



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA



Escola Tècnica
Superior d'Enginyeria
Informàtica

Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Informàtica
Universitat Politècnica de València

Modelado de sistemas de free-floating carsharing mediante MATSim

Trabajo Fin de Grado

Grado en Ingeniería Informática

Autora: Peipei Zhou

Tutor: Vicente Javier Julián Inglada

Director experimental: Jaume Magi Jordán Prunera

[2020 - 2021]

Resumen

Uno de los mayores problemas actuales de las ciudades es la alta contaminación causada por las emisiones de carbono y demás gases contaminantes de los automóviles. Esto es especialmente importante en ciudades con grandes masas de población, donde generalmente cada familia tiene al menos un vehículo privado. Una forma de aliviar estos problemas puede ser el carsharing, que consiste en un modelo de alquiler de automóviles durante un periodo corto de tiempo. Esta alternativa está llamando rápidamente la atención y ya se está aplicando en muchas ciudades del mundo. En esta memoria detallamos qué es el concepto del carsharing con las diferentes modalidades que tiene, las ventajas que nos puede aportar, y por qué es interesante su estudio y aplicación. Además, también se explica cómo obtener datos para poder realizar simulaciones multiagente utilizando MATSim y visualizarlo mediante VIA. Finalmente, se realizan las simulaciones en la ciudad de Valencia y se estudia la forma óptima de aplicar el carsharing a esta ciudad.

Palabras clave: Carsharing, free-floating, simulación, sistemas multiagente, MATSim.

Abstract

One of the biggest problems in cities nowadays is the high pollution caused by carbon emissions and other polluting gases from automobiles. This is especially important in cities with large populations, where generally every family has at least one private vehicle. One way to alleviate these problems may be carsharing, which is a model of renting cars for a short period of time. This alternative is rapidly gaining attention and is already being implemented in many cities around the world. In this report we detail what is the concept of carsharing with the different modalities it has, the advantages it can bring us, and why it is interesting to study and apply it. In addition, we also explain how to obtain data to perform multi-agent simulations using MATSim and visualize it using VIA. Finally, we perform the simulations in the city of Valencia, and we study the optimal way to apply carsharing to this city.

Keywords : Carsharing, free-floating, simulation, multi-agent systems, MATSim.

Tabla de contenidos

1. Introducción	1
1.1. Motivación	3
1.2. Objetivos	3
1.3. Estructura.....	4
2. Estado del arte.....	5
2.1. Modelización del transporte.....	5
2.2. Simuladores multiagente	6
2.3. Carsharing.....	7
2.3.1. Carsharing con estaciones.....	8
2.3.2. Free-floating carsharing	9
2.4. Estudios previos	10
2.5. Propuesta.....	12
3. Análisis del problema.....	13
4. Diseño de la solución.....	14
4.1. Arquitectura del sistema	14
4.2. Diseño detallado.....	15
4.3. Tecnología utilizada	17
4.3.1. Generador de carga	18
4.3.2. MATSim: Multi-Agent Transport Simulation.....	20
4.3.3. VIA.....	22
5. Desarrollo de la solución propuesta	25
5.1. Pruebas.....	25
5.1.1. Variando número de clientes, estaciones y vehículos por estación	25
5.1.2. Variando número de estaciones y tipo de distribución con número de clientes constante	30
5.1.3. Free-floating.....	38
5.1.4. Discusión	40
5.1.5. Visualización en VIA	42



6. Conclusiones	44
6.1. Relación del trabajo desarrollado con los estudios cursados.....	45
7. Trabajos futuros.....	47
8. Referencias.....	49

1. Introducción

Los automóviles fueron inventados a finales del siglo XVIII y eran impulsados por vapor. A mediados del siglo XIX fue cuando se patentó el primer vehículo por motor de combustión interna con gasolina, se construyeron los primeros motores eléctricos y poco más tarde fueron usados para impulsar coches. No obstante, a principios del siglo XX se descubrió una gran reserva de petróleo en Tejas haciendo que bajara el precio de la gasolina y, consecuentemente disminuyó cada vez más el coste de los vehículos impulsados por gasolina. Por otra parte, los coches eléctricos fueron desapareciendo gradualmente por su elevado precio y no fue hasta finales del siglo XX cuando volvieron a resurgir [1]. Estos inventos supusieron un gran avance tecnológico y permitió a las personas desplazarse con mayor comodidad y velocidad.

Aun así, un automóvil sigue siendo un bien relativamente caro de adquirir y de mantener. Por esto mismo, en algunos contextos como podrían ser los desplazamientos urbanos, no valdría la pena asumir dicho coste.

Actualmente, la mayoría de los viajes que se hacen utilizando el vehículo privado, suele ser de una sola persona y por un período corto de tiempo. Además, en las grandes ciudades es cada vez más complicado encontrar aparcamiento, sobre todo sin tener que pagar una tarifa extra. Todo esto aumenta el coste que supone poseer un vehículo privado [2].

Esto no solo supone un problema socioeconómico, sino también medioambiental. Cada vez hay más evidencias del cambio climático por la contaminación y por las emisiones de dióxido de carbono. Para reducir los efectos de la contaminación, se están creando más zonas verdes e intentando reducir el uso de los vehículos privados [3].

Como podemos ver en la figura 1, los automóviles son la mayor fuente de emisión de CO₂ dentro de los medios de transporte, originando el 60,7% de la contaminación por transporte por carretera.



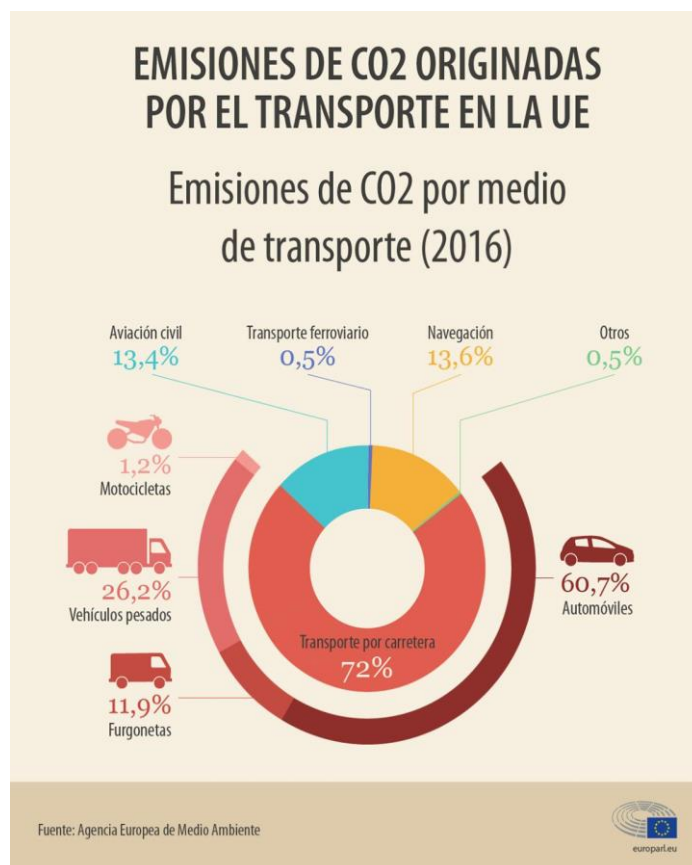


Fig. 1. Emisiones de CO2 originadas por el transporte en la UE en 2016 [4]

A causa de esto, está disminuyendo su adquisición, buscando alternativas que puedan proporcionar un servicio similar de forma más económica. Se ha intentado fomentar más el uso del transporte público o de las bicicletas mediante la creación de más carriles para estos medios de transporte, ya que son alternativas que pueden satisfacer casi todas las necesidades de las personas y suelen ser medios mucho más económicos y menos contaminantes [5].

Sin embargo, surge un nuevo problema cuando no posees un vehículo propio y, por la estructura de la ciudad o por la falta de recursos, el transporte público no es suficiente para satisfacer algunas necesidades. En estos casos es necesario otra alternativa eficaz y con un coste menor a adquirir un vehículo propio [3].

Una nueva alternativa y posible solución a estos problemas económicos y medioambientales podría ser el carsharing.

1.1. Motivación

El tema de este trabajo fue propuesto por los tutores del mismo y está relacionado con un estudio previo realizado en el departamento de Sistemas Informáticos y Computación, al que pertenecen los tutores, usando SimFleet para simular free-floating carsharing.

A partir de ese estudio y con la intención de ver cómo se podría aplicar el carsharing a la ciudad de Valencia, se decidió realizar un estudio similar utilizando simuladores y sistemas multiagente para ver las interacciones de los usuarios con los vehículos.

Adicionalmente, nos interesa utilizar las tecnologías actuales para encontrar soluciones a los problemas medioambientales causados, en gran medida, por la gran cantidad de vehículos concentrados en las ciudades.

En este estudio realizaremos simulaciones utilizando carsharing con estaciones y free-floating carsharing. Todas estas simulaciones centradas en la ciudad de Valencia.

1.2. Objetivos

Como hemos mencionado anteriormente, utilizaremos simuladores para llevar a cabo este trabajo, concretamente haremos uso de MATSim [6].

Los objetivos que se quieren lograr en este trabajo son varios. Nuestro principal objetivo es realizar simulaciones utilizando carsharing con estaciones y free-floating en la ciudad de Valencia. Estas simulaciones las llevaremos a cabo con MATSim y las visualizaremos con VIA [7].

En segundo lugar, queremos encontrar y determinar la cantidad y distribución óptima de los vehículos y de las estaciones. Para ello, realizaremos una serie de pruebas con distintas configuraciones y a partir de los resultados, siguiendo unos criterios que mencionaremos en el apartado de las pruebas, determinaremos la distribución óptima.

Por último, queremos minimizar la distancia que tienen que recorrer los clientes a la hora de buscar vehículo y el número de clientes que se quedan sin vehículo, ya sea porque están fuera de su alcance o por escasez de recursos. Relacionado con el segundo objetivo, la distribución óptima será aquella que use la cantidad necesaria de estaciones y/o vehículos dejando la menor cantidad de clientes sin vehículo.

1.3. Estructura

En este apartado comentaremos la estructura de este trabajo para que se obtenga unas nociones básicas de lo que comentaremos en cada punto.

Tras la introducción presentada en este apartado, se presenta el estado del arte (en la Sección 2) que podemos dividir en dos partes, la primera donde se introducen conceptos para contextualizar el trabajo, y la segunda parte donde se comentan algunos estudios realizados previamente en relación con este trabajo. A continuación, se hace un breve análisis del problema a tratar (Sección 3) y de la solución propuesta (Sección 4), explicando las tecnologías utilizadas y el diseño de dicha solución. Seguidamente, en la Sección 5 se presenta el análisis de las pruebas realizadas. En la Sección 6 se presentan las conclusiones, contrastándolas con los objetivos propuestos inicialmente. Además, se comentan los conocimientos adquiridos y necesarios para el correcto desarrollo de este proyecto. Finalmente, en la Sección 7 se numeran algunas ampliaciones interesantes que se podrían realizar en futuro.

2. Estado del arte

En este apartado veremos la modelización del transporte para poner en contexto la necesidad de los simuladores multiagente, qué son estos simuladores multiagente, el concepto de carsharing y sus modalidades, y algunos estudios previos realizados relacionados con el tema de este trabajo. Finalmente se mostrará en detalle la propuesta de este trabajo.

2.1. Modelización del transporte

En el contexto de una zona urbana, modelar adecuadamente el sistema de transporte es imprescindible ya que permite prever y estimar flujos de pasajeros o vehículos en posibles escenarios futuros que se puedan considerar en las ciudades. Además, permite pronosticar la demanda de cada tipo de transporte en distintas zonas de la ciudad y en cada momento del día [8].

Todo esto permite facilitar la movilidad de las personas en las ciudades ya que es inevitable que se movilicen entre distintos puntos de las ciudades, en cualquier momento del día.

Pero modelar el transporte no es tan sencillo. Debido a su dinamismo, cambiando constantemente según el contexto en el que se realice, no podemos ponerlo en práctica ya que implicaría muchos gastos y no sería rentable [9].

A la hora de modelar el transporte se puede realizar con dos grupos de modelos: modelos basados en viajes, analizando trayectos entre un origen y un destino, y modelos basados en actividades, analizando los distintos movimientos en un día completo derivado de llevar a cabo una serie de actividades.

Los modelos basados en actividades tienen ciertas ventajas frente a los modelos basados en viajes. Primero, consideran limitaciones realistas en tiempo, espacio y modo, es decir, tienen en cuenta las diferentes horas del día, los diferentes lugares donde paran las personas y su forma de desplazarse de un lugar a otros.

Es por ello por lo que la mejor manera de modelar el transporte es mediante simuladores multiagente. En este trabajo realizaremos simulaciones siguiendo el modelo basado en actividades.

2.2. Simuladores multiagente

Los simuladores multiagente son entornos virtuales compuestos por agentes inteligentes que interactúan entre ellos en un entorno común, produciendo así lo que observamos en las simulaciones.

A la hora de definir qué son los agentes, desafortunadamente, aún no hay una definición universal, y aún hay muchos debates y controversia en este asunto. Pero hay algunas características que podemos utilizar para definirlos a grandes rasgos [10].

Dicho esto, podemos decir que los agentes son entidades artificiales que tienen un comportamiento autónomo y proactivo. Son capaces de aprender de su interacción con el entorno en el que se encuentran y los agentes tienen un objetivo o una meta (individual o colectivo). Cada agente tiene unos recursos propios y solo tienen información parcial de su entorno [11].

Estos agentes se pueden agrupar formando lo que denominamos sistemas multiagentes. Estos sistemas multiagentes se pueden utilizar para resolver problemas que no podrían resolver los agentes de manera individual.

Las características de estos sistemas son que cada agente tiene información parcial o insuficiente para resolver el problema individualmente, no tienen un sistema de control global, los datos están descentralizados y la computación es asíncrona. Estas características han incrementado el interés en estos sistemas multiagentes ya que ayudan a evitar cuellos de botella y permiten la interconectividad e interoperabilidad de estos sistemas.

Se puede definir una simulación como el proceso de diseñar un modelo de un sistema real y llevar a cabo un experimento con dicho modelo. Así pues, el objetivo es entender el comportamiento de un sistema y/o de evaluar varias estrategias (delimitado por límites impuestos por un criterio o un conjunto de criterios) para la operabilidad de un sistema [11, 12].

Con respecto a esta definición, podemos considerar una simulación como una herramienta computacional para entender un sistema real y desarrollar un sistema real operacional.



2.3. Carsharing

El carsharing se introduce como un enfoque innovador a los problemas relacionados con el transporte.

El concepto de carsharing, o inicialmente préstamo de vehículos, nace en Suiza en 1987 y poco a poco se ha ido expandiendo por otros países de Europa y de Norteamérica [2]. Es un modelo de alquiler de automóviles, una nueva forma de compartir y reutilizar recursos. Es una alternativa en la que las personas pueden disfrutar de las ventajas de un vehículo privado durante un período de tiempo sin las responsabilidades y costes que implica ser propietario de un automóvil.

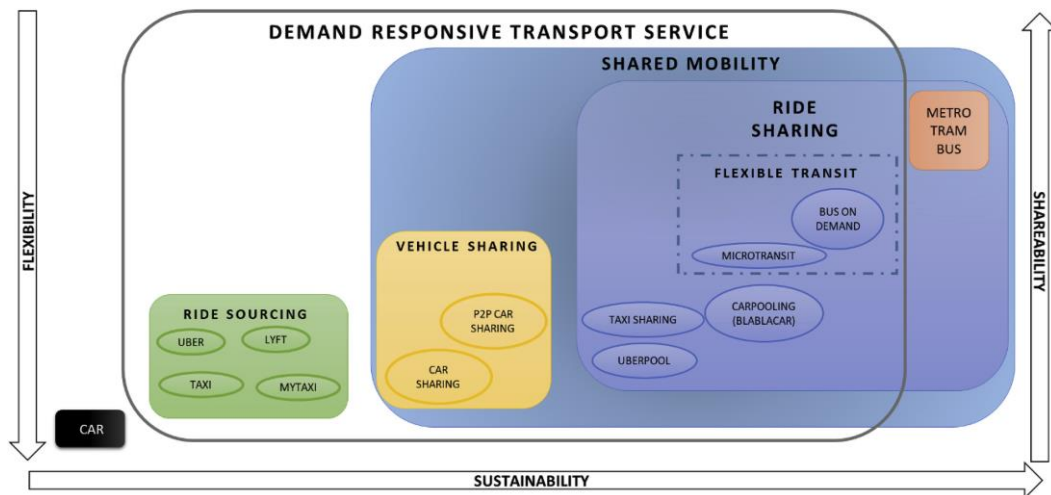


Fig. 2 Clasificación de los servicios de transporte según demanda. [13]

Como podemos ver en la Figura 2, el coche es la forma más flexible de transporte, pero es poco sostenible debido a los costes que hemos mencionado anteriormente y no permite compartir dicho vehículo. Por otra parte, el transporte público permite su uso por un gran número de personas a la vez y es más sostenible, pero no es flexible ya que tienen que seguir unos horarios y rutas. Entre estos dos modos de transporte está el *ride sourcing*, que consta de servicios como el taxi y similares. Permite una mayor flexibilidad frente al transporte público y es más sostenible que el vehículo privado, siendo así una buena alternativa en algunos casos, pero continúa tratándose de un medio de transporte relativamente caro ya que son servicios con conductor incluido. Frente a estos medios de transporte mencionados, en un punto de equilibrio se encuentra el carsharing, siendo más flexible, sostenible y con mayor capacidad de compartir recursos.

El carsharing tiene dos modalidades, basado en estaciones y free-floating. Para ambos casos, se pueden utilizar aplicaciones para el alquiler y localización de los vehículos.

2.3.1. Carsharing con estaciones

En esta modalidad del carsharing, como bien dice su nombre, se utilizan estaciones que se distribuyen por la ciudad y en cada estación hay un conjunto de vehículos que se pueden utilizar. Los clientes acceden a las estaciones y pueden utilizar los vehículos que haya disponibles en esa estación. Para devolver un vehículo, los clientes pueden dejarlo en la misma estación donde se recoge o en alguna otra estación localizada en otro lugar (por ejemplo, recogerlo en una estación cerca de sus viviendas y dejarlo en una estación cerca de sus lugares de trabajo).

Como el alquiler de un vehículo se cobra en función del tiempo alquilado, lo normal es dejarlo, acabando así el alquiler, en una estación diferente si la actividad que se va a realizar consume mucho tiempo y, cuando se acabe esa actividad, volver a alquilar otro vehículo. Si es una actividad corta, se puede mantener el primer alquiler.

Esto reduce la flexibilidad que pueden tener los clientes a la hora de utilizar los vehículos ya que, independientemente de donde decidan dejar el vehículo, tienen que buscar una estación cerca del lugar al que se dirigen y, si no mantienen el alquiler, no se les puede garantizar que puedan encontrar un vehículo disponible cuando acaben sus actividades. Pero para las empresas es más seguro y menos costoso porque no necesitarían sistemas de seguimiento muy complejos para saber la localización de cada vehículo [14].

Aun así, este modelo de carsharing implica más costes respecto al free-floating ya que es necesario una zona donde situar y construir las estaciones y personas que gestionen cada estación. Incluso puede resultar en la disminución del tamaño de las flotas y número de estaciones si la ciudad no tiene espacios adecuados donde situarlos [15].

En este estudio el alquiler se empezará y se acabará en la misma localización, que será el hogar de cada cliente y no se tendrá en cuenta la opción de dejarlo en estaciones intermedias.

Para realizar una simulación en esta modalidad se siguen los siguientes pasos [16]:

1. Localizar una estación cercana con vehículos disponibles para alquilar y andar hasta esa estación.
2. Una vez llegado a la estación, realizar el alquiler y obtener un vehículo.
3. Conducir con dicho vehículo hasta tu próxima actividad (la interacción con otros vehículos también se modelará).
4. Aparcar el coche cerca de tu próxima actividad.
5. Cuando se termina la actividad, volvemos al coche y nos desplazamos a la siguiente actividad.
6. Se repiten los pasos 4 y 5 hasta que terminamos la última actividad del día y volvemos a la estación inicial.
7. Dejamos el coche en la estación y acabamos el alquiler, dejando así el vehículo disponible para otras personas.
8. Finalmente, el cliente vuelve andando hasta el lugar de inicio.

Estos serían los pasos en caso de empezar y acabar en el hogar y no tener más actividades a lo largo del día. Pero, en caso de tener más actividades donde ya no haga falta el vehículo, después del paso 7 iría hasta la siguiente actividad.

2.3.2. Free-floating carsharing

En esta modalidad, a diferencia del modelo basado en estaciones, los vehículos se reparten directamente por la ciudad dentro de un área delimitada. Esto implica que los clientes pueden recogerlos de cualquier lugar, buscando en una aplicación el vehículo disponible que haya más cerca de ellos y dejarlos donde más les convenga [14].

Para esta modalidad, es imprescindible que las compañías que proporcionan los vehículos tengan un buen sistema de rastreo. Esto permite prevenir casos de robo y facilita a las compañías la búsqueda de los vehículos después de los alquileres ya que al final de cada día es posible que tengan que reubicar los vehículos que se hayan quedado en zonas poco accesibles [17].

Además, al no necesitar estaciones, el coste es menor a la hora de llevarlo a la práctica y es más sencillo y rápido desplegar las flotas de vehículos porque no depende del tiempo necesario para acabar de construir las estaciones.

Todo esto parece señalar que este modelo es el mejor y puede hacernos pensar qué necesidad hay de utilizar el modelo basado en estaciones. Aun así, algunos inconvenientes que puede tener este modelo son precisamente por la falta de estaciones. Al necesitar un buen sistema de rastreo es necesario una buena conexión para poder localizarlos y poder recibir los mensajes de nuevos alquileres para hacer accesible los vehículos [14].

Dicho esto, el mejor modelo dependerá de dónde se quiera aplicar y lo que cada compañía esté dispuesta a invertir.

Al igual que en la modalidad anterior, la ubicación de la primera y última actividad será el hogar del cliente.

Para simular esta modalidad, los pasos son bastante similares a utilizar carsharing con estaciones, pero la lista es ligeramente más corta [16]:

1. Localizar y alquilar el vehículo más cercano que esté disponible.
2. Desplazarse desde la ubicación de la primera actividad hasta el vehículo alquilado.
3. Desplazarse en el vehículo hasta la siguiente actividad (la interacción con otros vehículos también se modelará).
4. Aparcar el vehículo cerca de la actividad a realizar.
5. Acabar el alquiler dejando así el vehículo disponible para otros clientes.
6. Llevar a cabo la actividad actual.
7. Repetir todos los pasos desde el paso 1 hasta acabar todas las actividades.

De la misma manera que la modalidad con estaciones, si hubiera más actividades a llevar a cabo sin la necesidad de un vehículo, después del paso 6 el cliente se desplazaría directamente a la siguiente actividad sin necesidad de repetir los pasos anteriores.

2.4. Estudios previos

El carsharing ha estado presente desde hace más de 60 años y ya se ha implementado en varios países. En 2008, se puso en marcha el primer programa de free-floating carsharing con car2go (actualmente ShareNow después de la fusión de car2go con DriveNow) [18] en Ulm y se hicieron varios experimentos, pero en ese

entonces aún no se habían creado herramientas adecuadas para modelar este tipo de carsharing. Sin embargo, se pudieron aprovechar algunos datos obtenidos para llegar a la conclusión de que el modelo de free-floating carsharing tendría un gran impacto positivo, tanto económicamente como respecto al medio ambiente, ya que algunos fabricantes de automóviles empezaron a vender movilidad en lugar de vehículos, es decir, el número de vehículos en general disminuiría [16].

Los estudios centrados en los modelos de carsharing fueron aumentando a gran velocidad al igual que los fabricantes de coches interesados en este modelo debido a la competencia generada en el mercado de operadores de carsharing. Por lo tanto, modelos predictivos, instrumentos para la optimización de operaciones y la estimación de la demanda empezaron a llamar la atención de los operadores. Así se llegó a la conclusión de que usando simulaciones basadas en agentes sería la mejor manera para modelar el carsharing [16].

En 2014, se realizó un análisis sobre carsharing en la ciudad de Berlín como parte de un proyecto alemán llamado “elektroMobil”. Este estudio hizo uso de MATSim y se simularon varios escenarios de carsharing (basado en estaciones pequeñas, basado en estaciones más grandes y basado en estaciones y free-floating). Las simulaciones usando carsharing con estaciones juntamente con carsharing free-floating aumentan visiblemente los viajes que se realizan usando este tipo de servicio respecto a solo usar carsharing con estaciones. Además, se usa free-floating carsharing para trayectos más cortos, y para trayectos más largos se suele usar más el modelo basado en estaciones, indicando que los dos modelos pueden ser complementarios [16].

Al año siguiente, se realizó un estudio de validación en Luxemburgo aplicando dos nuevos módulos de MATSim. En este estudio se simuló el carpooling y el carsharing utilizando datos reales recogidos en esta ciudad. Se presentan los módulos introducidos en MATSim para simular el carpooling y el carsharing, los nuevos inputs necesarios con sus correspondientes estructuras y los nuevos parámetros introducidos en los outputs. Las pruebas realizadas utilizaron 155000 agentes que representaban a los viajeros que llegaban a Luxemburgo desde Francia, Bélgica y Alemania [19].

Más adelante en 2017, se hizo otro estudio basado en Francia. Este estudio se centra en la generación de una simulación sencilla para que, posteriormente, sirva de base a la hora de crear escenarios de simulación más complejas. Para ello, generaron las instalaciones donde tendría lugar las diferentes actividades de los agentes. A

continuación, generaron la población que será representada por los agentes y sus respectivos planes diarios. Y, por último, definieron el área donde se realizan las simulaciones. Como los agentes se adaptaron de un caso utilizado en Suecia, no se representaba un comportamiento similar a la realidad de Francia y, tampoco se dieron casos de congestión del tráfico, por lo que sería necesario obtener datos más realistas para estudios futuros [20].

2.5. Propuesta

Este trabajo de fin de grado llevará a cabo un breve estudio sobre qué es el carsharing con estaciones y free-floating. Veremos de qué trata el problema del carsharing, qué herramientas podemos utilizar para simularlo y finalmente haremos un modelado de este sistema de transporte, aplicándolo mediante simulaciones a la ciudad de Valencia.

Realizaremos simulaciones con las dos modalidades del carsharing, utilizando un conjunto variado de pruebas. Con los resultados de las pruebas y siguiendo unos criterios concluiremos cuál sería la mejor configuración y distribución de las flotas de vehículos a aplicar en la ciudad de Valencia.

3. Análisis del problema

El problema del carsharing consiste en analizar y encontrar la mejor forma de desplegar flotas de vehículos alrededor de la ciudad para maximizar el uso de los mismos, además de minimizar la distancia que tienen que andar los clientes y el número de clientes que se quedan sin vehículo. Este problema se podría dividir según la modalidad de carsharing utilizada, teniendo en cuenta el uso o no de estaciones.

En el caso de usar estaciones, estaríamos hablando de carsharing con estaciones. Esta versión del problema consiste en encontrar la mejor forma de distribuir las estaciones, el número óptimo de estaciones a utilizar y el número óptimo de vehículos por estación. Por lo tanto, las principales variables serían el número de estaciones, el número de vehículos por estación y la forma de distribuir las estaciones. La mejor distribución de dichas estaciones vendrá dada, principalmente, por la zona donde se vaya a hacer el estudio.

En el caso de no usar estaciones, estaríamos hablando de free-floating carsharing. En este caso solamente se tienen en cuenta el número de vehículos a utilizar y la forma de distribuirlos por la zona donde se quiera implementar, pero igual que en el caso anterior, la mejor forma de distribuir los coches variará según la zona a la que se vaya a aplicar.



4. Diseño de la solución

En este apartado explicaremos brevemente la estructura de nuestro sistema, como se conectan los elementos y qué relación tienen entre ellos, y veremos con más detalle su diseño. También explicaremos la tecnología empleada y cómo funciona cada una de las herramientas utilizadas.

4.1. Arquitectura del sistema

En este apartado veremos a grandes rasgos cómo se conectan cada una de las herramientas de las que hemos hecho uso mediante un esquema.

Como hemos mencionado anteriormente, las simulaciones se hacen empleando MATSim [6], por lo tanto, se ha invertido un período de tiempo al inicio de este trabajo para estudiar esta herramienta y configurar el entorno de trabajo necesario para posteriormente realizar las simulaciones.

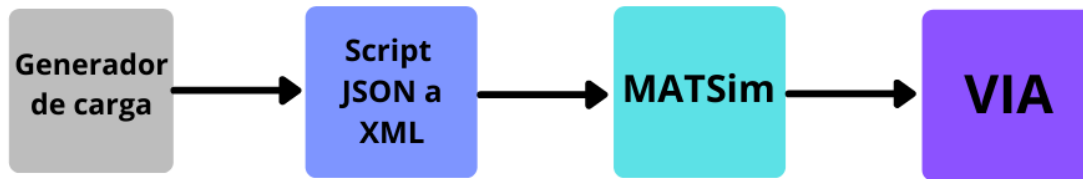


Fig. 3 Esquema de la arquitectura empleada.

La primera herramienta de la que hacemos uso es un generador de carga [21]. Esta aplicación nos permite obtener, en archivos JSON, las posiciones de los vehículos y de los clientes [3].

Después, para poder utilizar los datos obtenidos en el paso anterior, hemos creado un script al que se le pasa como parámetros de entrada los JSON y nos devuelve archivos XML, que son el tipo de archivos que recibe MATSim [6] como archivos de entrada (a partir de ahora los denominaremos inputs).

A continuación, ya podemos pasarle a MATSim los archivos XML para que ejecute una simulación utilizando esos datos. La simulación devuelve varios archivos de salida (a partir de ahora denominados outputs), entre ellos, un archivo comprimido con los

eventos de la simulación. Este archivo comprimido contiene un XML con información detallada de cada una de las acciones que realizan los agentes en un día.

Finalmente, para obtener información visual de las simulaciones, utilizamos VIA pasándole el archivo comprimido con los eventos de la simulación y la red donde se ha ejecutado la simulación. De esta forma, podemos ver cómo acceden los agentes a los vehículos y el camino que recorren.

4.2. Diseño detallado

En este apartado, como dice su nombre, veremos con más detalle la arquitectura explicada en el apartado 4.1. Veremos los inputs y outputs de cada una de las herramientas y cómo se conectan cada uno de estos archivos con las diferentes herramientas.

Dividiremos la explicación en primera y segunda parte, en la primera parte explicaremos la parte de la generación y transformación de datos para poder pasarlos a MATSim. En la segunda parte explicaremos cómo se pasan los archivos a MATSim y como visualizar las simulaciones.

En los esquemas que mostraremos a continuación hemos indicado los inputs mediante flechas azules y los outputs mediante flechas rojas.

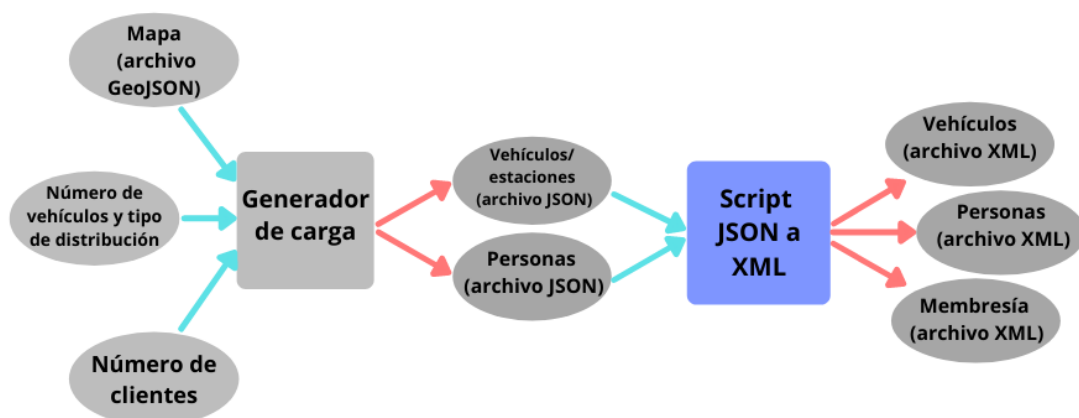


Fig. 4 Esquema conectando los inputs y outputs de cada herramienta

Para la primera parte, como hemos visto en el apartado anterior, el primer paso es utilizar el generador de carga. Para obtener la posición de los vehículos como de las

personas, tenemos que pasarle el mapa en el cuál queremos posicionarlos. Además del mapa, para obtener la posición de los vehículos tenemos que pasarle el número de vehículos o de estaciones y qué forma de distribución queremos que se aplique (se explicará en el apartado 4.3.1), y para obtener la posición de las personas tendremos que pasarle el número de clientes con los que queremos realizar la simulación.

El generador nos devuelve dos archivos JSON como output con las posiciones que queríamos de los vehículos o estaciones y de las personas. Estos dos archivos, los adaptamos a ficheros XML con un formato muy específico que necesita MATSim mediante un script escrito utilizando Python. Este script hace uso de la API *ElementTree* que nos permite crear archivos con datos XML y darles el formato típico que tienen este tipo de archivos. Además de cambiar el formato de la información contenida en los JSON, realizamos una conversión de coordenadas (de epsg:4326 a epsg:3857) mediante la API *Transformer* y añadimos los atributos necesarios para que se asimile a los archivos XML que necesita MATSim.

Como podemos observar en la Figura 4, pasamos los dos archivos JSON y el script se encarga de tratar cada archivo por separado y nos devuelve 3 archivos XML. Los archivos con los vehículos y con las personas tienen las posiciones al igual que los archivos JSON que le pasamos, pero obtenemos otro archivo adicional al que llamaremos membresía, que contiene las personas que pueden utilizar el servicio del carsharing. En este trabajo todos pueden utilizar el carsharing, por lo que este archivo contiene a todas las personas que hemos generado.

Con estos tres archivos generados podemos pasar a la segunda parte. Pero antes de empezar esta parte, explicaremos brevemente de dónde obtenemos el mapa XML que vemos en el siguiente esquema (Figura 5).

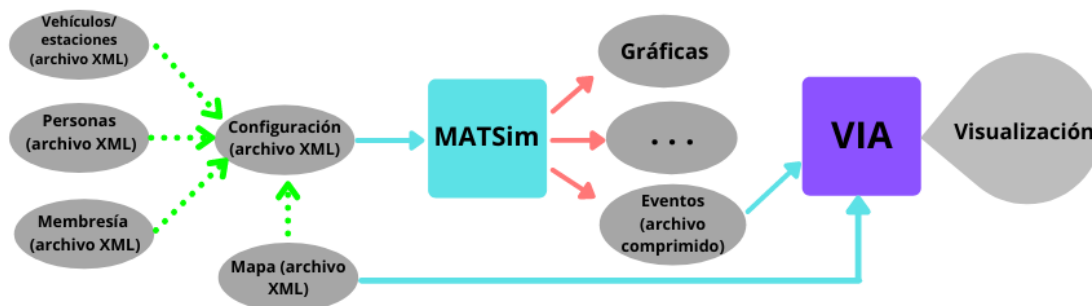


Fig. 5 Esquema detallado de MATSim y VIA

Para generar un XML que represente las carreteras de la zona que queremos utilizar para la simulación primero hemos obtenido un fichero OSM de OpenStreetMaps [22] con el área que queremos utilizar. Este archivo lo hemos pasado a una aplicación denominada JOSM [23] y, con su extensión de MATSim, hemos generado el XML que necesitábamos.

Una vez obtenido todos los ficheros necesarios, utilizamos un fichero XML denominado configuración para indicarle a MATSim qué ficheros utilizar. En la figura 5, las flechas con líneas discontinuas verdes indican que se introducen como valores para distintos parámetros y módulos del fichero configuración (veremos esto con más detenimiento en el apartado 4.3.2).

El único input que necesita MATSim es la configuración y con eso ya puede ejecutarse la simulación. Una vez finalizada la ejecución, obtenemos varios archivos y gráficas con información referente a la simulación.

Como hemos mencionado anteriormente, pasando los eventos y el mapa XML como input a VIA, podemos visualizar cómo interactúan los clientes con los vehículos y el trayecto que recorren andando y en vehículo en un espacio y tiempo que imita a la realidad.

4.3. Tecnología utilizada

En este apartado explicaremos las herramientas utilizadas en este trabajo y que hemos ido mencionando en apartados anteriores.

Hemos utilizado el entorno de desarrollo Eclipse principalmente para acceder y modificar, en los casos necesarios, el código fuente de MATSim escrito en Java y ejecutar las simulaciones. Además, utilizamos Visual Studio Code como editor de código para crear scripts adicionales que hemos necesitado a medida que hemos avanzado en este trabajo, como el conversor de archivos JSON a XML.

Las herramientas principales que utilizamos para este trabajo es un simulador multiagente denominado MATSim y una aplicación denominada VIA para visualizar las simulaciones ejecutadas. Hemos utilizado también un generador de carga [21] para obtener los datos de entrada necesarios para realizar las simulaciones.

4.3.1. Generador de carga

Para empezar, hablaremos de la herramienta que hemos utilizado para generar los archivos con los datos necesarios para realizar las simulaciones.

El generador [21] recibe como entrada un archivo GeoJSON (a partir de ahora lo denominaremos mapa) que define el área del mundo real donde tendrá lugar nuestra simulación y a partir de él generará lo que necesitamos.

Para situar las estaciones o vehículos, se le pasa como parámetro el tipo de distribución que queremos utilizar (aleatoria, uniforme o radial) y el número de estaciones o vehículos que queremos.

Si utilizamos una distribución aleatoria, se generan coordenadas (x, y) al azar en el interior de un polígono que define el área donde queremos hacer las simulaciones. Si la coordenada está en el interior del mapa, se guarda si no, se descarta. Este proceso se repite hasta conseguir el mismo número de puntos guardados y de estaciones o vehículos.

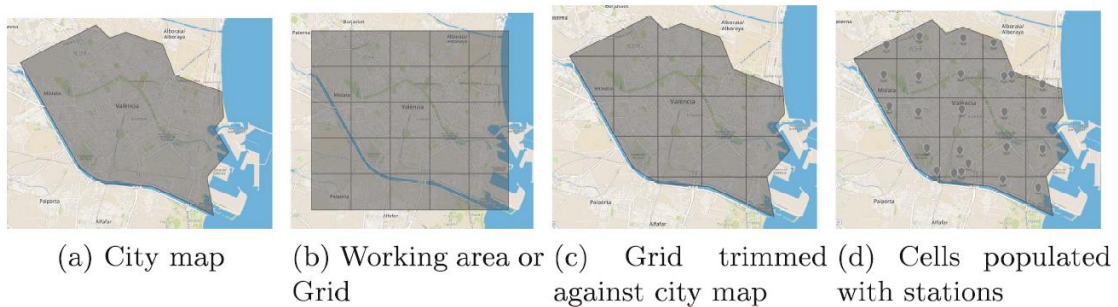


Fig. 6 Proceso de distribución uniforme. [5]

Si utilizamos la distribución uniforme (Figura 6), se divide el mapa en celdas iguales, generalmente rectangulares. El número de estaciones o vehículos que queremos generar determina el número de filas y columnas de celdas y el ancho y alto de los mismos. Una vez tenemos las celdas, se recortan para descartar las celdas que se quedan por fuera del mapa o están en la parte exterior de los bordes, formando así celdas con formas irregulares. Se genera un punto en el centro de cada celda hasta que se hayan situado todas las estaciones. Si después de este proceso aún quedan estaciones o vehículos por colocar, se colocan aleatoriamente en un punto y celda válidas.

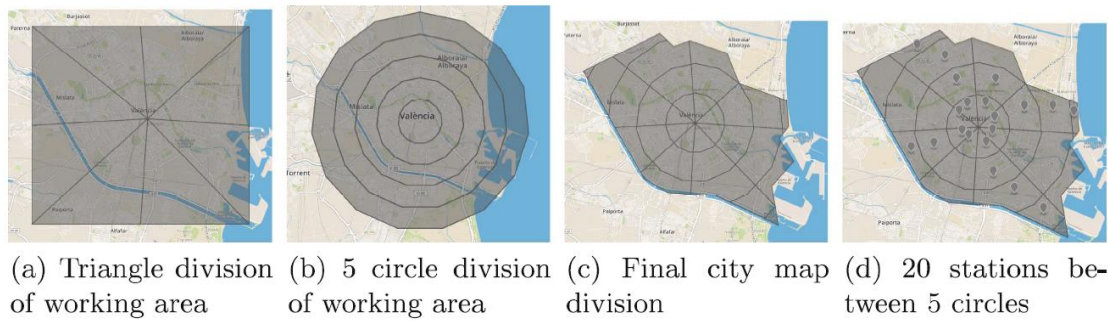


Fig. 7 Proceso de distribución radial. [5]

Si utilizamos una distribución radial (Figura 7), las estaciones se colocarán en mayor cantidad en el centro e irá decreciendo a medida que nos vayamos alejando. Se hacen dos copias del mapa, en uno de ellos se hacen divisiones triangulares y en la otra se dividen usando una cantidad de círculos concéntricos que pasamos como parámetro. Luego se intersecan y obtenemos las celdas donde colocaremos las estaciones. E igual que en el caso anterior, si quedan estaciones o vehículos por colocar, se colocan aleatoriamente en un punto y celda válidas.

Para generar los agentes que simulan el comportamiento de los clientes, pasamos como parámetro el número de clientes que deseamos. El generador le asigna una posición origen y destino. Para este trabajo, la posición origen será donde aparecerá inicialmente el agente y la posición destino será el lugar al que se desplazará con el vehículo. Utilizaremos la posición de inicio como la vivienda del agente y la posición destino como su lugar de trabajo, de esta manera, el recorrido que harán todos los agentes será de la vivienda al trabajo y del trabajo a su vivienda.

Para obtener movimientos más realistas, necesitamos obtener datos relevantes a partir de los cuales determinaremos sus rutas. Los datos que utilizamos para este generador son los siguientes:

- Datos de población: Indica la cantidad de personas que viven en diferentes zonas de la ciudad. La información se representa mediante un conjunto de polígonos junto a sus respectivas poblaciones. Cada polígono representa cada una de las zonas de la ciudad.
- Datos de tráfico: Indica la cantidad de vehículos que se mueven alrededor de un área. La información se representa mediante un conjunto de cadenas poligonales junto a sus respectivos volúmenes de tráfico. Las cadenas poligonales representan una calle o carretera.

- Actividad de Twitter: Proporciona información de la cantidad de *tweets* geolocalizados de la red social *Twitter*. Esta información nos permite conocer la localización donde pasan más tiempo un porcentaje representativo de la población. Esta actividad se representa mediante un conjunto de tuplas de latitud-longitud y el número de *tweets* en esas coordenadas.

A partir de esta información, obtendremos los puntos de origen y destino de los agentes. Primero se divide la ciudad en pequeños polígonos, y en cada polígono se juntan los datos anteriores para determinar la probabilidad de que dicho polígono (un punto aleatorio del mismo) se elija como origen, y el destino estará (en este trabajo) a una distancia de 2km, como mínimo.

4.3.2. MATSim: Multi-Agent Transport Simulation

Después de generar los datos con el generador de carga y convertirlos en archivos XML, hemos necesitado unos archivos adicionales para el correcto funcionamiento de las simulaciones.

A continuación, explicaremos cada uno de los archivos necesarios para realizar una simulación en MATSim [6].

Para realizar una simulación sencilla se necesitan, como mínimo, 3 archivos XML que explicamos a continuación:

- Un archivo denominado *config* con la configuración general de las simulaciones. En este archivo podemos modificar y añadir parámetros y módulos que afectarán a la simulación. También se utilizará para indicar qué archivos debe tomar para definir las estaciones (o vehículos en caso de free-floating carsharing), los planes de los clientes y el mapa con las carreteras donde se va a realizar la simulación.
- Un archivo denominado *plan* o *person* con una lista de personas (agentes) con un identificador único para cada uno. Cada persona tiene uno o varios planes y cada plan tiene una lista de actividades. Si un agente tiene varios planes, uno de ellos estará marcado como el plan principal mediante el atributo *selected* y después de una iteración es posible que se ejecute otro plan para determinar cuál devuelve mejores resultados. Estas actividades o planes describen las acciones en un día de cada agente. Las actividades tienen asignadas un tipo (casa, trabajo...) y unas coordenadas indicando dónde se realizarán. Todas las actividades tendrán un

tiempo de inicio y una duración, pero solamente tendrá un tiempo de fin la primera y última actividad. Entre cada actividad estará indicado el modo de desplazamiento mediante el parámetro *leg*, es decir, cómo viaja una persona de un lugar a otro (andando, en coche, transporte público...). Este parámetro puede tener opcionalmente un atributo *trav_time* indicando el tiempo estimado para desplazarse de una actividad a otra. Cuando se acaba una actividad, el *leg* empieza a ejecutarse, indicando que el agente se está desplazando a la siguiente actividad.

- Un archivo denominado *network* con la infraestructura por la que se van a mover los agentes. Consiste en nodos y enlaces (*links*). Cada elemento tiene un identificador y unas coordenadas. Las coordenadas de los nodos indican la posición de cada nodo en la red, mientras que los enlaces utilizan los atributos *from* y *to* para indicar qué nodos conectan. Además, los enlaces también tienen una longitud, una velocidad máxima, una capacidad (en vehículos por hora), un número de carriles y el modo de transporte que pueden viajar por ellos.

Para realizar simulaciones aplicando carsharing, se necesitan adicionalmente 3 archivos XML que son los siguientes:

- Un archivo denominado *stations* con la posición de las estaciones (si es carsharing con estaciones) o de los coches (si es free-floating), además de la compañía que facilita estos vehículos. Cada estación tendrá un identificador único, unas coordenadas geográficas y unos vehículos que tendrán también un identificador. En el caso de ser free-floating, los vehículos tendrán unas coordenadas, un tipo (generalmente será coche) y al igual que los vehículos de las estaciones, tendrán un identificador único.
- Un archivo denominado *freefloating_areas* con las coordenadas que delimitan el área en el que está disponible el servicio de free-floating.
- Un archivo denominado *membership* indicando qué personas pueden usar el servicio de carsharing con estaciones o free-floating.

Una vez tenemos todos los archivos necesarios, ya podemos ejecutar la simulación. Ahora veremos brevemente cómo funciona MATSim y qué pasos sigue a la hora de realizar una simulación. Una ejecución de MATSim contiene un número de iteraciones representadas por el siguiente ciclo, conocido como el ciclo de MATSim (Figura 8).

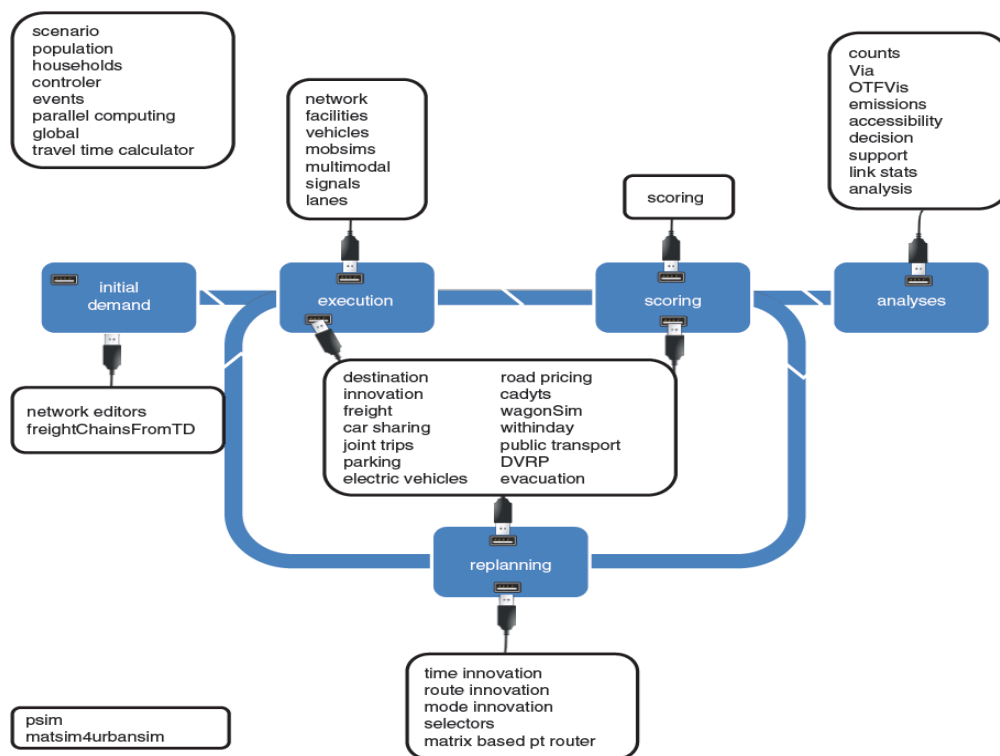


Fig. 8 Ciclo de MATSim [6]

El primer paso de este ciclo se denomina *Initial demand*. En este paso, MATSim recibe los planes de cada persona. Estos planes se pasan al *Mobsim* (*mobility simulation*). En este segundo paso, se ejecutan los planes que recibe, obteniendo unos resultados numéricos para cada agente. Con estos valores, pasamos al tercer paso donde cada plan se puntúa (*Scoring*) y en caso de tener múltiples planes, esta puntuación es la que se utiliza en el cuarto paso para decidir cuál es el mejor de todos los que tiene (*Replanning*) y si fuera necesario, eliminar el plan con peor puntuación. Después de puntuar todos los planes, se termina el ciclo y en el último paso obtenemos los outputs necesarios para visualizar la simulación.

4.3.3. VIA

Una vez obtenemos los archivos de salida que nos proporciona MATSim, podemos visualizar la simulación utilizando VIA [7].

VIA es una aplicación que pertenece a Simunto (empresa con sede en Suiza) [24] que permite cargar y visualizar datos de MATSim. A diferencia de MATSim, no es un software de código abierto, por lo que ha sido necesario solicitar una licencia para utilizarlo.

Para realizar una sencilla visualización de los agentes, de los vehículos y de la trayectoria de los vehículos, se le pasa como ficheros de entrada la red donde se han realizado las simulaciones y el archivo comprimido con los eventos que se ha obtenido de la simulación que queremos visualizar.

A continuación, se muestra una captura de la interfaz de esta aplicación (Figura 9).



Fig. 9 Interfaz de VIA

En la parte izquierda tenemos 3 pestañas diferentes, una para importar los archivos de entrada, otra para gestionar las capas (lo que se ve en esta figura) y otra para gestionar grupos de agentes concretamente. En la pestaña actual podemos utilizar el símbolo con un interrogante para obtener información sobre los agentes, los vehículos o partes de la red. Esta información aparecerá en la columna de la derecha.

En la parte central vemos la simulación con los agentes y vehículos sobre la red que hemos pasado como ficheros de entrada. En la parte superior izquierda observamos un reloj que indica el tiempo, esto se puede manejar con la barra deslizadora que vemos en la parte inferior con la etiqueta *time*. La velocidad a la que se mueven los agentes y vehículos se modifica con la barra deslizadora con etiqueta *speed*.

En la columna de la derecha, como hemos comentado previamente, podemos ver información de lo que hayamos seleccionado. En este caso, hemos seleccionado un agente, por lo que se nos muestra en detalle las actividades que va a realizar el agente seleccionado, además de la duración y tipo de transporte entre cada actividad.

También se puede obtener información adicional para ver la cantidad de agentes que se han quedado sin vehículo y por tanto han abortado la ejecución y no aparecen en la simulación.

5. Desarrollo de la solución propuesta

En este apartado explicaremos las diferentes pruebas que hemos realizado y sus resultados, una breve discusión para explicar cuál sería la mejor configuración para la ciudad de Valencia y un ejemplo de visualización en la aplicación de VIA.

5.1. Pruebas

Se han realizado diversas pruebas que separaremos en 3 grandes grupos.

Para todas las pruebas, hemos utilizado un valor constante de distancia de búsqueda. Este valor indica la distancia máxima que recorrerá un cliente en busca de una estación o vehículo. Hemos decidido poner como distancia de búsqueda 1.5km ya que hemos observado que más distancia sería ineficiente ya que haría al cliente recorrer una distancia innecesaria, y menos distancia sería ineficaz ya que la probabilidad de que encontrara una estación en ese radio podría ser muy baja en algunos casos.

Las pruebas del primer grupo se han realizado variando el número de clientes, de estaciones y de vehículos por estación. Las pruebas del segundo grupo mantienen un número constante de clientes mientras modificamos el número de estaciones, de vehículos por estación para conseguir un número constante de vehículos totales y la forma de distribuirlos. Y las pruebas del tercer grupo se han realizado sin estaciones, es decir, mediante free-floating carsharing. Analizaremos los resultados de dichas pruebas teniendo en cuenta la distancia media recorrida, tanto en vehículo como andando y el número de clientes que se han quedado sin vehículo.

5.1.1. Variando número de clientes, estaciones y vehículos por estación

Estas pruebas han sido las primeras pruebas realizadas y son las que hemos utilizado para definir las pruebas finales. Como veremos a continuación, estas pruebas han sido las más extensas porque hemos probado muchas combinaciones para poder determinar qué valores de cada parámetro tenía sentido o no utilizar en la ciudad de Valencia.

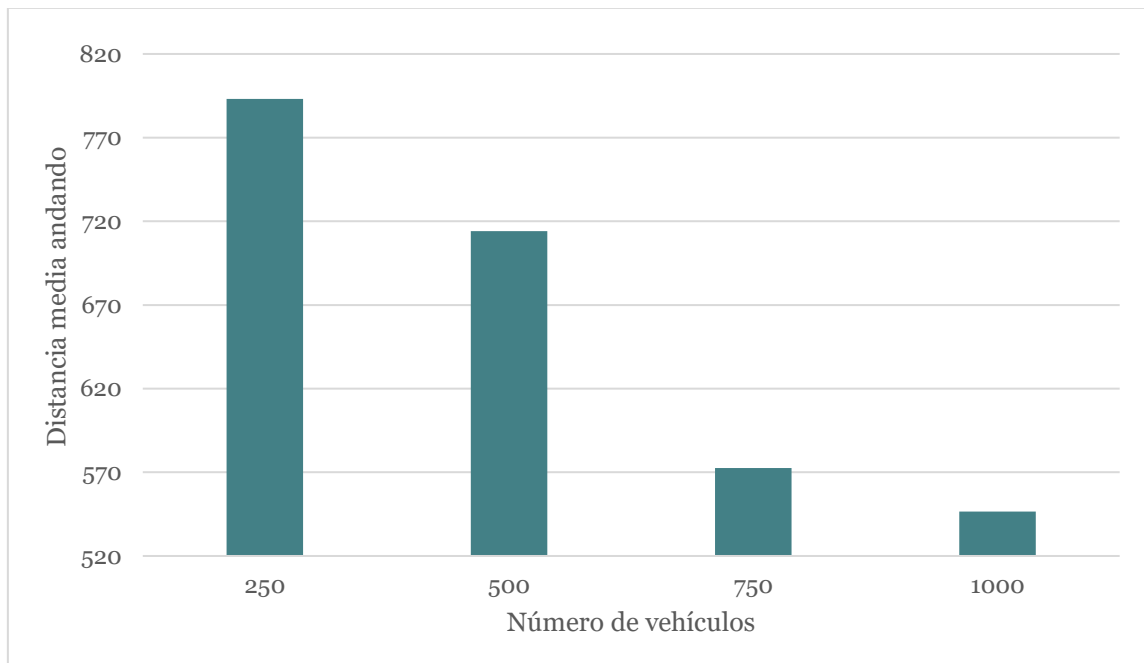
Estas pruebas las separaremos según el número de clientes utilizados, obteniendo así pruebas con 1000, 5000, 10000 y 20000 clientes.

Empezamos realizando pruebas de menor magnitud, utilizando 1000 clientes para familiarizarnos con MATSim y poder analizar adecuadamente los outputs obtenidos.

Clientes	Estaciones	Vehículos totales	Vehículos por estación	Distancia media \pm desviación típica recorrida en vehículo	Distancia media \pm desviación típica recorrida andando
1000	50	250	5	6048,4 \pm 2248,2	793,2 \pm 367,3
1000	100	500	5	5899,9 \pm 2179,9	714,2 \pm 431,6
1000	250	750	3	5721,6 \pm 2018,1	572,6 \pm 436,0
1000	250	1000	4	5670,2 \pm 2005,7	546,5 \pm 432,2

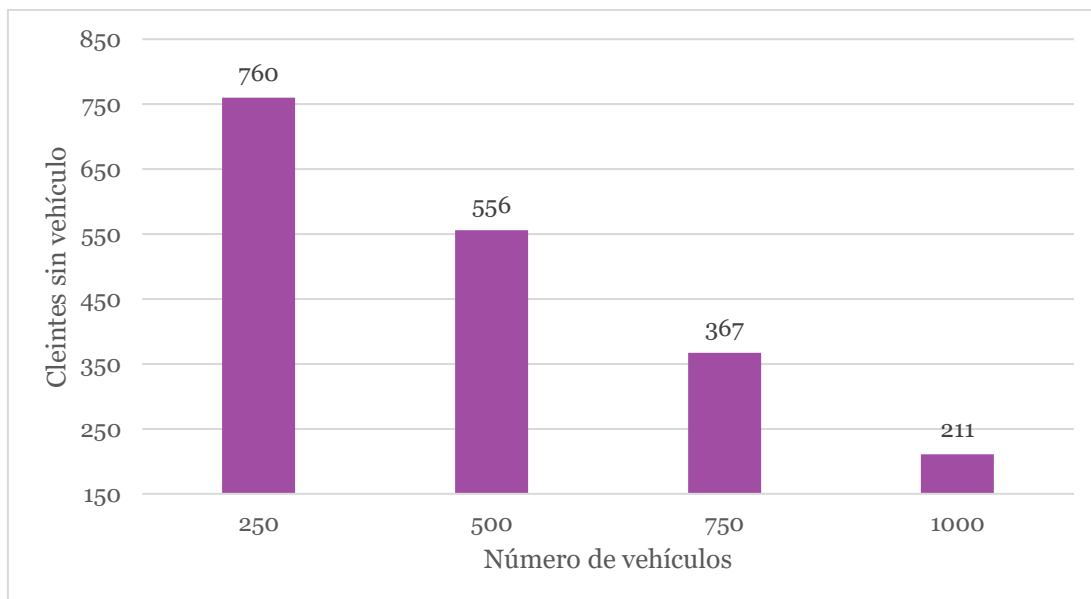
Tabla 1 Resultados para 1000 clientes con diferentes cantidades de estaciones y vehículos.

Como podemos observar en la tabla 1, la distancia recorrida en vehículo disminuye poco a poco cuantos más vehículos desplegamos.



Gráfica 1 Comparación de la distancia media andando según el número de vehículos totales.

Si miramos también la gráfica 1, observamos que la distancia que recorren andando disminuye significativamente cuantos más vehículos tenemos.



Gráfica 2 Comparación de la cantidad de personas sin vehículo según el número total de vehículos utilizados.

Mirando la gráfica 2, vemos que la cantidad de clientes sin vehículo es inversamente proporcional al número de vehículos.

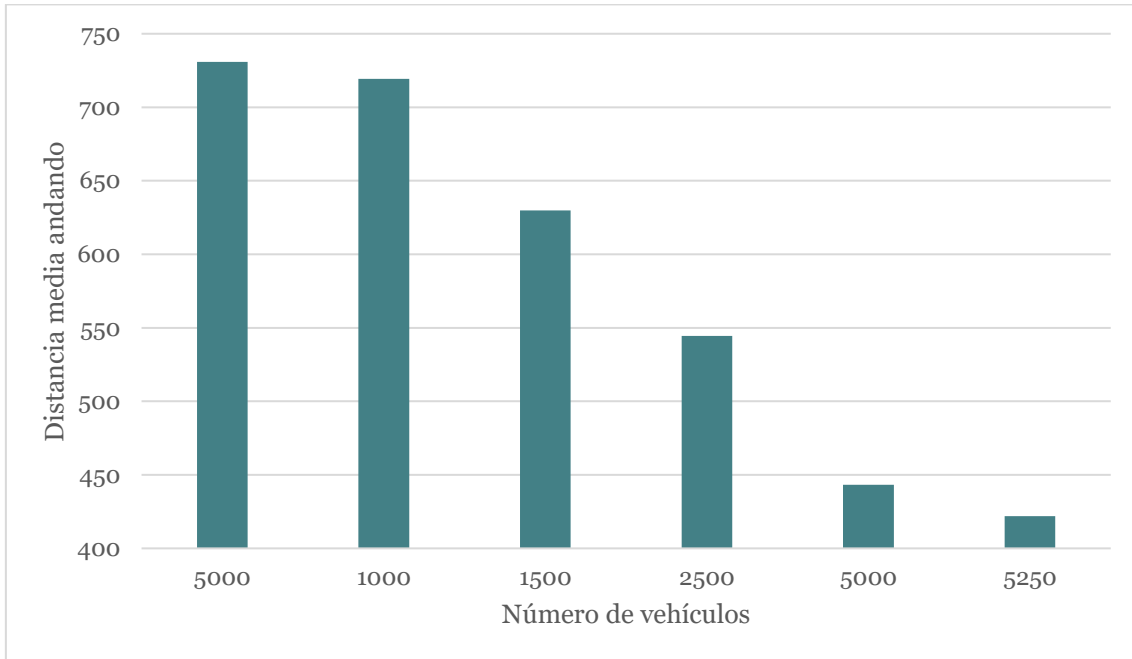
Ahora pasaremos a las pruebas utilizando 5000 clientes y más combinaciones de estaciones y vehículos.

Cientes	Estaciones	Vehículos totales	Vehículos por estación	Distancia media \pm desviación típica recorrida en vehículo	Distancia media \pm desviación típica recorrida andando
5000	50	5000	100	5663,0 \pm 1993,8	730,9 \pm 361,0
5000	100	1000	10	5982,6 \pm 2090,7	719,3 \pm 445,4
5000	250	1500	6	5835,1 \pm 2034,4	629,9 \pm 458,7
5000	500	2500	5	5729,6 \pm 2025,7	544,4 \pm 479,9
5000	500	5000	10	5554,3 \pm 1938,9	443,3 \pm 427,9
5000	750	5250	7	5506,5 \pm 1912,1	421,8 \pm 418,2

Tabla 2 Resultados para 5000 clientes con diferentes cantidades de estaciones y vehículos.

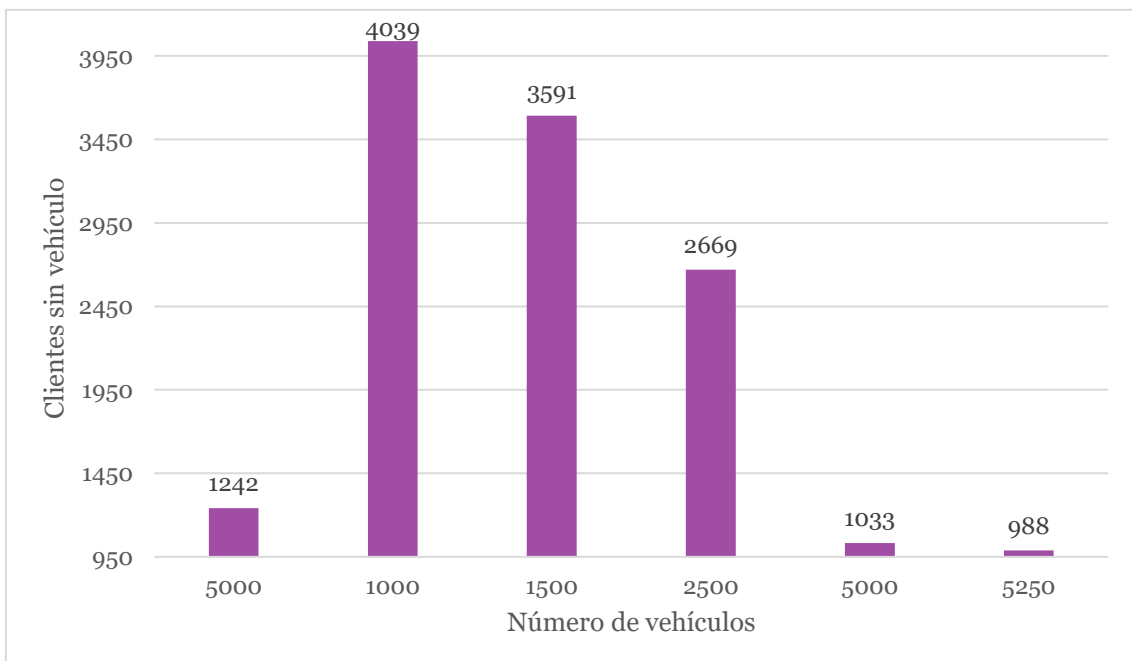
Mirando en la tabla 2, observamos que esta vez la distancia recorrida en vehículo no varía mucho respecto a la cantidad de estaciones y vehículos.

En las gráficas 3 y 4, la primera columna corresponde a 50 estaciones con 5000 vehículos, el resto corresponden al número de vehículos indicados debajo de cada columna y orden creciente de estaciones.



Gráfica 3 Comparación de la distancia media andando según el número de vehículos totales.

La distancia media andando sigue el mismo comportamiento que en el caso anterior, como podemos apreciar en la gráfica 3.



Gráfica 4 Comparación de la cantidad de personas sin vehículo según el número total de vehículos utilizados.

Y mirando la gráfica 4 podemos observar que la cantidad de clientes sin vehículos también tiene el mismo comportamiento, como esta ordenado por la cantidad de estaciones y no por la cantidad de vehículos totales, a primera vista parece que es completamente distinto al caso anterior. Volviendo a la tabla 2, vemos que con 100, 250 y 500 estaciones tenemos menos vehículos totales. De esta manera, si miramos según el número total de vehículos, en orden ascendente, podremos observar que sigue el mismo patrón.

Ahora pasamos a las últimas pruebas de este subapartado. Veremos los casos de 10000 y 20000 juntos debido a que solo hicimos un par de pruebas en cada caso para ver la carga que podía soportar MATSim.

Clientes	Estaciones	Vehículos totales	Vehículos por estación	Distancia media \pm desviación típica recorrida en vehículo	Distancia media \pm desviación típica recorrida andando
10000	250	2000	8	5838,7 \pm 2093,9	640,6 \pm 474,2
10000	500	4000	8	5786,3 \pm 2102,6	546,5 \pm 480,4
20000	250	4000	16	5871,9 \pm 2133,1	644,3 \pm 468,6
20000	500	8000	16	5820,4 \pm 2123,1	546,7 \pm 479,7

Tabla 3 Resultados para 10000 y 20000 clientes con diferentes cantidades de estaciones y vehículos.

Mirando la tabla 3, al igual que en la prueba anterior, la diferencia en la distancia recorrida en vehículo es pequeña.

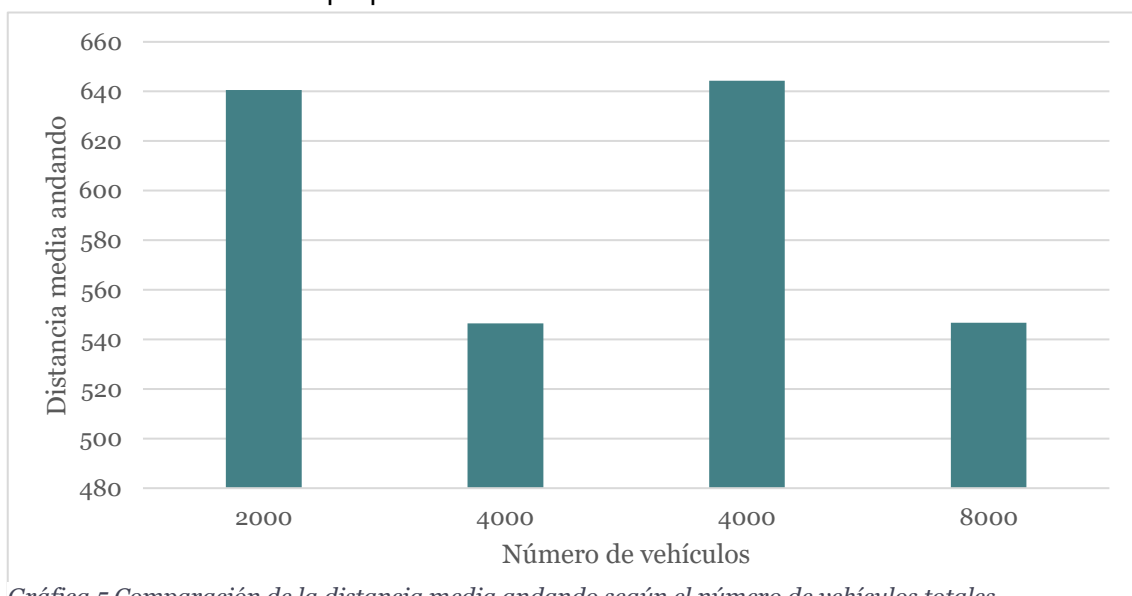
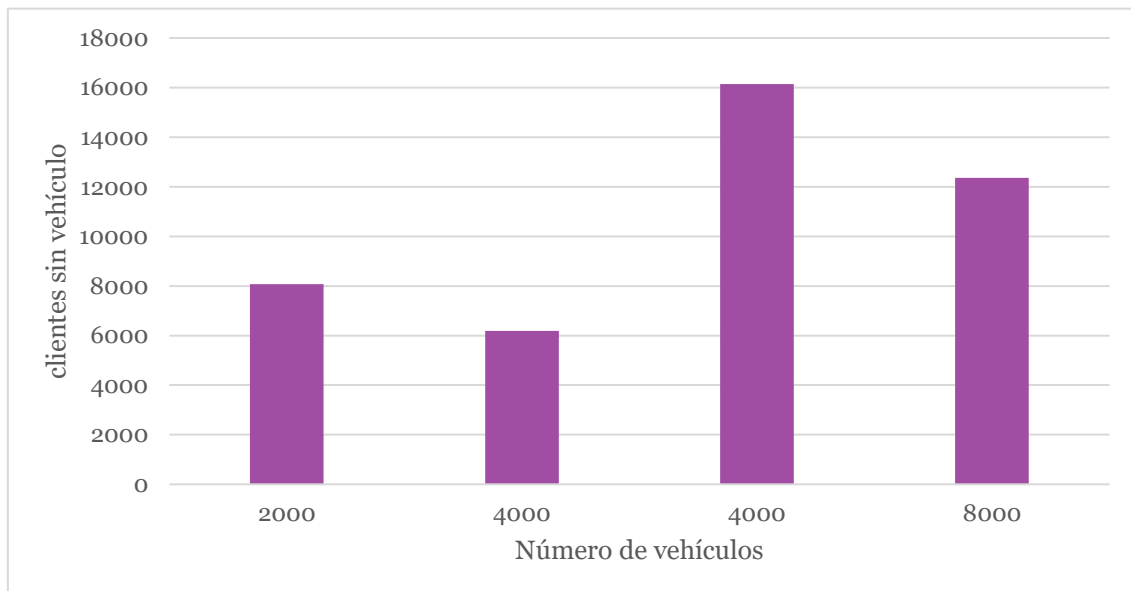


Gráfico 5 Comparación de la distancia media andando según el número de vehículos totales.

En la gráfica 5 y 6, las dos primeras columnas corresponden a los datos con 10000 clientes y las dos últimas corresponden a los datos con 20000 clientes. Esto explica la similitud entre las columnas 1 y 3, y las columnas 2 y 4.

Dicho esto, podemos observar en la gráfica 5, que una vez más, cuantos más vehículos haya, menos distancia recorren los clientes para acceder a una estación.



Gráfica 6 Comparación de la cantidad de personas sin vehículo según el número total de vehículos utilizados.

Del mismo modo que en las pruebas anteriores, los clientes sin vehículo también disminuyen cuantos más vehículos haya.

5.1.2. Variando número de estaciones y tipo de distribución con número de clientes constante

Una vez finalizadas las pruebas del subapartado anterior y viendo los resultados obtenidos, hemos decidido realizar las pruebas finales con la siguiente configuración de parámetros.

Para estas pruebas, los vehículos por estación se han ido ajustando, según el número de estaciones para que siempre hubiera 10000 vehículos. Al número de clientes le hemos asignado un valor constante de 10000.

En estas pruebas hemos realizado 3 conjuntos de simulaciones diferentes según el tipo de distribución.

Las gráficas que utilizaremos en este apartado mostrarán los datos en función del número de estaciones porque utilizamos el mismo número de vehículos totales para todas las pruebas.

En la primera prueba, hemos utilizado una distribución aleatoria de las estaciones, ya que es la manera más sencilla de distribuir las estaciones.

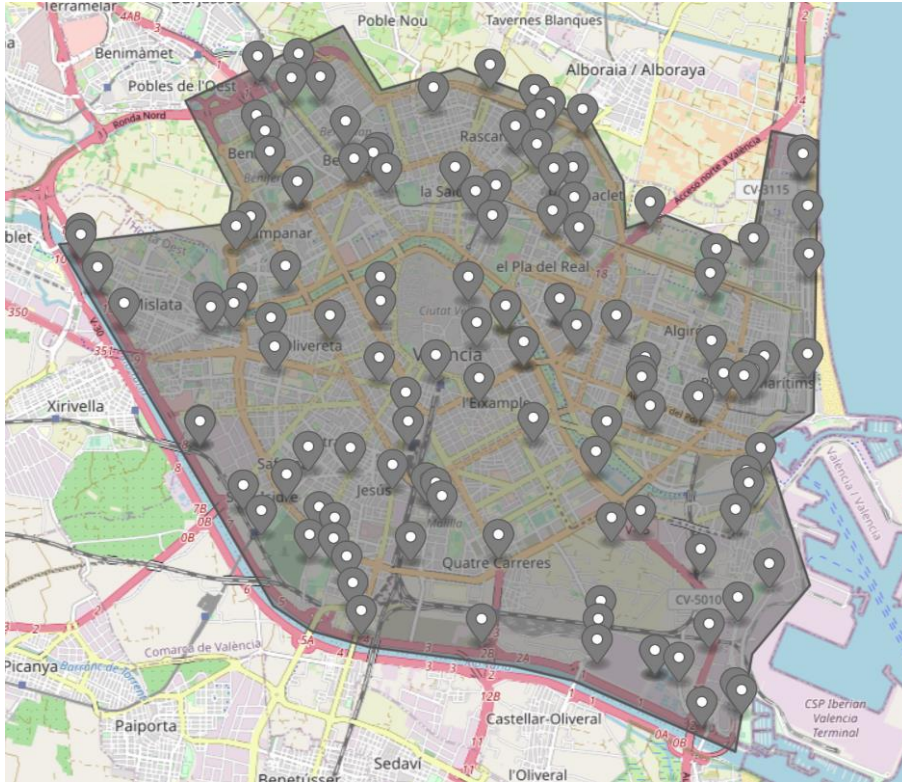
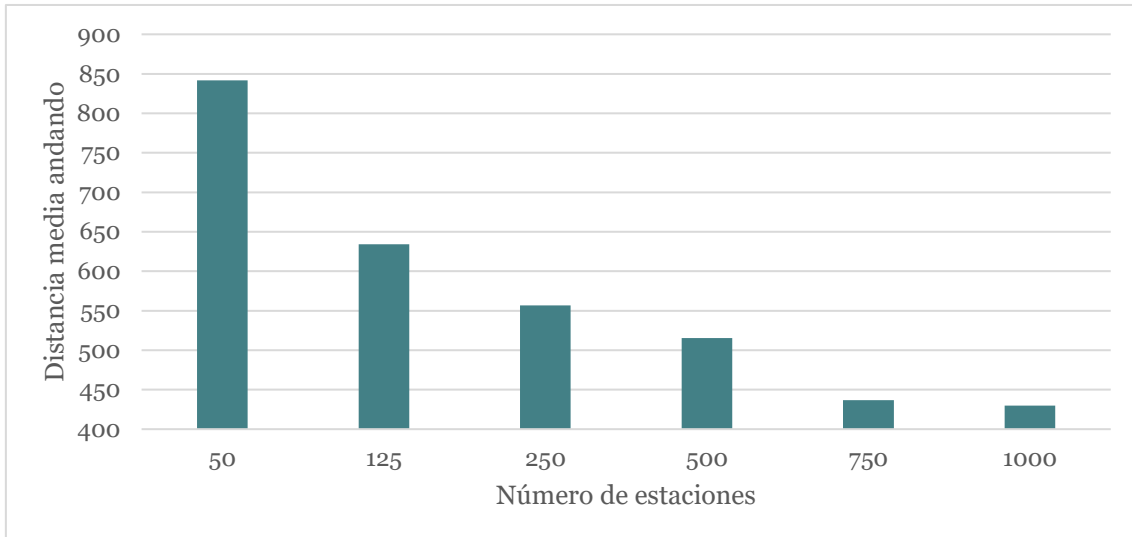


Fig. 10 Distribución aleatoria de 125 estaciones para la ciudad de Valencia.

Clientes	Estaciones	Vehículos totales	Vehículos por estación	Distancia media \pm desviación típica recorrida en vehículo	Distancia media \pm desviación típica recorrida andando
10000	50	10000	200	5367,4 \pm 1963,0	841,6 \pm 422,6
10000	125	10000	80	5536,0 \pm 1947,6	634,3 \pm 413,3
10000	250	10000	40	5525,3 \pm 1968,1	556,6 \pm 437,7
10000	500	10000	20	5467,6 \pm 1965,7	515,2 \pm 440,7
10000	750	10500	14	5468,0 \pm 1947,0	436,5 \pm 424,2
10000	1000	10000	10	5481,8 \pm 1923,8	429,8 \pm 430,8

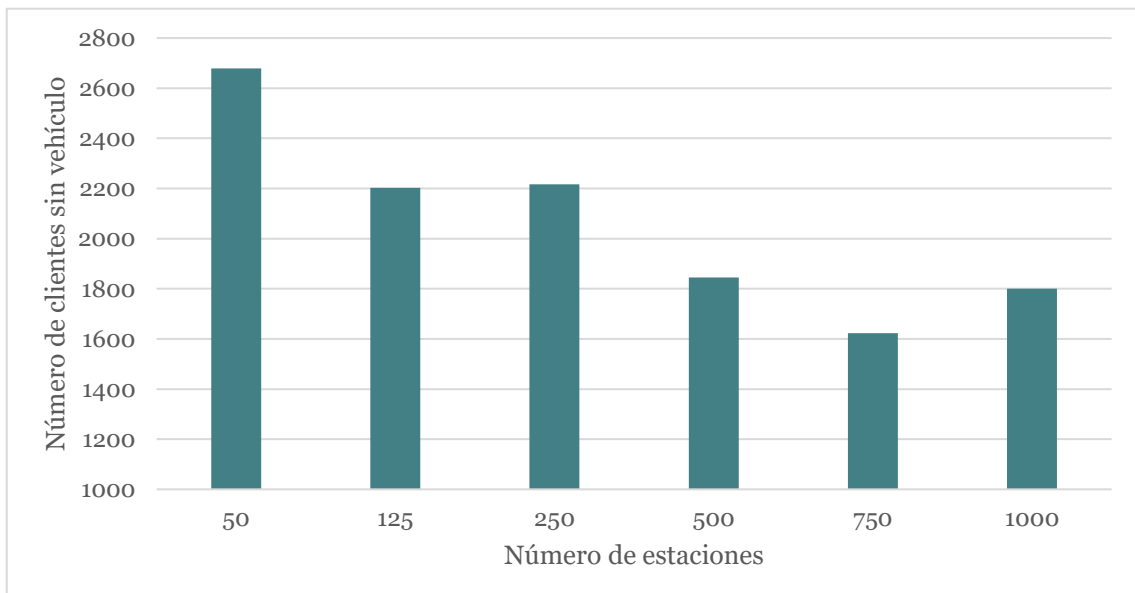
Tabla 4. Resultados para una distribución aleatoria con diferentes números de estaciones.

Si miramos la tabla 4, podemos observar que la distancia media recorrida por el vehículo usando 50 estaciones es ligeramente superior a usar más estaciones y usando 1000 estaciones aumenta un poco comparado con usar 750 estaciones. Sin embargo, estas diferencias no son totalmente significativas.



Gráfica 7. Comparación de la distancia media andando según el número de estaciones usando una distribución aleatoria.

Fijándonos además en la gráfica 7, vemos que la distancia media andando, usando 50 o 125 estaciones, tienen una diferencia bastante grande y, poco a poco si vamos aumentando el número de estaciones, la distancia media se decrementa ligeramente.



Gráfica 8. Comparación de la cantidad de personas sin vehículo según el número de estaciones usando una distribución aleatoria.

En cuanto a los clientes que se quedan sin vehículo, podemos observar en la gráfica 8 que, a más estaciones, menos son los clientes que se quedan sin vehículo, excepto en el caso de 125 donde no ha podido observarse el decremento anteriormente mencionado, e incluso ha habido un ligero incremento; y en el caso de 1000 estaciones, donde incrementa significativamente con respecto al valor anterior.

Seguramente, para el caso de 125 y 1000 estaciones que son los casos donde incrementa el número de clientes sin vehículo, como cada estación sólo tiene 10 vehículos, hay zonas en las que se acumulan más de 10 clientes por estación, lo que ocasiona que algunos clientes se queden sin vehículo al fragmentar en tantas estaciones la flota disponible.

Observando la tendencia del decremento de clientes que se quedan sin vehículo, se ha llegado a la conclusión de que el número de estaciones óptimo para aplicar carsharing con estaciones utilizando una distribución aleatoria en la ciudad de Valencia, sería de 750 estaciones.

En la segunda prueba que hemos realizado, hemos utilizado una distribución uniforme.

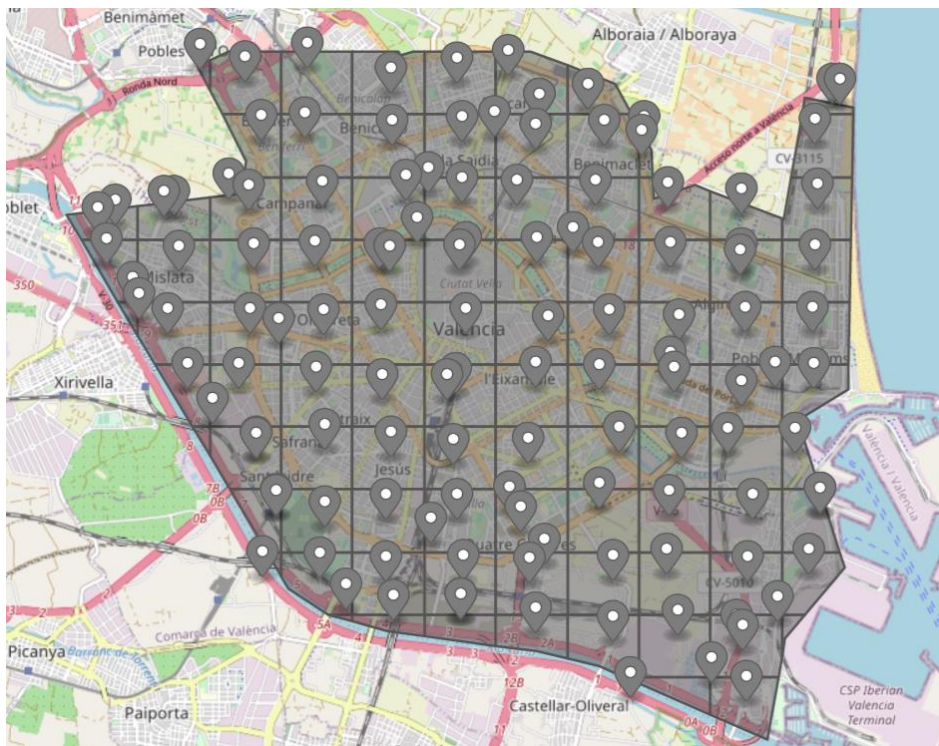
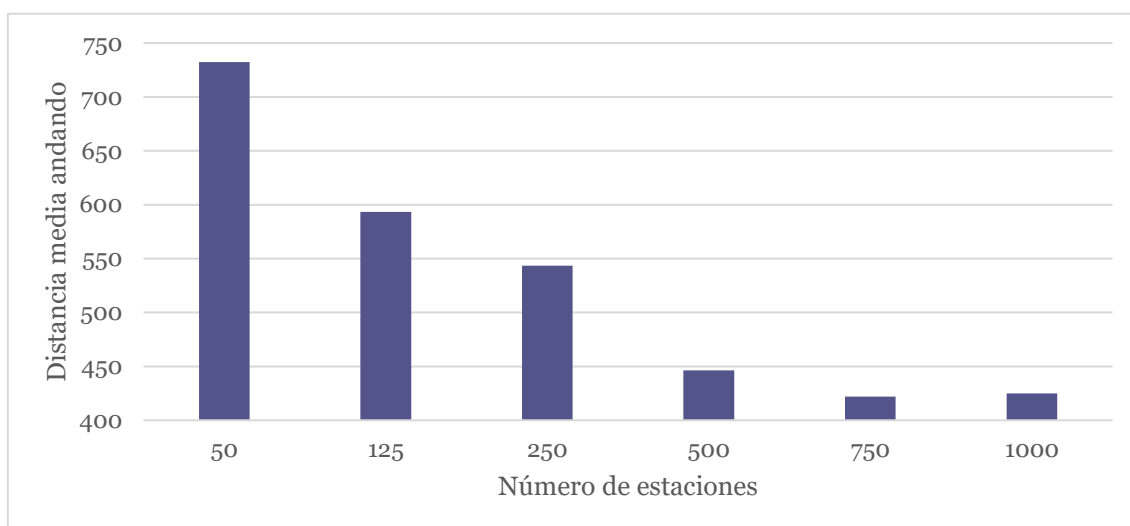


Fig. 11 Distribución uniforme de 125 estaciones por la ciudad de Valencia.

Clientes	Estaciones	Vehículos totales	Vehículos por estación	Distancia media \pm desviación típica recorrida en vehículo	Distancia media \pm desviación típica recorrida andando
10000	50	10000	200	5668,4 \pm 2031,9	732,2 \pm 364,5
10000	125	10000	80	5549,0 \pm 1951,3	593,4 \pm 372,2
10000	250	10000	40	5568,2 \pm 1988,7	543,5 \pm 425,4
10000	500	10000	20	5555,8 \pm 1984,3	446,4 \pm 424,6
10000	750	10500	14	5524,7 \pm 1956,4	421,9 \pm 421,2
10000	1000	10000	10	5514,6 \pm 1955,8	425,0 \pm 429,9

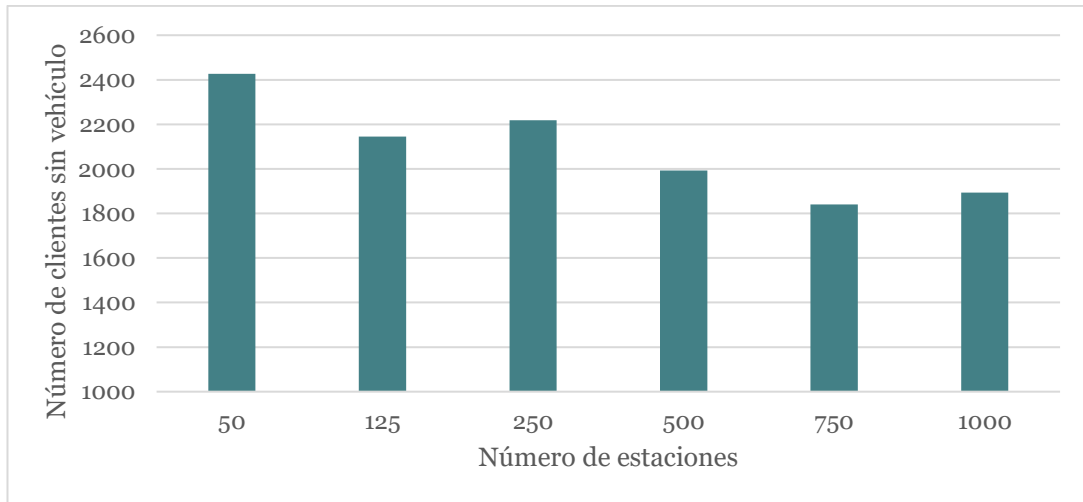
Tabla 5. Resultados para una distribución uniforme con diferentes números de estaciones.



Gráfica 9 Comparación de la distancia media andando según el número de estaciones usando una distribución uniforme.

En este caso podemos observar que la distancia media recorrida por el vehículo usando 50 estaciones es ligeramente superior respecto de la distancia media usando 125 estaciones. Pero la diferencia entre la distancia media usando 125, 250, 500, 750 o 1000 estaciones es casi despreciable.

En cuanto a la distancia media andando, la diferencia entre usar 50 estaciones y 125 estaciones es bastante significativa. Usando 250 estaciones no cambia mucho con respecto a 125, pero de 250 a 500 y 750 estaciones disminuye significativamente.



Gráfica 10. Comparación de la cantidad de personas sin vehículo según el número de estaciones usando una distribución uniforme.

Respecto a la cantidad de clientes que se quedan sin vehículo, podemos ver cómo va disminuyendo a medida que aumenta el número de estaciones, excepto con 125 y 1000 estaciones, al igual que en la primera prueba. Por lo que también podemos afirmar que en este caso utilizar 750 estaciones sería lo óptimo para la ciudad de Valencia.

En la tercera y última prueba de este subapartado, hemos utilizado una distribución radial.

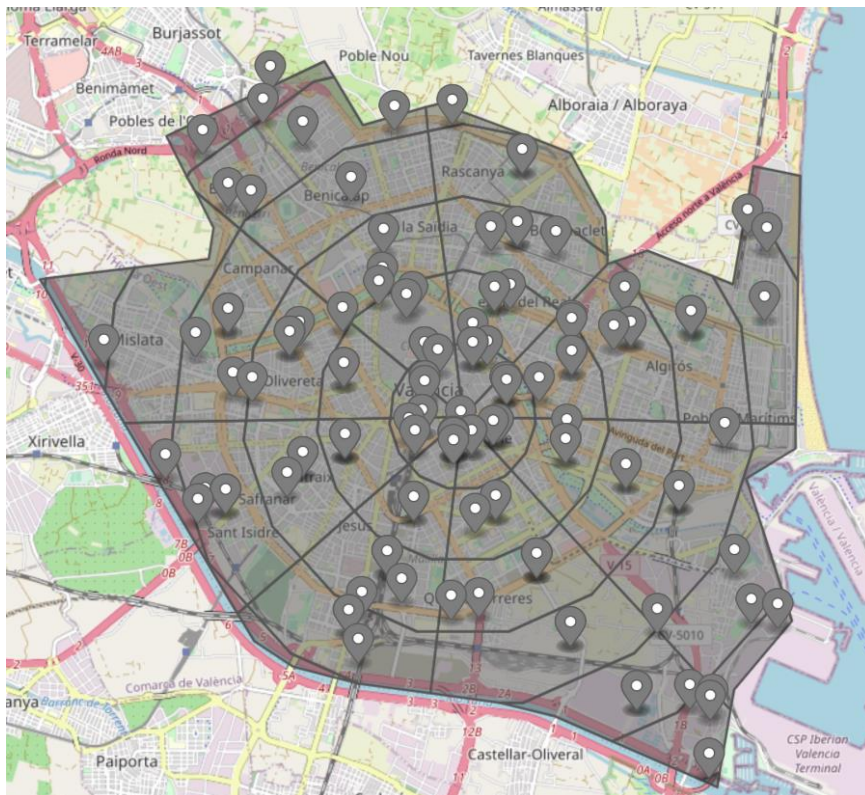
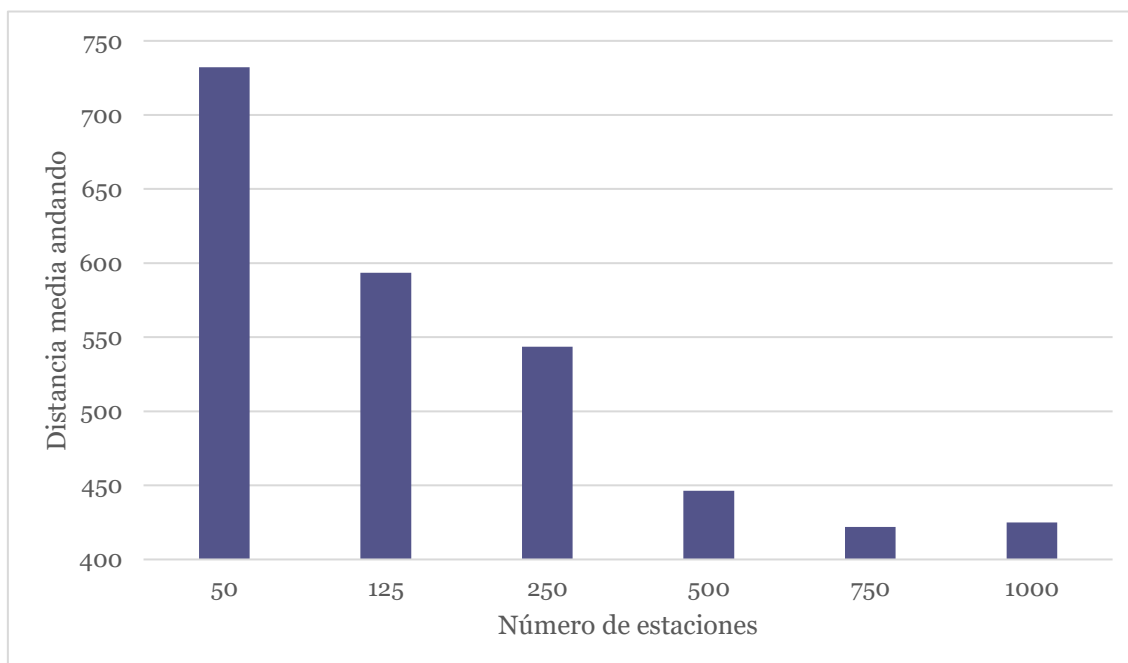


Fig. 12 Distribución radial de 125 estaciones por la ciudad de Valencia.

Clientes	Estaciones	Vehículos totales	Vehículos por estación	Distancia media \pm desviación típica recorrida en vehículo	Distancia media \pm desviación típica recorrida andando
10000	50	10000	200	5110,9 \pm 1838,4	802,9 \pm 432,1
10000	125	10000	80	5219,6 \pm 1883,5	663,0 \pm 416,6
10000	250	10000	40	5174,8 \pm 1915,0	633,9 \pm 458,0
10000	500	10000	20	5314,5 \pm 1968,6	576,1 \pm 477,5
10000	750	10500	14	5317,5 \pm 1988,4	527,2 \pm 466,0
10000	1000	10000	10	5323,0 \pm 1972,4	528,7 \pm 473,1

Tabla 6. Resultados para una distribución radial con diferentes números de estaciones.

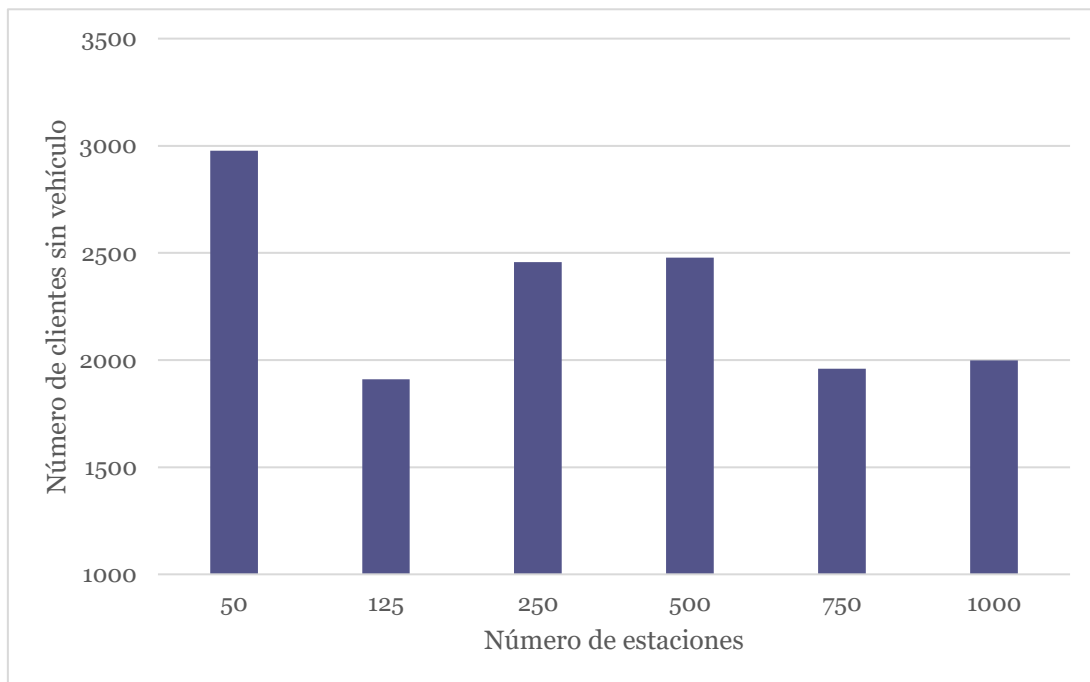


Gráfica 11. Comparación de la distancia media recorrida andando según el número de estaciones usando una distribución radial.

Aquí observamos que la distancia media del vehículo se incrementa ligeramente a medida que aumentamos el número de estaciones, justo lo contrario a lo que pasaba en las dos pruebas anteriores. Podemos suponer que esto ocurre así debido al tipo de distribución empleada, las posiciones iniciales y finales de los clientes no corresponden a una distribución radial, provocando que sus desplazamientos se hagan un poco más largos.

En el caso de la distancia media andando, ocurre lo mismo que en las pruebas anteriormente realizadas. Se puede observar una disminución significativa de la distancia cuando el número de estaciones pasa de 50 a 125 y de 250 a 500.

A pesar de que se puede observar una tendencia decreciente en la distancia media andada al aumentar el número de estaciones, la distancia a recorrer sigue siendo mayor en comparación con las dos pruebas previas.



Gráfica 12. Comparación de la cantidad de personas sin vehículo según el número de estaciones usando una distribución radial.

Respecto a los clientes, se observa que no pasa lo mismo que en las pruebas anteriores. El aumento de clientes sin vehículos no parece tener una relación lineal con el número de estaciones empleados. Como hemos comentado previamente, esto se puede deber a la distribución utilizada ya que, en la realidad, la ciudad de Valencia no presenta una distribución radial y por ello, un aumento de estaciones que se concentran principalmente en el centro no implica necesariamente mejoras respecto al número de clientes que se quedan sin vehículo.

Con este análisis de estos 3 conjuntos de pruebas podemos sospechar que la distribución radial será la menos recomendable para la ciudad de Valencia y que las distribuciones aleatorias y uniformes pueden ser equivalentes si se emplean muchas estaciones.

5.1.3. Free-floating

En este subapartado, hemos realizado una prueba con 10000 clientes y vehículos repartidos por la ciudad de Valencia utilizando una distribución uniforme (Figura 11).

Clientes	Vehículos	Distancia media \pm desviación típica recorrida en vehículo	Distancia media \pm desviación típica recorrida en andando	Número de clientes sin vehículo
10000	10000	5483,1 \pm 1917,2	101,3 \pm 279,6	1913

Tabla 7 Resultado de la simulación utilizando free-floating carsharing.

Esta prueba la analizaremos comparando con las pruebas realizadas en el subapartado anterior.

Primero, compararemos con la prueba utilizando la distribución aleatoria, después con la prueba utilizando la distribución uniforme y finalmente con la prueba utilizando la distribución radial.

Estaciones	Vehículos por estación	Distancia media \pm desviación típica recorrida en vehículo	Distancia media \pm desviación típica recorrida andando	Clientes sin vehículo
50	200	5367,4 \pm 1963,0	841,6 \pm 422,6	2679
125	80	5536,0 \pm 1947,6	634,3 \pm 413,3	2203
250	40	5525,3 \pm 1968,1	556,6 \pm 437,7	2217
500	20	5467,6 \pm 1965,7	515,2 \pm 440,7	1845
750	14	5468,0 \pm 1947,0	436,5 \pm 424,2	1623
1000	10	5481,8 \pm 1923,8	429,8 \pm 430,8	1801

Tabla 8 Resumen de los resultados obtenidos utilizando carsharing con estaciones para una distribución aleatoria.

Respecto a la prueba utilizando la distribución aleatoria (Figura 10), comparando los datos de las tablas 7 y 8, podemos observar que las distancias recorridas en vehículo son bastante similares y la distancia andando, es mejor utilizando free-floating carsharing. Pero con los clientes sin vehículos, la versión con estaciones es bastante mejor, con una diferencia de 300 clientes en el mejor caso, dejándolo con 1623 clientes sin vehículo.

Estaciones	Vehículos por estación	Distancia media \pm desviación típica recorrida en vehículo	Distancia media \pm desviación típica recorrida andando	Clientes sin vehículo
50	200	5668,4 \pm 2031,9	732,2 \pm 364,5	2427
125	80	5549,0 \pm 1951,3	593,4 \pm 372,2	2145
250	40	5568,2 \pm 1988,7	543,5 \pm 425,4	2218
500	20	5555,8 \pm 1984,3	446,4 \pm 424,6	1993
750	14	5524,7 \pm 1956,4	421,9 \pm 421,2	1840
1000	10	5514,6 \pm 1955,8	425,0 \pm 429,9	1893

Tabla 9 Resumen de los resultados obtenidos utilizando carsharing con estaciones para una distribución uniforme.

Comparando con la prueba con una distribución uniforme (Figura 11), si observamos los datos de las tablas 7 y 9, la diferencia con las distancias medias recorridas en vehículo tampoco es grande, pero es ligeramente menor. Con la distancia media andando pasa lo mismo que con la distribución aleatoria, la distancia utilizando free-floating carsharing es significativamente menor. Pero con los clientes que se quedan sin vehículo, en el caso de carsharing con estaciones es mejor ya que reduce este número a 1840 en el mejor caso.

Estaciones	Vehículos por estación	Distancia media \pm desviación típica recorrida en vehículo	Distancia media \pm desviación típica recorrida andando	Clientes sin vehículo
50	200	5110,9 \pm 1838,4	802,9 \pm 432,1	2977
125	80	5219,6 \pm 1883,5	663,0 \pm 416,6	1910
250	40	5174,8 \pm 1915,0	633,9 \pm 458,0	2457
500	20	5314,5 \pm 1968,6	576,1 \pm 477,5	2478
750	14	5317,5 \pm 1988,4	527,2 \pm 466,0	1959
1000	10	5323,0 \pm 1972,4	528,7 \pm 473,1	1998

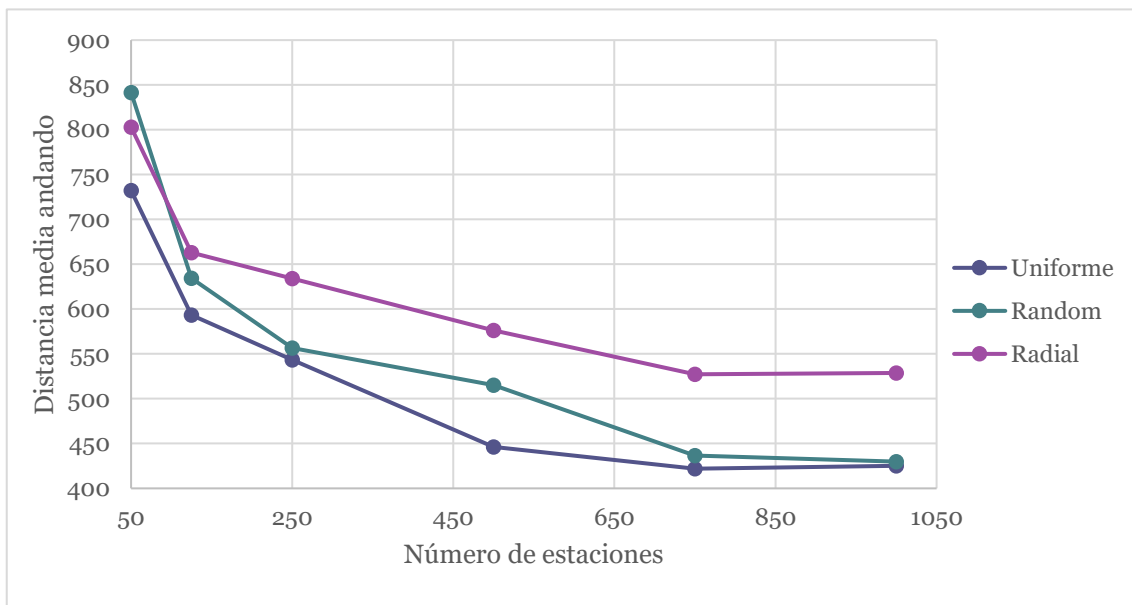
Tabla 10 Resumen de los resultados obtenidos utilizando carsharing con estaciones para una distribución radial.

Finalmente, comparando con la prueba con una distribución radial (Figura 12), mirando las tablas 7 y 10, vemos que la distancia recorrida en vehículo utilizando free-

floating carsharing es ligeramente superior en todos los casos. Pero respecto a la distancia andando, al igual que con la distribución aleatoria y uniforme, con free-floating carsharing es mucho menor. En cuanto a los clientes sin vehículo, vemos que la diferencia en el mejor caso, son muy similares, con 1910 clientes sin vehículo empleando free-floating carsharing y 1913 clientes sin vehículo utilizando carsharing con 125 estaciones y una distribución radial.

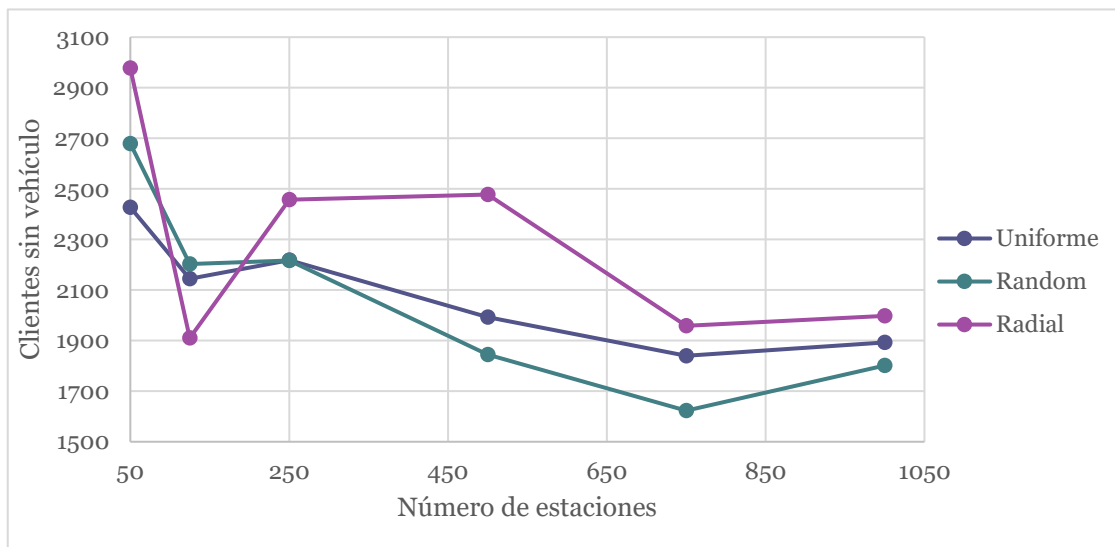
5.1.4. Discusión

Con estas pruebas anteriores podemos deducir que, a menos estaciones, la distancia necesaria para encontrar una estación puede aumentar.



Gráfica 13 Comparación de las distancias recorridas en vehículo, en función del número de estaciones y el tipo de distribución aplicada.

Esto justificaría el decremento de la distancia media andando a medida que aumenta el número de estaciones, como podemos apreciar para las tres distribuciones en la gráfica 13, donde tiene una clara tendencia decreciente. Sin embargo, no podemos concluir que esta sea la razón definitiva de este decremento porque los clientes que se quedan sin vehículo abortan su ejecución y su distancia andando sería 0. La existencia de 0s, en gran cantidad, a la hora de calcular la distancia media, tanto de la distancia media en vehículo como andando, pueden hacer que los resultados finales no tengan la exactitud que necesitamos para sacar conclusiones definitivas, pero sí ciertas especulaciones.



Gráfica 14 Comparación del número de clientes sin vehículo, en función del número de estaciones y el tipo de distribución aplicada.

Con relación a la cantidad de clientes que se quedan sin vehículo, podemos observar en la gráfica 14 lo que se comentaba en los apartados anteriores, a medida que aumenta el número de estaciones, el número de clientes sin vehículo tiende a disminuir. Esto se da en las distribuciones aleatoria y uniforme. En cambio, en la distribución radial, podemos observar que con 50, 125, 750 y 1000 estaciones se comportan de la misma manera que las otras dos distribuciones, pero en los valores intermedios aumenta, siendo un comportamiento inverso.

Como ya hemos comentado en el párrafo anterior, abortan si no encuentran vehículos. Esto se puede dar porque no haya ninguna estación cerca de ellos o porque las estaciones que tienen cerca ya han alquilado todos los vehículos que tenían disponibles.

También podemos deducir que una distribución radial de estaciones no sería la óptima para la ciudad de Valencia, posiblemente porque la mayoría de los clientes que disfrutarían de este servicio originalmente estarían localizados fuera del centro de la ciudad, donde se localizan en menor cantidad los vehículos según esta distribución. Y en relación con la distribución uniforme y aleatoria, si ponemos un número suficientemente grande de estaciones, la distribución aleatoria acaba pareciéndose mucho a una distribución uniforme ya que acabarían repartiéndose las estaciones por toda la ciudad.

Según estas pruebas, la distribución más adecuada para la ciudad de Valencia usando carsharing con estaciones sería una distribución uniforme o aleatoria con 750 estaciones. Incluso utilizar free-floating carsharing sería una buena alternativa ya que hemos visto que la diferencia no es demasiado grande y sería ligeramente mejor económicamente.

5.1.5. Visualización en VIA

Después de realizar las pruebas y obtener los eventos de cada simulación, podemos visualizar las simulaciones con VIA. Como ya hemos comentado antes, pasándole la red y los eventos comprimidos a la aplicación, podemos ver como se desplazan los clientes tanto a pie como en el vehículo.

A continuación, explicaremos cómo se visualiza y cómo se representan los agentes, los vehículos y los recorridos en esta aplicación. Para ellos hemos seleccionado un agente, marcándose así en naranja todo su recorrido.

Podemos observar en las figuras 13 y 14 que el recorrido andando se representa con líneas discontinuas y el trayecto en coche mediante una línea continua. Los agentes se representan mediante un círculo y los vehículos mediante flechas. Estas representaciones se pueden modificar en los ajustes de la aplicación.

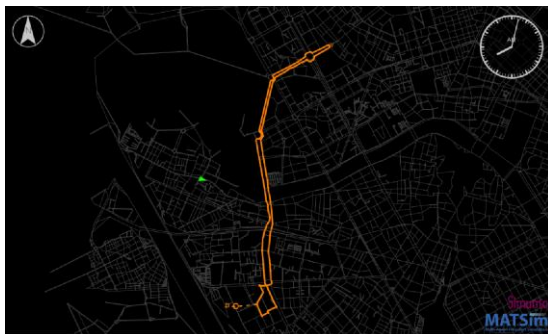


Fig. 13 Representación en VIA del agente, el origen y el destino.



Fig. 14 Representación en VIA de los vehículos.

La h representa la casa del agente (“home”) y la w representa su lugar de trabajo (“work”). Para nuestras simulaciones solo hemos utilizado estas dos localizaciones, pero se podrían añadir más actividades.

Si miramos la figura 15 podemos ver puntos azules, estos puntos indican que los agentes están en sus lugares de trabajo. Podemos observar también un temporizador que indica el tiempo que lleva trabajando el agente. Y en la figura 16, los puntos rojos indican que los agentes están en casa. Estos colores los podemos modificar a nuestro gusto para identificar mejor las distintas localizaciones a las que van llegando los agentes.



Fig. 15 Representación en VIA del tiempo y del lugar de trabajo.



Fig. 16 Representación en VIA de las viviendas.

6. Conclusiones

Al principio de este trabajo, concretamente en el apartado 1.2, exponemos los objetivos que hemos tenido en mente para el desarrollo del mismo. A lo largo de este trabajo hemos ido explicando cuál era el problema a resolver, la metodología empleada, las herramientas necesarias y las pruebas finales que hemos realizado para intentar justificar y confirmar que efectivamente se podían cumplir los objetivos propuestos inicialmente.

En este trabajo se ha realizado un análisis exhaustivo de las posibles aplicaciones del carsharing con estaciones y del free-floating carsharing en Valencia. Para ello, se han utilizado sistemas multiagente para la simulación de los movimientos de flotas y personas, así como otras herramientas de simulación basadas en datos reales para la colocación de las estaciones y vehículos. El resultado final ha sido positivo puesto que, para un volumen de unos 10000 usuarios, una cifra previsiblemente superior a los usuarios iniciales de este tipo de sistemas, la mejor distribución sería con 750 estaciones, o con los vehículos distribuidos de forma uniforme. Sin embargo, el servicio ofrecido por el carsharing todavía sería bastante bueno bajando a muchas menos estaciones y/o vehículos, lo que abarataría los costes y sería más viable inicialmente. En cualquier caso, la instalación final siempre estaría supeditada a los intereses de la ciudad de Valencia y a la demanda que se pudiera predecir.

Ahora explicaremos uno a uno si se han cumplido o no cada uno de los objetivos propuestos:

- Realización de simulaciones utilizando carsharing con estaciones y free-floating en la ciudad de Valencia: Se ha conseguido su implementación y su correcta ejecución utilizando datos realistas, mediante los cuales podemos deducir cuál sería la mejor forma de aplicar el carsharing en esta ciudad.
- Determinar la distribución óptima y el número de estaciones o vehículos a desplegar: Hemos determinado que, para las distintas configuraciones probadas, lo óptimo sería utilizar carsharing con estaciones y una distribución aleatoria o uniforme con 750 estaciones. O utilizar free-floating carsharing con 10000 vehículos distribuidos de manera uniforme.

- Minimizar la distancia recorrida andando para buscar un vehículo y el número de clientes que se quedan sin vehículo: Esto se ha podido conseguir utilizando la misma distribución que mencionamos en el objetivo anterior.

Los objetivos planteados inicialmente se han podido cumplir en su totalidad puesto que se dispone de un sistema completo de simulación multiagente en el que se pueden probar distintas configuraciones de carsharing, utilizando distintas fuentes de datos para la localización de las estaciones y/o vehículos de la flota.

6.1. Relación del trabajo desarrollado con los estudios cursados

En este apartado comentaremos las asignaturas que hemos visto a lo largo del Grado en Ingeniería Informática y de los cuales hemos obtenido los conocimientos suficientes para el desarrollo de este trabajo.

- Agentes inteligentes (AIN): Es la asignatura que más relación tiene con este trabajo. El concepto de la IA, los agentes inteligentes y los sistemas multiagente se ven principalmente en esta asignatura. Además de estos conceptos, también se han visto sus aplicaciones y posibles problemas reales que se podrían resolver mediante el uso de sistemas multiagente. A partir de estos conceptos y nuestro interés por su aplicación práctica en problemas actuales hemos definido la propuesta de este trabajo de fin de grado.
- Sistemas inteligentes (SIN): Similar a la asignatura anterior, en esta asignatura se introduce el concepto de la IA y de los sistemas inteligentes, su evolución y sus posibles aplicaciones.
- Gestión de proyectos (GPR): Los conocimientos adquiridos en esta asignatura han permitido una mejor organización del trabajo y el tiempo dedicado a ello.
- Ingeniería del software (ISW): En esta asignatura, de manera similar a la asignatura anterior, se presentan distintas metodologías de trabajo que han permitido agilizar el desarrollo de este trabajo.

Estas son las asignaturas que han tenido una relación más directa con el desarrollo de este proyecto, pero no son las únicas.

En particular, tener una base sólida en programación ha tenido un papel importante a la hora de comprender el código y realizar las trazas necesarias con el fin de modificar y añadir lo necesario para el correcto funcionamiento de las simulaciones. Estos conocimientos de programación los hemos ido adquiriendo y complementando a lo largo de toda la carrera mediante asignaturas como «Introducción a la programación», «Programación» y «Estructura de datos», principalmente enfocados en Java. Además, en asignaturas como «Sistemas de almacenamiento y recuperación de información» y «Algorítmica» se aprende a programar en Python, que es el lenguaje utilizado para la creación de scripts adicionales que se ha necesitado.

En definitiva, todas las asignaturas cursadas en el Grado de Ingeniería Informática han aportado conocimientos sin los cuales no habría sido posible o hubiera sido complicado el correcto entendimiento y desarrollo de este proyecto.

7. Trabajos futuros

En este apartado veremos algunas mejoras y ampliaciones que podríamos incorporar en este trabajo.

En primer lugar, una posible mejora al estudio ya desarrollado sería poder realizar estas mismas pruebas y simulaciones utilizando datos más realistas, es decir, recolectando información sobre las actividades y rutinas de los ciudadanos mediante encuestas, por ejemplo. De este modo conseguiremos resultados más significativos como consecuencia de unas simulaciones con mayor semejanza a la realidad.

Otra posible mejora que podríamos introducir con el fin de obtener simulaciones más realistas es tratar correctamente con los clientes que no podían alquilar un vehículo. Actualmente los agentes que representan este tipo de clientes abortan su ejecución y se eliminan de la simulación. Ahora bien, sabemos que en la práctica esto no es así. Por eso sería interesante poder simular correctamente la acción de esperar un período razonable de tiempo y, si pasado este tiempo no se ha encontrado un vehículo, optar por otra forma para desplazarse.

En cuanto a las ampliaciones, hemos visto que, en estudios previos relacionados con el tema de este trabajo, se realizaban pruebas empleando las dos modalidades del carsharing conjuntamente. Además, si miramos de forma conjunta los resultados de las pruebas que hemos realizado, utilizando free-floating carsharing se consiguen unos resultados muy similares en comparación con el carsharing con estaciones. Por ello pensamos que sería interesante realizar simulaciones empleando las dos modalidades del carsharing en la ciudad de Valencia y comparar con las versiones donde sólo aplicamos una de las dos modalidades. Como resultado de estas comparaciones, tendríamos todas las combinaciones posibles y esto nos ayudaría a encontrar la mejor manera de aplicar el carsharing en esta ciudad.

Finalmente, otra ampliación que podríamos tener en cuenta y que tiene un interés medioambiental sería la aplicación de carsharing con vehículos eléctricos. Para esta ampliación, aplicando carsharing con estaciones, podríamos definir los puntos de recarga como las mismas estaciones. En el caso de free-floating carsharing sería necesario un estudio más exhaustivo para determinar la forma óptima de posicionar los puntos de recarga por la ciudad. Con respecto a las recargas de los vehículos, se podría considerar dos opciones. La primera sería mediante los clientes, después de cada uso

tendrían que comprobar la batería del vehículo y, en caso de ser necesario, dejarlo en un punto de recarga. La otra opción sería mediante la propia empresa que proporciona los vehículos. Deberían tener un control de la batería de cada vehículo y cuando sea necesario recargarlo, recibir una alerta con la posición del vehículo para poder así trasladarlo a un punto de recarga. Estos mecanismos también se aplican a los vehículos de gasolina y diésel, sin embargo, como su autonomía es todavía muy superior, el impacto sobre la empresa no es tan significativo como con los vehículos eléctricos.

8. Referencias

1. Guarnieri M. Looking back to electric cars. En: 2012 Third IEEE HISTory of ELection-technology CONference (HISTELCON). 2012. p. 1-6.
2. Shaheen SA, Sperling D, Wagner C. A Short History of Carsharing in the 90's. 1 de septiembre de 1999; Disponible en: <https://escholarship.org/uc/item/6p3305b0>
3. Martí P, Jordán J, Palanca J, Julian V. Free-Floating Carsharing in SimFleet. En: Analide C, Novais P, Camacho D, Yin H, editores. Intelligent Data Engineering and Automated Learning – IDEAL 2020. Cham: Springer International Publishing; 2020. p. 221-32. (Lecture Notes in Computer Science).
4. Emisiones de CO2 de los coches: hechos y cifras (infografía) | Noticias | Parlamento Europeo [Internet]. 2019. Disponible en: <https://www.europarl.europa.eu/news/es/headlines/society/20190313STO31218/emisiones-de-co2-de-los-coches-hechos-y-cifras-infografia>
5. KATZEV, Richard. Car sharing: A new approach to urban transportation problems. *Analyses of social issues and public policy*, 2003, vol. 3, no 1, p. 65-86.
6. Horni A, Nagel K, Axhausen KW. The Multi-Agent Transport Simulation MATSim [Internet]. Ubiquity Press. Ubiquity Press; 2016. Disponible en: <https://www.ubiquitypress.com/site/books/e/10.5334/baw/>
7. Via Features [Internet]. Disponible en: <https://www.simunto.com/via/>
8. Li Siyu. Activity-based travel demand model: Application and innovation. Ann Arbor: National University of Singapore (Singapore); 2015.
9. Cayul C, Humberto L. Desarrollo y aplicación de modelo de simulación basada en agentes a gran escala para la ciudad de Santiago. 2017; Disponible en: <http://repositorio.uchile.cl/handle/2250/147155>
10. Wooldridge M. An Introduction to MultiAgent Systems. John Wiley & Sons; 2009. 484 p.
11. Uhrmacher AM, Weyns D. Multi-Agent Systems: Simulation and Applications. CRC Press; 2009. 582 p.
12. Shannon R, Johannes JD. Systems Simulation: The Art and Science. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics. octubre de 1976;SMC-6(10):723-4.
13. Inturri G, Le Pira M, Giuffrida N, Ignaccolo M, Pluchino A, Rapisarda A, et al. Multi-agent simulation for planning and designing new shared mobility services. *Research in Transportation Economics*. 1 de marzo de 2019;73:34-44.



14. Free Floating vs. Stationary vs. P2P: Car-sharing Technology Providers Open the Door to New Options [Internet]. Disponible en: <https://www.sierrawireless.com/iot-blog/free-floating-vs-stationary-vs-p2p-carsharing-technology-providers-open-the-door-to-new-options/>
15. Station-based Business Model Definition [Internet]. Car Rental Glossary. 2020. Disponible en: <https://www.carrentalgateway.com/glossary/station-base-model/>
16. Ciari F, Bock B, Balmer M. Modeling Station-Based and Free-Floating Carsharing Demand Test Case Study for Berlin. Transp Res Record. 2014;(2416):37-47.
17. Free-Floating Model Definition in Car Rental [Internet]. Car Rental Glossary. 2020. Disponible en: <https://www.carrentalgateway.com/glossary/free-floating-model/>
18. La nueva era del carsharing | SHARE NOW España [Internet]. Disponible en: <https://www.share-now.com/>
19. Ayed H, Khadraoui D, Aggoune R. Using MATSim to simulate carpooling and car-sharing trips. 2015 World Congress on Information Technology and Computer Applications (WCITCA). New York: Ieee; 2015.
20. Hörl S. A MATSim scenario for autonomous vehicles in La Défense and Île-de-France. Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung [Internet]. febrero de 2017;1239. Disponible en: <https://www.research-collection.ethz.ch/handle/20.500.11850/128143>
21. Martí P, Jordán J, Palanca J, Julian V. Load Generators for Automatic Simulation of Urban Fleets. En: De La Prieta F, Mathieu P, Rincón Arango JA, El Bolock A, Del Val E, Jordán Prunera J, et al., editores. Highlights in Practical Applications of Agents, Multi-Agent Systems, and Trust-worthiness The PAAMS Collection. Cham: Springer International Publishing; 2020. p. 394-405. (Communications in Computer and Information Science).
22. OpenStreetMap [Internet]. OpenStreetMap. Disponible en: <https://www.openstreetmap.org/>
23. JOSM [Internet]. Disponible en: <https://josm.openstreetmap.de/>
24. Simunto [Internet]. Disponible en: <https://simunto.com/>

