15] Castro Rodriguez, L., “REORDENAMIENTO VIAL EN EL SUR DEL CASCO CENTRAL DE SAN JOSE: ANALISIS DE TRANSITO ANTES-DESPUES”, National Academies, 1998. <https://trid.trb.org/view/965393>
- [16] Cárdenas González, L. y Soto Lozano, C. “MODELACIÓN DE UN SISTEMA INTELIGENTE DE TRÁFICO VEHICULAR POR MEDIO DE UNA SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES”, Institutional Repository - Pontificia Universidad Javeriana, 2020. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/53029>

- [17] Referencia de internet con fecha de consulta 21/02/2022 con el link: <https://www.google.com/search?q=google+ai+with+traffic+lights&oq=google+ai+with+traffic+lights&aqs=chrome..69i57j0i22i30j69i64.8393j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8> .
- [18] G. Velloso, C. “EL PRIMER SEMÁFORO DE MADRID CUMPLE 90 AÑOS”, El Mundo, 2016. <https://www.elmundo.es/madrid/2016/09/10/57d42854ca4741eb0a8b463a.html#:~:text=A%20actualmente%20en%20Madrid%20hay%202.213,una%20cifra%20de%20130.000%2C%20aproximadamente>.
- [19] García P, “ATASCOS EN MADRID: ESTOS SON LOS 15 PUNTOS NEGROS DE TRÁFICO QUE HAY QUE EVITAR.”, El Independiente, 2018. <https://www.elindependiente.com/economia/2018/03/14/atascos-madrid-estos-son-15-puntos-negros-traffic-evitar/>
- [20] “HUELLA DE CARBONO DEL COCHE: REDUCIR LAS EMISIONES DE CO2”, Climate Consulting by Selectra, 2018. <https://climate.selectra.com/es/huella-carbono/coche>

# **INTELLIGENT TRAFFIC LIGHT NETWORK FOR THE REDUCTION OF POLLUTING PARTICLES AND IMPROVEMENTS OF TRANSIT TIMES.**

**Author: Minguillán Van Kapel, Lawrence Javier.**

Supervisor: Fernández-Pacheco Sánchez-Migallón, Atilano.

Collaborating Entity: ICAI – Universidad Pontificia Comillas.

## **ABSTRACT**

Traffic flow detection system based on simulation, scalable to a real environment. Depending on the traffic density detected in the different directions of the road, a series of decisions will be made through the use of an algorithm that will allow traffic decongestion. Consequently, this decongestion will lead to changes that will reduce the polluting particles produced by the vehicles, due to the reduction in vehicle usage time. This is achieved through a system that, by processing a video of traffic at an intersection, determines in which direction the cars are heading and based on the flow of traffic, executes predefined instructions that are sent to the traffic lights.

**Keywords:** urban development, decongestion, effective, feedback, stages.

## **1. Introduction**

The traffic light network system developed has the objective to decongest traffic by improving transit times in order to reduce polluting particles for the sustainable development of new urban development areas.

The problem that arises in intersections is the great congestion of automobiles on the roads and the inefficiency of the current systems for decongesting them.

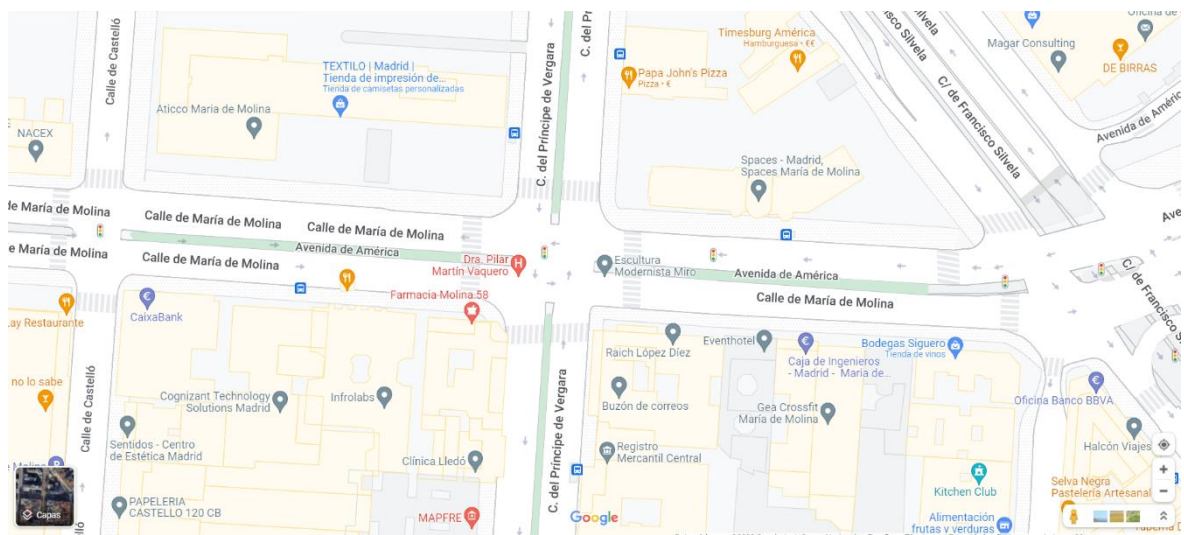
Globally, what is sought with this work is to develop a system that achieves the reduction of transit times and at the same time decongests roads, implanting an algorithm for an active control of traffic lights, based on the environment of an intersection.

## **2. Definition of the project**

This solution takes a different approach than most projects trying to perform a similar debottlenecking function. The drawback of the systems that currently exist is that they are based on the redirection of traffic that can cause congestion nodes at other points on the road, rather than addressing the problem at the specific point.

The advantage of this type of system is that it is completely objective and effective. If the times obtained are not as expected, it is very easy to introduce new parameters to improve the output results. One possible parameter to modify is the analysis time between instructions. This will allow processing a greater or lesser number of frames of the video in question and in this way different possible instructions will be obtained for the different times.

For the development of the environment, the project will be based on the intersection located on María de Molina Street with Príncipe de Vergara (Ilustración 3).



***Ilustración 3. Intersection between c/ María de Molina and c/ del Príncipe de Vergara.***

The times of the traffic lights at this intersection have been physically timed and it has been estimated that, on average, the traffic lights at this node spend 94 seconds in the green state, in both directions. For the simulation of the project we will use 40 seconds because of processing limitations.

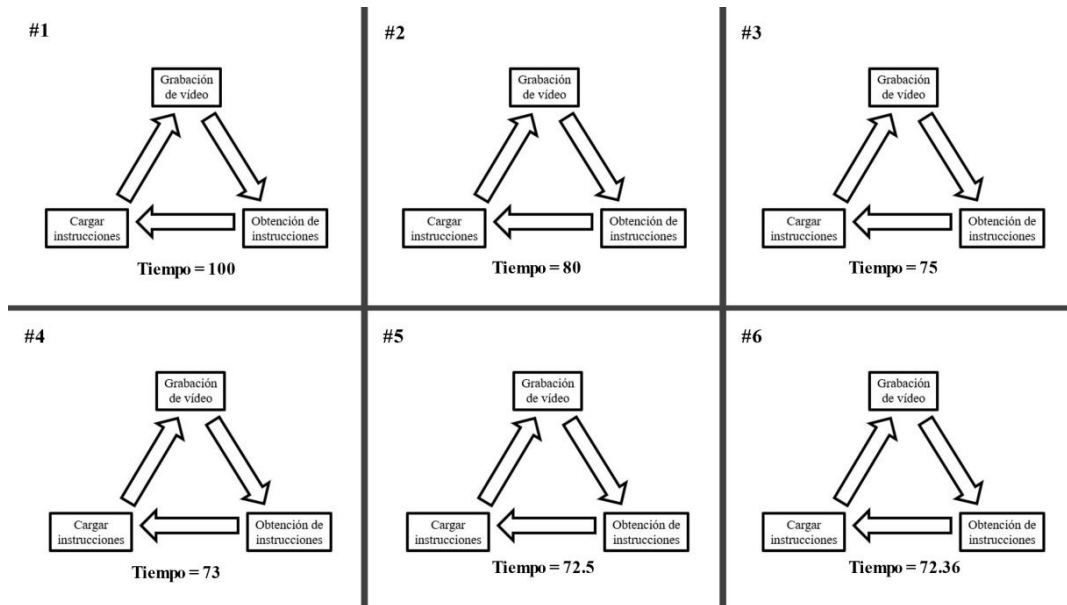
### **3. Description of the model/system/tool**

The proposed system is composed of various modules. Among which we can find the modules of the car detection, identification and tracking, vector allocation based on ID's and connection between server (Aimsun simulator) and client (external script module).

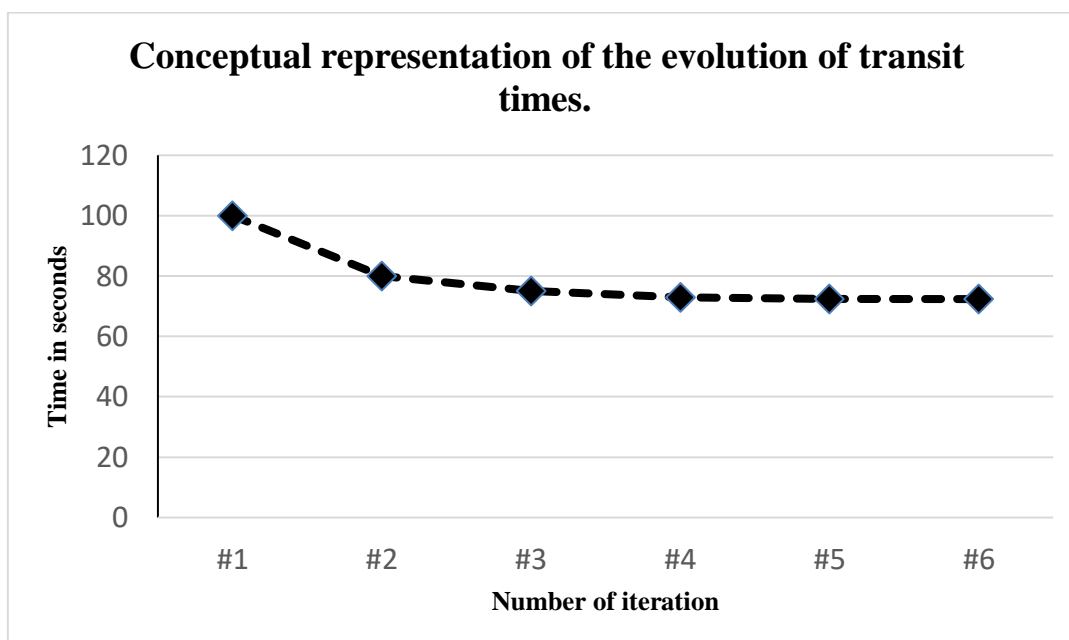
The operation of the proposed system is based on a feedback model that takes as input the video of the simulation of the previous stage with new traffic light instructions that will allow the reduction of transit times.

The system is made up of different stages. The first stage consists of obtaining the video of the simulation. In the next stage, the processing of the images and determination of the instructions is carried out. In the final stage, the instructions that have been obtained are loaded into the simulator, in order to carry out the process once again.

The objective to be achieved with the reiteration of these three stages is to be able to reduce the transit times of the cars with each loop (Ilustración 4 & Gráfica 6).



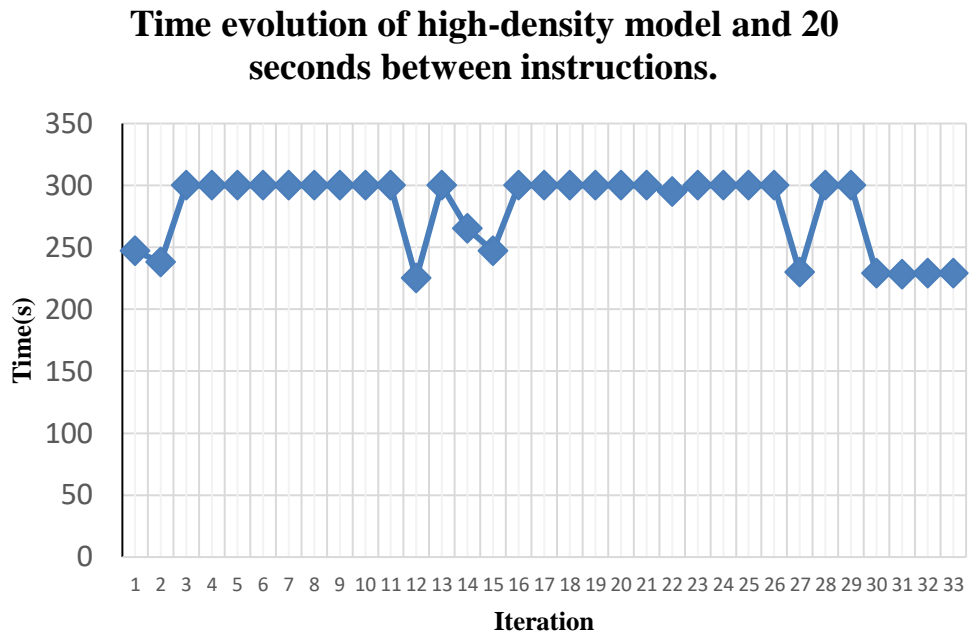
*Ilustración 4. Conceptual representation of the project objective.*



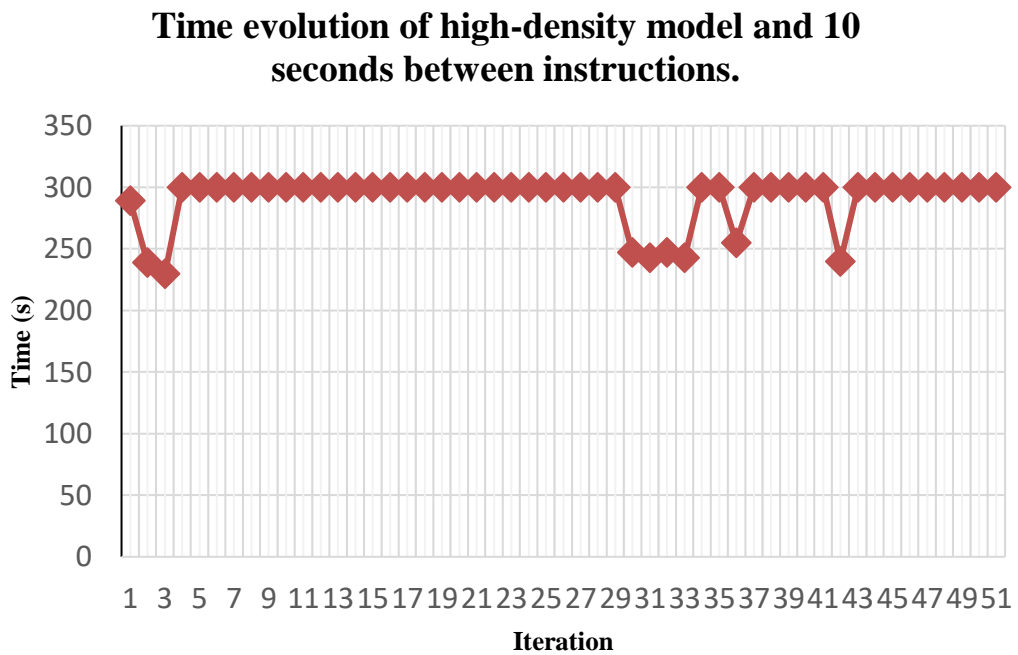
*Gráfica 6. Conceptual representation of the evolution of transit times.*

#### 4. Results

They are then shown in graphs 7, 8, 9 and 10; and tables 5, 6, 7 and 8 the results obtained from the simulation and study of this project.

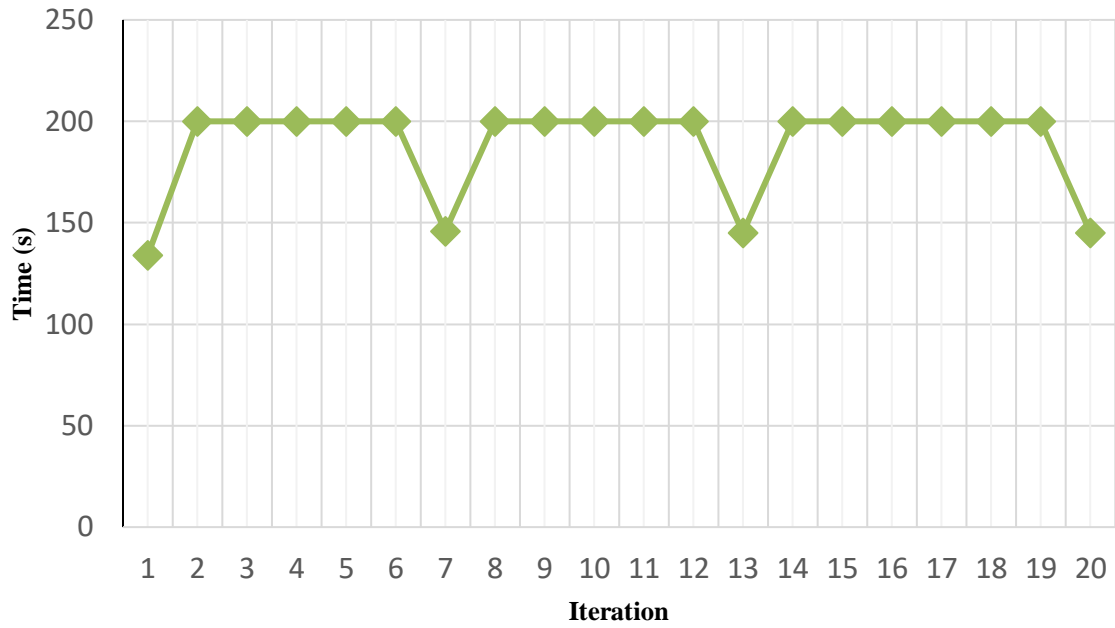


*Gráfica 7. Time evolution of high-density model and 20 seconds between instructions.*



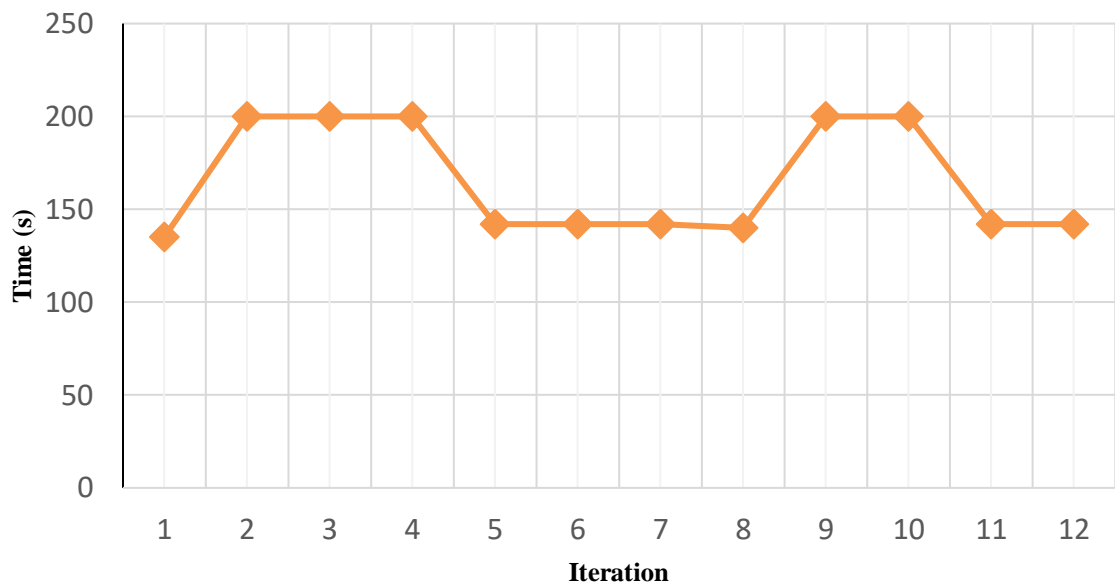
*Gráfica 8. Time evolution of high-density model and 10 seconds between instructions.*

**Time evolution of low-density model and 10 seconds between instructions.**



*Gráfica 9. Time evolution of low-density model and 10 seconds between instructions.*

**Time evolution of low-density model and 20 seconds between instructions.**



*Gráfica 10. Time evolution of low-density model and 20 seconds between instructions.*

Efficiency in dynamic results			
		Density	
		High	High
Time	10	17.3	-
	20	3.6	-

*Tabla 5. Efficiency obtained from the second iteration.*

Efficiency in feedback results			
		Density	
		Alta	Baja
Time	10	Undetermined (52)	-8.21
	20	7.7	-5.18

*Tabla 6. Efficiency obtained from the steady state.*

High density model		
Dynamic System		Feedback System
10	20	20
16.33 Tons	2.91 Tons	6.22 Tons

*Tabla 7. Reduction in tons of CO2.*

Low density model	
Feedback System	
10	20
-3.5 Tons	-2.1 Tons

*Tabla 8. Reduction in tons of CO2.*

The equations 29, 30 and 31 of the project show a **5.08%** saving in CO2 emissions (see in [Índice de ecuaciones](#) on page IX).



## 5. Conclusions

The first conclusion that can be obtained from this development is that improvements in traffic management are observed, at a temporary level, with just one iteration of the system in a high-density model, corresponding to a dynamic management system. These efficiency improvements can be seen in the "High" column of Tabla 5.

The following conclusion that can be obtained is that the recursive results (Tabla 6) do not present advantages over the dynamic results (Tabla 5) except for the high-density model and 20 seconds between instructions, nor do they present advantages over a conventional system.

The third conclusion obtained, related to the high-density models, establishes that it is better to implement a dynamic system of 10 seconds between instructions compared to any other, because the highlighted model achieves the greatest reduction of gases in 16.33 tons. This result can be seen in Tabla 8.

The fourth conclusion that can be drawn from this project is that, for models with low density, whether they are in the second iteration or in search of the steady state, they do not present advantages compared to a conventional system with the established algorithm.

Finally, the last conclusion that can be obtained is that the best implementation of the system, as it is, would be a hybrid system that allows it to act dynamically, based on the second iterations, in high-density environments, taking instructions every 10 seconds and allowing it to act in a standard way in low density environments. This conclusion has been obtained by comparing tables 5 and 6. Tabla 7 has been used to obtain the best case, in which 16.33 tons of CO<sub>2</sub> are saved.

By implementing a hybrid system, such as the one proposed in the previous conclusion, we can obtain a **5.08%** reduction in emissions of CO<sub>2</sub> per day in the city of Madrid.

## 6. References

- [1] "GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM TRANSPORT IN THE EU, BY TRANSPORT MODE AND SCENARIO", European environment agency, 2018, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-greenhouse-gases-7/assessment>

- [2] Gutiérrez-Domènech, M.. “¿CUÁNTO CUESTA IR AL TRABAJO? EL COSTE EN TIEMPO Y EN DINERO”, Caixabankresearch.com, 2008. [https://www.caixabankresearch.com/sites/default/files/content/file/2016/09/de11\\_esp.pdf](https://www.caixabankresearch.com/sites/default/files/content/file/2016/09/de11_esp.pdf)
- [3] “CONSUMO Y EMISIONES DE CO<sub>2</sub>”, Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía, 2014. <https://coches.idae.es/consumo-de-carburante-y-emisiones>
- [4] Orús, A, “EVOLUCIÓN ANUAL DEL NÚMERO DE AUTOMÓVILES MATRICULADOS EN LA COMUNIDAD DE MADRID ENTRE 2011 Y 2021”, Statista, 2022. <https://es.statista.com/estadisticas/812484/numero-anual-de-matriculaciones-de-automoviles-comunidad-de-madrid/>
- [5] “EL 48% DE LOS ESPAÑOLES UTILIZA EL COCHE A DIARIO PARA TRABAJAR, SEGÚN EASYPARK”, Europapress, 2017. <https://www.europapress.es/motor/coches-00640/noticia-48-espanoles-utiliza-coche-diario-trabajar-easypark-20170823142811.html>
- [6] Olguin, N, “¿CUÁNTA GASOLINA SE GASTA POR KILÓMETRO?”, el motor el país, 2022. <https://manitec.es/gasolina-auto/un-auto-gasta-8-litros-de-gasolina-cada-100-kilometros/>
- [7] “DIESEL VS GASOLINA EN LOS GASTOS EN COMBUSTIBLE”, Grupo Gil, 2020. <https://www.grupogil.es/actualidad/comparativa-diesel-vs-gasolina-que-es-mejor#:~:text=%C2%BFConsume%20m%C3%A1s%20un%20motor%20gasolina,menos%20que%20uno%20de%20gasolina.>
- [8] Castro Rodríguez, L, REORDENAMIENTO VIAL EN EL SUR DEL CASCO CENTRAL DE SAN JOSÉ: ANÁLISIS DE TRÁNSITO ANTES-DESPUÉS, National Academies, 1998. <https://trid.trb.org/view/965393>
- [9] Woong Shin, S, Hickman, M, “EFFECTIVENESS OF THE KATY FREEWAY HOV-LANE PRICING PROJECT PRELIMINARY ASSESSMENT”, Sage Journals, 1999, [https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.3141/1659-12?casa\\_token=yP-UEyLoSv8AAAAA%3AvYxMvCIwOHJLisCUKXN2KOGGrN8SGiHkhIFA6k4yzJXeyAesWryDC-x4TcFA7Dpo8EiHH9VgjVNFx&](https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.3141/1659-12?casa_token=yP-UEyLoSv8AAAAA%3AvYxMvCIwOHJLisCUKXN2KOGGrN8SGiHkhIFA6k4yzJXeyAesWryDC-x4TcFA7Dpo8EiHH9VgjVNFx&)
- [10] W. Wen, “AN INTELLIGENT TRAFFIC MANAGEMENT EXPERT SYSTEM WITH RFID TECHNOLOGY, EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS”, 2010, Science direct, 2010. [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417409008112?casa\\_token=AGPSNCY4YUwAAAAA: MEEAr3o0uL2fYlhQI6FNp7N7TIHJMbs4fjk6hj7UnM0Q2-HVclbnr2sjNI\\_vpPekA4rmIoh6w](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417409008112?casa_token=AGPSNCY4YUwAAAAA: MEEAr3o0uL2fYlhQI6FNp7N7TIHJMbs4fjk6hj7UnM0Q2-HVclbnr2sjNI_vpPekA4rmIoh6w)
- [11] Sharif, A., Li, J.P. & Sharif, M.I. “INTERNET OF THINGS NETWORK COGNITION AND TRAFFIC MANAGEMENT SYSTEM”, Springer Link, 2019. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10586-018-1722-1>

- [12] Olivares Gallego, R, “MODELO DE SIMULACIÓN Y PLANIFICACIÓN DE TRÁFICO URBANO MEDIANTE SEMÁFOROS INTELIGENTES Y SUMO”, 2015. [https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/23170/TFG\\_Ricardo\\_Olivares\\_Gallego.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/23170/TFG_Ricardo_Olivares_Gallego.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [13] Monterrey Cañas, A.M. y Sosa Ramírez, C. A., “DISEÑO DE UN SISTEMA DE SEMAFORIZACIÓN INTELIGENTE PARA CONTROLAR FLUJO VEHICULAR A PARTIR DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES”, Institutional Repository Universidad Piloto de Colombia, 2020. <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/9865>
- [14] González Pombo, A., “VARIANTE NORTE-SUR PARA LA DESCONGESTIÓN DEL TRÁFICO PESADO EN EL NÚCLEO DE CARBALLO”, Repositorio Universidad de Coruña, 2019. <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/22395>
- [15] Castro Rodriguez, L., “REORDENAMIENTO VIAL EN EL SUR DEL CASCO CENTRAL DE SAN JOSE: ANALISIS DE TRANSITO ANTES-DESPUES”, National Academies, 1998. <https://trid.trb.org/view/965393>
- [16] Cárdenas González, L. y Soto Lozano, C. “MODELACIÓN DE UN SISTEMA INTELIGENTE DE TRÁFICO VEHICULAR POR MEDIO DE UNA SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES”, Institutional Repository - Pontificia Universidad Javeriana, 2020. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/53029>
- [17] Referencia de internet con fecha de consulta 21/02/2022 con el link: <https://www.google.com/search?q=google+ai+with+traffic+lights&oq=google+ai+with+traffic+lights&aqs=chrome..69i57j0i22i30j69i64.8393j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8> .
- [18] G. Velloso, C. “EL PRIMER SEMÁFORO DE MADRID CUMPLE 90 AÑOS”, El Mundo, 2016. <https://www.elmundo.es/madrid/2016/09/10/57d42854ca4741eb0a8b463a.html#:~:text=Actualmente%20en%20Madrid%20hay%20202.213,una%20cifra%20de%20130.000%2C%20aproximadamente>.
- [19] García P, “ATASCOS EN MADRID: ESTOS SON LOS 15 PUNTOS NEGROS DE TRÁFICO QUE HAY QUE EVITAR.”, El Independiente, 2018. <https://www.elindependiente.com/economia/2018/03/14/atascos-madrid-estos-son-15-puntos-negros-traffic-evitar/>
- [20] “HUELLA DE CARBONO DEL COCHE: REDUCIR LAS EMISIONES DE CO2”, Climate Consulting by Selectra, 2018. <https://climate.selectra.com/es/huella-carbono/coche>



## Índice de la memoria

<b>Capítulo 1. Introducción .....</b>	<b>11</b>
1.1 Motivación del proyecto .....	11
<b>Capítulo 2. Descripción de las Tecnologías.....</b>	<b>13</b>
2.1 Python .....	13
2.1.1 Numpy.....	14
2.1.2 OpenCV.....	15
2.1.3 Tesseract.....	16
2.2 Aimsun .....	17
2.2.1 Introducción .....	17
2.2.2 Objetivo .....	18
2.3 OBS.....	19
<b>Capítulo 3. Estado de la Cuestión.....</b>	<b>21</b>
3.1.1 Implementación tecnológica.....	23
3.1.2 Funcionalidad.....	24
<b>Capítulo 4. Definición del Trabajo .....</b>	<b>29</b>
4.1 Justificación.....	29
4.2 Objetivos .....	31
4.3 Metodología .....	31
4.4 Planificación y Estimación Económica.....	35
<b>Capítulo 5. Sistema/Modelo Desarrollado.....</b>	<b>39</b>
5.1 Desarrollo de las etapas de planificación .....	39
5.2 Creación del entorno de simulación.....	46
5.2.1 Suposiciones .....	46
5.2.2 Vías de circulación.....	48
5.2.3 Flujo de tráfico .....	50
5.2.4 Demanda de tráfico .....	53
5.2.5 Creación de intermitencia semafórica .....	54
5.2.6 Establecimiento del escenario dinámico.....	56
5.3 Diseño .....	58

---

5.4	Arquitectura y escalabilidad .....	59
5.5	Implementación .....	62
<b>Capítulo 6. Análisis de Resultados.....</b>		<b>65</b>
6.1	Alta densidad y 20s entre toma de decisión .....	65
6.1.1	Etapa 1 .....	65
6.1.2	Etapa 2 .....	66
6.1.3	Resto de etapas .....	67
6.2	Alta densidad y 10s entre toma de decisión .....	80
6.3	Baja densidad y 10s entre toma de decisión.....	84
6.4	Baja densidad y 20s entre toma de decisión.....	87
6.5	Estudio sobre el caso más favorable .....	90
<b>Capítulo 7. Conclusiones y Trabajos Futuros .....</b>		<b>93</b>
<b>Capítulo 8. Bibliografía.....</b>		<b>97</b>
<b>ANEXO I: ALINEACIÓN DEL PROYECTO CON LOS ODS.....</b>		<b>101</b>
<b>ANEXO II</b>		<b>103</b>

## *Índice de figuras*

Ilustración 1. Intersección c/ María de Molina con c/ del Príncipe de Vergara. ....	10
Ilustración 2. Representación conceptual del objetivo del proyecto. ....	11
Ilustración 3. Intersection between c/ María de Molina and c/ del Príncipe de Vergara. ....	20
Ilustración 4. Conceptual representation of the project objective. ....	21
Ilustración 5. Gases de emisión producidos por el transporte europeo. ....	12
Ilustración 6. Python. ....	13
Ilustración 7. NumPy. ....	14
Ilustración 8. OpenCv. ....	15
Ilustración 9. Tesseract. ....	16
Ilustración 10. Reloj interno de la simulación de Aimsun. ....	17
Ilustración 11. Aimsun. ....	17
Ilustración 12. OBS. ....	19
Ilustración 13. Límites de Madrid Central. ....	25
Ilustración 14. Madrid 360. ....	25
Ilustración 15. Madrid Nuevo Norte. ....	26
Ilustración 16. Red con único nodo {Aimsun}. ....	30
Ilustración 17. Red con múltiples nodos {Aimsun}. ....	30
Ilustración 18. Etapas de la metodología Agile. ....	32
Ilustración 19. Etapas de la metodología Waterfall. ....	34
Ilustración 20. Diagrama de Grantt. ....	35
Ilustración 21. Presupuesto económico del servicio AWS DynamoDB. ....	36
Ilustración 22. Requerimientos del servicio AWS Lambda. ....	36
Ilustración 23. Módulo de cámara. ....	37
Ilustración 24. Orange pi y módulo 4G. ....	37
Ilustración 25. Detección de coches reales. ....	39
Ilustración 26. Aimsun logo. ....	41
Ilustración 27. CARLA Simulador logo. ....	41
Ilustración 28. Entorno de desarrollo Aimsun. ....	41

---

Ilustración 29. Entorno de simulación controlado.....	42
Ilustración 30. Vista de coches 3D simulados en Aimsun. ....	43
Ilustración 31. Vista de coches 2D simulados en Aimsun. ....	43
Ilustración 32. Trackeo para la identificación de coches.....	44
Ilustración 33. Intersección Aimsun.....	49
Ilustración 34. Asignación de ruta del tráfico.....	50
Ilustración 35. Vías entrantes y salientes de la intersección.....	50
Ilustración 36. Centroide de tráfico. ....	51
Ilustración 37. Asignación de tráfico saliente y entrante del centroide.....	51
Ilustración 38. Matriz de circulación con tráfico.....	52
Ilustración 39. Matriz de circulación sin tráfico.....	52
Ilustración 40. Tiempos de las etapas de la simulación.....	53
Ilustración 41. Asignación de fases semafóricas manualmente. ....	54
Ilustración 42. Asignación de semáforos a fase semafórica.....	54
Ilustración 43. Creación de un nuevo guion de Python.....	55
Ilustración 44. Script ReStart en Aimsun. ....	55
Ilustración 45. Creación del escenario dinámico.....	56
Ilustración 46. Comprobación inicial de la configuración inicial. ....	57
Ilustración 47. Comprobación final de la configuración inicial. ....	57
Ilustración 48. Diagrama UML del sistema.....	59
Ilustración 49. Carpeta de cálculos.....	59
Ilustración 50. . Carpeta de conexiones.....	60
Ilustración 51. . Carpeta de direcciones.....	60
Ilustración 52. . Carpeta de registro de instrucciones.....	60
Ilustración 53. . Carpeta de Tiempos.....	61
Ilustración 54 . Carpeta de tracking.....	61
Ilustración 55. Carpeta de almacenamiento de vídeos. ....	61
Ilustración 56. Carpeta de propiedades.....	62
Ilustración 57. Inicio de proceso de la etapa 1. ....	66
Ilustración 58. Fin de la etapa 1.....	66

---



---

Ilustración 59. Fin de la etapa 2.....	66
Ilustración 60. Imagen representativa de las ODS .....	101
Ilustración 61. Guía de instalación 1. ....	103
Ilustración 62. Guía de instalación 2. ....	103
Ilustración 63. Guía de instalación 3. ....	104
Ilustración 64. Inicio de gravacion OBS. ....	105
Ilustración 65. Inicio de simulación Aimsun.....	105
Ilustración 66. Carpeta de vídeos. ....	106
Ilustración 67. Dirección de vídeo a procesar. ....	106
Ilustración 68. Inicio de procesamiento Python. ....	106

## *Índice de tablas*

Tabla 1. Eficiencia obtenida de la segunda iteración..	14
Tabla 2. Eficiencia obtenida del estado de reposo.....	14
Tabla 3. Reducción en Toneladas de CO2.....	15
Tabla 4. Reducción en Toneladas de CO2. ....	15
Tabla 5. Efficiency obtained from the second iteration.....	24
Tabla 6. Efficiency obtained from the steady state. ....	24
Tabla 7. Reduction in tons of CO2.....	24
Tabla 8. Reduction in tons of CO2.....	24
Tabla 9. Presupuestos de servicios software. ....	38
Tabla 10. Presupuesto de componentes hardware para 1 semáforo. ....	38
Tabla 11. Presupuesto para desarrollo y mantenimiento del sistema. ....	38
Tabla 12. Conjunto de instrucciones y tiempos del modelo con alta densidad y 20 segundos entre instrucción. ....	75
Tabla 13. Conjunto de instrucciones y tiempos del modelo con alta densidad y 10 segundos entre instrucción. ....	81
Tabla 14. Conjunto de instrucciones y tiempos del modelo con baja densidad y 10 segundos entre instrucción. ....	84
Tabla 15. Conjunto de instrucciones y tiempos del modelo con baja densidad y 20 segundos entre instrucción. ....	87
Tabla 16. Eficiencia obtenida de la segunda iteración. ....	93
Tabla 17. Reducción en Toneladas de CO2 en modelos de alta densidad.h.....	93
Tabla 18. Eficiencia obtenida del estado de reposo.....	94
Tabla 19. Reducción en Toneladas de CO2 en modelos de baja densidad.....	94

## *Índice de gráficas*

Gráfica 1. Representación conceptual de la evolución del tiempo de tránsito. ....	12
Gráfica 2. Evolución temporal de modelo de alta densidad y 20 segundos entre instrucción. .....	12
Gráfica 3. Evolución temporal de modelo de alta densidad y 10 segundos entre instrucción. .....	13
Gráfica 4. Evolución temporal de modelo de baja densidad y 10 segundos entre instrucción. .....	13
Gráfica 5. Evolución temporal de modelo de baja densidad y 20 segundos entre instrucción. .....	14
Gráfica 6. Conceptual representation of the evolution of transit times. ....	21
Gráfica 7. Time evolution of high-density model and 20 seconds between instructions. ...	22
Gráfica 8. Time evolution of high-density model and 10 seconds between instructions. ...	22
Gráfica 9. Time evolution of low-density model and 10 seconds between instructions. ....	23
Gráfica 10. Time evolution of low-density model and 20 seconds between instructions. ..	23
Gráfica 11. Evolución temporal de modelo de alta densidad y 20 segundos entre instrucción. .....	76
Gráfica 12. Evolución temporal de modelo de alta densidad y 10 segundos entre instrucción. .....	82
Gráfica 13. Evolución temporal de modelo de baja densidad y 10 segundos entre instrucción. .....	85
Gráfica 14. Evolución temporal de modelo de baja densidad y 20 segundos entre instrucción. .....	88

## *Índice de ecuaciones*

Ecuación 1. km conducidos por coche para llegar al trabajo. ....	46
Ecuación 2. Litros de gasolina consumida por coche.....	47
Ecuación 3. Litros de gasoil consumida por coche. ....	47
Ecuación 4. Kg de CO2 producidos por coche de gasolina.....	47
Ecuación 5. Kg de CO2 producidos por coche de gasoil. ....	47
Ecuación 6. Kg de CO2 producidos por todos los coches de gasolina en Madrid. ....	48
Ecuación 7. Kg de CO2 producidos por todos los coches de gasoil en Madrid.....	48
Ecuación 8. Kg de CO2 producidos por todos los coches en Madrid. ....	48
Ecuación 9. Reducción de tiempo obtenida en el modelo de 20 segundos y Alta densidad retroalimentado.....	77
Ecuación 10. Eficiencia obtenida en el modelo de 20 segundos y alta densidad retroalimentado.....	77
Ecuación 11. Reducción de tiempo obtenida en el modelo de 20 segundos y Alta densidad dinámico. ....	77
Ecuación 12. Eficiencia obtenida en el modelo de 20 segundos y alta densidad dinámico.	78
Ecuación 13. Minutos de tránsito con 7.7% de eficiencia.....	78
Ecuación 14. Minutos de tránsito con 3.64% de eficiencia.....	78
Ecuación 15. Kg de combustible ahorrados con 3.64% de eficiencia.....	79
Ecuación 16. Kg de combustible ahorrados con 7.7% de eficiencia.....	79
Ecuación 17. Reducción de tiempo obtenida en el modelo de 10 segundos y Alta densidad. ....	82
Ecuación 18. Eficiencia obtenida en el modelo de 10 segundos y alta densidad.....	83
Ecuación 19. Minutos de tránsito con 17.3% de eficiencia.....	83
Ecuación 20. Kg de combustible ahorrados con 17.3% de eficiencia.....	83
Ecuación 21. Reducción de tiempo obtenida en el modelo de 10 segundos y Baja densidad. ....	85
Ecuación 22. Eficiencia obtenida en el modelo de 10 segundos y baja densidad. ....	86
Ecuación 23. Minutos de tránsito con -8.21 % de eficiencia. ....	86

---

Ecuación 24. Kg de combustible ahorrados con -8.21% de eficiencia.....	86
Ecuación 25. Reducción de tiempo obtenida en el modelo de 20 segundos y Baja densidad. .....	87
Ecuación 26. Eficiencia obtenida en el modelo de 20 segundos y baja densidad. ....	87
Ecuación 27. Minutos de tránsito con -5.18 % de eficiencia. ....	88
Ecuación 28. Kg de combustible ahorrados con -5.18% de eficiencia.....	89
Ecuación 29. Toneladas de CO2 producidas por día en la ciudad de Madrid. ....	90
Ecuación 30. Toneladas de CO2 ahorradas en un día. ....	90
Ecuación 31. Estimación del porcentaje de CO2 ahorrado tras implementar un modelo de alta densidad y 10 segundos entre instrucción.....	91



## Capítulo 1. INTRODUCCIÓN

Capítulo descriptivo de Red de semáforos inteligentes para la descongestión de tráfico, mejoras de tiempos de tránsito y reducción de partículas contaminantes en un ámbito general y sobre la motivación del proyecto.

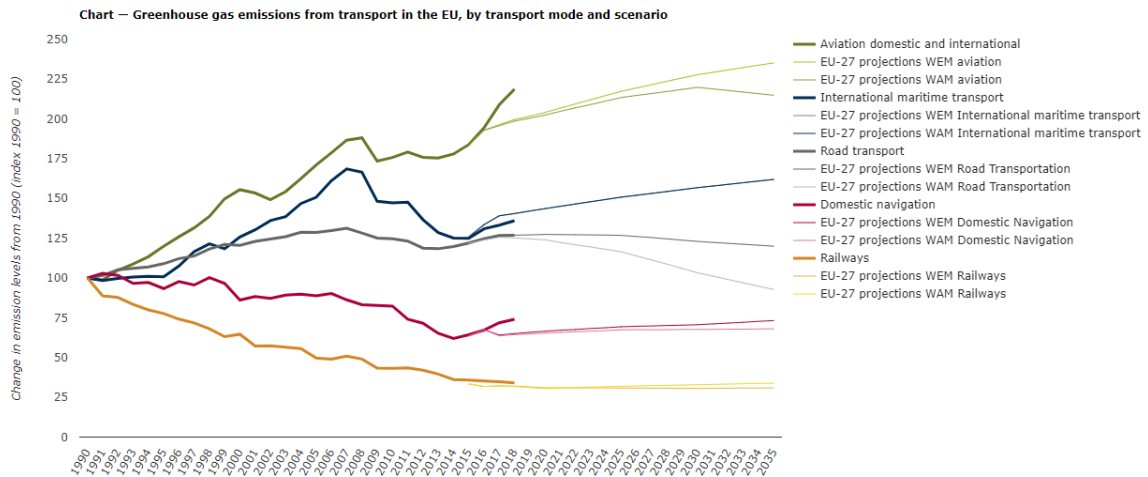
### *1.1 MOTIVACIÓN DEL PROYECTO*

El problema que se plantea es la gran congestión de automóviles en las vías y la poca eficacia de los sistemas actuales para su descongestión.

En ámbito global, lo que se busca con este trabajo es desarrollar un sistema que consiga la reducción de tiempos de tránsito y a la vez su descongestión, implantado un sistema de Machine Learning para con control de los semáforos de manera activa. Esta solución traerá consigo beneficios como la reducción de contaminación de partículas y contaminación acústica.

Debido a la creciente preocupación por el medioambiente en los últimos años, la contaminación producida por los automóviles ha sido uno de los principales debates en todo el mundo. Con un 13% de las partículas contaminantes en Europa proviniendo del transporte por carretera la búsqueda de una solución es necesaria.

Pese a muchos esfuerzos de limitación de la movilidad de coches antiguos y nuevos, que producen una alta tasa de contaminación, medida en gramos de CO<sub>2</sub> por kilómetro, el plan de reducción de este tipo de contaminación es a muy largo plazo y se necesitan medidas que consigan la reducción de manera inmediata. Contribuyendo al objetivo 11 de ODS “Ciudades y comunidades sostenibles” en el que uno de los principales puntos a desarrollar es la introducción de medios de transporte adecuados, asequibles y seguros.



**Ilustración 5. Gases de emisión producidos por el transporte europeo.**

En la previa ilustración <sup>1</sup>(European environment agency, 2018), se puede apreciar la contaminación actual que produce el transporte automovilístico de tierra y su leve reducción contemplada hacia el año 2040.

Actualmente existen iniciativas para poder reducir la contaminación en zonas como Madrid, con Madrid Central que se implantó para proteger la salud de los madrileños y conseguir una reducción de contaminación importante. Otro ejemplo puede ser la iniciativa para poder dar subvenciones a los compradores de coches eléctricos para incentivar a los potenciales clientes del sector automovilístico a comprar este tipo de vehículo. Pero debido a que son medidas que pueden ser derogadas o que puede que tarden tiempo en tomar efecto, no son una solución inmediata válida.

Por lo tanto, la motivación de este proyecto es poder proporcionar una solución de rápida implementación, con consecuencias positivas y de ámbito global que sea posible instalar e implementar en muchos sitios, con pocos recursos.

<sup>1</sup> European environment agency, 2018.



## Capítulo 2. DESCRIPCIÓN DE LAS TECNOLOGÍAS

Las tecnologías que se emplean para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto son exclusivamente de ámbito software, pero con un alto potencial de ampliación al desarrollo hardware.

Entre estas herramientas software se pueden encontrar: Python, Aimsun y OBS.

### 2.1 PYTHON



*Ilustración 6. Python.*

Python es un lenguaje de programación de alto nivel, orientado a objetos, con una semántica dinámica integrada. Se ha decidido realizar este proyecto con Python debido a su gran multitud de capacidades destacando la facilidad y la gran comunidad para el entorno de detección de objetos.

Existen librerías que facilitan el desarrollo del proyecto y permiten un trabajo dinámico. Entre estas librerías caben destacar Numpy y Cv2.

### 2.1.1 NUMPY



*Ilustración 7. NumPy.*

NumPy es una biblioteca para el lenguaje de programación Python que da soporte para crear vectores y matrices grandes multidimensionales, junto con una gran colección de funciones matemáticas de alto nivel para operar con ellas.

Este proyecto tiene la función principal de la reducción de tiempos de tránsitos de los coches como un conjunto general. Desde la aparición del primer coche hasta de desaparición del último se van a realizar múltiples operaciones matemáticas de carácter básico y se van a usar diccionarios y listas para poder almacenar tanto coordenadas como identificadores de coches.

## 2.1.2 OPENCV



*Ilustración 8. OpenCv.*

OpenCV o Cv2 es una gran herramienta para el procesamiento de imágenes y la realización de tareas de visión artificial. Es una biblioteca de código abierto que se puede utilizar para realizar tareas como detección de rostros, seguimiento de objetos, detección de escenarios y mucho más.

Como se ha indicado previamente, se desea realizar la detección de coches. En el caso que se va a emplear los coches serán representados por cuadriláteros de color azul entre un determinado rango de la escala HSV.

Se emplea cv2 para poder realizar diversas funciones. Entre estas funciones encontramos: la obtención del video, que es transformado a imágenes/frames para ser procesadas. La identificación/detección de los objetos del determinado rango HSV. Y finalmente, el dibujo de los contornos de los objetos detectados.

También se emplea cv2 para poder mostrar la salida de lo que está siendo procesado.

### 2.1.3 TESSERACT

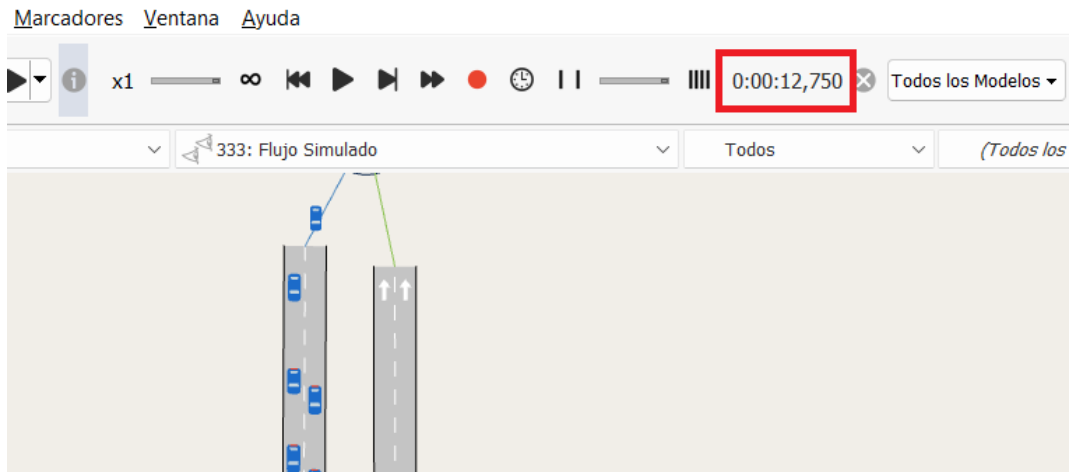


#### *Ilustración 9. Tesseract.*

Tesseract es una librería de Python que permite la lectura de texto de una imagen.

Este módulo se decide implementar a raíz de la detección de un impedimento del proyecto. Debido a la capacidad limitada del ordenador sobre el que se trabaja, en el momento de procesar instrucciones se pueden haber leído diferentes números de frames y determinar una instrucción diferente ya que el tiempo de obtención de una instrucción es externo al simulador. Es decir, si la capacidad de procesamiento del ordenador es 16 y no hay ningún otro programa abierto, se podrá leer tantas imágenes como sea posible, gracias a que dispone de toda la capacidad. Pero si hay muchos programas abiertos, la capacidad del ordenador se distribuye y Python puede que solo reciba 5 de esos 16. Por lo que la cantidad de imágenes que se están procesando para determinar una instrucción en el tiempo específico, es diferente y no obtendremos constancia en los resultados de un mismo entorno de simulación.

En vez de utilizar un reloj externo, la mejor alternativa es leer el tiempo de simulación que se está produciendo. Este tiempo se puede conseguir gracias a que en el panel de simulación aparece un reloj interno de Aimsun, que nos permite siempre poder enviar una instrucción en un tiempo deseado (Ilustración 10).



*Ilustración 10. Reloj interno de la simulación de Aimsun.*

Esto se consigue leyendo todo el texto de cada imagen y segmentando aquel que nos indique el tiempo de simulación.

## 2.2 AIMSUN



*Ilustración 11. Aimsun.*

### 2.2.1 INTRODUCCIÓN

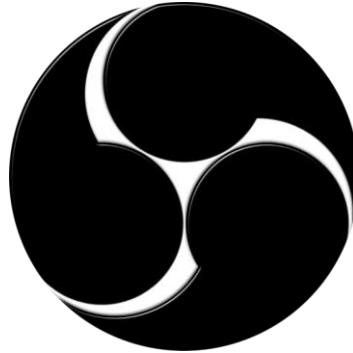
Aimsun Next es un software de simulación de tráfico que se utiliza para planificar y evaluar sistemas de transporte. Simula y predice las interacciones entre vehículos, peatones, bicicletas, autobuses y tranvías para que los usuarios puedan realizar evaluaciones de operaciones de tráfico de diferente escala y complejidad y su impacto ambiental.

### **2.2.2 OBJETIVO**

Aimsun Next permite realizar evaluaciones de operaciones de tráfico de cualquier escala y complejidad. Las aplicaciones son infinitas, pero algunas de las más comunes son: evaluación y optimización de los esquemas de Prioridad semafórica para el Transporte Público (TSP) y los sistemas de Bus Rapid Transit (BRT), estudios de viabilidad de carriles para Vehículos de Alta Ocupación (HOV) y para vías Express de Peaje (HOT), análisis de impacto del diseño de infraestructuras y la mejora y construcción de corredores de carreteras, análisis de impacto ambiental, tarificación estática y dinámica de peajes, carreteras y urbanos, evaluación de estrategias de Gestión de la Demanda de Viajes (TDM), optimización del plan de control de regulación semafórica y evaluación de control adaptativo, análisis de seguridad vial, evaluación de políticas y esquemas de Velocidad Variable, sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), análisis del Manual de Capacidad de Carreteras (HCM), gestión de zonas de obras viales, evaluación del impacto del vehículo conectado y autónomo (CAV).

Para este proyecto, el fin por el que se utiliza aimsun es para poder definir un entorno controlado de simulación de tráfico. Los coches se representan mediante una vista 2D mediante cuadriláteros. Este entorno controlado nos permitirá determinar un tiempo de tránsito total previo al uso del sistema creado. Una vez aplicado el sistema podremos determinar un segundo tiempo. Al comparar estos dos tiempos podremos comprobar la eficacia del sistema.

## 2.3 *OBS*



*Ilustración 12. OBS.*

OBS Studio u Open Broadcaster Software es un software que permite grabar la pantalla de un dispositivo., realizar webinars, directos entre otras funciones. Pero la finalidad que tiene en este proyecto es simplemente grabar el simulador.

Con este programa se permite obtener el vídeo cada vez que se crea una nueva etapa e introducirlo en el programa creado.





## Capítulo 3. ESTADO DE LA CUESTIÓN

Existen diferentes medidas para intentar descongestionar el tráfico, pero ninguna es imparcial y completamente eficaz.

La primera medida de descongestión que podemos encontrar son las propias autoridades para poder dirigir el tráfico y movilizarlo. Esta medida es eficaz a pequeña escala de una intersección, pero no a gran escala. Un policía solo tiene visión de los vehículos inmediatamente adyacentes al atasco y no de los que se encuentran en el horizonte, pudiendo así producir más atascos en otros puntos de las vías.

La siguiente medida que podemos encontrar, es una aplicada originalmente a el “Katy Freeway” en Huston, Texas, la segunda carretera más congestionada de Estados Unidos en 2004. Esta solución constaba de usar medidores de rampas para permitir/denegar acceso a la autopista. Pese a ser una solución que resultó ser eficaz, el componente pasivo de ser un semáforo con comportamiento intermitente puede seguir dando lugar a problemas de congestión de carreteras. Además, es una solución interurbana y colocar más semáforos dentro de la zona urbana puede llevar a mayores problemas <sup>9</sup>(Woong. S, Hickman, M., 1999).

Podemos también encontrar una gran cantidad de estudios que intentan mitigar el problema implementando elementos como tarjetas RFID, Wen, W., 2010, An intelligent traffic management expert system with RFID technology, Expert Systems with Applications, pero que la solución propuesta consiste en redirigir el tráfico por otro camino, pudiendo así causar problemas de congestión en otras zonas de la vía <sup>10</sup>(Wen, W., 2010).

Tambien existe el estudio de Sharif, A., Li, J.P. & Sharif, M.I. Internet of Things network cognition and traffic management system, que se centra en la descongestión del tráfico

---

<sup>9</sup> Woong. S, Hickman, M., 1999.

<sup>10</sup> Wen, W., 2010

implementando tecnología IoT, pero con la misma finalidad de redirección de tráfico por otras vías <sup>11</sup>(Sharif, A., Li, J.P. & Sharif, M.I., 2019).

El sistema planteado por Olivares Gallego, Ricardo, Modelo de simulación y planificación de tráfico urbano mediante semáforos inteligentes y sumo, 2015, plantea la creación de un sistema de descongestión de tráfico basándose en la predicción, del comportamiento de los vehículos, sin poder obtener feedback, en tiempo real, de lo que está sucediendo <sup>12</sup>(Olivares Gallego, R. 2012).

El proyecto Diseño de un sistema de semaforización inteligente para controlar flujo vehicular a partir de procesamiento de imágenes, Monterrey Cañas, Ángel Mauricio y Sosa Ramírez, Camilo Andrés, 2020, se centra en realizar un sistema de control de tráfico basándose en las imágenes del entorno. Este estudio realizado en Carrera 7ma con Calle 45 de la ciudad de Bogotá D.C, Colombia, se centra en realizar únicamente el registro de la información mediante un entorno *cloud* y procesar en la obtención del número de coches de la vía <sup>13</sup>(Monterrey Cañas, Á. M. y Sosa Ramírez, C. A., 2020).

Otros estudios como es el Variante norte-sur para la descongestión del tráfico pesado en el núcleo de Carballo de González Pombo, Alba, 2019 se basan en el replanteo de los ejes del trazado de las vías. Por lo que no es un sistema escalable y económico <sup>14</sup>(González Pombo, A., 2019).

Otro estudio parecido al anterior es el Reordenamiento vial en el sur del casco central de San José: análisis de tránsito antes-después, Castro Rodríguez, L, 1998, que propone un reordenamiento de la señalización horizontal y vertical. A diferencia con el estudio anterior, este incluye un plan de ordenación de vehículos privados y públicos realizando trazadas de los autobuses en el sector descrito <sup>15</sup>(Castro Rodríguez, L., 1998).

---

<sup>11</sup> Sharif, A., Li, J.P. & Sharif, M.I., 2019.

<sup>12</sup> Olivares Gallego, R. 2012.

<sup>13</sup> Monterrey Cañas, Á. M. y Sosa Ramírez, C. A., 2020.

<sup>14</sup> González Pombo, A., 2019.

<sup>15</sup> Castro Rodríguez, L., 1998.

Modelación de un sistema inteligente de tráfico vehicular por medio de una simulación basada en agentes, Cárdenas González, Laura y Soto Lozano, Camila, 2020. En este trabajo se realizar un estudio de optimización por el cual se valoran diferentes agentes a tener en cuenta para poder desarrollar un sistema de tráfico que sea óptimo para la circulación<sup>16</sup>(Cárdenas González, L. y Soto Lozano, C., 2020).

La implementación del sistema de Google es muy parecida al del planteado en este proyecto, con AI que busca detectar el tráfico en tiempo real y mediante el uso de juego de semáforos descongestionar el tráfico para reducir el consumo de gasolina en un 10% a 20%. Este sistema ya ha sido probado en Israel y Google actualmente está esperando poder implementarlo en Rio de Janeiro. No se ha podido encontrar ningún artículo académico sobre este proyecto por lo que se adjunta en el pie de página la referencia de búsqueda<sup>17</sup>.

Actualmente el proyecto desarrollado comparte más características con último nombrado. Se busca la reducción de tiempos de tránsito de vehículos mediante un algoritmo que permita modificar las señales semaforicas dinámicamente.

### **3.1.1 IMPLEMENTACIÓN TECNOLÓGICA**

Las herramientas existentes para poder desarrollar el proyecto son varias. Podemos distinguir dos grupos de herramientas. En primer lugar, los diferentes simuladores existentes y luego los diferentes métodos de detección de la información de los coches.

En el primer grupo podemos destacar diferentes simuladores como, Aimsun, el usado en este proyecto, Carla simulador, un simulador de alta capacidad de procesamiento. También podemos mencionar Autoware, centrado en simulación de coches de auto conducción. Finalmente, otro simulador de notable mención es Airsim que proporciona una simulación muy detallada del entorno.

---

<sup>16</sup> Cárdenas González, L. y Soto Lozano, C., 2020

<sup>17</sup> <https://www.google.com/search?q=google+ai+with+traffic+lights&aq=chrome.69i57j0i22i30j69i64.8393j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8>

En el segundo bloque de las herramientas posibles a usar son las diferentes técnicas de detección de coches. Debido a que este proyecto no se requiere de un alto realismo de coches ya que solo, en una primera instancia, se necesita mantener una cuenta dinámica de los coches capturados por las cámaras, se usa la herramienta de Cv2 para poder detectar máscaras de colores. La otra alternativa para poder detectar los coches es usar Inteligencia Artificial (IA) para poder detectar los coches. La rama usada de la IA para poder hacer esto posible es el Machine Learning que permite que las máquinas aprendan a partir de parámetros iniciales. Dentro de Machine Learning usaremos la rama de Deep Learning. Esta rama tiene la particularidad de que es la máquina quien consigue extraer las características de los datos de entrada en nuestro modelo y usa esas características para detectar los objetos deseados.

### **3.1.2 FUNCIONALIDAD**

El valor añadido que proporciona este proyecto es poder implementar el sistema en zonas de alto tránsito sin tener que realizar obras ni interrumpirlo, con un coste reducido. Una implementación muy eficaz de este sistema sería la introducción a Madrid 360, proyecto con el que comparte los objetivos de sostenibilidad, escalabilidad y reducción de emisiones dentro de la capital, Madrid.

Madrid Central es una zona en el centro de la ciudad, en el que el Ayuntamiento tiene como objetivo reducir la emisión de gases contaminantes a la atmósfera, que contribuyen junto a otros, al cambio climático y a enfermedades que afectan a la población en general, además de descongestionar la zona centro de Madrid del intenso tráfico que venía sufriendo diariamente. Una de las medidas tomadas ha sido limitar la circulación de ciertos vehículos en esta área.



*Ilustración 13. Límites de Madrid Central.*

Esta limitación de los vehículos del centro de Madrid (Ilustración 13) ha resultado en un aumento del uso de otros medios de transporte entre los cuales están la bicicleta, transporte público y movilidad a pie. Pero seguir extendiendo esta limitación puede afectar de manera negativa a la movilidad en Madrid y a su comodidad de alternativas de viaje.

Madrid tiene como objetivo seguir aumentando y creando nuevas zonas restrictivas para vehículos de alta contaminación, hasta poder alcanzar en 2025 una limitación total de la circulación de coches sin etiquetas en toda la comunidad de Madrid.



*Ilustración 14. Madrid 360.*

El proyecto de Madrid 360, es una solución de movilidad para poder fomentar la sostenibilidad; reducir contaminación, en forma de emisiones; y cumplir con normativas europeas. Entre todas las soluciones que plantea Madrid 360 para la movilidad, como pueden ser 2 nuevas líneas de la EMT completamente gratuitas y 100% eléctricas; la creación de 15.000 nuevas plazas de aparcamiento disuasorio; y el apoyo al uso del “*car sharing*” y la moto duplicando las plazas de aparcamiento que tienen ahora mismo, no podemos encontrar una solución que se centre en una mejor gestión de tráfico. Este punto es esencial debido a que se puede conseguir una disminución de emisiones significativa con un sistema como el planteado en este proyecto ya que ataca directamente a uno de los principales problemas de la movilidad, que son los atascos. Además, una solución de mejora de gestión afecta a todo el mundo sin perjudicar a nadie. Esto quiere decir que una implementación de un sistema dinámico de gestión de tráfico lo usan todos los conductores, tengan el vehículo que tengan y usen el método de transporte que usen, sin penalizar a ningún usuario de las vías.

Los objetivos de sostenibilidad y reducción de emisiones buscan en ambos proyectos ser soluciones para combatir el cambio climático, de una manera u otra. El objetivo de escalabilidad busca que, a medida que la capital crece con nuevos proyectos y nuevas ambiciones, como puede ser Madrid Nuevo Norte, la implementación de los proyectos elegidos sean capaces de cumplir satisfactoriamente los requisitos que se piden.



*Ilustración 15. Madrid Nuevo Norte.*

Madrid Nuevo Norte es un desarrollo urbanístico que va a tomar lugar en la capital de España y será, a nivel municipal, la transformación más importante y, a su vez, a nivel europeo, una de las principales. Madrid Nuevo Norte busca poder crear una ciudad 100% sostenible con

el menor impacto medioambiental posible. Por lo que, si en este proyecto de desarrollo urbanístico se introduce un sistema de gestión dinámico los efectos que se producen sobre los usuarios de las vías, como los de contaminación, no solo en formato de emisiones, sino también en contaminación acústica son únicamente beneficiosas.

La implementación de un gestor de tráfico activo permitirá no solo reducir tiempos de viajes, sino que, principalmente la reducción de emisiones de partículas contaminantes.





## Capítulo 4. DEFINICIÓN DEL TRABAJO

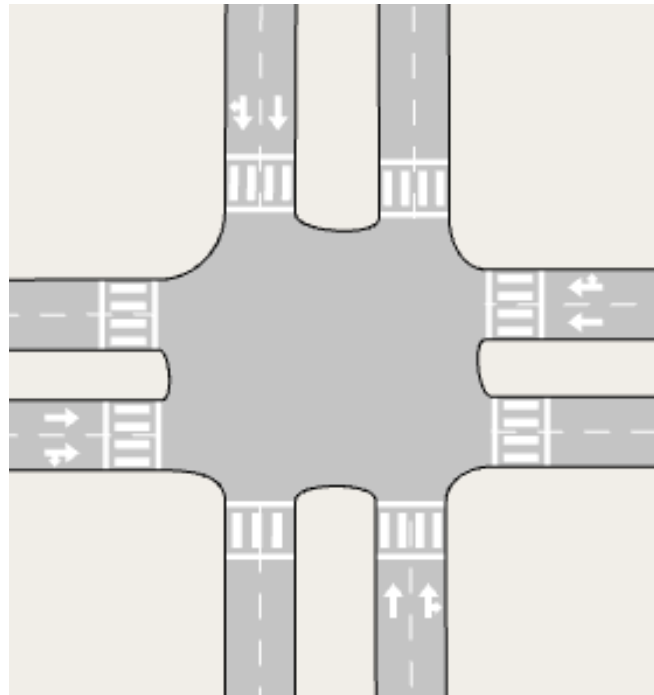
### 4.1 JUSTIFICACIÓN

Como se ha comenzado a indicar en el [Capítulo 3. Estado de la cuestión](#), la mayoría de los proyectos intentan resolver la descongestión de tráfico basándose en la redirección de los coches o en la limitación de tráfico sobre una vía con barreras de paso, pudiendo producir problemas de congestión en otros nodos de la carretera. El único proyecto que intenta enfocar la misma solución es el de Google, pero actualmente no existe mucha información sobre la tecnología que está usando ni los gastos económicos que ha implicado, indicando únicamente que se va a enfocar el proyecto usando inteligencia artificial con el uso de sensores y cámaras.

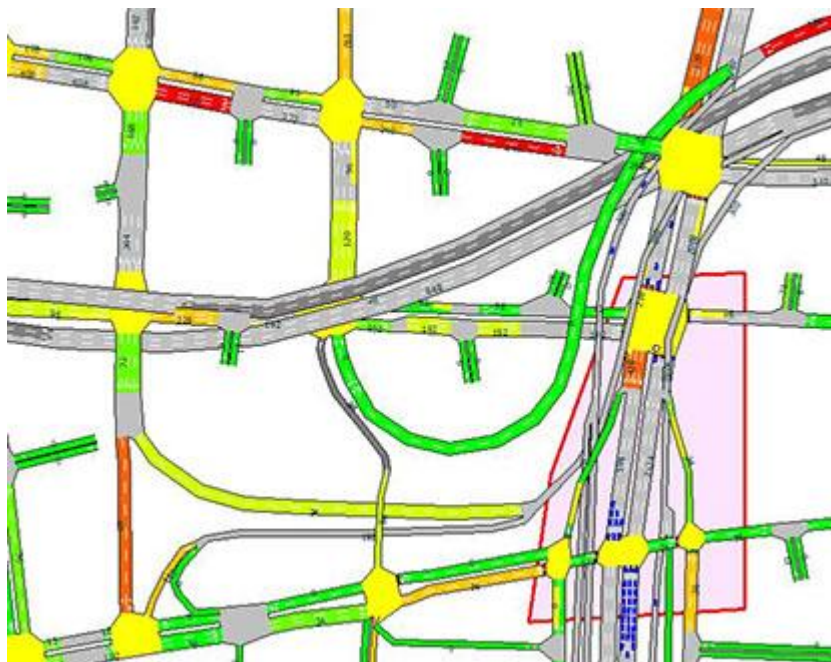
Por lo que la solución que se plantea en este trabajo tiene la ventaja de ser de bajo coste de implementación, al necesitar pocos elementos, como puede ser 1 cámara por intersección y un módulo de conexión para enviar las imágenes capturadas a un servidor y procesarlas. También se suma a las ventajas la complejidad reducida del sistema, al ser una solución basada en software y no requerir de elementos externos.

El proyecto planteado tiene la capacidad de conseguir la reducción de tiempos de tránsitos de vehículos en zonas de alta congestión y en sí, reducir la contaminación que se produce en la intersección. Y si el sistema se aplicando a varias intersecciones el efecto conseguido es el mismo en todas y los resultados de la reducción de contaminación serán mayores.

Como es sistema está enfocado a ser aplicado a una única intersección y no requiere de input de otras, se puede obtener una red muy simple, con tan solo 1 nodo (Ilustración 16) o una red muy compleja (Ilustración 17) con todos los nodos que se necesiten.



*Ilustración 16. Red con único nodo {Aimsun}.*



*Ilustración 17. Red con múltiples nodos {Aimsun}.*

## **4.2 OBJETIVOS**

Como se ha ido mencionando a lo largo del trabajo el principal objetivo que se quiere obtener es la reducción de tiempos de tránsito para que los vehículos pasen el menor tiempo posible en las vías para reducir la contaminación que producen.

Por lo tanto, los principales objetivos del proyecto son:

En primer lugar, desarrollar un sistema que permita la descongestión del tráfico basado en información del nodo en el que se encuentra sin recurrir a alternativas de redirección.

En segundo lugar, relacionado con el primer objetivo, es reducir la cantidad de partículas contaminantes producidas por los coches en su totalidad desde el inicio de un viaje hasta el fin de este mismo.

En tercer lugar, obtener un sistema de descongestión de tráfico basado en procesos software que permitan reducir costes de implementación a la hora de escalabilidad en una situación real.

Y finalmente poder detectar el flujo de coches mediante un modelo de Inteligencia Artificial, Deep Learning.

## **4.3 METODOLOGÍA**

La metodología que se va a implementar para poder desarrollar el proyecto es una combinación del método Agile con implementación de Waterfall en ciertas partes del trabajo.

La metodología Agile (Ilustración 18) consiste en ser un método que asegura respuestas rápidas a valoraciones sobre el propio proyecto. En sí, es un sistema que permite, frente a cambios en planificación, una rápida y sencilla adaptación a estos. Por este motivo se le determina con el nombre de Agile, del inglés, ágil.



*Ilustración 18. Etapas de la metodología Agile.*

El principal componente de este método son las aportaciones de los integrantes del grupo y las intervenciones que hay entre ellos, que están valorando constantemente la evolución del proyecto.

Un objetivo principal de esta metodología es que se valore más la calidad frente a la cantidad. Es decir, se prefiere un funcionamiento perfecto de una parte del sistema frente a un funcionamiento parcial e incompleto del proyecto entero.

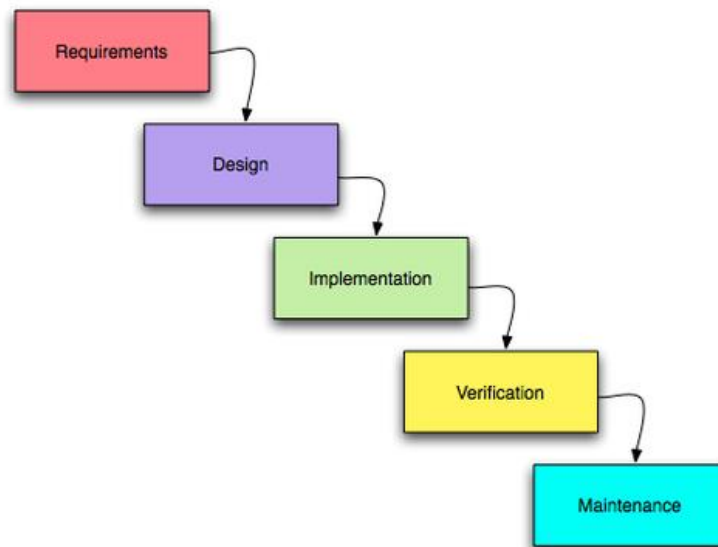
A lo largo del desarrollo del trabajo, han surgido varias modificaciones del sistema y en el resultado de la implementación que se quiere obtener. Por lo que la adaptación de la organización frente a estas modificaciones permite mostrar un claro uso de la metodología Agile. Entre estas modificaciones podemos hacer notar la elección al cambio producido en la sección de la identificación de los coches, pasando del uso de un modelo de Machine Learning basado en Yolov4 y TensorFlow a un uso de OpenCv para la detección de los coches simulados en Aimsun.

Otra modificación del proyecto surge con el tipo de simulador a usar. Entre varias opciones iniciales se optó por implementar el sistema basándose en el simulador Carla, pero pese a su complejo uso y alto requerimiento de capacidad en el ordenador local en el que se desarrolla este proyecto no se pudo avanzar con esta opción y se tuvo que buscar otra alternativa. Esta alternativa fue Aimsun. Este simulador proporcionaba una solución de bajo nivel de procesamiento y con una capacidad de aprendizaje mayor a Carla.

Finalmente, el último ejemplo que demuestra la implementación de la metodología Agile es la variación de implementación del sistema en conjunto. Se pasó de querer implementar un módulo de descongestión dinámico en tiempo real, por un modelo retroalimentado que permitirá obtener instrucciones óptimas para escenarios concretos que se han estudiado, y posteriormente con estos dos elementos se podrá entrenar un modelo de Inteligencia Artificial que permita en tiempo real determinar la instrucción semafórica idónea para un escenario particular.

La metodología Waterfall (Ilustración 19), o cascada también ha sido implementada en este proyecto. Esta metodología consiste en desarrollar una parte del proyecto y cuando se finalice, pasar el siguiente, pero únicamente cuando se finalice. Esta metodología ha tenido ventajas e inconvenientes en la realización de este proyecto. La principal ventaja es poder tener organizadas una serie de tareas a realizar. Estas tareas se completarán a medida que vaya avanzando el proyecto.

Las dos principales desventajas de esta metodología es que no se tiene una visión global del proyecto a medida que se está desarrollando y es complicado poder anticipar fallos y cambios en el proyecto. Y que no se puede avanzar hasta que no ha finalizado la tarea previa, y por lo tanto, si una tarea se retrasa, el resto de tareas también, a no ser que se recorte tiempo de otras partes del proyecto.



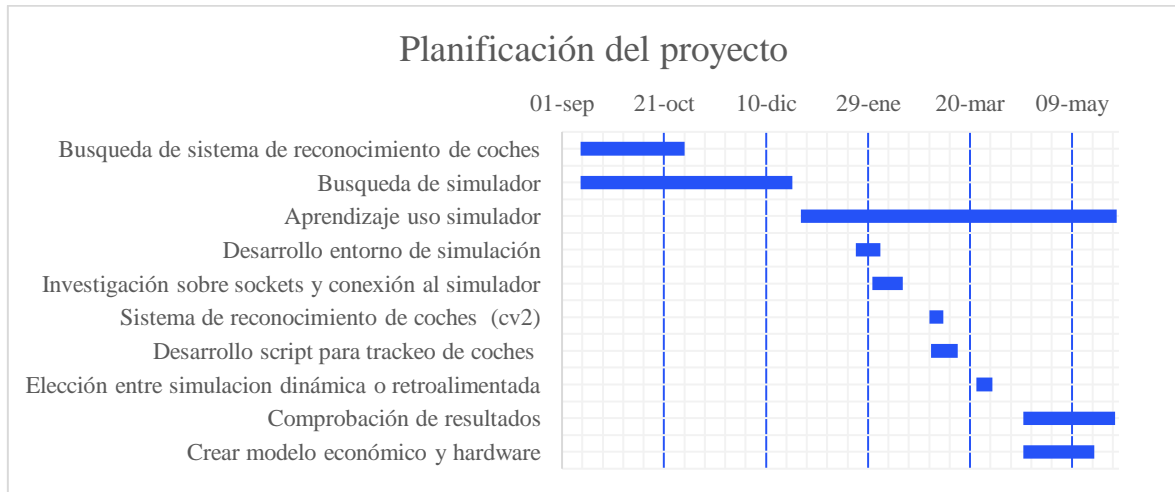
*Ilustración 19. Etapas de la metodología Waterfall.*

Un claro ejemplo de la implementación de la metodología Waterfall es la secuencia de: primero encontrar un simulado para el sistema, seguido del aprendizaje de este mismo y finalizando con el desarrollo de un entorno de simulación con capacidad de conexión al sistema creado y de ejecución a nivel local.

Por los motivos que se han indicado previamente, la implementación conjunta de tanto la metodología agile como la metodología Waterfall es una solución válida para el desarrollo de cualquier tipo de proyecto, pero principalmente para proyectos software como puede ser este. Esto se debe a que en lugares donde la metodología agile no proporciona una solución óptima como puede ser la distribución del tiempo, la metodología Waterfall permite una visión mucho más clara. Y zonas en las que la metodología Waterfall falla, como puede ser en el cambio de objetivos del proyecto, la metodología agile complementa perfectamente.

## 4.4 PLANIFICACIÓN Y ESTIMACIÓN ECONÓMICA

La planificación de este proyecto se muestra en el siguiente diagrama de Grantt.



*Ilustración 20. Diagrama de Grantt.*

El desarrollo de las actividades llevadas a cabo en cada etapa se puede encontrar en el apartado [5.1 Desarrollo de las etapas de planificación.](#)

La estimación económica va acompañada de los componentes que se deseen implementar para poder obtener el vídeo de los coches, el procesamiento de las imágenes y los módulos para poder representar la salida a través de luces. Debemos analizar dos escenarios distintos:

El primero es el actual, el desarrollado. Este modelo económico que solo consta de procesamiento software y una licencia de simulación. El coste inicial del presupuesto es únicamente la licencia del simulador, con funciones API, de 150 € anuales. Este presupuesto solo contemplaría poder seguir realizando estudios sobre las posibles mejoras a la gestión de tráfico y no el desarrollo de un modelo real.

El segundo presupuesto, es el ya mencionado, el de escalabilidad hacia un sistema de implementación real. Este modelo económico contempla el desarrollo hardware para su integración y un salario base de gestión y crecimiento.

En el apartado de software podemos encontrar dos componentes.

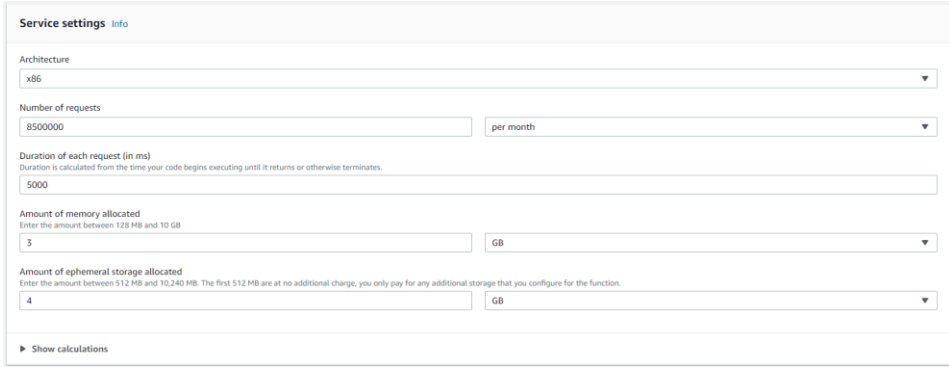
El primero sería un servicio *cloud* para poder almacenar los registros de los semáforos y respectivas imágenes del escenario evaluado y poder mantener una base de datos para posibles estudios y corrección de errores.

Esta solución se puede implementar a través de AWS DynamoDB. Este servicio nos permitirá almacenar la información en un mismo lugar y poder acceder a ella desde un entorno integrado con el procesamiento. El coste de este servicio es de 2300€ por mes.

DynamoDB on-demand capacity estimate	
DynamoDB data storage cost (monthly)	2,176.00 USD
Monthly write cost (monthly)	125.00 USD
<b>Total monthly cost:</b>	<b>2,301.00 USD</b>

***Ilustración 21. Presupuesto económico del servicio AWS DynamoDB.***

El segundo componente puede usar el servicio de AWS Lambda que permite ejecutar código cargado desde una imagen de un contenedor, como puede ser Docker. Este servicio tendrá un coste de aproximadamente 2200€ mensuales. Este precio se ha obtenido con el estimador de presupuestos de AWS.



The screenshot shows the 'Service settings' form for AWS Lambda. The fields are as follows:

- Architecture:** x86
- Number of requests:** 8500000 per month
- Duration of each request (in ms):** 5000
- Amount of memory allocated:** 3 GB
- Amount of ephemeral storage allocated:** 4 GB

There is a 'Show calculations' link at the bottom of the form.

***Ilustración 22. Requerimientos del servicio AWS Lambda.***

En el apartado de hardware encontraremos 4 componentes iniciales. El primero será un módulo de cámara que permitirá obtener todas las imágenes del entorno. Este módulo puede ser una cámara como la siguiente, con un precio que ronda los 50€ a 70€.





**SEN-18088**

---

N.º de producto de Digi-Key: 1568-SEN-18088-ND

Fabricante: [SparkFun Electronics](#)

Número de pieza del fabricante: SEN-18088

Descripción: SPARKFUN 2D BARCODE SCANNER BREA

Plazo estándar del fabricante: 6 semanas

Descripción detallada: DE2120 series Sensores de imágenes CMOS Placas de evaluación - sensores


Referencia del cliente:

Hoja de datos: [Hoja de datos](#)

Foto demostrada es una representación solamente. Datos específicos deben ser obtenidos de las hojas de datos del producto.

***Ilustración 23. Módulo de cámara.***

El segundo componente es un módulo de 4G que nos permite realizar la conexión con el servicio de Amazon para enviar la información capturada. Y el componente principal para poder unificar estos dos elementos será un Orange pi. Se puede encontrar un Orange pi con un modulo de 4G integrado por tan solo 90€, aproximadamente.



**Orange Pi 4 LTS 3/4GB LPDDR4+16GB EMMC Rockchip RK3399, Run Android, Ubuntu, Debian OS (Pi 4 LTS 4GB +16GB EMMC)**

Brand: Orange Pi

---

Size: **Pi 4 LTS 4GB +16GB EMMC**

Pi 4 LTS 4GB +16GB EMMC 1 option from \$92.90	Pi 4 LTS 3GB Without... 1 option from \$74.90	Pi 4 LTS 3GB +16GB EMMC 1 option from \$82.90	Pi 4 LTS(3GB 16GB)+5V4... 1 option from \$91.07
Pi 4 LTS 4GB Without... 1 option from \$84.90	Pi 4 LTS(4GB 16GB)+5V4... 1 option from \$101.00		

---

Brand: Orange Pi  
 Connectivity Technology: Ethernet, HDMI  
 Ram Memory Installed Size: 4 GB

***Ilustración 24. Orange pi y módulo 4G.***

El último componente de este sistema serían los semáforos, cuyo diseño y presupuesto quedan fuera del alcance de este proyecto, por el momento.

En el presupuesto también incluimos el mantenimiento y desarrollo del sistema con un grupo de 3 ingenieros, con un salario de 135.000€ el trimestre.

Presupuesto de componentes software:

Servicios	Precio	Frecuencia de pago
<b>AWS DynamoDB</b>	2.300 €	mensual
<b>AWS Lambda</b>	2.200 €	mensual

*Tabla 9. Presupuestos de servicios software.*

Presupuesto de componentes hardware (1):

Componentes	Precio
<b>Módulo de cámara</b>	60 €
<b>Orange pi + módulo 4G</b>	90 €

*Tabla 10. Presupuesto de componentes hardware para 1 semáforo.*

Presupuesto de desarrollo y mantenimiento:

Integrantes	Precio	Frecuencia de pago
<b>Ingeniero 1</b>	45.000 €	Trimestral
<b>Ingeniero 2</b>	45.000 €	Trimestral
<b>Ingeniero 3</b>	45.000 €	Trimestral

*Tabla 11. Presupuesto para desarrollo y mantenimiento del sistema.*

Total: 148500€ trimestralmente y 150€ por modulo completo instalado.

## Capítulo 5. SISTEMA/MODELO DESARROLLADO

En este capítulo se desarrolla tanto la explicación de qué se ha hecho en cada etapa del proyecto, las conclusiones de las decisiones que se han tomado y la interpretación que se debe realizar con el resultado final.

### 5.1 DESARROLLO DE LAS ETAPAS DE PLANIFICACIÓN

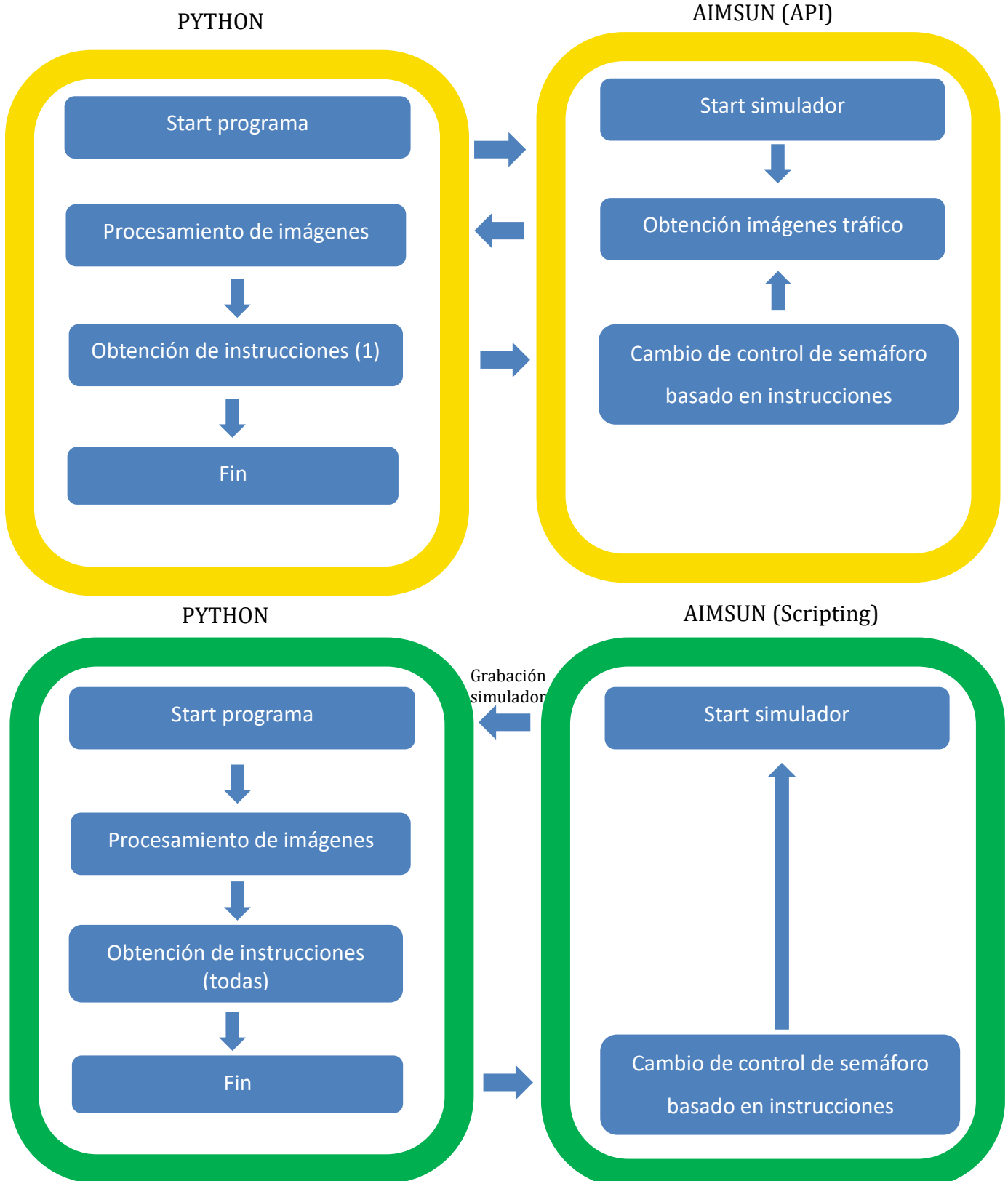
#### 5.1.1 BÚSQUEDA DE SISTEMA DE RECONOCIMIENTO DE COCHES

La implementación original consiste en obtener a través de un modelo de Machine Learning, que usa Yolov4 y Tensorflow la detección de coches reales (Ilustración 25).



*Ilustración 25. Detección de coches reales*

Elección entre simulación dinámica y retroalimentada. (Diagrama de contexto)



### 5.1.2 BÚSQUEDA DE SIMULADOR

Elección de un simulador para poder realizar las pruebas de la modificación de los controles de las señales de tráfico. La elección final resultó en el uso del simulador de tráfico Aimsun. Otra posible alternativa podría haber sido CarlaSim (Ilustración 26 e Ilustración 27).



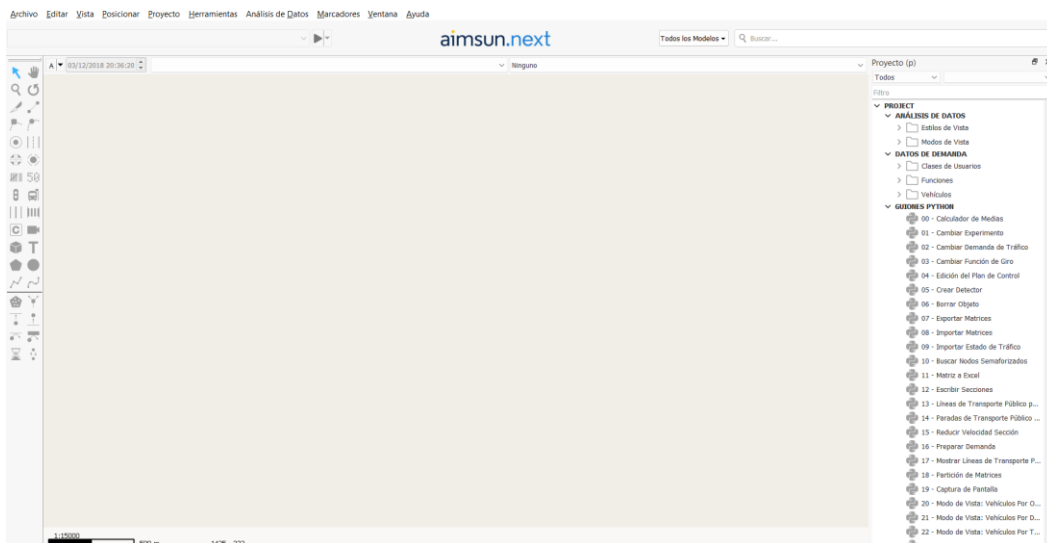
*Ilustración 26. Aimsun logo.*



*Ilustración 27. CARLA Simulador logo.*

### 5.1.3 APRENDIZAJE USO SIMULADOR

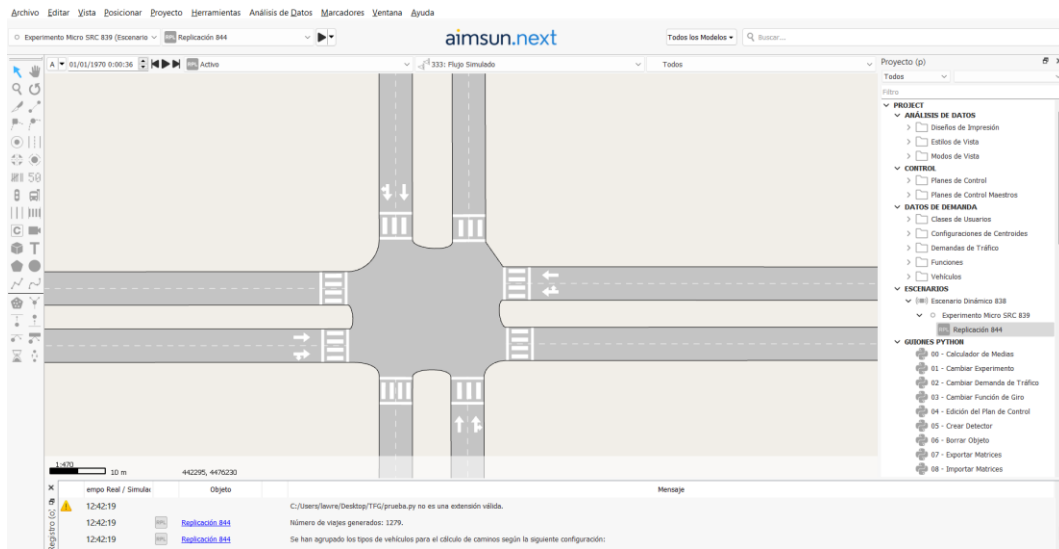
El proyecto ha contado con la necesidad de la documentación del simulador Aimsun para su desarrollo (Ilustración 28).



*Ilustración 28. Entorno de desarrollo Aimsun.*

### 5.1.4 DESARROLLO ENTORNO DE SIMULACIÓN

La comprobación del sistema en un entorno controlado es esencial para poder determinar la efectividad del proyecto. Las pruebas se realizan sobre el mismo entorno de simulación con un flujo de tráfico fijo (Ilustración 29).



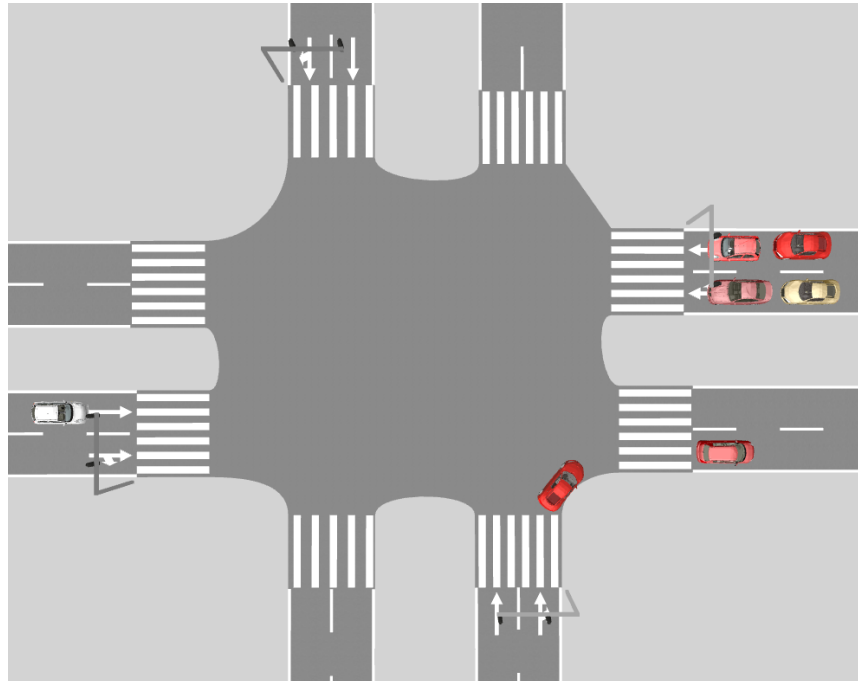
*Ilustración 29. Entorno de simulación controlado.*

### 5.1.5 INVESTIGACIÓN SOBRE SOCKETS Y CONEXIÓN AL SIMULADOR

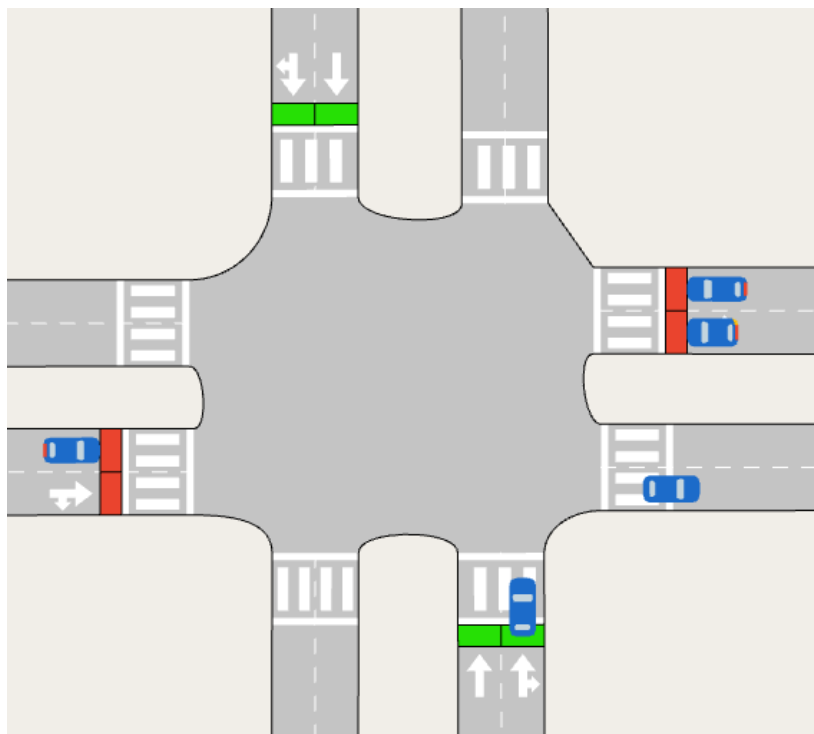
El envío de instrucciones hacia el simulador se debe realizar median el uso de sockets. En este modelo de cliente-servidor, el servidor es el simulador Aimsun, que dentro de él tiene posibilidad de inyectar scripts y el cliente es un módulo externo que procesa las instrucciones que debe enviar.

### 5.1.6 SISTEMA DE RECONOCIMIENTO DE COCHES

Debido a la limitación de capacidad de procesamiento con la que se ha contado para este proyecto y el inconveniente de que el módulo de reconocimiento de coches no detecta los coches 3D generado por el simulador, se llega a un punto de inflexión por el cual se comienza el desarrollo de un modelo de OpenCv para la detección del vídeo 2D que genera Aimsun (Ilustración 30 e Ilustración 31).



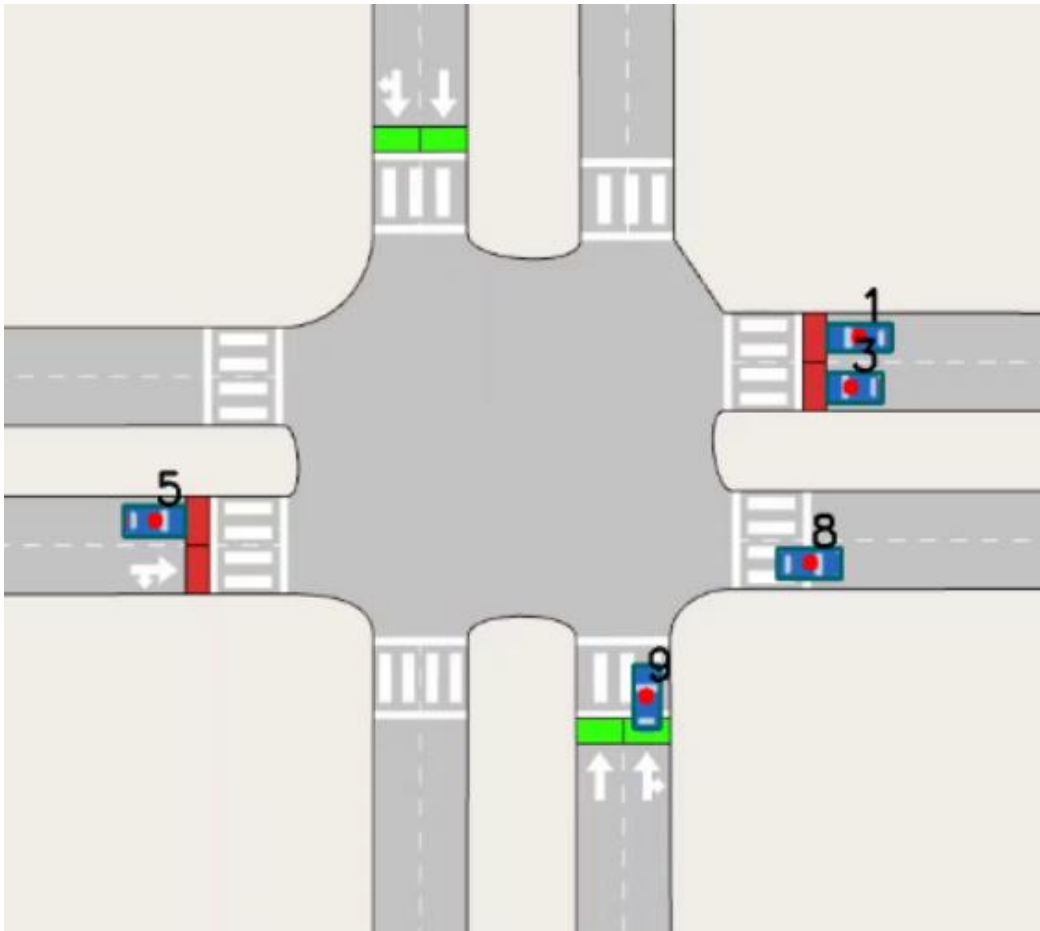
*Ilustración 30. Vista de coches 3D simulados en Aimsun.*



*Ilustración 31. Vista de coches 2D simulados en Aimsun.*

### 5.1.7 DESARROLLO SCRIPT PARA IDENTIFICACIÓN DE COCHES

La instrucción que se procesa para enviar al simulador depende del flujo de tráfico que se genera en ambas direcciones (Norte/Sur y Este/Oeste). Debido a esto, es esencial poder determinar el número de coches que hay en los carriles, identificarlos y saber si se están dirigiendo al nodo de congestión o alejándose de él. Debido a esto el módulo del *tracking* toma una gran participación en este proyecto. Debido a que es un módulo que usa un vector de coordenadas como entrada es aplicable a cualquier tipo de vídeo para realizar seguimientos (Ilustración 32).



*Ilustración 32. Trackeo para la identificación de coches.*



### **5.1.8 ELECCIÓN ENTRE SIMULACIÓN DINÁMICA Y RETROALIMENTADA**

El proyecto se puede afrontar de dos puntos de vista distintos. El primero es la realización de una gestión del tráfico dinámico. Mientras se genera el vídeo de la simulación el sistema se está ejecutando y cada determinado tiempo se toma una decisión sobre la gestión de los semáforos, que se envía al simulador y este los modifica. La segunda alternativa es la evolución de la implementación del sistema de manera retroalimentada. Se genera un video de la simulación y se procesa entero obteniendo todas las instrucciones generadas. Una vez finalizado el vídeo, todas las instrucciones son enviadas al simulador y se genera otro vídeo con las nuevas instrucciones para ser procesadas de nuevo y obtener nuevas indicaciones para mejorar el tráfico. De esta manera en un determinado momento se deberían obtener las indicaciones óptimas y el tiempo de tránsito total debería llegar a un régimen estacionario.

### **5.1.9 COMPROBACIÓN DE RESULTADOS**

Se debe determinar si el sistema creado mejora los tiempos de tránsito cumpliendo los objetivos de reducción de flujo de tráfico y de producción de partículas contaminantes.

### **5.1.10 CREACIÓN DE UN MODELO ECONÓMICO Y HARDWARE**

Elección de los elementos que se necesitarían implementar para el correcto funcionamiento del sistema en un entorno real.

## 5.2 CREACIÓN DEL ENTORNO DE SIMULACIÓN

Para poder realizar una correcta retroalimentación se debe tener un entorno controlado, que siempre realice las mismas funciones en tiempos específicos. Esto se puede hacer con el simulador Aimsun que nos permite controlar parámetro de la simulación. Entre estos parámetros podemos encontrar la densidad de tráfico, diferentes demandas de tráfico y diferentes tipos de simulación.

### 5.2.1 SUPOSICIONES

Para poder mostrar a efectos teóricos el objetivo del proyecto, se estimarán cuántas emisiones producen los automóviles de Madrid en momentos de alto tránsito en la ciudad, como puede ser ir y venir del trabajo y el efecto que tendría sobre la reducción los tiempos de tránsito.

#### Suposiciones:

- Se asume un tiempo medio de tránsito para los ciudadanos de 71 minutos diarios en ir al trabajo en Madrid. <sup>2</sup>(Gutiérrez-Domènech, 2008)
- Velocidad media de conducción dentro de la M-30 (30 km/hora vías de 1 carril y 50 km/hora vías de +2 carriles en un sentido de circulación) es de 40km/hora.

$$\frac{71\text{minutos}}{60\text{minutos}} \times \frac{40\text{km}}{1\text{hora}} = 47.33 \text{ km conducidos por coche para llegar al trabajo.}$$

***Ecuación 1. km conducidos por coche para llegar al trabajo.***

---

<sup>2</sup> Gutiérrez-Domènech, 2008.

Datos de contaminación:

- Establecemos el consumo medio de un coche de gasolina en 8 litros a los 100 km y un coche de diésel en un 17.5% menos, es decir: 6,6 litros a los 100 km. Por lo tanto, por km, un coche de gasolina consume: 0,08 litros y un diésel: 0.066 litros. <sup>6</sup>(Olguin, 2022), <sup>7</sup>(Grupo Gil, 2020).

$$\frac{0.08\text{litros}}{\text{km}} \times 47.33\text{km} = 3.786 \text{ litros de gasolina por coche}$$

*Ecuación 2. Litros de gasolina consumida por coche.*

$$\frac{0.066\text{litros}}{\text{km}} \times 47.33\text{km} = 3.124 \text{ litros de gasoil por coche}$$

*Ecuación 3. Litros de gasoil consumida por coche.*

- Por cada litro de gasolina consumido, un coche emite en promedio 2,35 kg de CO<sub>2</sub> y por cada litro de gasóleo, unos 2,64 kg de CO<sub>2</sub>. <sup>3</sup>(Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía, 2014).

$$3.786 \text{ litros de gasolina} \times 2.35 \text{ kg} = 8.898 \text{ kg de CO}_2 \text{ por coche de gasolina}$$

*Ecuación 4. Kg de CO<sub>2</sub> producidos por coche de gasolina.*

$$3.124 \text{ litros de gasolina} \times 2.64 \text{ kg} = 8.247 \text{ kgde CO}_2 \text{ por coche de gasoil}$$

*Ecuación 5. Kg de CO<sub>2</sub> producidos por coche de gasoil.*

- España tiene matriculados 23.890.000 coches aproximadamente. De estos el 63,78% son coches que consumen gasolina y 35,57% consumen gasoil. El resto son otras variantes.

<sup>6</sup> Olguin, 2022.

<sup>7</sup> Grupo Gil, 2020.

<sup>3</sup> Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía, 2014.

Si aplicamos la proporción a el número de coches existentes en Madrid, 364.416, podemos aproximar que hay 232.424 coches de gasolina y 129.622 coches de diesel en Madrid. <sup>4</sup>(Orús, 2022)

- El 66% de los españoles utilizan el coche para ir a trabajar y el 48% lo usan diariamente. <sup>5</sup>(Europapress, 2017)

Con estos datos podemos determinar cuanta contaminación se produce para ir al trabajo en Madrid:

$$0.44 \times 232.424 \times 8.898 \text{ kg} = 910036.028 \text{ kg de CO}_2 \text{ para coches de gasolina}$$

***Ecuación 6. Kg de CO<sub>2</sub> producidos por todos los coches de gasolina en Madrid.***

$$0.44 \times 129.622 \times 8.247 \text{ kg} = 470048.78 \text{ kg de CO}_2 \text{ para coches de diesel}$$

***Ecuación 7. Kg de CO<sub>2</sub> producidos por todos los coches de gasoil en Madrid.***

$$909395.15 \text{ kg} + 470048.78 \text{ kg} = 1379443,92 \text{ kg de CO}_2$$

***Ecuación 8. Kg de CO<sub>2</sub> producidos por todos los coches en Madrid.***

{Todos estos cálculos se presentan como estimaciones y no como valores exactos}

## 5.2.2 VÍAS DE CIRCULACIÓN

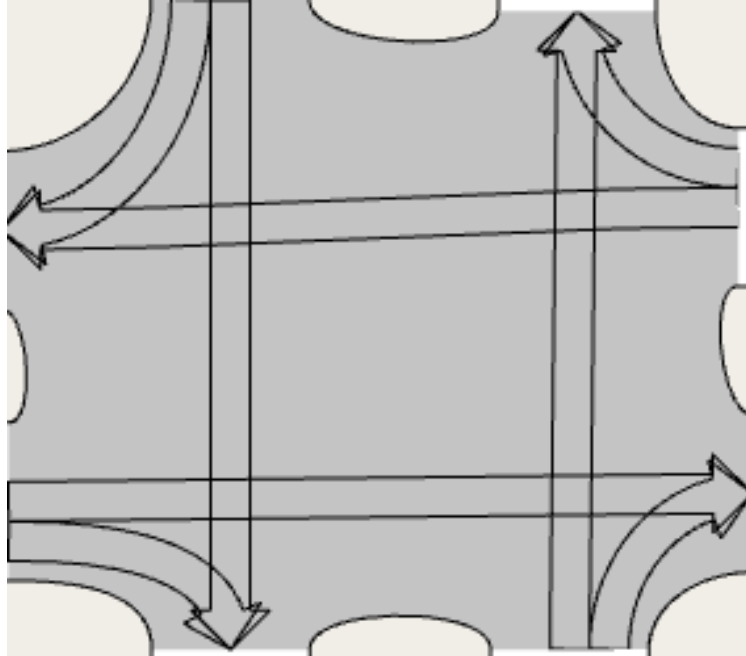
El primer paso para la creación del entorno de simulación es el establecimiento de las vías por las que van a circular los coches. El entorno que se va a usar consta de cuatro elementos

---

<sup>4</sup> Orús, 2022.

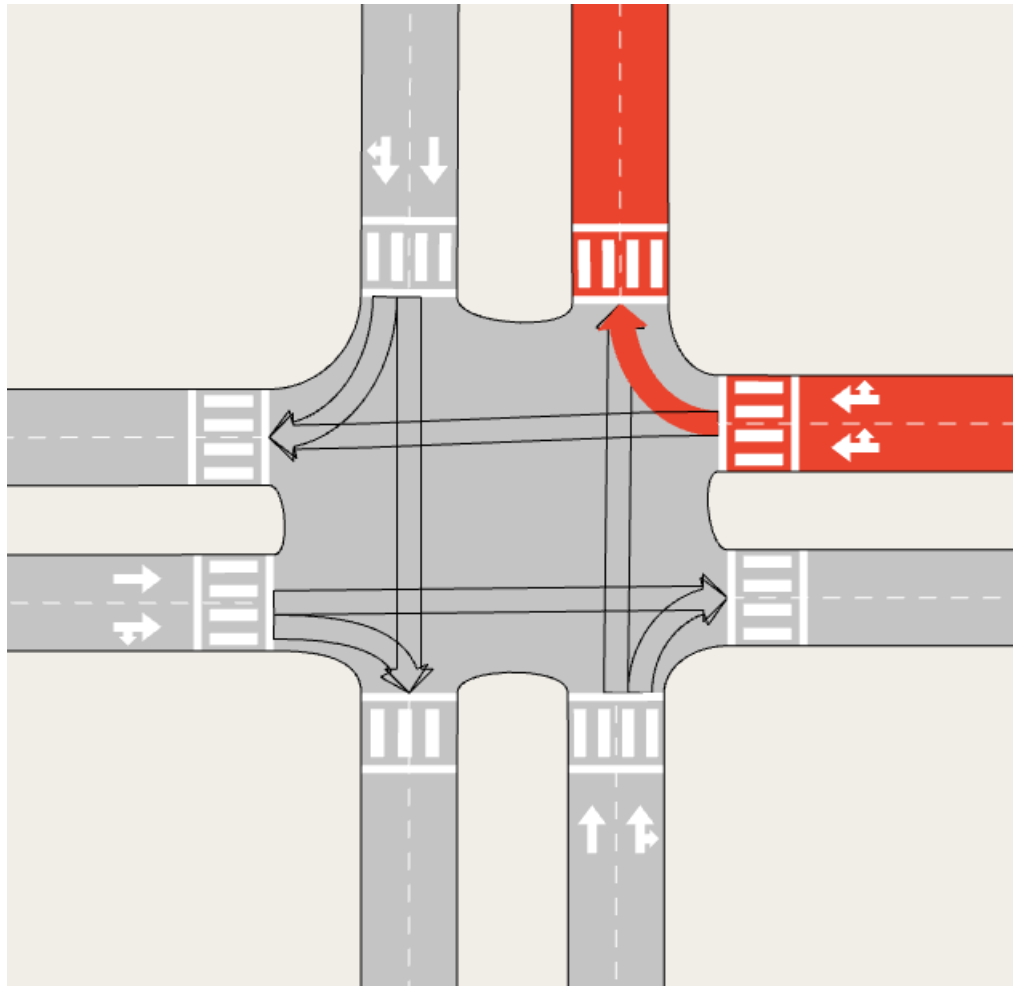
<sup>5</sup> Europapress, 2017.

principales. El primero de ellos es la intersección que se quiere descongestionar (Ilustración 33).

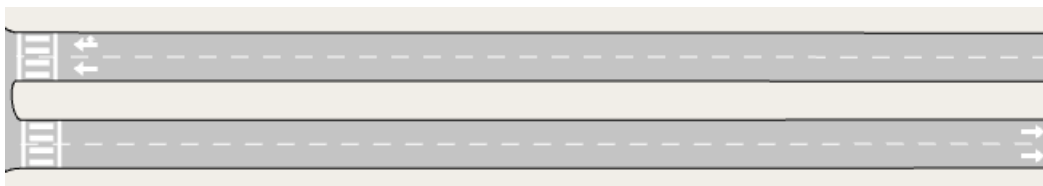


*Ilustración 33. Intersección Aimsun.*

A esta intersección irán conectadas ocho vías de circulación de doble sentido. Cuatro de estas vías serán entrantes a la intersección y cuatro serán salientes de esta. Para las vías de circulación entrantes hay que indicar las vías de circulación salientes por las que envían el tráfico (Ilustración 34 e Ilustración 35).



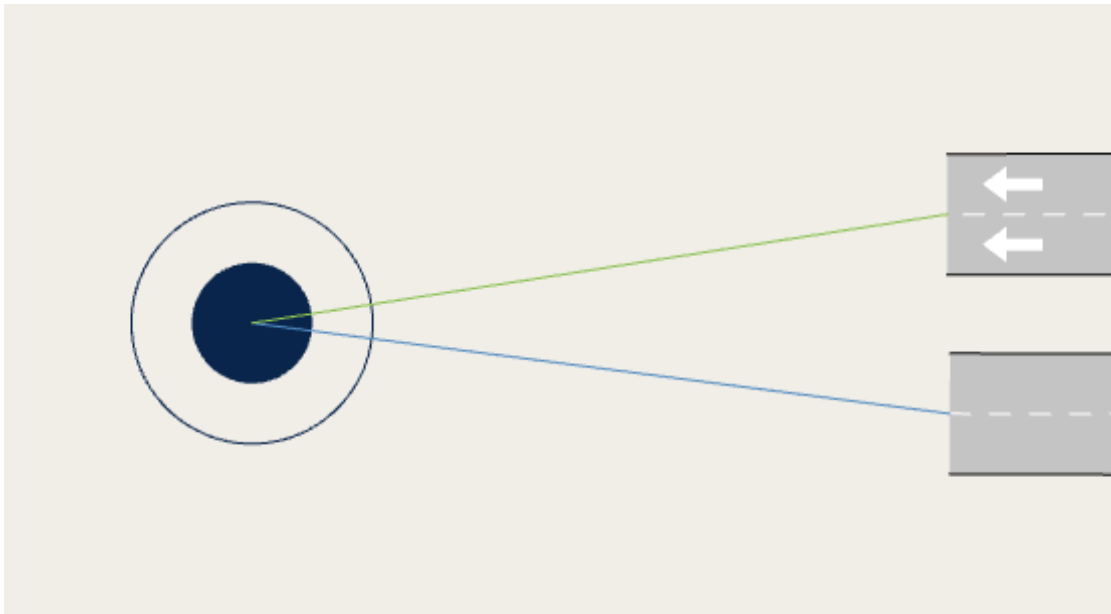
*Ilustración 34. Asignación de ruta del tráfico.*



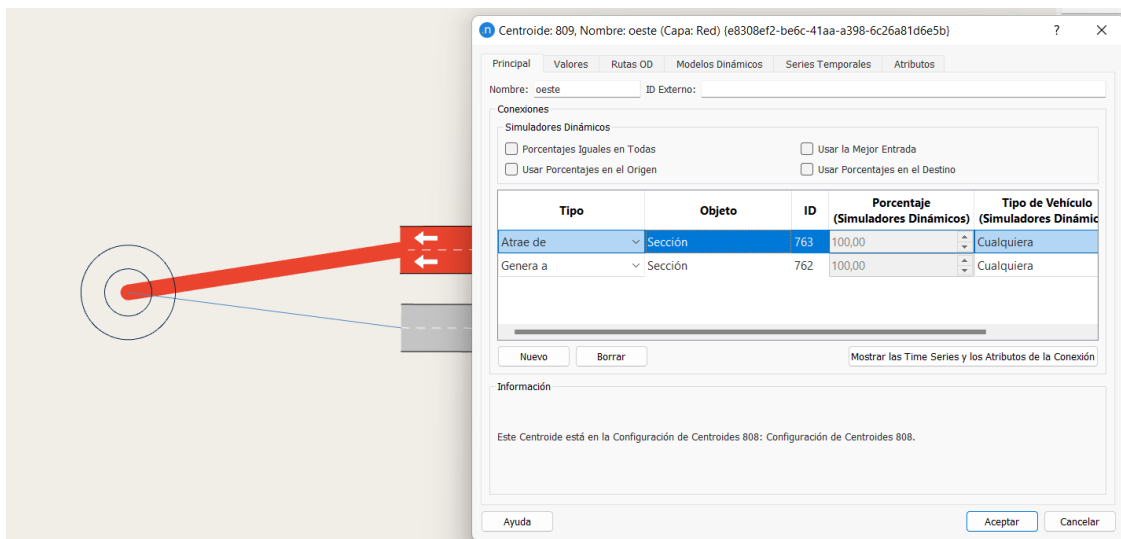
*Ilustración 35. Vías entrantes y salientes de la intersección.*

### 5.2.3 FLUJO DE TRÁFICO

Cada vía debe tener asignado un centroide, que proporcionará el tráfico o al que se lo entregará, y cada centroide tendrá dos vías asignadas, una a la que le proporciona tráfico y a otra de la que recibe tráfico (Ilustración 36 e Ilustración 37).

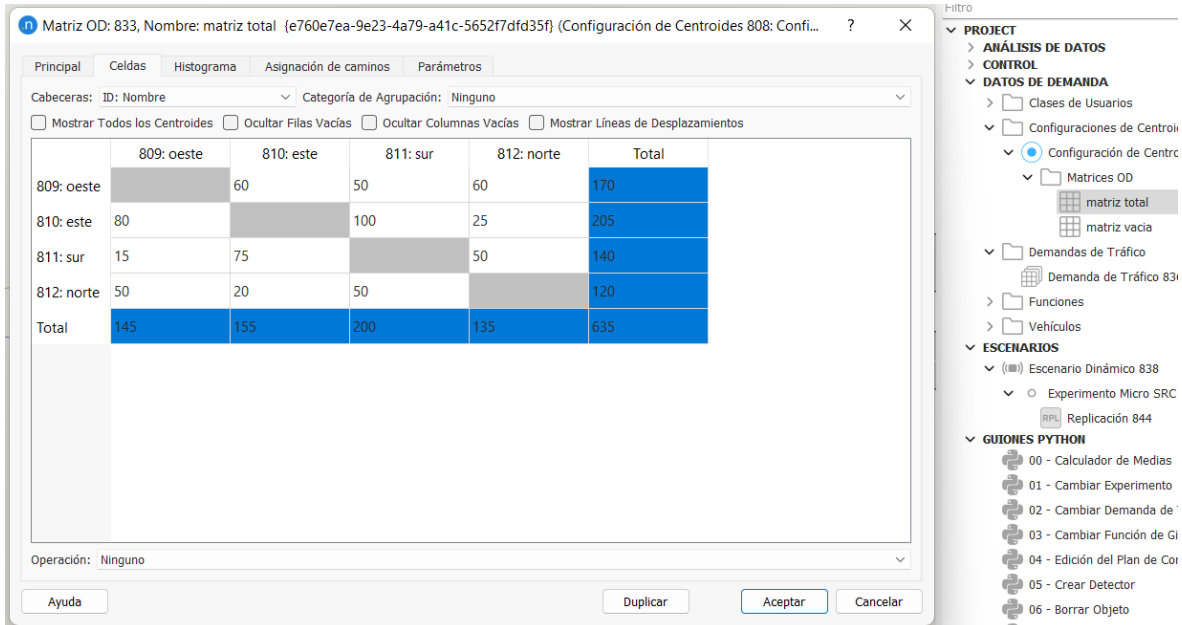


*Ilustración 36. Centroide de tráfico.*

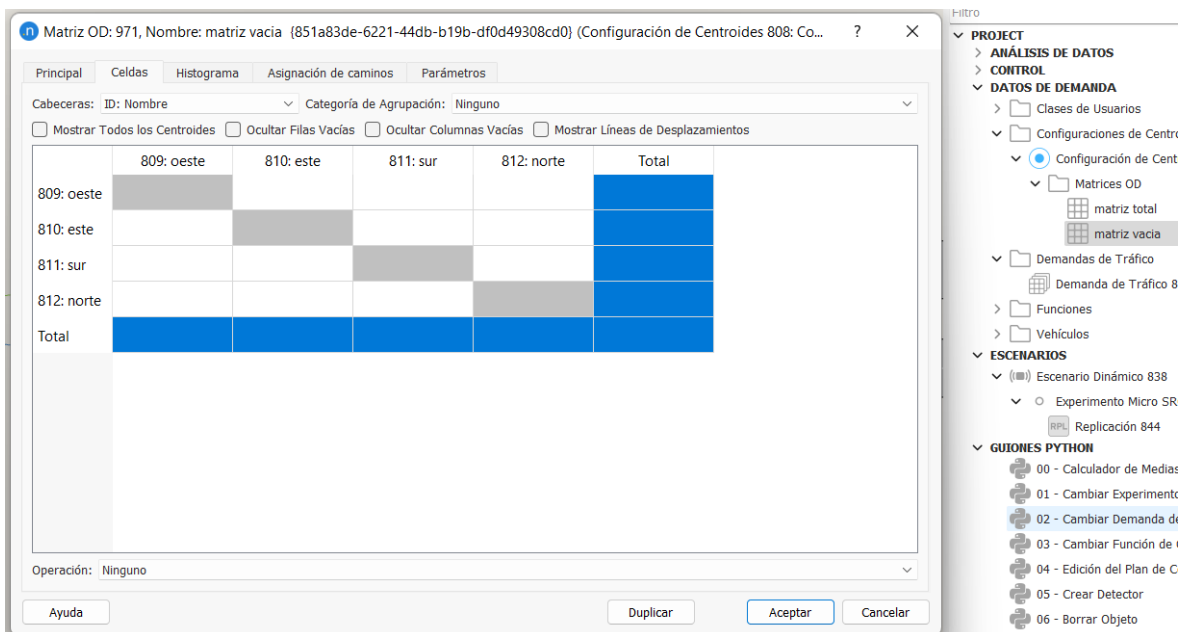


*Ilustración 37. Asignación de tráfico saliente y entrante del centroide.*

El tráfico total que se genera se controla desde la configuración de todos los centroides donde podemos crear diferentes matrices de tráfico indicando el origen y destino de una densidad de coches específica. De esta manera creamos una matriz con una densidad de tráfico alta y otra sin densidad de tráfico (Ilustración 38 e Ilustración 39).



*Ilustración 38. Matriz de circulación con tráfico.*



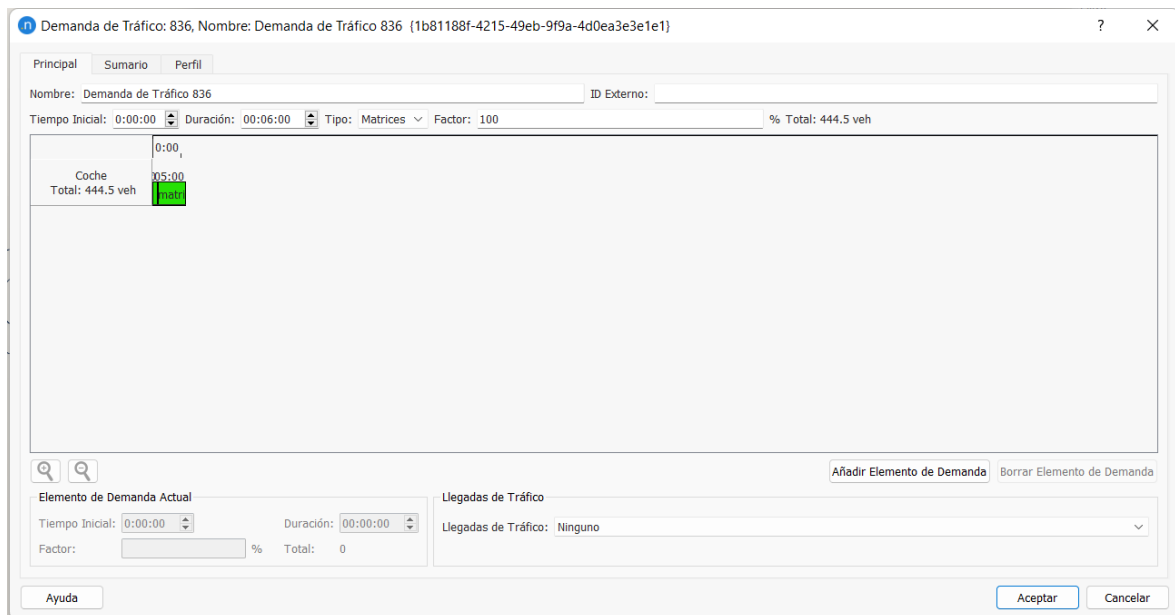
*Ilustración 39. Matriz de circulación sin tráfico.*



## 5.2.4 DEMANDA DE TRÁFICO

La demanda de tráfico se controla por el tiempo que tiene la matriz de poder proporcionar tráfico.

Debido a que la simulación solo dura el tiempo que se le asigna a la generación de tráfico, si no hay generación de tráfico finaliza la simulación. Por lo que la solución que se implementa es tener un tiempo específico para poder generar tráfico, con la matriz de tráfico total y congestionar el nodo con los semáforos apagados y un tiempo de descongestión con la matriz de tráfico vacía y el juego semafórico (Ilustración 40).



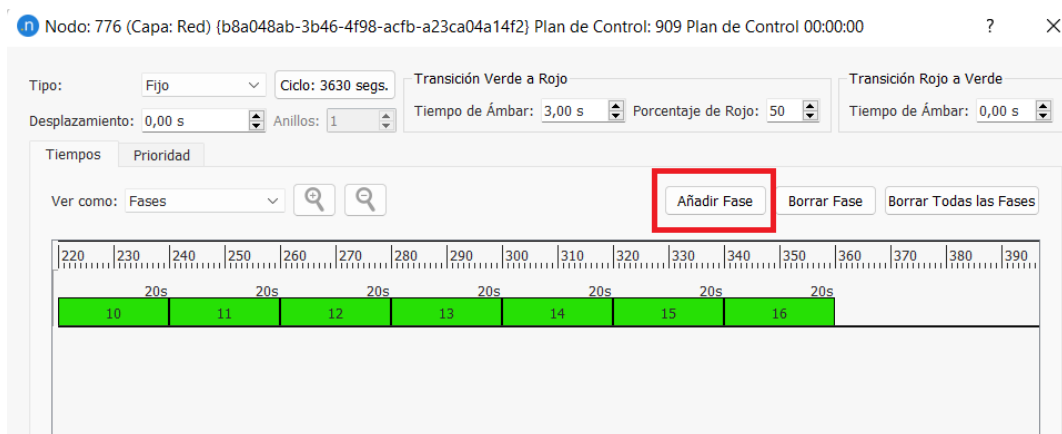
**Ilustración 40. Tiempos de las etapas de la simulación.**

En la ilustración previa se introducen dos etapas. La primera es un periodo de 1 minuto que va desde 0:00:00 hasta 0:01:00 donde se pretende congestionar la intersección. Y la segunda etapa es un periodo de 5 minutos que comienza en 0:01:00 y finaliza en 0:06:00. En esta segunda etapa es donde se produce la descongestión de la intersección y donde se toma como muestra el tiempo de salida del último coche.

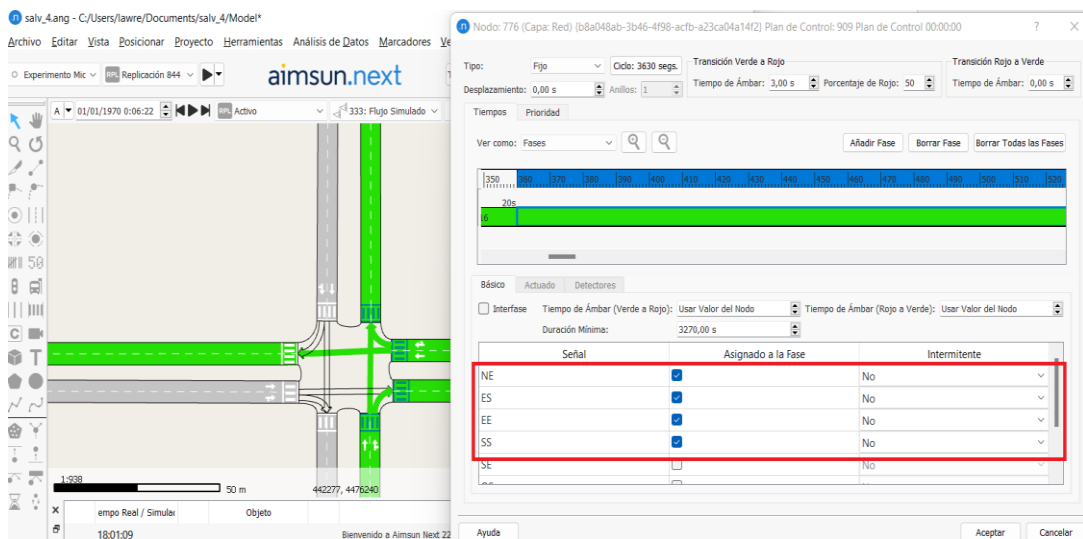
## 5.2.5 CREACIÓN DE INTERMITENCIA SEMAFÓRICA

El punto de partida del proyecto es el entorno de simulación con los parámetros que se han indicado previamente y con un establecimiento de las instrucciones semafóricas de manera intermitente. Esto se puede conseguir mediante una asignación manual, o median un script.

Para poder crear la intermitencia semafórica podemos acceder al nodo de control y dentro de él añadir nuevas fases y asignar los semáforos correspondientemente (Ilustración 41 e Ilustración 42).

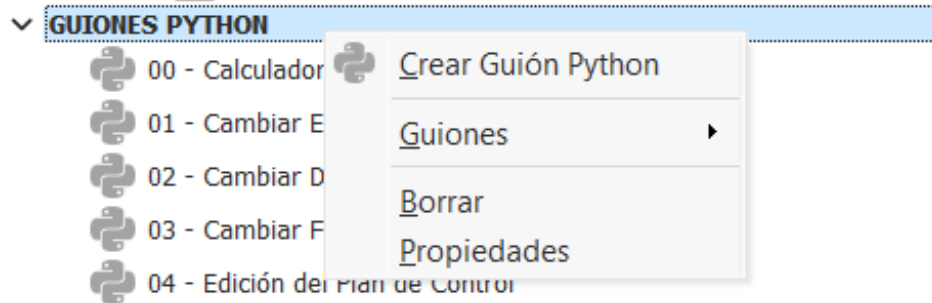


*Ilustración 41. Asignación de fases semafóricas manualmente.*



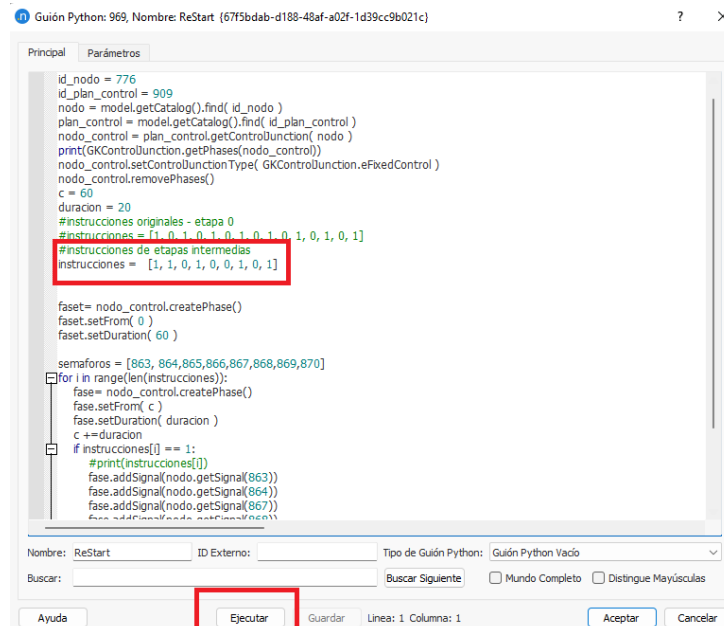
*Ilustración 42. Asignación de semáforos a fase semafórica.*

Para poder realizar esta función de manera automática, como se ha mencionado previamente, se puede realizar mediante código. Este código es un script que se introduce en el apartado de scripting de Aimsun y se ejecuta (Ilustración 43 e Ilustración 44).



**Ilustración 43. Creación de un nuevo guion de Python.**

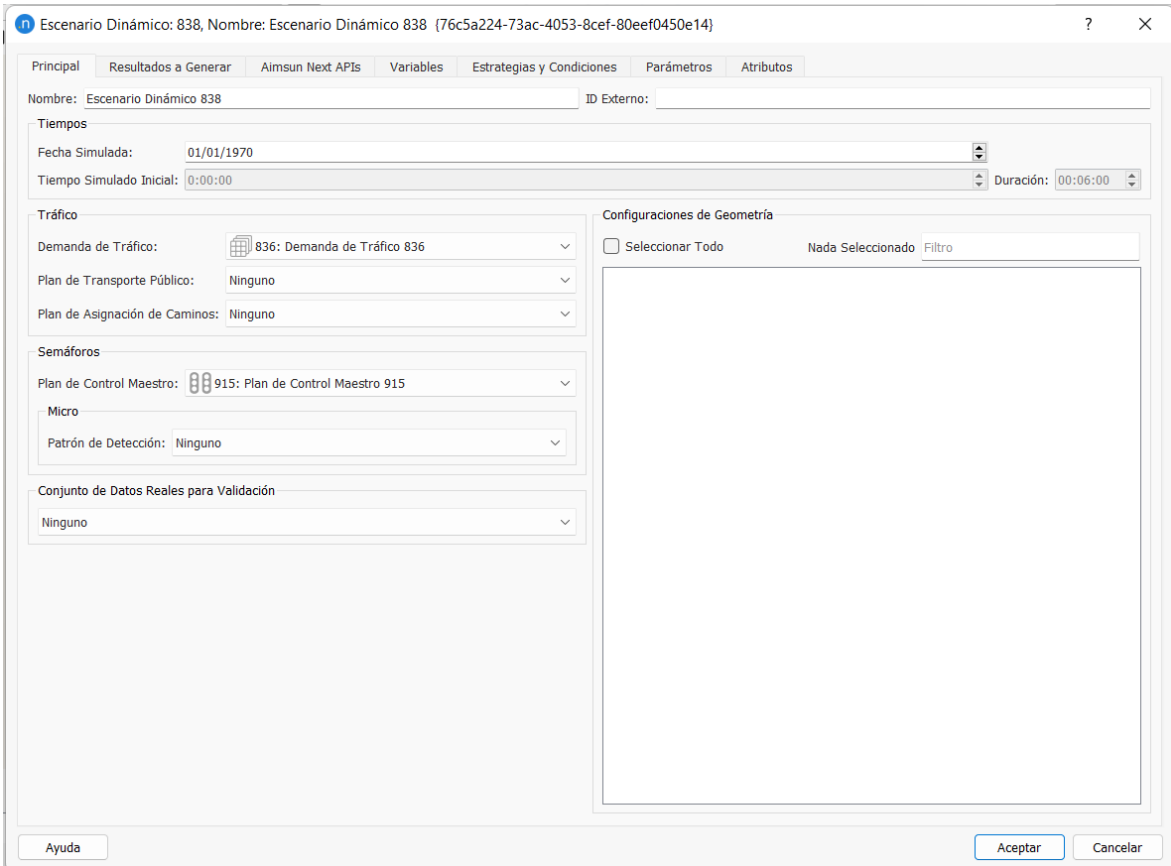
El script permite, a partir de cualquier instrucción, posicionarse en una iteración. Esto es útil debido a que, si el sistema falla y produce errores al cargar los resultados, con los resultados obtenidos del registro del .txt podemos ejecutarlo y continuar con el proceso de obtención de resultados.



**Ilustración 44. Script ReStart en Aimsun.**

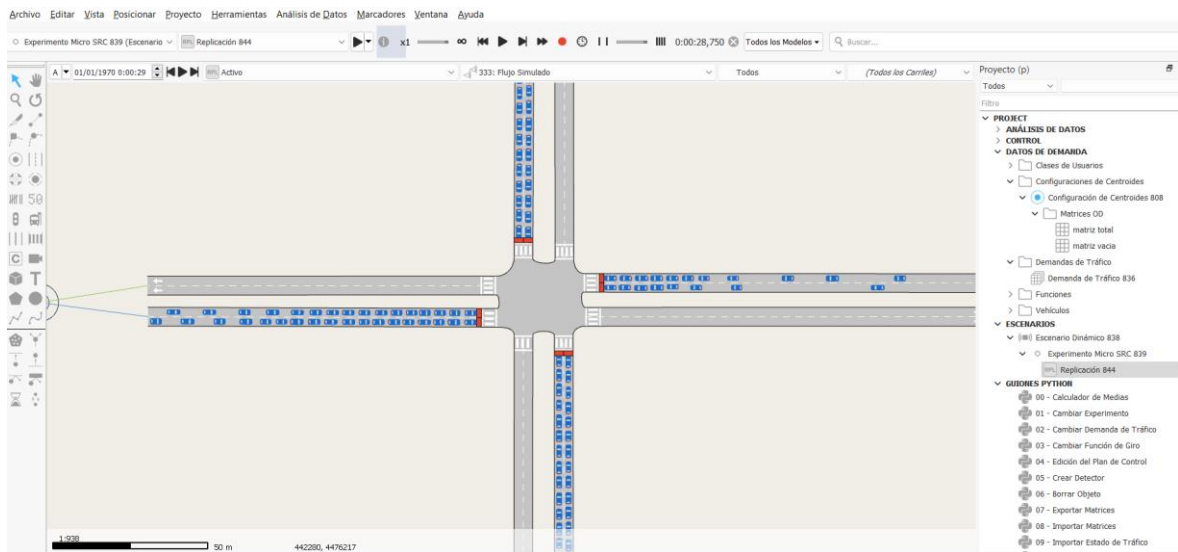
## 5.2.6 ESTABLECIMIENTO DEL ESCENARIO DINÁMICO

Con los elementos que previamente se han creado debemos establecer un escenario que tenga todos estos parámetros en cuenta. Por lo tanto, en el escenario dinámico debemos indicarle qué demanda de tráfico usar y que plan de control implementar.

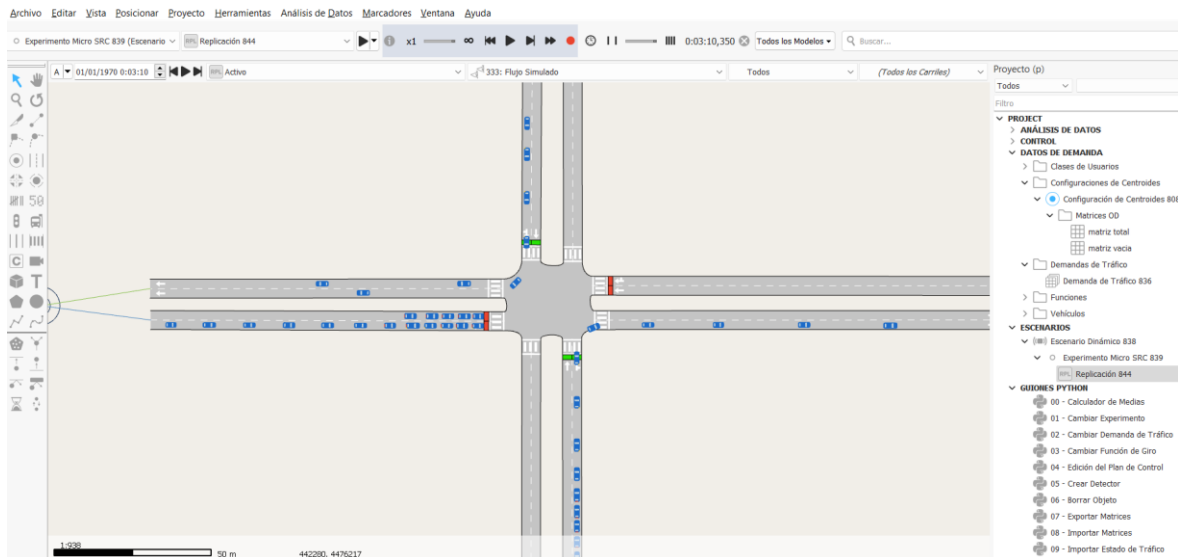


*Ilustración 45. Creación del escenario dinámico.*

Con el escenario dinámico creado se puede iniciar una simulación para poder comprobar la correcta configuración del sistema (Ilustración 46 e Ilustración 47).



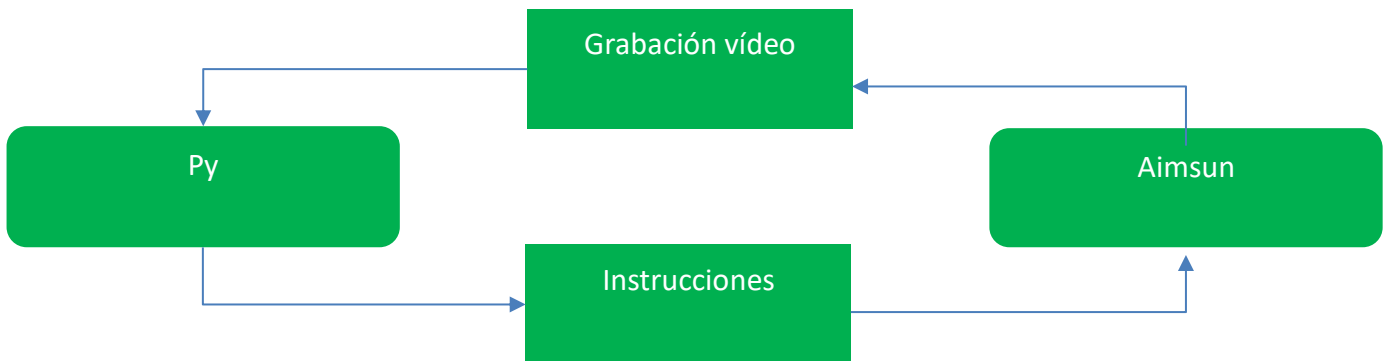
*Ilustración 46. Comprobación inicial de la configuración inicial.*



*Ilustración 47. Comprobación final de la configuración inicial.*

### 5.3 DISEÑO

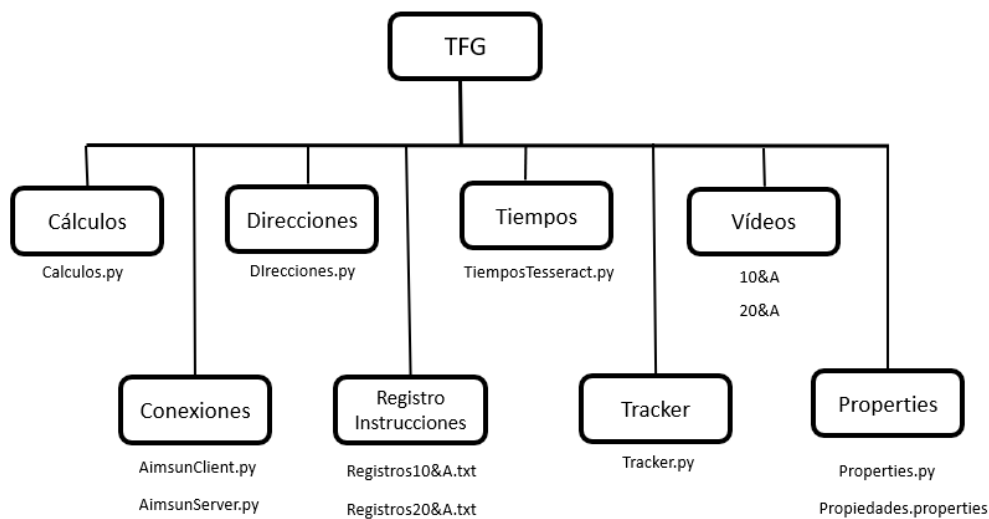
El diseño final que se utiliza para poder desarrollar el proyecto es el basado en el scripting de Aimsun. Una explicación más detallada puede encontrarse en el punto [5.1.8 Establecimiento del escenario dinámico](#). A alto nivel se puede representar de la siguiente manera:



Esta decisión se ha tomado para poder obtener resultados dinámicos y retroalimentados a partir de un sistema retroalimentado. Esto es posible ya que con la primera iteración del sistema podemos obtener resultados de un modelo dinámico, pero con la creación de nuevas etapas podemos obtener resultados de un periodo estacionario.

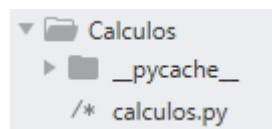
## 5.4 ARQUITECTURA Y ESCALABILIDAD

La arquitectura que se ha intentado modelar ha sido una en la que cada funcionalidad se encuentra en un directorio diferente. Así como la de un proyecto basado en microservicios, sin llegar a ser exactamente lo mismo. La distribución seguida es la siguiente:



*Ilustración 48. Diagrama UML del sistema.*

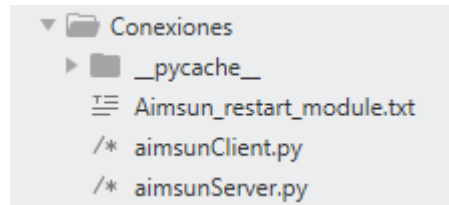
En la carpeta de cálculos podemos encontrar el script que se encarga de realizar la comprobación de la multiplicidad de los tiempos, y la de la delimitación de los coches en las vías (Ilustración 49).



*Ilustración 49. Carpeta de cálculos.*

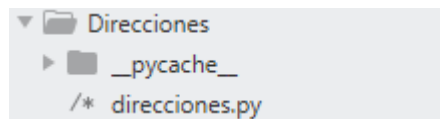
En la carpeta de conexiones podemos encontrar dos módulos diferentes que hacen referencia a el modelo de cliente servido que mantiene con el simulador. El cliente es el script que se encarga de enviar las instrucciones establecidas y el servidor es el simulador que se encarga

de cargar las instrucciones a los semáforos. Esta carpeta también incorpora una copia de un segundo script del simulador que permite cargar cualquier instrucción que se desee sin tener que ejecutar el programa en su totalidad (Ilustración 50).



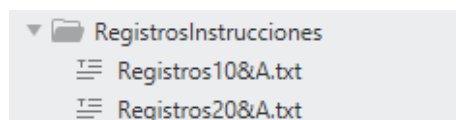
*Ilustración 50. . Carpeta de conexiones.*

En el directorio de direcciones se encuentra un módulo encargado de realizar la asignación vectorial de los coches a sus respectivas direcciones, la horizontal o la vertical (Ilustración 51).



*Ilustración 51. . Carpeta de direcciones.*

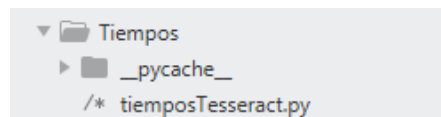
El siguiente módulo que toma importancia es el de registros de instrucciones que permiten tener un registro de todas las instrucciones que se han obtenido a lo largo de todas las simulaciones. Se genera un nuevo archivo de manera automática al indicar en la ruta de fuente\_txt el nuevo archivo. Se deberá crear un nuevo archivo por cada entorno de simulación (Ilustración 52).



*Ilustración 52. . Carpeta de registro de instrucciones.*

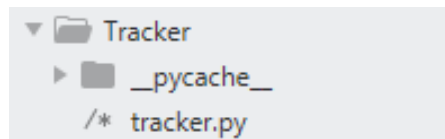


El módulo de tiempos permite poder usar la librería de Tesseract para permitir sincronismos entre las instrucciones obtenidas por el ordenador y el tiempo de la simulación, ya que, si se usaran tiempos reales, no se podría garantizar que siempre, sobre un mismo vídeo se obtuviesen las mismas instrucciones (Ilustración 53).



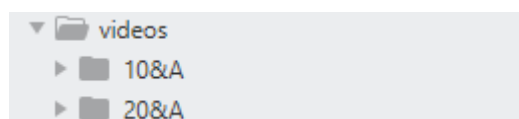
*Ilustración 53. . Carpeta de Tiempos.*

El siguiente módulo se encarga de poder identificar a los coches en su recorrido por las vías. De todos los scripts, tracker.py es uno de los más importante ya que permiten identificar a los coches, a lo largo de todo el tiempo, que permanecen en pantalla (Ilustración 54).



*Ilustración 54. . Carpeta de tracking.*

El módulo de vídeo contiene carpetas con el mismo nombre de cada entorno de simulación distinta, y en ellas se encuentra los vídeos de todas las iteraciones que se han analizado (Ilustración 55).



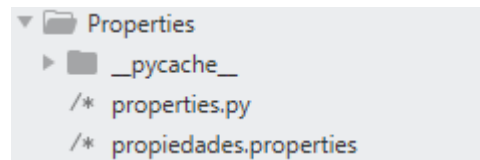
*Ilustración 55. Carpeta de almacenamiento de vídeos.*

El último módulo de alta importancia a la arquitectura del sistema es el de propiedades. En este directorio podemos encontrar dos archivos diferentes. propiedades.properties y

properties.py. El archivo propiedades.properties contiene todas las variables modificables del sistema. Estas variables son, por ejemplo, la multiplicidad de la toma de instrucción, es decir, cada cuanto tiempo se toma una nueva instrucción, la ruta para obtener el vídeo a analizar o el del archivo para guardar los registros.

Este archivo presenta tanta importancia debido a que es el centro de control de todo el sistema, ya que desde él podemos decidir cómo actúa el sistema. Gracias a esta distribución se puede realizar un programa de mayores dimensiones manteniendo siempre el punto de control unificado y hacer posible un sistema mucho más escalable.

Finalmente, el archivo de properties.py es en centro de comunicación con propiedades.properties para que todas las peticiones que se hacen desde el sistema pasen por este módulo y poder en un futuro aplicar medidas de control a las variables (Ilustración 56).



*Ilustración 56. Carpeta de propiedades.*

En conclusión, a este apartado, es importante reflejar que tanto la distribución de carpetas como mantener un centro unificado para el control del sistema es esencial para una arquitectura organizada y de gran escalabilidad.

## **5.5 IMPLEMENTACIÓN**

La implementación de este sistema se basa en un ejercicio de retroalimentación en la que se parte de unas instrucciones semafóricas estándares intermitentes, verde, rojo, verde, rojo..., se graba la simulación y se obtiene un vídeo. Con el programa que se ha creado y con el vídeo que se acaba de obtener, se determinan las instrucciones óptimas que se deben aplicar para que los carriles se descongestionen con mayor rapidez. Una vez obtenidas todas estas instrucciones, que se ejecutan en tiempo concretos, se cargan a los semáforos

correspondientes y se finaliza la primera etapa. En esta primera etapa se observa en qué momento desaparece el último coche de la intersección y se toma ese tiempo como punto de partida.

En la siguiente etapa se realizará el mismo proceso, pero en vez de partir con las señales semafóricas intermitentes, se parte con las instrucciones que previamente se han determinado y cargado.

Si las instrucciones cargadas hacen que la descongestión sea eficaz, el tiempo en el que el último coche sale de la intersección debe ser menor que el de la etapa anterior.

De esta manera aplicando este proceso a lo largo de varias etapas, se debe obtener una gráfica que a medida que se van aplicando más etapas el tiempo de procesamiento debe ir disminuyendo hasta alcanzar un régimen estacionario, en el que, por más etapas que se añadan, no cambiará las instrucciones óptimas que se han determinado.



## Capítulo 6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

El análisis de resultados se mostrará mediante 4 diferentes escenarios del sistema creado. Los parámetros que se modificarán para obtener estos cuatro diferentes escenarios serán:

- Densidad de tráfico.
- Tiempo de obtención de instrucción.

### **6.1 ALTA DENSIDAD Y 20S ENTRE TOMA DE DECISIÓN**

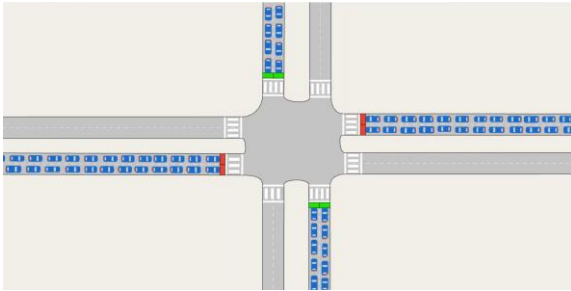
#### **6.1.1 ETAPA 1**

El proceso que se va a realizar a continuación es el descrito a lo largo de este trabajo. En primer lugar, se grabará el simulador con unas instrucciones preestablecidas. Estas instrucciones son una intermitencia semafórica entre la luz verde y la luz roja cada 40 segundos. Los semáforos horizontales están sincronizados para tomar las mismas decisiones. Y lo mismo ocurre con los verticales, también están sincronizados, y cambiarán de color de luz a la vez. Se gravará el simulador con estas instrucciones cargadas y tras pasarlo por el sistema, se obtendrán nuevas instrucciones que actualizarán el juego semafórico. Esto representará la primera iteración del proceso, conocida como la etapa 1 (Ilustración 57 e Ilustración 58).

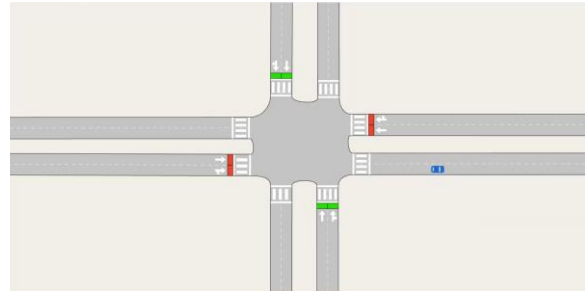
Instrucciones preestablecidas: [1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1]

Duración de etapa 1: 4:07

Instrucciones obtenidas de etapa 1: [0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1]



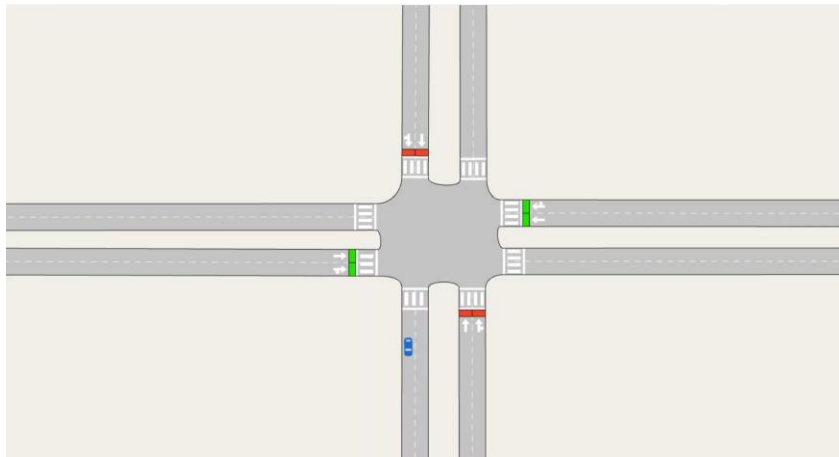
*Ilustración 57. Inicio de proceso de la etapa 1.*



*Ilustración 58. Fin de la etapa 1.*

### 6.1.2 ETAPA 2

En la etapa 2 se genera un nuevo vídeo con las nuevas instrucciones cargadas de la etapa 1. Para generalizarlo, la etapa N del sistema usa un video grabado con las instrucciones de la etapa N-1 del proceso para obtener las instrucciones de la etapa N.



*Ilustración 59. Fin de la etapa 2.*

Duración de etapa 2: 3.58

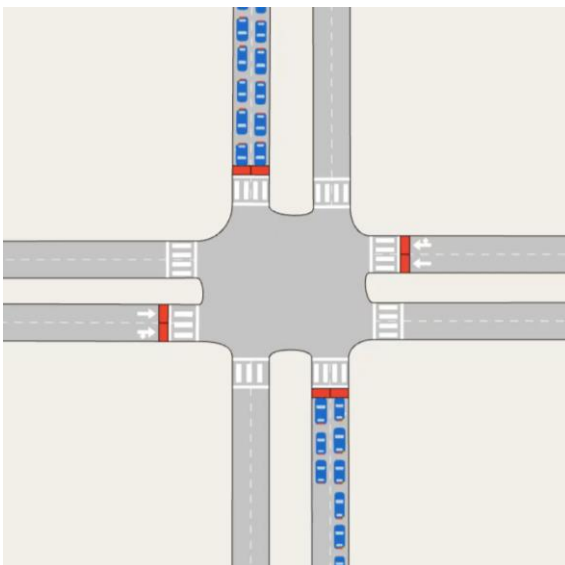
Instrucciones obtenidas de etapa 2: [0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1]

### 6.1.3 RESTO DE ETAPAS

El resto de las etapas seguirán el mismo proceso que se acaba de describir. Para obtener las nuevas instrucciones que mejorarán el tiempo del sistema se necesita un video grabado con las instrucciones de la etapa anterior.

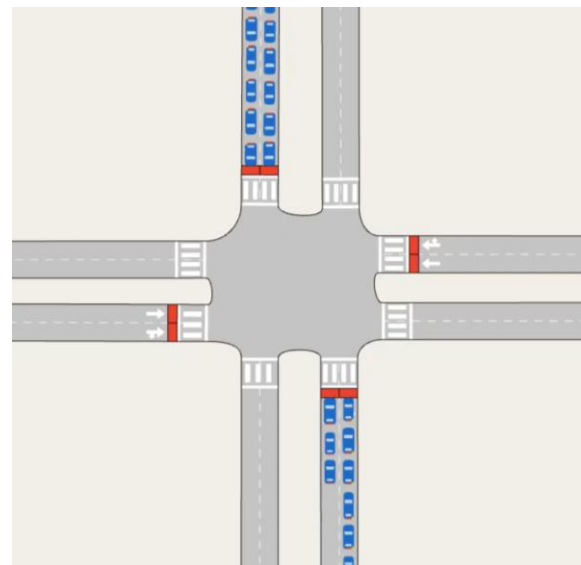
Las imágenes que se muestran en este apartado son el final de la simulación de cada etapa.

#### 6.1.3.1 Etapas 3 a 10



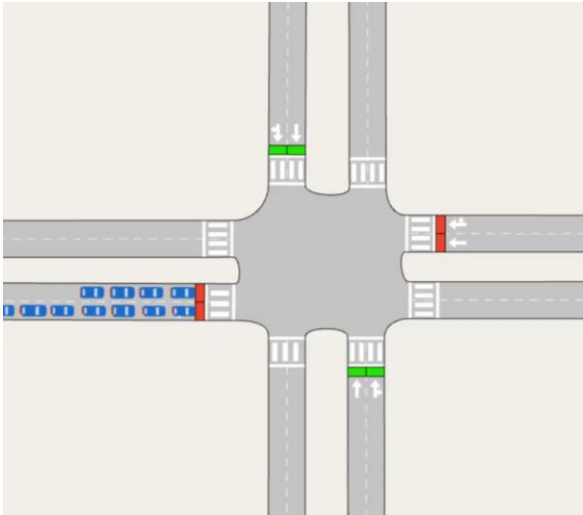
Duración de etapa 3: 5:00

Instrucciones obtenidas de etapa 3: [0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]



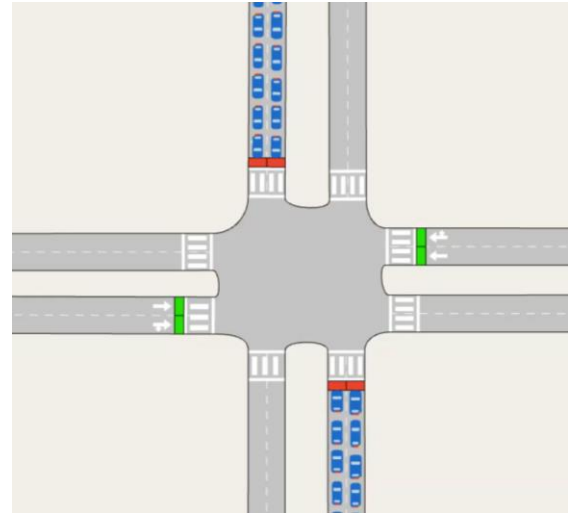
Duración de etapa 4: 5:00

Instrucciones obtenidas de etapa 4: [1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]



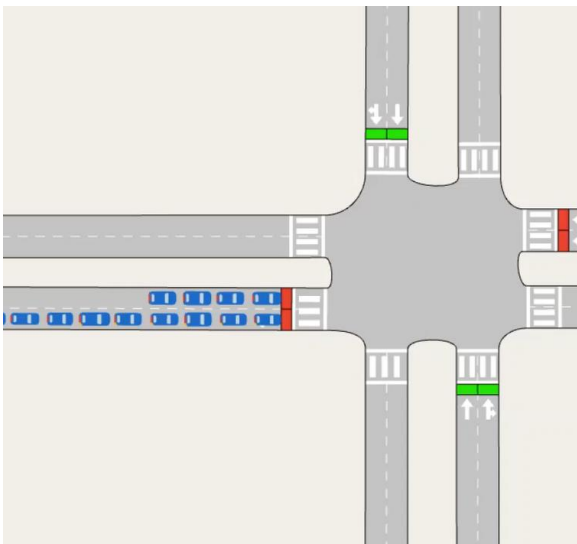
Duración de etapa 5: 5:00

Instrucciones obtenidas de etapa 5: [1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]



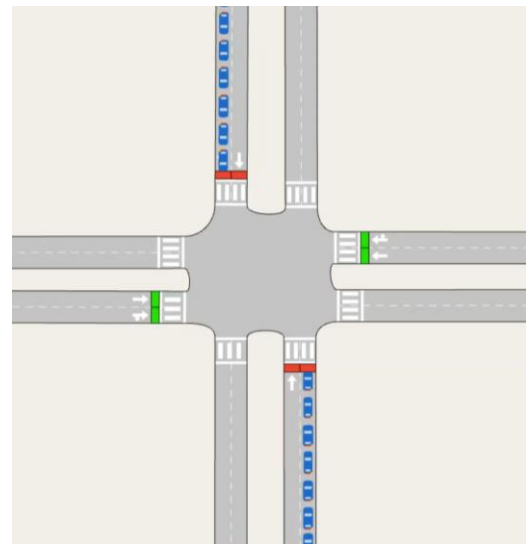
Duración de etapa 6: 5:00

Instrucciones obtenidas de etapa 6: [0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]



Duración de etapa 7: 5:00

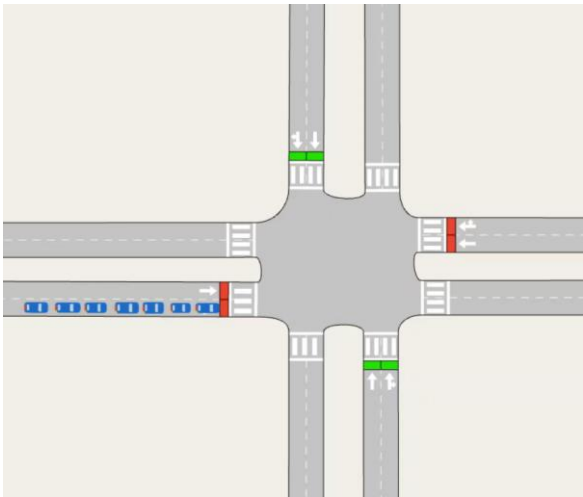
Instrucciones obtenidas de etapa 7: [0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]



Duración de etapa 8: 5:00

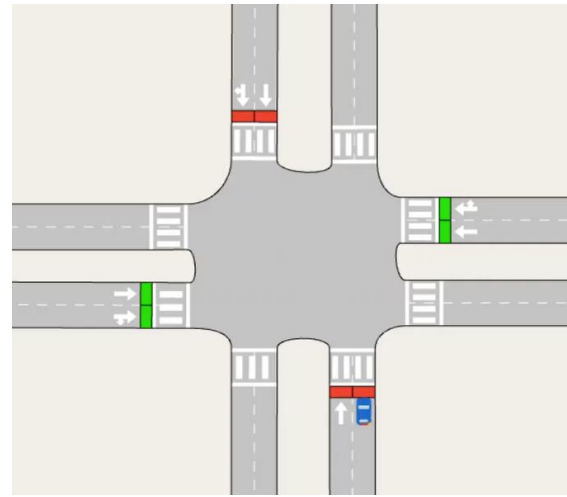
Instrucciones obtenidas de etapa 8: [0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0]





Duración de etapa 9: 5:00

Instrucciones obtenidas de etapa 9: [0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]

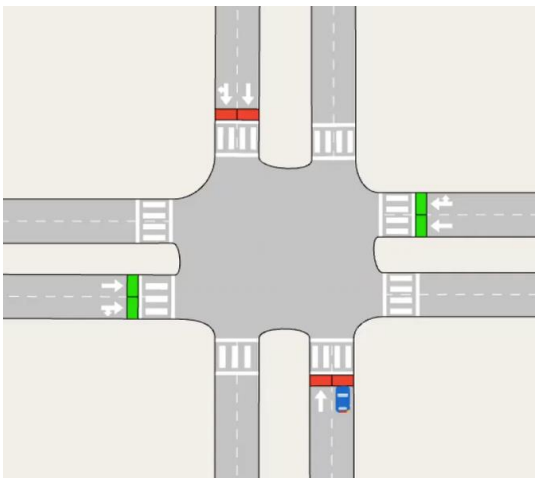


Duración de etapa 10: 5:00

Instrucciones obtenidas de etapa 10: [0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0]

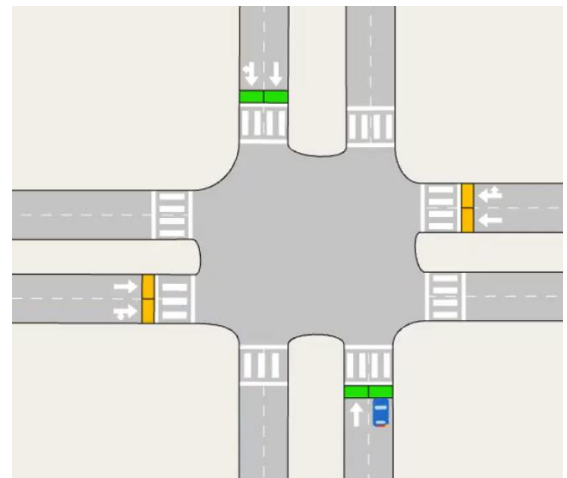
### 6.1.3.2 Etapas 11 a 14

Se introduce al sistema una limitación que hace que no puedan haber más de 2 instrucciones iguales seguidas. Es decir, no puede permitirse que un semáforo esté habilitado más de 40 segundos seguidos en este modelo.



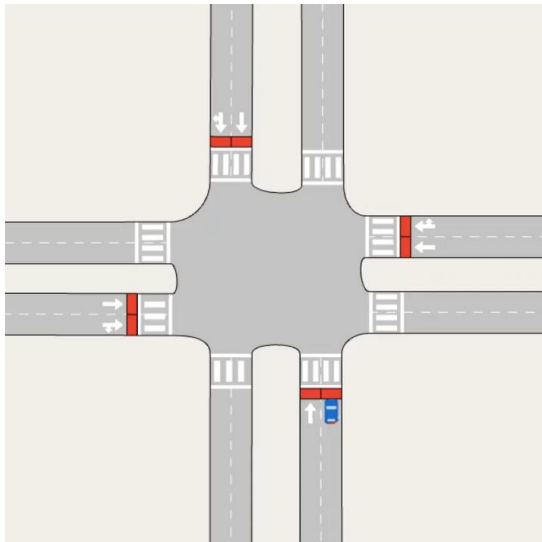
Duración de etapa 11: 5:00

Instrucciones obtenidas de etapa 11: [0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0]



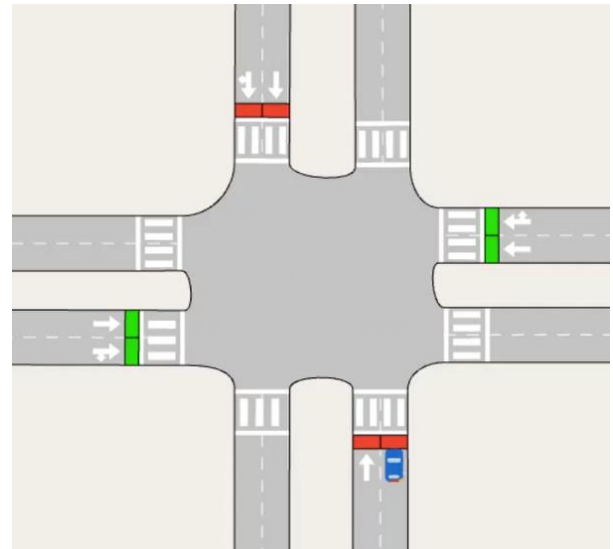
Duración de etapa 12: 3:45

Instrucciones obtenidas de etapa 12: [0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0]



Duración de etapa 13: 5:00

Instrucciones obtenidas de etapa 11: [0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1]



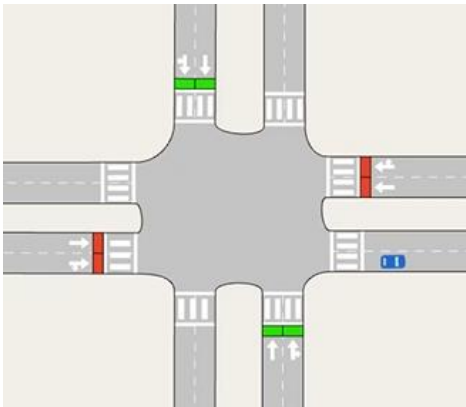
Duración de etapa 14': 5:00

Instrucciones obtenidas de etapa 14': [0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0]

### 6.1.3.3 Etapas 14 a 30

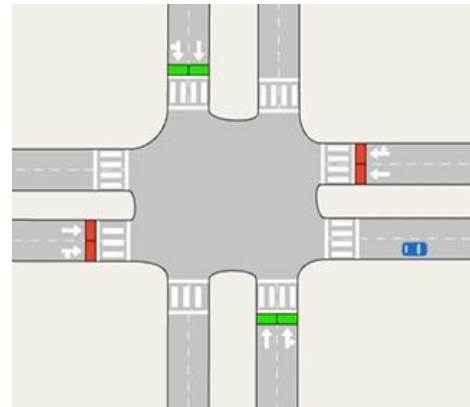
Con todos estos cambios el inconveniente que surge es que cuando solo quedan coches en una vía, las instrucciones se intercalarán de dos en dos, de la siguiente manera, sin realmente tener que hacerlo. 0,0,1,1,0,0,1,1... así hasta que desaparezcan todos los coches de esa vía. Pero en realidad como no hay coches en otras vías que quieran pasar, debería ser 0,0,0,0,0,0...

Para permitir más de 2 repeticiones de la misma instrucción se introduce un control que detecta cuando hay coches en más de una vía para limitar un máximo de dos instrucciones. Repetimos la etapa 14 con esta nueva implementación para observar el efecto.



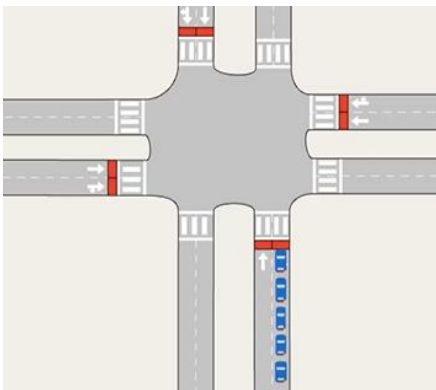
Duración de etapa 14: 4:25

Instrucciones obtenidas de etapa 14: [0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0]



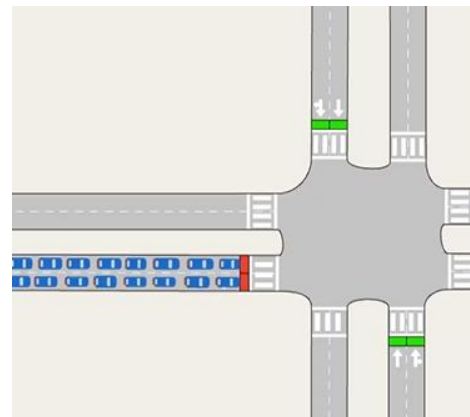
Duración de etapa 15: 4:07

Instrucciones obtenidas de etapa 15: [0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0]



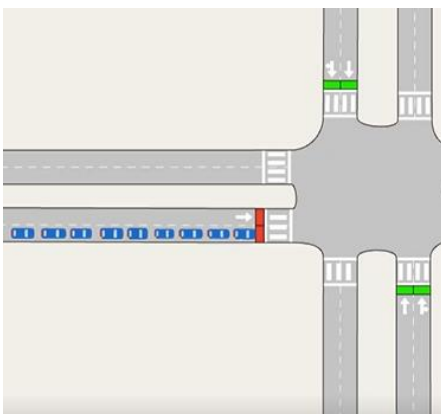
Duración de etapa 16: 5:00

Instrucciones obtenidas de etapa 16: [0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0]



Duración de etapa 17: 5:00

Instrucciones obtenidas de etapa 17: [0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]



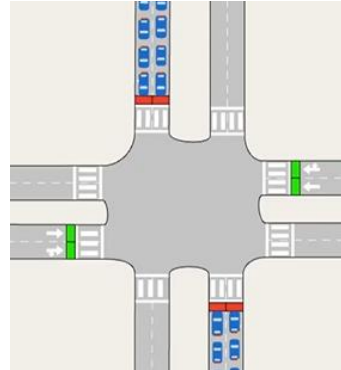
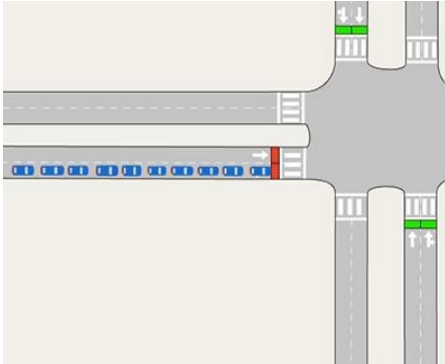
Duración de etapa 18: 5:00



Instrucciones obtenidas de etapa 18: [0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]

Duración de etapa 19: 5:00

Instrucciones obtenidas de etapa 19: [1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]

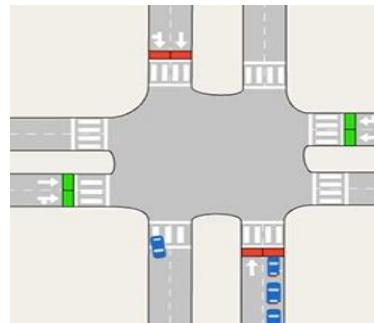
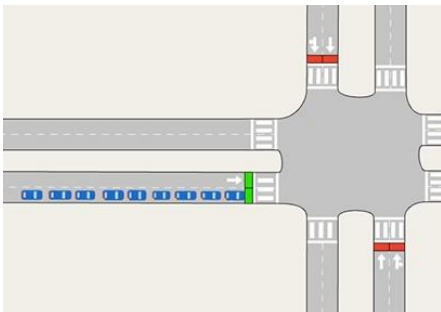


Duración de etapa 20: 5:00

Instrucciones obtenidas de etapa 20: [1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]

Duración de etapa 21: 5:00

Instrucciones obtenidas de etapa 21: [0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]

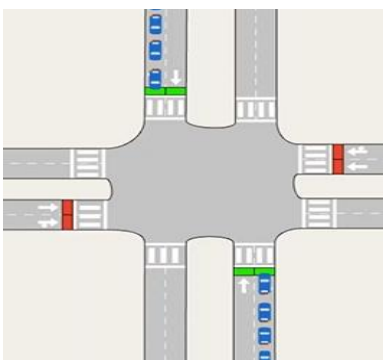


Duración de etapa 22: 4:55

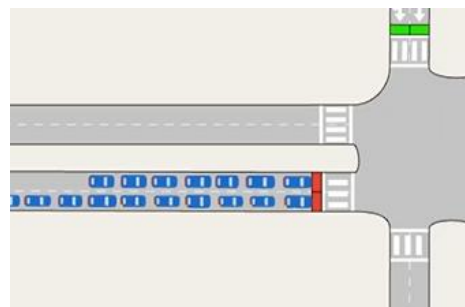
Instrucciones obtenidas de etapa 22: [1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]

Duración de etapa 23: 5:00

Instrucciones obtenidas de etapa 23: [0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0]



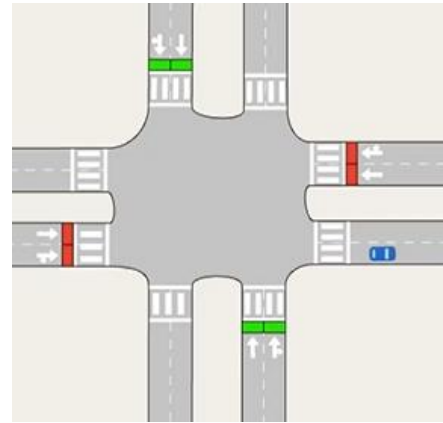
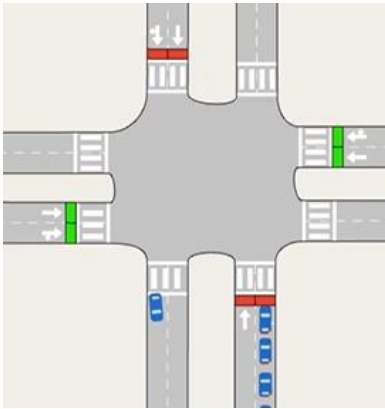
Instrucciones obtenidas de etapa 24: [0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]



Duración de etapa 24: 5:00

Duración de etapa 25: 5:00

Instrucciones obtenidas de etapa 25: [0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]

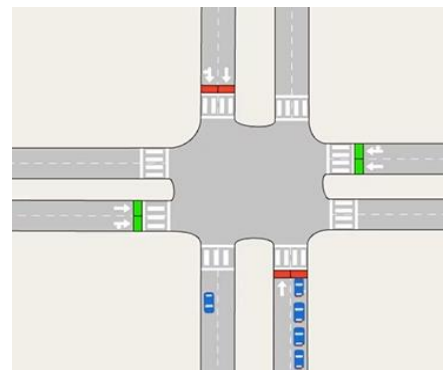
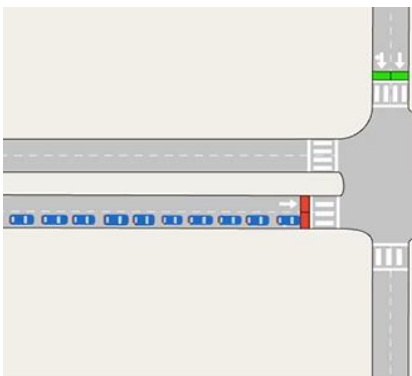


Duración de etapa 26: 5:00

Instrucciones obtenidas de etapa 26: [0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0]

Duración de etapa 27: 3:50

Instrucciones obtenidas de etapa 27: [0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0]

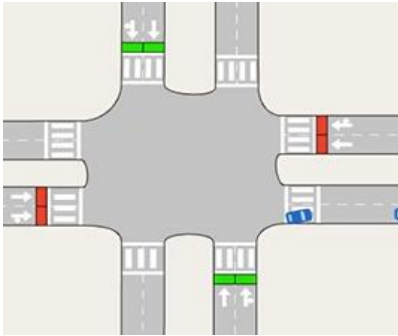


Duración de etapa 28: 5:00

Instrucciones obtenidas de etapa 28: [0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1]

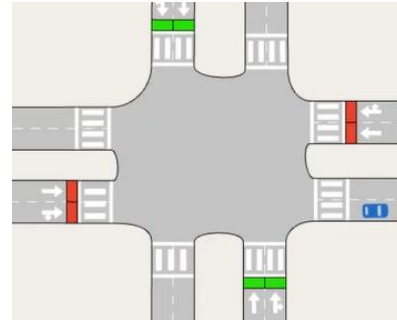
Duración de etapa 29: 5:00

Instrucciones obtenidas de etapa 29: [0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0]



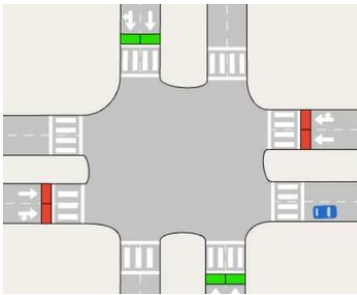
Duración de etapa 30: 3:49

Instrucciones obtenidas de etapa 30: [0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0]



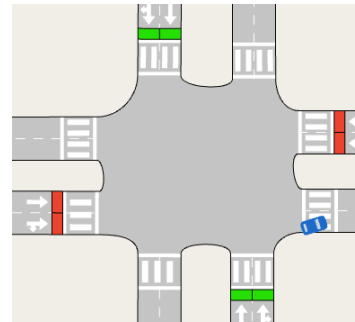
Duración de etapa 31: 3:48

Instrucciones obtenidas de etapa 31: [0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0]



Duración de etapa 32: 3:49

Instrucciones obtenidas de etapa 32: [0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0]



Duración de etapa 33: 3:49

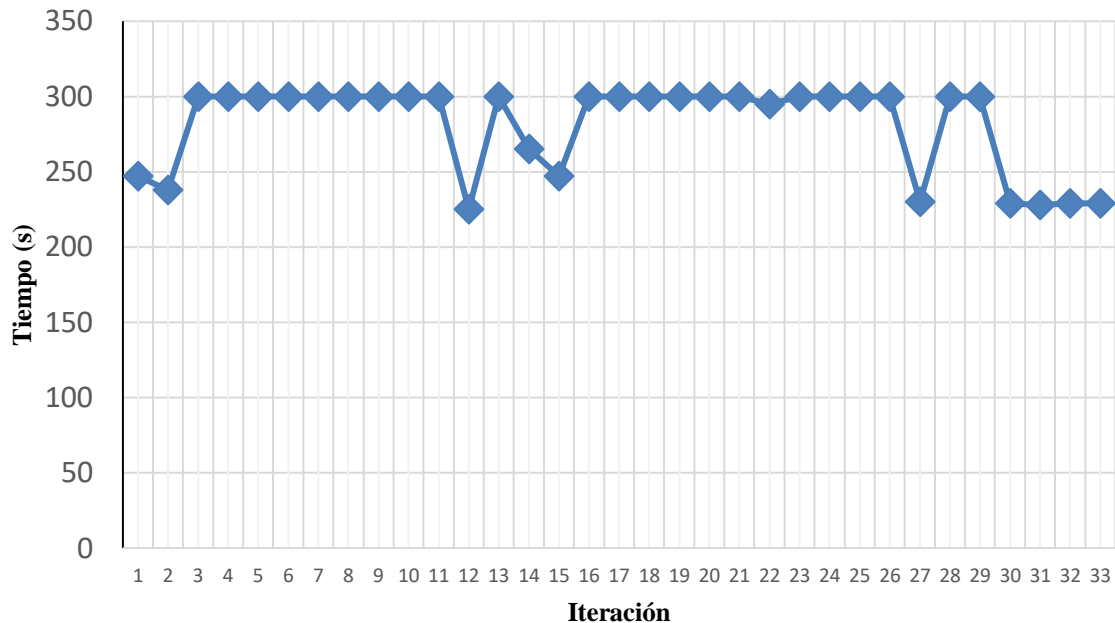
Instrucciones obtenidas de etapa 33: [0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0]

A continuación, se muestra en la tabla 12 la recopilación de todos los tiempos e instrucciones.

Iteración	Tiempo	Instrucción
1	247	[0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1]
2	238	[0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1]
3	300	[0, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
4	300	[1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
5	300	[1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
6	300	[0, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
7	300	[0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
8	300	[0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
9	300	[0, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1]
10	300	[0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0]
11	300	[0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0]
12	225	[0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0]
13	300	[0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1]
14	265	[0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0]
15	247	[0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0]
16	300	[0, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
17	300	[0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
18	300	[0, 1, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
19	300	[1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
20	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
21	300	[0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 0]
22	295	[0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
23	300	[0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 0]
24	300	[0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
25	300	[0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
26	300	[0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0]
27	230	[0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0]
28	300	[0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1]
29	300	[0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0]
30	229	[0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0]
31	228	[0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0]
32	229	[0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0]
33	229	[0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0]

**Tabla 12. Conjunto de instrucciones y tiempos del modelo con alta densidad y 20 segundos entre instrucción.**

### **Evolución temporal de modelo de alta densidad y 20 segundos entre instrucción.**



*Gráfica 11. Evolución temporal de modelo de alta densidad y 20 segundos entre instrucción.*

Como se puede observar en la Gráfica 11, tenemos resultante una alta variación de los resultados obtenidos. Esta gráfica debe analizarse por tres tramos distintos, cada uno perteneciente a un conjunto de iteraciones específicas.

La primera etapa hasta las 10 primeras iteraciones observamos que no se produce la descongestión del tráfico ya que a partir de la 3ª iteración se agota el tiempo de simulación permitido para la descongestión. En los vídeos e instrucciones obtenidos se observa un “descontrol” de la situación, sin tener orden ni preferencia real.

A partir de esta iteración y hasta la 14 observamos cambios notables con altas variaciones en el tiempo al haber introducido la limitación de repeticiones de instrucciones semafóricas.

A partir de la iteración 14, con la introducción de la selección de los carriles, podemos observar un inicial descenso gradual. Pero posteriormente vuelve a subir el tiempo de simulación, agotándola. Es necesario notar que a diferencia de las primeras 10 iteraciones



las instrucciones obtenidas empiezan a asemejarse una a otra, y a medida que las iteraciones avanzan se parecen aún más. Hasta llegar al punto en que las instrucciones obtenidas son idénticas con variación de una indicación, obteniendo así el mismo tiempo de simulación de 3:48 minutos y llegando a un estado estable.

Recordatorio: debido a limitaciones de procesamiento la simulación se corta a los 5 minutos. Por este motivo no hay valores por encima de los 5 minutos.

$$(4 * 60) + 7 - (3 * 60) + 48 = 19 \text{ segundos (reduccion de tiempo obtenida)}$$

***Ecuación 9. Reducción de tiempo obtenida en el modelo de 20 segundos y Alta densidad retroalimentado.***

$$\frac{19}{(4 * 60) + 7} = 0.07692 \text{ (eficiencia obtenida)}$$

***Ecuación 10. Eficiencia obtenida en el modelo de 20 segundos y alta densidad retroalimentado.***

La eficiencia obtenida por el sistema en un entorno de alta densidad de tráfico y con un intervalo de toma de decisión de 20 segundos es de **7.7 %**.

También podemos obtener la eficiencia de la primera iteración, que representaría lo efectivo que sería el sistema si se emplease, ya que refleja el modelo de gestión dinámica en tiempo real.

$$(4 * 60) + 7 - (3 * 60) + 58 = 9 \text{ segundos (reduccion de tiempo obtenida)}$$

***Ecuación 11. Reducción de tiempo obtenida en el modelo de 20 segundos y Alta densidad dinámico.***

$$\frac{9}{(4 * 60) + 7} = 0.0364 \text{ (eficiencia obtenida)}$$

***Ecuación 12. Eficiencia obtenida en el modelo de 20 segundos y alta densidad dinámico.***

La eficiencia obtenida con el sistema en la primera iteración es de **3.64%**.

Con la eficiencia obtenida podemos aproximar la cantidad de partículas contaminantes que se podrían reducir. Este dato se obtiene siguiendo los mismos cálculos del apartado [5.2.1. Suposiciones](#), pero modificando los 71 minutos de viaje por el tiempo mejorado.

Estos cálculos se van a realizar con la base de que solo se encuentra una intersección con alta densidad en la vía. En caso de haber más nodos congestionados, los efectos serían mayores.

El 7.7% de eficiencia hace que el tiempo de tránsito pase a:

$$71 - \frac{19}{60} = 70.68 \text{ minutos}$$

***Ecuación 13. Minutos de tránsito con 7.7% de eficiencia.***

El 3.64% de eficiencia hace que el tiempo de tránsito pase a:

$$71 - \frac{9}{60} = 70.85 \text{ minutos}$$

***Ecuación 14. Minutos de tránsito con 3.64% de eficiencia.***

Las emisiones producidas por el sistema dinámico, correspondiente con el tiempo de la segunda iteración, son de 1377496.95 kg. Comparando con las emisiones del sistema convencional podemos obtener:

$$1380413.31 - 1377496.95 = \mathbf{2916.36 \text{ kg de combustible ahorrados}}$$

*Ecuación 15. Kg de combustible ahorrados con 3.64% de eficiencia.*

Las emisiones producidas por un sistema retroalimentado son de 1374191.73 kg. Comparando con las emisiones del sistema convencional podemos obtener:

$$1380413.31 - 1374191.73 = \mathbf{6221.58 \text{ kg de combustible ahorrados}}$$

*Ecuación 16. Kg de combustible ahorrados con 7.7% de eficiencia.*

## 6.2 ALTA DENSIDAD Y 10s ENTRE TOMA DE DECISIÓN

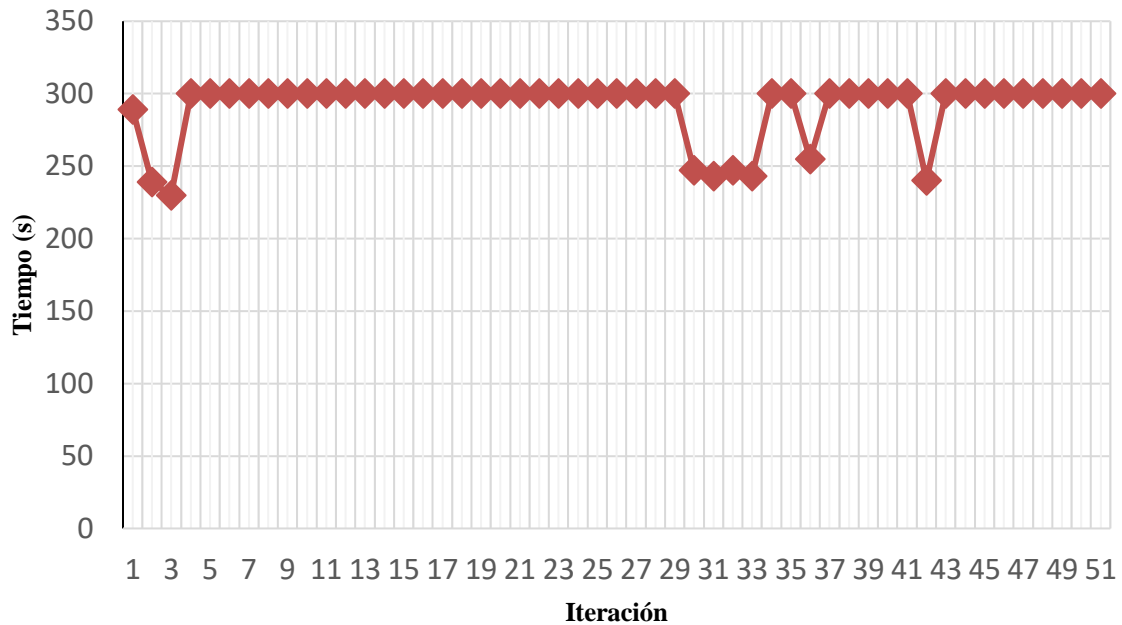
Para esta nueva simulación realizamos el mismo proceso que en el anterior, pero partiendo de todos los cambios desarrollados. En esta etapa se mostrará únicamente una tabla, Tabla 13, con toda la información relevante a la simulación. Esta información es la evolución de las instrucciones a lo largo de las etapas y los tiempos de duración de cada etapa.

Iteración	Tiempo	Instrucción
1	289	[1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
2	239	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
3	230	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 1]
4	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
5	300	[1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
6	300	[1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
7	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
8	300	[0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
9	300	[0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
10	300	[1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
11	300	[0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
12	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
13	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
14	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
15	300	[0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
16	300	[0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
17	300	[0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
18	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
19	300	[0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
20	300	[0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
21	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
22	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
23	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
24	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
25	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
26	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
27	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
28	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
29	300	[0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0]
30	247	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]

31	243	[0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
32	247	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0]
33	243	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
34	300	[0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
35	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0]
36	255	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
37	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
38	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
39	300	[1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
40	300	[1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
41	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1]
42	240	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0]
43	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
44	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
45	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
46	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
47	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
48	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]
49	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
50	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 1]
51	300	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 1, 1, 1, 0, 1, 1, 0]
52	285	[0, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0]
53	300	

*Tabla 13. Conjunto de instrucciones y tiempos del modelo con alta densidad y 10 segundos entre instrucción.*

**Evolución temporal de modelo de alta densidad y 10 segundos entre instrucción.**



*Gráfica 12. Evolución temporal de modelo de alta densidad y 10 segundos entre instrucción.*

Esta variación del modelo ha permitido obtener una alta eficiencia al inicio de su iteración. Pero a medida que se han realizado más iteraciones no se ha podido obtener un estado de reposo, como se puede apreciar en la Gráfica 12, que indique la mejor instrucción basándose en retroalimentación. Pese a esto se pueden observar declives en el sistema que indican que hay instrucciones muy similares como pueden ser las iteraciones 2, 3, 30, 31, 32 y 33. No obstante, como no hemos llegado a un estado de reposo no podemos asegurar que estas son las óptimas. La eficiencia obtenida en la primera segunda iteración es:

$$289 - 239 = 50 \text{ segundos (reduccion de tiempo obtenida)}$$

*Ecuación 17. Reducción de tiempo obtenida en el modelo de 10 segundos y Alta densidad.*

$$\frac{50}{289} = 0.1730 \text{ (eficiencia obtenida)}$$

***Ecuación 18. Eficiencia obtenida en el modelo de 10 segundos y alta densidad.***

La eficiencia obtenida es de un **17.30%**.

Siguiendo las mismas operaciones que en apartado, [6.1 Alta densidad y 20 segundos entre toma de decisiones](#), podemos determinar:

El 17.3% de eficiencia hace que el tiempo de tránsito pase a:

$$71 - \frac{50}{289} = 70.16 \text{ minutos}$$

***Ecuación 19. Minutos de tránsito con 17.3% de eficiencia.***

Las emisiones producidas por el sistema dinámico, correspondiente con el tiempo de la segunda iteración, son de 1364081.66 kg. Comparando con las emisiones del sistema convencional podemos obtener:

$$1380413.31 - 1364081.66 = \mathbf{16331.65 \text{ kg de combustible ahorrados}}$$

***Ecuación 20. Kg de combustible ahorrados con 17.3% de eficiencia.***

### 6.3 BAJA DENSIDAD Y 10s ENTRE TOMA DE DECISIÓN

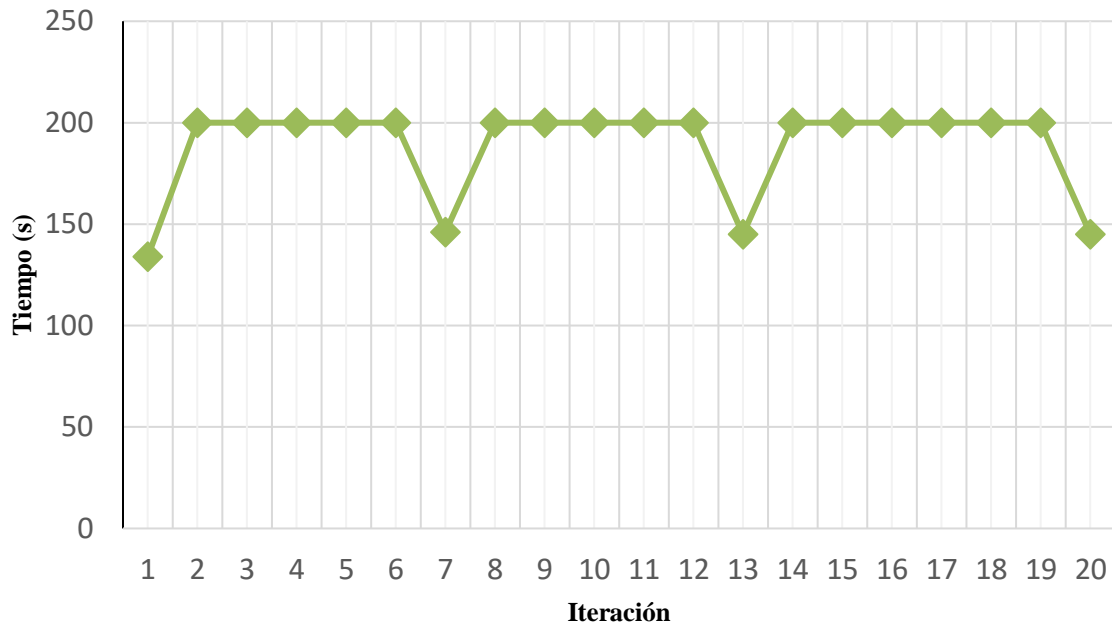
Debido a que hemos comprobado eficiencia en un sistema de alta densidad de tráfico es lógico comprobar el funcionamiento de este en un entorno de baja densidad. Lo que se busca con este apartado y el siguiente es poder conseguir datos que respalden que la implementación de este sistema no solo es beneficioso para entornos de alta densidad, sino que también para aquellos de baja.

Iteración	Tiempo	Instrucción
1	134	[1, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
2	200	[1, 1, 0, 1, 1, 1, 1]
3	200	[1, 1, 0, 1, 0, 0, 0]
4	200	[1, 1, 0, 1, 0, 0, 1]
5	200	[1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0]
6	200	[1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1]
7	146	[0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0]
8	200	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1]
9	200	[1, 1, 0, 1, 0, 0, 0]
10	200	[1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1]
11	200	[1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0]
12	200	[1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1]
13	145	[1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0]
14	200	[0, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1]
15	200	[1, 1, 0, 1, 1, 0, 1, 1, 1, 1]
16	200	[1, 1, 0, 1, 0, 0, 0, 0, 0, 0]
17	200	[1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 1, 1]
18	200	[1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0]
19	200	[1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1]
20	145	[1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 0]

*Tabla 14. Conjunto de instrucciones y tiempos del modelo con baja densidad y 10 segundos entre instrucción.*



**Evolución temporal de modelo de baja densidad y 10 segundos entre instrucción.**



*Gráfica 13. Evolución temporal de modelo de baja densidad y 10 segundos entre instrucción.*

En esta variación del sistema podemos observar únicamente 3 iteraciones que consiguen resultados en la Tabla 14 y Gráfica 13. Estas iteraciones son la 7, la 13 y la 20. Si nos fijamos a demás en la instrucción de la etapa anterior, es decir, 6, 12 y 19 podemos observar que son idénticas. Este conjunto de instrucciones es [1, 1, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1]. Esto quiere decir que la mejor solución obtenida por el sistema será el conjunto de instrucciones previamente indicado. Con esta información podemos establecer la eficiencia del sistema.

$$134 - 145 = -11 \text{ segundos (reduccion de tiempo obtenida)}$$

*Ecuación 21. Reducción de tiempo obtenida en el modelo de 10 segundos y Baja densidad.*

$$\frac{-11}{134} = -0.0821 \text{ (eficiencia obtenida)}$$

***Ecuación 22. Eficiencia obtenida en el modelo de 10 segundos y baja densidad.***

La eficiencia obtenida con el sistema en la primera iteración es de **8.21%**, pero negativa. Como se ha mencionado al principio de este apartado, lo que se busca es que el sistema, si empeora, su efecto negativo no contrarreste el positivo del modelo con alta densidad.

Es necesario mencionar que a efectos proporcionales el resultado es significativo. Pero a efectos temporales son semejantes los resultados obtenidos en comparación con un sistema de 20 segundos de alta densidad e inferior en un modelo de 10 segundos de alta densidad. Esto es debido a que en este modelo una diferencia de 10 segundos corresponde con 7.46% y en los dos modelos anteriores corresponde con un 4.04% y 3.46% respectivamente.

Calculamos los efectos de esta eficiencia:

El -8.21 % de eficiencia hace que el tiempo de tránsito pase a:

$$71 - \frac{-11}{60} = 71.18 \text{ minutos}$$

***Ecuación 23. Minutos de tránsito con -8.21 % de eficiencia.***

Las emisiones producidas por el sistema retroalimentado, correspondiente con el tiempo de la segunda iteración, son de 1383912.95 kg. Comparando con las emisiones del sistema convencional podemos obtener:

$$1380413.31 - 1383912.95 = \text{-3499.63 kg de combustible ahorrados}$$

***Ecuación 24. Kg de combustible ahorrados con -8.21% de eficiencia.***

Este resultado indica que, en vez de ahorrar combustible, se produce más combustible.

## 6.4 BAJA DENSIDAD Y 20S ENTRE TOMA DE DECISIÓN

Al igual que el caso anterior, 10 segundos y baja densidad, podemos observar que hay un leve empeoramiento en los tiempos de descongestión produciendo una eficiencia negativa del sistema. El tiempo resultante de diferencia es de +7 segundos de tráfico, empeorando el resultado final (Tabla 15 y Gráfica 14).

etapas	tiempo	Instrucción
1	135	[1, 0, 0, 0]
2	200	[1, 0, 1, 1]
3	200	[1, 0, 0, 0]
4	200	[1, 0, 0, 1]
5	142	[1, 0, 0, 1]
6	142	[1, 0, 0, 1, 1]
7	142	[0, 0, 1, 1, 0]
8	140	[1, 1, 0, 1, 1]
9	200	[1, 0, 0, 0]
10	200	[1, 0, 0, 1]
11	142	[1, 0, 0, 1, 0]
12	142	[1, 0, 0, 1, 1]

*Tabla 15. Conjunto de instrucciones y tiempos del modelo con baja densidad y 20 segundos entre instrucción.*

La eficiencia obtenida se calcula de la siguiente manera:

$$135 - 142 = -7 \text{ segundos (reduccion de tiempo obtenida)}$$

*Ecuación 25. Reducción de tiempo obtenida en el modelo de 20 segundos y Baja densidad.*

$$\frac{-7}{135} = -0.0518 \text{ (eficiencia obtenida)}$$

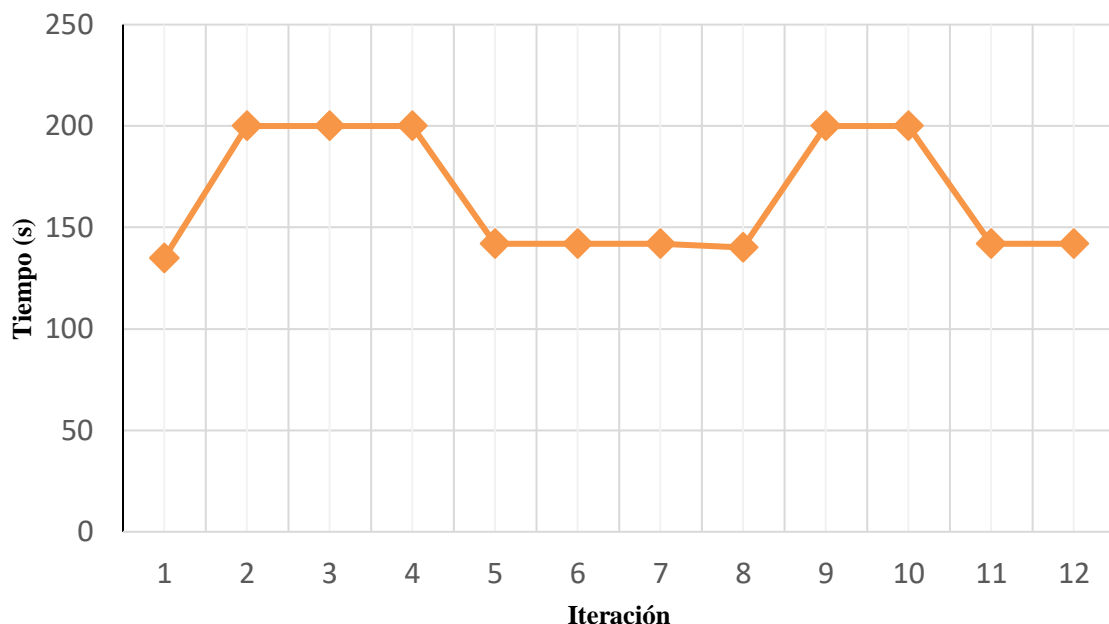
*Ecuación 26. Eficiencia obtenida en el modelo de 20 segundos y baja densidad.*

No se ha podido obtener mejoras para el sistema en la segunda iteración. Pero si se puede observar la repetición de una instrucción que ofrece el tiempo más favorable proporcionado por el sistema. Esta instrucción es [1, 0, 0, 1].

La eficiencia obtenida con el sistema en las iteraciones donde esta instrucción está presente es **-5.18%**.

Es importante recordar que la baja eficiencia que se está produciendo es proporcional al tiempo de simulación del entorno, es decir 1 minuto y 35 segundos.

### **Evolución temporal de modelo de baja densidad y 20 segundos entre instrucción.**



*Gráfica 14. Evolución temporal de modelo de baja densidad y 20 segundos entre instrucción.*

Calculamos los efectos de la eficiencia:

El -5.18 % de eficiencia hace que el tiempo de tránsito pase a:

$$71 - \frac{-7}{60} = 71.11 \text{ minutos}$$

***Ecuación 27. Minutos de tránsito con -5.18 % de eficiencia.***

Las emisiones producidas por el sistema retroalimentado, correspondiente con el tiempo de la segunda iteración, son de 1382551.98 kg. Comparando con las emisiones del sistema convencional podemos obtener:

$$1380413.31 - 1382551.98 = \mathbf{-2138.66 \text{ kg de combustible ahorrados}}$$

*Ecuación 28. Kg de combustible ahorrados con -5.18% de eficiencia.*

Este resultado indica que, en vez de ahorrar combustible, se produce más combustible.

## 6.5 ESTUDIO SOBRE EL CASO MÁS FAVORABLE

De todos los modelos, el mejor caso ha sido el de alta densidad de tráfico con 10 segundos entre toma de instrucciones. Este modelo ha producido un 17.3% de eficiencia con respecto a un sistema tradicional y resultando en un ahorro de 16.33 Toneladas de CO<sub>2</sub> de emisiones al pasar por una intersección según el modelo creado.

Si introducimos esta modalidad en las intersecciones más congestionadas de Madrid podremos extrapolar los resultados para ver el efecto sobre la ciudad completa, como se indica a continuación.

En la Madrid hay 2213 intersecciones reguladas por semáforos <sup>16</sup>(G. Velloso, 2016). Según un artículo por el independiente, basándose en un estudio creado por el Inrix Global Traffic Scorecar, la comunidad de Madrid tiene 15 nodos de alta congestión, de los cuales dos de ellos se sitúan dentro de la M-30 <sup>17</sup>(García, 2018). Con esta información y sabiendo que cada coche en España tiene una huella de carbono anual de 1.27 Toneladas de CO<sub>2</sub> <sup>18</sup>(Climate Consulting, Selectra, 2018) y que en Madrid hay un total de 364.416 coches matriculados <sup>4</sup>(Orús, 2022) se determina que:

$$\frac{364.416 \text{ coches} \times 1.27 \text{ toneladas}}{365} = 1285.57 \text{ Toneladas de CO}_2 \text{ producidas por día.}$$

***Ecuación 29. Toneladas de CO<sub>2</sub> producidas por día en la ciudad de Madrid.***

Como asumimos 2 nodos de alta congestión, a lo largo de un día se pueden ahorrar

$$16331.65 \times 4 = 65326.6 \text{ Toneladas ahorradas en un día}$$

***Ecuación 30. Toneladas de CO<sub>2</sub> ahorradas en un día.***

---

<sup>16</sup> G. Velloso, 2016.

<sup>17</sup> García, 2018.

<sup>18</sup> Climate Consulting, Selectra, 2018.

<sup>4</sup> Orús, 2022.

$$\frac{65326.6}{1285.57} = 0.0508 \text{ impacto del sistema a nivel de ciudad en un día}$$

*Ecuación 31. Estimación del porcentaje de CO2 ahorrado tras implementar un modelo de alta densidad y 10 segundos entre instrucción.*

Podemos concluir que, a nivel de ciudad, si se implementa es sistema se puede ahorrar un 5.08% de emisiones por día siendo un valor muy significativo.





## Capítulo 7. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

La primera conclusión que se puede obtener de este desarrollo es que se observan mejoras en la gestión del tráfico, a nivel temporal, con tan solo una iteración del sistema en un modelo de alta densidad, es decir, con un input que podría ser una cámara de video que está grabando en directo se pueden obtener mejoras significativas en la gestión de tráfico. Esta mejora es de un **3.6%** en el modelo de alta densidad y 20 segundos entre instrucción y **17.3%** en el modelo de alta densidad y 10 segundos entre instrucción (Tabla 16). Esto significa que se producen reducciones en las emisiones de gases contaminantes en **2.91 Toneladas** de CO<sub>2</sub> y **16.33 Toneladas** de CO<sub>2</sub>, respectivamente (Tabla 17).

Eficiencia en resultados dinámicos			
		Densidad	
		Alta	Baja
Tiempo	10	17.3	-
	20	3.6	-

*Tabla 16. Eficiencia obtenida de la segunda iteración.*

Modelo de alta densidad		
Sistema dinámico		Sistema retroalimentado
10	20	20
16.33 Toneladas	2.91 Toneladas	6.22 Toneladas

*Tabla 17. Reducción en Toneladas de CO<sub>2</sub> en modelos de alta densidad.h*

La segunda conclusión que se puede obtener es que, por lo general, no presenta ventajas tener múltiples iteraciones de un mismo entorno. Por ende, las ventajas presentadas por tener que emplear mayor capacidad de procesamiento y tiempo de ejecución, no son suficientemente significativas para justificar este gasto. Con tan solo la primera iteración en modelos de alta densidad se observan ventajas, pero si seguimos iterando, la eficiencia

obtenida en el modelo de 10 segundos desaparece. Por el contrario, el modelo de 20 segundos, con una eficiencia de **7.7%**, mejora la producción de CO2 reduciendo el consumo en **6.22 Toneladas** de CO2 (Tabla 17 y Tabla 18 comparando con Tabla 16).

Por lo tanto, los modelos recursivos no presentan ventajas frente a los modelos dinámicos, con excepción del modelo de alta densidad y 20 segundos entre instrucciones, ni presentan ventajas frente a un sistema convencional.

Eficiencia en resultados retroalimentados			
		Densidad	
		Alta	Baja
Tiempo	10	Indeterminado (52)	-8.21
	20	7.7	-5.18

*Tabla 18. Eficiencia obtenida del estado de reposo.*

La tercera conclusión obtenida, relacionada con el modelo de alta densidad (Tabla 17 y Tabla 18), establece que es mejor implementar un sistema dinámico de 10 segundos entre instrucciones frente a cualquier otro, debido a que el modelo remarcado consigue la mayor reducción de gases en **16.33 Toneladas**.

La cuarta conclusión que se puede extraer de este proyecto es que, para modelos con baja densidad, tanto si son en la segunda iteración, como si son en búsqueda del régimen estacionario, no presentan ventajas frente a un sistema convencional con el algoritmo establecido, ya que producen más emisiones que si se usara una gestión estática. Esto se puede observar en la Tabla 19.

Modelo de baja densidad	
Sistema retroalimentado	
10	20
-3.5 Toneladas	-2.1 Toneladas

*Tabla 19. Reducción en Toneladas de CO2 en modelos de baja densidad.*

Finalmente, la última conclusión que se puede obtener, basándonos en las previas conclusiones extraídas es que se puede proponer una alternativa a un sistema completamente pasivo o a un sistema completamente dinámico. La solución es la implementación de un **sistema híbrido** que permita, en entornos de vía de **alta densidad** de tráfico implementar un **sistema dinámico con una toma de decisión entre instrucción de 10 segundos** y en entornos detectados de **baja densidad** implementar un **sistema tradicional** de juego de luces. La determinación de qué se considera una vía de alta densidad y baja densidad se puede realizar mediante un contador de coches y buscar el punto de inflexión mediante otro estudio parecido al previamente realizado.

Si se implementase un sistema híbrido, como el planteado anteriormente se puede estimar que se conseguiría una reducción de emisiones de CO<sub>2</sub>/día en un **5.08%**.

El paso inicial, previo a continuar desarrollando el sistema, sería la obtención de resultados 100% verídicos con nuevas iteraciones de los diferentes entornos llegando a un régimen estacionario, en el caso del modelo de alta densidad con 10 segundos entre instrucciones. El próximo paso, sería la comprobación del simulador en un entorno más complejo con más nodos a procesar y observar el efecto que produce a mayor escala. Las siguientes tareas a desarrollar, se basarían en pasar de una estimación de modelo hardware a la implementación de este mismo; la actualización software para poder integrar estos componentes de manera adecuada; y finalmente, crear un modelo de Inteligencia Artificial, Deep Learning, que permita detectar un sistema de coches reales.



## Capítulo 8. BIBLIOGRAFÍA

- [1] “GREENHOUSE GAS EMISSIONS FROM TRANSPORT IN THE EU, BY TRANSPORT MODE AND SCENARIO”, European environment agency, 2018, <https://www.eea.europa.eu/data-and-maps/indicators/transport-emissions-of-greenhouse-gases-7/assessment>
- [2] Gutiérrez-Domènech, M.. “¿CUÁNTO CUESTA IR AL TRABAJO? EL COSTE EN TIEMPO Y EN DINERO”, Caixabankresearch.com, 2008. [https://www.caixabankresearch.com/sites/default/files/content/file/2016/09/de11\\_esp.pdf](https://www.caixabankresearch.com/sites/default/files/content/file/2016/09/de11_esp.pdf)
- [3] “CONSUMO Y EMISIONES DE CO2”, Instituto para la Diversificación y ahorro de la Energía, 2014. <https://coches.idae.es/consumo-de-carburante-y-emisiones>
- [4] Orús, A, “EVOLUCIÓN ANUAL DEL NÚMERO DE AUTOMÓVILES MATRICULADOS EN LA COMUNIDAD DE MADRID ENTRE 2011 Y 2021”, Statista, 2022. <https://es.statista.com/estadisticas/812484/numero-anual-de-matriculaciones-de-automoviles-comunidad-de-madrid/>
- [5] “EL 48% DE LOS ESPAÑOLES UTILIZA EL COCHE A DIARIO PARA TRABAJAR, SEGÚN EASYPARK”, Europapress, 2017. <https://www.europapress.es/motor/coches-00640/noticia-48-espanoles-utiliza-coche-diario-trabajar-easypark-20170823142811.html>
- [6] Olguin, N, “¿CUÁNTA GASOLINA SE GASTA POR KILÓMETRO?”, el motor el país, 2022. <https://manitec.es/gasolina-auto/un-auto-gasta-8-litros-de-gasolina-cada-100-kilometros/>
- [7] “DIESEL VS GASOLINA EN LOS GASTOS EN COMBUSTIBLE”, Grupo Gil, 2020. <https://www.grupogil.es/actualidad/comparativa-diesel-vs-gasolina-que-es-mejor#:~:text=%C2%BFConsume%20m%C3%A1s%20un%20motor%20gasolina,menos%20que%20uno%20de%20gasolina.>
- [8] Castro Rodríguez, L, REORDENAMIENTO VIAL EN EL SUR DEL CASCO CENTRAL DE SAN JOSÉ: ANÁLISIS DE TRÁNSITO ANTES-DESPUÉS, National Academies, 1998. <https://trid.trb.org/view/965393>
- [9] Woong Shin, S, Hickman, M, “EFFECTIVENESS OF THE KATY FREEWAY HOV-LANE PRICING PROJECT PRELIMINARY ASSESSMENT”, Sage Journals, 1999, [https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.3141/1659-12?casa\\_token=yP-](https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.3141/1659-12?casa_token=yP-)

- [UEyLoSv8AAAAA%3AvYxMvCIwOHJLisCUKXN2KOGGrN8SGiHkhIFA6k4yzJXeyAEsWryDC-x4TcFA7Dpo8EiHH9VgjVNFx&](https://www.google.com/search?q=google+ai+with+traffic+lights&oq=google+ai+with+traffic+lights&aqs=chrome..69i57j0i22i30j69i64.8393j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8)
- [10] W. Wen, “AN INTELLIGENT TRAFFIC MANAGEMENT EXPERT SYSTEM WITH RFID TECHNOLOGY, EXPERT SYSTEMS WITH APPLICATIONS”, 2010, Science direct, 2010. [https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417409008112?casa\\_token=AGPSNCY4YUwAAAAA:MEEAr3o0uL2fYlhQI6FNp7N7TIHJMbs4fjk6hj7UnM0Q2-HVcIbnr2sjNI\\_vpPekA4rmIoh6w](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957417409008112?casa_token=AGPSNCY4YUwAAAAA:MEEAr3o0uL2fYlhQI6FNp7N7TIHJMbs4fjk6hj7UnM0Q2-HVcIbnr2sjNI_vpPekA4rmIoh6w)
- [11] Sharif, A., Li, J.P. & Sharif, M.I. “INTERNET OF THINGS NETWORK COGNITION AND TRAFFIC MANAGEMENT SYSTEM”, Springer Link, 2019. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10586-018-1722-1>
- [12] Olivares Gallego, R, “MODELO DE SIMULACIÓN Y PLANIFICACIÓN DE TRÁFICO URBANO MEDIANTE SEMÁFOROS INTELIGENTES Y SUMO”, 2015. [https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/23170/TFG\\_Ricardo\\_Olivares\\_Gallego.pdf?sequence=1&isAllowed=y](https://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/23170/TFG_Ricardo_Olivares_Gallego.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- [13] Monterrey Cañas, A.M. y Sosa Ramírez, C. A., “DISEÑO DE UN SISTEMA DE SEMAFORIZACIÓN INTELIGENTE PARA CONTROLAR FLUJO VEHICULAR A PARTIR DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES”, Institutional Repository Universidad Piloto de Colombia, 2020. <http://repository.unipiloto.edu.co/handle/20.500.12277/9865>
- [14] González Pombo, A., “VARIANTE NORTE-SUR PARA LA DESCONGESTIÓN DEL TRÁFICO PESADO EN EL NÚCLEO DE CARBALLO”, Repositorio Universidad de Coruña, 2019. <https://ruc.udc.es/dspace/handle/2183/22395>
- [15] Castro Rodriguez, L., “REORDENAMIENTO VIAL EN EL SUR DEL CASCO CENTRAL DE SAN JOSE: ANALISIS DE TRANSITO ANTES-DESPUES”, National Academies, 1998. <https://trid.trb.org/view/965393>
- [16] Cárdenas González, L. y Soto Lozano, C. “MODELACIÓN DE UN SISTEMA INTELIGENTE DE TRÁFICO VEHICULAR POR MEDIO DE UNA SIMULACIÓN BASADA EN AGENTES”, Institutional Repository - Pontificia Universidad Javeriana, 2020. <https://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/53029>
- [17] Referencia de internet con fecha de consulta 21/02/2022 con el link: <https://www.google.com/search?q=google+ai+with+traffic+lights&oq=google+ai+with+traffic+lights&aqs=chrome..69i57j0i22i30j69i64.8393j0j7&sourceid=chrome&ie=UTF-8> .

- [18] García P, “ATASCOS EN MADRID: ESTOS SON LOS 15 PUNTOS NEGROS DE TRÁFICO QUE HAY QUE EVITAR.”, El Independiente, 2018. <https://www.elindependiente.com/economia/2018/03/14/atascos-madrid-estos-son-15-puntos-negros-traffic-evitar/>
- [19] “HUELLA DE CARBONO DEL COCHE: REDUCIR LAS EMISIONES DE CO2”, Climate Consulting by Selectra, 2018. <https://climate.selectra.com/es/huella-carbono/coche>





# ANEXO I: ALINEACIÓN DEL PROYECTO CON LOS ODS

Los ODS u objetivos de desarrollo sostenible son 17 objetivos globales que buscan un mejor y sostenible futuro para todos. Fueron establecidas hace menos de una década por la asamblea general de las naciones unidas. Los objetivos que se plantean son: Fin de la pobreza, Hambre cero, Salud y bienestar, Educación de calidad, Igualdad de género, Agua limpia y saneamiento, Energía asequible y no contaminante, Trabajo decente y crecimiento económico, Industria, innovación e infraestructura, Reducción de la desigualdades, Ciudades y comunidades sostenibles, Producción y consumo responsables, Acción por el clima, Vida submarina, Vida de ecosistemas terrestres, Paz, justicia e instituciones sólidas y Alianzas para los objetivos.



*Ilustración 60. Imagen representativa de las ODS*

Por la naturaleza de este proyecto, podemos observar que hay varios objetivos de los ODS que se cumplen. Empezando por energía asequible y no contaminante, este sistema es un proyecto que una vez desplegado en un modelo hardware requerirá de poca energía para poder funcionar. Esta energía puede provenir perfectamente de una fuente energética renovable como es la solar, a través de una placa que alimente a varios sistemas.

El segundo objetivo que cumple es el de industria, innovación e infraestructura que permite a través de infraestructura tecnológica alcanzar mejoras para la comunidad innovando y mejorando la gestión de la movilidad vial.

Otro objetivo conseguido es el de ciudades y comunidades sostenibles. La esencia del proyecto es reducir los excesivos gases contaminantes que se producen para poder obtener en actuales y nuevos entornos de desarrollos urbanístico la mejor gestión vial posible.

Acción por el clima es el último ODS que se cumple. Este trabajo a parte de buscar eficiencia para los integrantes de las comunidades que decidan impartir un sistema así, busca reducir la contaminación producida por el conjunto de vehículos tanto acústica como de gases.

Para resumir, los ODS que cumple el proyecto son los siguientes cuatro: energía asequible y no contaminante; industria, innovación e infraestructura; ciudades y comunidades sostenibles; y acción por el clima.

## ANEXO II

### *GÍA DE INSTALACIÓN*

Para poder trabajar con la herramienta Aimsun debemos realizar dos principales pasos. El primero es la instalación del simulador y el segundo la solicitud de una licencia.

Para poder realizar la descarga del simulador debemos acceder a la página oficial, pinchando <sup>a</sup>[aquí](#), y acceder a la sección de Software > Recursos > Descargas (Ilustración 61).



*Ilustración 61. Guía de instalación 1.*

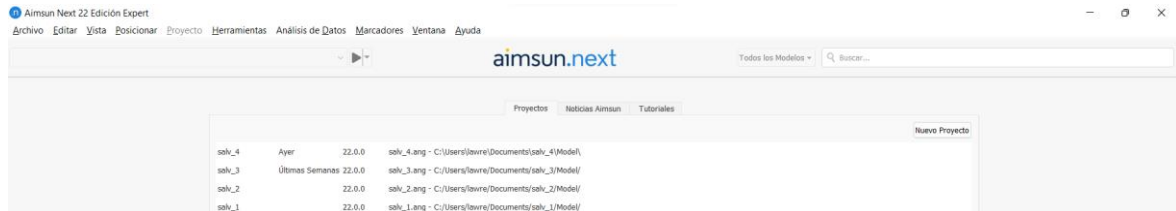
El siguiente paso es solicitar una licencia. Dependiendo de las necesidades del proyecto se podrá seleccionar la necesaria. Para solicitar una licencia debemos acceder a la web y acceder a la zona de Software > Students & Academics (Ilustración 62).



*Ilustración 62. Guía de instalación 2.*

<sup>a</sup> <https://www.aimsun.com/es/>

Finalmente, una vez otorgada la licencia se puede proceder al uso del simulador (Ilustración 63).



***Ilustración 63. Guía de instalación 3.***

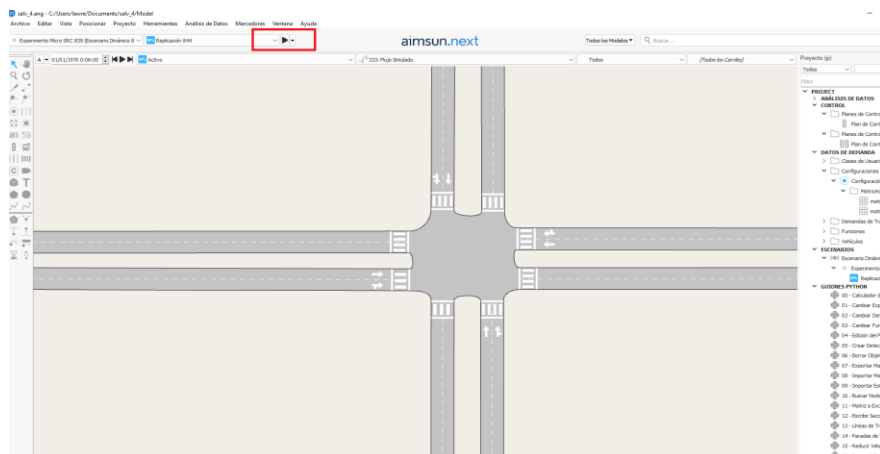
## MANUAL DE USUARIO

Para poder ejecutar este sistema y poder obtener resultados, los pasos a seguir son los siguientes:

En primer lugar, la obtención del input/fuente, es decir, la grabación del vídeo. Esto se realiza con la herramienta OBS. Iniciamos una grabación. Después iniciamos el simulador. Cuando termine la simulación paramos el vídeo y lo almacenamos en la carpeta correspondiente al tipo de simulación (Ilustración 64 e Ilustración 65).



*Ilustración 64. Inicio de grabación OBS.*

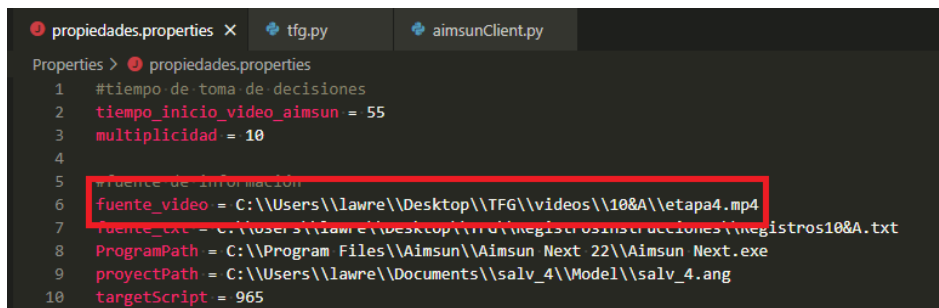


*Ilustración 65. Inicio de simulación Aimsun.*

El segundo paso para realizar en este proceso es simplemente cambiar en la carpeta de *properties* el parámetro *fFuente\_vídeo* del archivo *propiedades.properties* y asegurarnos que concuerda con el nombre del vídeo que acabamos de grabar (Ilustración 66 e Ilustración 67).



*Ilustración 66. Carpeta de vídeos.*

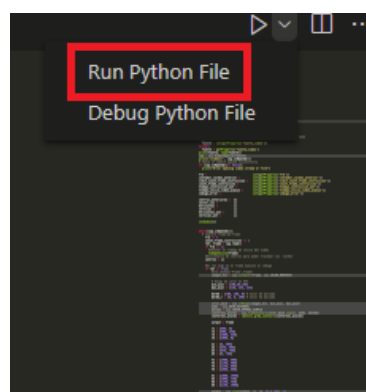


```

propiedades.properties x tfg.py aimsunClient.py
Properties > propiedades.properties
1 #tiempo de toma de decisiones
2 tiempo_inicio_video_aimsun = 55
3 multiplicidad = 10
4
5 #fuente de información
6 fuente_video = C:\\Users\\lawre\\Desktop\\TFG\\videos\\10&A\\etapa4.mp4
7 fuente_ext = C:\\Users\\lawre\\Desktop\\TFG\\registros\\instrucciones\\registros10&A.txt
8 ProgramPath = C:\\Program Files\\Aimsun\\Aimsun Next 22\\Aimsun Next.exe
9 projectPath = C:\\Users\\lawre\\Documents\\salv_4\\Model\\salv_4.ang
10 targetScript = 965
  
```

*Ilustración 67. Dirección de vídeo a procesar.*

Finalmente, lo único que queda por hacer es ejecutar el programa y esperar a obtener unas nuevas instrucciones que se cargarán automáticamente en el simulador para poder reiniciar el proceso y obtener más iteraciones (Ilustración 68).



*Ilustración 68. Inicio de procesamiento Python.*

