



UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH

Facultat d'Informàtica de Barcelona



EINA D'AVALUACIÓ I SIMULACIÓ PER AL MONITORATGE DEL TRÀNSIT EN XARXES DELIMITADES AMB SUPORT A LA PRESA DE DECISIONS

JOAN CASAHUGA ALTIMIRAS

Director/a

EDELMIRA PASARELLA SANCHEZ (Departament de Ciències de la Computació)

Codirector/a

MARTA FAIREN GONZALEZ (Departament de Ciències de la Computació)

Titulació

Grau en Enginyeria Informàtica (Computació)

Memòria del treball de fi de grau

Facultat d'Informàtica de Barcelona (FIB)

Universitat Politècnica de Catalunya (UPC) - BarcelonaTech

22/01/2025

Agraïments

Voldria agrair a totes les persones que m'han ajudat o donat el seu suport, fent possible la realització d'aquest projecte.

Primerament, voldria agrair a les dues persones que han seguit des del començament el treball, la meva directora, Edelmira Pasarella, i la meva codirectora, Marta Fairen, donant el seu punt de vista, guiatge, recomanacions i experiència, que han estat essencials pel rumb i elaboració del treball.

També vull agrair a la família, pel seu suport i motivació, que m'ha ajudat a mantenir el treball constant setmana a setmana, amb moments de patiment, però també d'alegria, per així arribar a superar aquesta etapa.

Finalment, voldria agrair a amics i companys del grau per la solidaritat i compromís durant aquests anys compartint idees, conversant i formant-nos.

Resum

El transport sempre ha estat un sector molt important pel progrés de la societat. Ens ha permès intercanviar recursos, idees i serveis. En el segle passat, un període de grans revolucions i canvis, es va incorporar la massificació dels vehicles. Això ha donat lloc a la creació i el desenvolupament de les vies, que han ocasionat la implementació de normatives i l'addició d'elements característics com són els semàfors, els passos de vianants o les rotondes, i també de les normes de trànsit que fan possible una circulació més segura i ordenada.

L'increment en la densitat de vehicles en les infraestructures ha suposat la congestió de les vies, amb la consegüent reducció del seu rendiment i la necessitat constant d'adaptació per cobrir les demandes creixents que hi apareixen. Un dels principals reptes és l'impacte ambiental, que es manifesta a través d'alguns efectes com: les emissions dels vehicles, l'obtenció de recursos, la qualitat de l'aire, la gestió dels vehicles al final de la seva vida útil i les conseqüències en l'àmbit atmosfèric.

D'acord amb el que comporta un estudi de trànsit i aquests reptes, l'objectiu principal és proposar un entorn de treball capaç de traslladar a l'entorn digital aquestes infraestructures amb els seus elements més característics, on el sistema facilitarà valorar i comparar els resultats per prendre decisions més informades en la millora de les vies.

Com a resultat, s'ha aconseguit la creació d'un sistema de simulació integrat, que permet traslladar de forma semiautomàtica l'àrea d'estudi al món digital, poder fer i guardar les modificacions necessàries, generar alternatives al circuit original, simular les infraestructures, verificar el seu funcionament, extreure mètriques, visualitzar-les a través de gràfiques o mapes de calor i comparar-les entre elles.

La principal contribució d'aquest projecte es troba en el sistema desenvolupat, que pot ser un suport útil per a l'avaluació i millora d'infraestructures viàries des del punt de vista d'eficiència, però també ambiental a través de la captació de detalls com el consum energètic, les emissions generades o el consum dels combustibles fòssils.

Resumen

El transporte siempre ha sido un sector muy importante para el progreso de la sociedad. Nos ha permitido intercambiar recursos, ideas y servicios. En el siglo pasado, un período de grandes revoluciones y cambios, se incorporó la masificación de los vehículos. Esto dio lugar a la creación y el desarrollo de las vías, que provocaron la implementación de normativas y la adición de elementos característicos como los semáforos, los pasos de peatones o las rotondas, y también de las normas de tráfico que hacen posible una circulación más segura y ordenada.

El aumento de la densidad de vehículos en las infraestructuras ha ocasionado la congestión de las vías, con la consiguiente reducción de su rendimiento y la necesidad constante de adaptación para cubrir las crecientes demandas que surgen. Uno de los principales retos es el impacto ambiental, que se manifiesta a través de efectos como: las emisiones de los vehículos, la obtención de recursos, la calidad del aire, la gestión de los vehículos al final de su vida útil y las consecuencias en el ámbito atmosférico.

De acuerdo con lo que implica un estudio de tráfico y estos retos, el objetivo principal es proponer un entorno de trabajo capaz de trasladar al mundo digital estas infraestructuras con sus elementos más característicos, donde el sistema permitirá valorar y comparar los resultados para tomar decisiones más informadas en la mejora de las vías.

Como resultado, se ha logrado la creación de un sistema de simulación integrado, que permite trasladar de forma semiautomática el área de estudio al entorno digital, realizar y guardar las modificaciones necesarias, generar alternativas al circuito original, simular las infraestructuras, verificar su funcionamiento, extraer métricas, visualizarlas a través de gráficos o mapas de calor y compararlas entre sí.

La principal contribución de este proyecto reside en el sistema desarrollado, que puede ser una herramienta útil para la evaluación y mejora de infraestructuras viarias desde el punto de vista de la eficiencia, pero también ambiental a través de la captura de detalles como el consumo energético, las emisiones generadas o el consumo de combustibles fósiles.

Abstract

Transportation has always been a fundamental sector for the progress of society. It has allowed us to exchange resources, ideas, and services. In the last century, a period of great revolutions and changes, the widespread adoption of vehicles occurred. This led to the creation and development of roads, which resulted in the implementation of regulations and the addition of characteristic elements such as traffic lights, pedestrian crossings, or roundabouts, as well as traffic rules that enable safer and more organized circulation.

The increase in vehicle density on infrastructures has caused road congestion, resulting in a reduction in performance and the constant need for adaptation to meet the growing demands that arise. One of the main challenges is the environmental impact, which manifests through effects such as: vehicle emissions, resource extraction, air quality, the management of vehicles at the end of their useful life, and atmospheric consequences.

In line with what a traffic study involves and these challenges, the main goal is to propose a work environment capable of transferring these infrastructures with their characteristic elements to a digital environment, where the system will allow evaluating and comparing the results to make more informed decisions for the improvement of roads.

As a result, an integrated simulation system has been developed, which allows for semi-automatically transferring the study area to the digital environment, making and saving necessary modifications, generating alternatives to the original circuit, simulating the infrastructures, verifying their operation, extracting metrics, visualizing them through graphs or heatmaps, and comparing them against each other.

The main contribution of this project lies in the developed system, which can be a useful tool for evaluating and improving road infrastructures from both an efficiency perspective and an environmental one, by capturing details such as energy consumption, generated emissions, or fossil fuel consumption.

Taula de Continguts

1	Introducció	15
1.1	Contextualització	15
1.2	Definició de conceptes	16
1.2.1	Simulació	16
1.2.2	Motor	16
1.2.3	Xarxa Viària	16
1.3	Identificació del problema	16
1.4	Actors Implicats	17
2	Justificació	18
2.1	Estudi d'alternatives	18
2.1.1	SUMO	18
2.1.2	PTV Vissim	19
2.1.3	Contribucions del projecte	19
2.2	Selecció del programari	20
3	Abast	22
3.1	Objectius	22
3.1.1	Objectius Específics	22
3.2	Requeriments	22
3.2.1	Funcionals	22
3.2.2	No Funcionals	22
3.3	Obstacles	23
3.3.1	Eficiència	23
3.3.2	Fidelitat	23
3.3.3	Complexitat	23
3.3.4	Dades	23
3.4	Riscos	23
3.4.1	Integritat dels fitxers	23
3.4.2	Complicacions del desenvolupament	24
4	Metodologia i Rigor	25
4.1	Metodologia de treball	25
4.2	Eines de seguiment	25
4.3	Mètode de validació	26
5	Planificació Temporal	27
5.1	Recursos	27
5.1.1	Recursos humans	27
5.1.2	Recursos materials	27
5.2	Descripció de les tasques	28
5.2.1	Gestió del projecte [G]	28
5.2.2	Desenvolupament [D]	28
5.2.3	Proves [T]	29
5.2.4	Elaboració memòria [M]	30
5.2.5	Defensa [E]	30

5.2.6	Reunions [R]	30
5.3	Representació de les tasques	31
5.3.1	Taula Resum	31
5.3.2	Diagrama de Dependències	31
5.3.3	Diagrama de Gantt	32
5.4	Gestió del risc: Plans alternatius i obstacles	33
6	Gestió econòmica	34
6.1	Identificació i estimació dels costos	34
6.1.1	Costs genèrics	34
6.1.2	Costs personals	38
6.1.3	Cost de contingència	40
6.1.4	Cost d'imprevistos	40
6.1.5	Cost total	41
6.2	Control de gestió	41
6.3	Cost final i desviacions	42
7	Informe de sostenibilitat	44
7.1	Autoavaluació	44
7.2	Dimensió econòmica	44
7.3	Dimensió ambiental	46
7.4	Dimensió social	47
8	De la realitat a l'entorn digital	49
8.1	Identificació dels elements	49
8.2	Modelització dels elements	49
8.2.1	Xarxes viàries	50
8.2.2	Elements de control	58
8.2.3	Generadors	64
8.2.4	Destructors	65
8.2.5	Vehicles	66
9	Creació i edició de xarxes	84
9.1	Creació de la xarxa	84
9.2	Edició de la xarxa	87
10	Importació i guardat de xarxes	90
10.1	Sistema de guardat	90
10.2	Sistema d'importació	90
10.3	Extracció d'àrees	98
11	Definició de la simulació	101
12	Monitoratge de les xarxes	103
12.1	Preliminars	103
12.2	Gràfiques	103
12.2.1	Mètriques	103
12.2.2	Visualització	108
12.3	Comparacions de Gràfiques	111

12.4 Mapes de Calor	112
13 Altres característiques	115
13.1 Suport d'idiomes	115
13.2 Configuració de la finestra	115
13.3 Capacitats del visor	115
13.4 Interfície	116
13.5 Tècniques d'optimització	119
13.5.1 Vehicles	119
13.5.2 Corbes	121
13.5.3 Mapa de calor	121
13.5.4 Navegació de mapes	121
13.5.5 Altres	121
14 Descripció del sistema final	123
15 Conclusions	126
15.1 Valoració personal	126
15.2 Reptes	127
15.3 Assoliment d'objectius	127
15.3.1 Objectius Específics	127
15.3.2 Requeriments	128
15.4 Treballs futurs	129

Llista de Figures

1	Visualització de xarxa viària a SUMO.	19
2	Visualització de xarxa viària a PTV Vissim.	19
3	Diagrama de dependències de tasques.	31
4	Diagrama de Gantt	32
5	Visualització aèria de l'àrea de Barcelona.	50
6	Visualització de coordenades sobre la Terra.	51
7	Connectivitat dels vèrtexs.	51
8	Representació d'interpolació entre dos punts.	52
9	Representació de l'algoritme de De Casteljau.	53
10	Representació de la suma ponderada.	54
11	Representació de la geometria de les corbes.	55
12	Representació d'una corba Bézier cúbica.	56
13	Probabilitat dels vèrtexs posteriors.	56
14	Preferència dels trams.	57
15	Resum de propietats dels vèrtexs i arestes.	57
16	Edició de la xarxa dins el sistema.	57
17	Visualització de la xarxa dins el sistema.	58
18	Semàfor en una via.	58
19	Duració i ordre dels estats d'un semàfor.	59
20	Estat i retard inicial.	59
21	Estat original, exemple per programar un semàfor.	60
22	Estat complementari, programació de semàfors.	60
23	Estat complementari + temps de seguretat, programació de semàfors.	60
24	Estat complementari + temps de seguretat + retard, programació de semàfors.	61
25	Resum de propietats dels semàfors.	61
26	Visualització de semàfors dins el sistema.	61
27	Pas de vianants en una via.	62
28	Duració i estats d'un pas de vianants.	62
29	Representació de la distribució de probabilitat uniforme.	63
30	Representació de la distribució de probabilitat normal.	63
31	Representació de la distribució de probabilitat exponencial.	63
32	Resum de propietats dels passos de vianants.	64
33	Visualització de passos de vianants dins el sistema.	64
34	Distribució de vehicles al llarg del dia.	65
35	Resum de propietats dels generadors.	65
36	Visualització dels generadors dins el sistema.	65
37	Vehicles en una via.	66
38	Dimensions del vehicle.	66
39	Posició del vehicle.	67
40	Rotació del vehicle.	67
41	Velocitat del vehicle.	67
42	Medi del vehicle.	68
43	Desplaçament del vehicle.	69
44	Detecció de la proximitat de punts del vehicle.	70

45	Informació dels vèrtexs i arestes dels elements de la via.	71
46	Distància de frenat del vehicle respecte a un pas de vianants.	73
47	Distància de frenat del vehicle respecte al vehicle del davant.	75
48	Exploració de vèrtexs posteriors pels vehicles.	75
49	Exploració de vèrtexs posteriors pels vehicles.	76
50	Vehicle en el punt d'incorporació.	77
51	Acceleració del vehicle al punt d'incorporació.	78
52	Càlcul de possible col·lisió en incorporació.	79
53	Càlcul de l'acceleració posterior a la incorporació.	80
54	Càlcul de la intercepció entre els dos vehicles.	81
55	Resum de propietats dels vehicles.	81
56	Diagrama de flux dels vehicles.	82
57	Visualització d'un dels models tridimensionals.	82
58	Visualització de vehicles dins el sistema.	83
59	Construcció de la rotonda, addició de punts.	84
60	Construcció de la rotonda, selecció de punts.	84
61	Construcció de la rotonda, unió de punts.	85
62	Construcció de la rotonda, modificació de corbes.	85
63	Construcció de la rotonda, addició de semàfors.	86
64	Construcció de la rotonda, addició de passos de vianants.	86
65	Construcció de la rotonda, addició de generadors.	86
66	Panell d'edició de punts i trams.	87
67	Visualització de la selecció de trams en el sistema.	87
68	Panell d'edició de semàfors.	88
69	Visualització de la vinculació de semàfors.	88
70	Panell d'edició de passos de vianants.	88
71	Panell d'edició de generadors.	89
72	Visualització de la simulació de la rotonda d'exemple.	89
73	Procés de binarització i guardat de la xarxa.	90
74	Panell de generació de carrils OSM.	93
75	Panell d'unió de punts OSM.	93
76	Panell d'exclusió de vies.	93
77	Generació de carrils OSM.	97
78	Resultat d'una part de la graella d'imatges.	98
79	Resultat del visor de mapes.	99
80	Resultat de la importació d'un fitxer OSM sense inferència.	100
81	Resultat de la importació d'un fitxer OSM.	100
82	Resultat de la importació d'un fitxer OSM.	101
83	Controls de l'execució de la simulació.	102
84	Controls de la velocitat d'execució de la simulació.	102
85	Renderitzat d'una línia.	109
86	Renderitzat de l'àrea de la línia.	109
87	Pestanyes de selecció dels gràfics.	110
88	Exportació de les mètriques de la simulació a CSV.	110
89	Exportació de les mètriques de la simulació a CSV.	111
90	Configuració de la recol·lecció i visualització del mapa de calor.	111
91	Gràfic de línies per la comparació de mètriques.	112

92	Gràfic radial per la comparació de mètriques.	112
93	Configuració de la recol·lecció i visualització del mapa de calor. . .	113
94	Retall del mapa de calor exportat.	114
95	Menú de selecció de mode en el sistema.	116
96	Informació de la càmera en el sistema.	116
97	Informació general de l'entorn i configuració.	116
98	Panell d'inspecció d'elements.	117
99	Controls en el mode de simulació del sistema.	117
100	Exemple de la visualització de la interfície.	117
101	Camp de text de la interfície.	118
102	Menú desplegable de la interfície.	118
103	Botó de selecció de la interfície.	118
104	Llista de botons de selecció de la interfície.	118
105	Informació associada als botons amb icones.	118
106	Captura de pantalla del Unity Profiler.	119
107	Nivells de detall en els models.	119
108	Comparació d'una malla complexa i una simple.	120
109	Mostra de la superposició de píxels en el sistema.	120
110	Vehicles creats i desactivats prèviament a ser utilitzats.	120
111	Flux de treball integrat del sistema.	123
112	Exemple de descàrrega d'un cas real.	124
113	Exemple d'importació d'un cas real.	124
114	Exemple d'edició d'un cas real.	124
115	Exemple de comparació amb un gràfic de línies d'un cas real.	125
116	Exemple de comparació amb un gràfic radial d'un cas real.	125

Llista de Taules

1	Resum de les tasques del projecte.	31
2	Costs genèrics totals	38
3	Distribució temporal de les tasques	39
4	Costs personals totals.	39
5	Cost d'imprevistos	41
6	Cost total	41
7	Desviació temporal de les tasques.	42
8	Costs personals totals finals.	42
9	Cost total	43

Llista d'Algoritmes

1	Interpolació lineal entre dos punts	52
2	Algoritme de De Casteljaou	53
3	Calcular un punt en la corba Bézier cúbica	54
4	Dibuixar una corba Bézier cúbica	55

Llista de Fragments de codi

1	Exemple de fitxer OSM	91
---	---------------------------------	----

1 Introducció

L'àrea d'estudi d'aquest treball són les infraestructures viàries, un sector de gran creixement en aquest i el segle passat, fruit d'aquest creixement i dels anys que l'acompanyen, han sorgit tota mena de normatives i dissenys de construcció, tot i així, a causa de l'alta saturació de vehicles, sobretot en nuclis urbans, apareix la constant necessitat de millorar l'eficiència de la circulació.

Principalment, l'eficiència de la circulació en les vies la definim com la capacitat de desplaçament de vehicles d'un origen a un destí. Aquesta capacitat es pot avaluar com una relació òptima d'energia i temps, tot integrant les necessitats socials i ambientals del seu entorn.

D'aquesta en podem extreure dos actors principals, amb papers clarament separats però igual d'importants:

Les vies de trànsit, de les quals podem destacar les del temps dels romans, on han anat millorant a través dels materials, capes, drenatge, i velocitat de construcció, fins a les carreteres que tenim avui en dia, amb grans ponts, túnels subaquàtics o apilades les unes sobre les altres.

Els vehicles, que fins fa dos segles eren majoritàriament els carros, a finals del segle XIX comença la revolució de l'automòbil, suposant un canvi radical que massifica les vies i facilita la comunicació a gran escala, però de la mateixa forma, concentra molts vehicles i genera un problema de congestió, tant en el transport de persones com el de mercaderies.

1.1 Contextualització

Aquest és un Treball de Fi de Grau, emmarcat dins la Modalitat A, vinculat a la Facultat d'Informàtica de Barcelona a la Universitat Politècnica de Catalunya, posada en pràctica l'aprenentatge durant aquests quatre anys en el Grau en Enginyeria Informàtica.

La idea del treball està lligada d'un bon inici a un interès personal, els factors que més m'han incidit són: l'ús quotidià del transport, que tot i que ens millora i facilita la vida, alhora, ens fa qüestionar i buscar la millora del seu funcionament, si als aspectes anteriors li afegim l'interès personal de la resolució de problemes, tindríem les variables que m'han despertat motivació per aquest tema.

La construcció i les millores en les vies de comunicació són part de grans inversions de diners públics d'ajuntaments, comunitats autònomes i de l'Estat. Aquestes inversions són necessàries per a l'adaptació de la comunicació i transport a l'augment demogràfic de les poblacions i, en molts casos, pels nous perfils de vehicles que transiten per les vies. Disposar d'una eina de simulació permetria valorar i prendre una resposta més informada —abans de la despesa— de quina manera aquestes intervencions impacten el sistema de trànsit existent i les seves projeccions a futur.

Per donar dimensionalitat a l'impacte de la mobilitat, en una àrea com és Catalunya, aquesta té una xarxa de 12,010 km¹, amb un parc automobilístic de 5,398,254 ve-

Idescat: <https://www.idescat.cat/indicadors/?id=aec&n=16226>

hicles². En l'àmbit autonòmic es destina a infraestructures i mobilitat una inversió de 3.245 milions d'euros³, que suposa un 6.7% del pressupost total.

Així, des de l'àrea on m'estic formant acadèmicament, espero poder contribuir amb una eina d'avaluació i simulació per a la seva millora i facilitar-ne una comprensió més completa.

1.2 Definició de conceptes

A continuació, defineixo alguns dels conceptes que poden resultar útils per la lectura i comprensió del treball.

1.2.1 Simulació

En el nostre cas d'estudi, una simulació és la recreació d'un sistema i les seves interaccions en un entorn virtual. Això permet analitzar el seu comportament i experimentar amb diferents escenaris per prendre decisions més informades, i possiblement més encertades.

1.2.2 Motor

Un motor és un programari que proporciona un conjunt de sistemes implementats i interconnectats, dissenyats per facilitar el desenvolupament. Cada motor ofereix eines específiques, com poden ser el renderitzat gràfic, els càlculs de físiques i la manipulació d'àudio, i pot donar més o menys llibertat als desenvolupadors en la seva personalització i ús.

1.2.3 Xarxa Viària

Una xarxa viària comprèn les infraestructures i els elements que faciliten la circulació de vehicles en un entorn. En la nostra situació, la caracteritzem com una xarxa on es desplacen els vehicles, mentre que els elements de control del trànsit defineixen les normes que dictaminen com és el desplaçament.

1.3 Identificació del problema

Un dels reptes principals és la dificultat d'analitzar de manera efectiva les xarxes a causa de la seva dimensió, diversitat d'estructures i nombre de vehicles, gràcies al desenvolupament dels ordinadors, avui en dia, tenim al nostre abast grans eines que poden posar en funcionament sistemes amb quantitats abans inimaginables d'informació, ajudant a proporcionar sentit i facilitar la seva anàlisi.

L'estudi de les vies és essencial per identificar alguns problemes com: embussos, vies poc transitades, accidentalitat elevada, de manera que en l'últim segle multitud de contribucions referents a l'impacte econòmic, seguretat, medi ambient han anat creixent en l'àmbit.

Idescat: <https://www.idescat.cat/indicadors/?id=aec&n=15566>

Generalitat - Departament d'Economia i Hisenda:

https://aplicacions.economia.gencat.cat/wpres/2024/03_projecte.htm

És per això que aquest treball es focalitzarà en desenvolupar un sistema per reproduir xarxes de trànsit d'àrees delimitades per analitzar les febleses i les forteses del circuit.

1.4 Actors Implicats

En aquest projecte es defineixen els següents grups d'actors:

- **Equip de Desenvolupament:** portat a terme individualment per l'estudiant, qui n'és el responsable del desenvolupament, implementació i presa de decisions tècniques del projecte.
- **Equip de Coordinació/Direcció:** format per la directora, codirectora i l'estudiant, amb l'objectiu de definir, planificar i fer un seguiment del projecte, assegurant que aquest compleixi amb els objectius establerts.
- **Usuaris finals:** tot i que encara no estan definits, els possibles interessats en el producte serien: empreses constructores de carreteres, planificadors urbanístics, organismes governamentals, així com altres entitats involucrades en el disseny i planificació d'infraestructures viàries i de mobilitat.

2 Justificació

Un cop definit el context del treball, s'avaluaran les principals eines que existeixen en el context de simulació de trànsit, on també es farà la tria del programari més indicat per desenvolupar l'eina.

L'aplicació d'aquesta classe d'eines, sovint es troba en les fases d'estudis previs dels projectes, en què els tècnics de l'àrea de mobilitat, els hi permet fer una anàlisi de diferents propostes. Per exemple, en el cas de la Generalitat els hi correspondria valorar l'opció més adequada als tècnics del departament de Territori, Habitatge i Transició Ecològica; pel que fa al consell comarcal, als del departament d'Àmbit de Desenvolupament Territorial i en els Ajuntaments seria l'Àrea de Mobilitat.

2.1 Estudi d'alternatives

En aquest àmbit hi ha múltiples solucions existents, on en destacarem dues de les grans plataformes establertes en la indústria, una de codi obert i l'altre de llicència comercial. Això ens ajudarà a conèixer algunes de les seves debilitats, és allà on podem contribuir, tot i la seva robustesa adquirida amb els seus més de vint anys de desenvolupament:

2.1.1 SUMO

El desenvolupament de l'eina comença el 2001 i el seu codi està escrit principalment amb Python i C++. És de codi obert impulsat per l'àmbit de recerca i la comunitat. Pel que fa al funcionament, SUMO⁴ és un conjunt d'eines que permeten la importació, edició i simulació de xarxes de trànsit, cada una d'aquestes funciona de forma separada i amb un objectiu únic.

Alguns desavantatges que podem definir són les següents:

1. **Entorn de treball fragmentat:** cal conèixer diverses eines i treballar en formats diferents per completar un projecte, aquesta integració més baixa pot portar complicacions i resultar confusa, el motiu principal és que cada subprograma segueix metodologies diferents per assolir els seus propòsits.
2. **Interfícies i facilitat d'ús baixa:** la modificació de vies existents, paràmetres de simulació i importació de vies... suposen a l'usuari una formació extensa. També cal afegir que alguns processos és fan a través de la terminal o editant configuracions en fitxers.
3. **Desenvolupament de noves característiques:** actiu durant més de vint anys, amb contribucions de diverses fonts, i amb l'ús combinat de C++ i Python, presenta una baixa compatibilitat i coherència, on augmenta la dificultat en el desenvolupament a futur provocat per la gran varietat d'extensions sense una clara uniformitat.
4. **Modernització:** L'aplicació es nota una mica desactualitzada pel que fa a aspectes com: la interfície, visualització, edició, gràfiques... però compleixen

SUMO: <https://www.eclipse.dev/sumo/>

la funcionalitat. Degut això, sovint pot ser difícil localitzar-les a causa de poca claredat en la distribució.

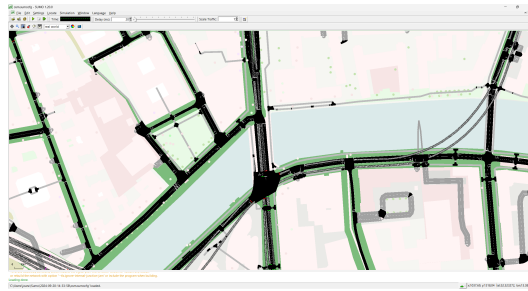


Figura 1: Visualització de xarxa viària a SUMO.
Font: Elaboració pròpia.

2.1.2 PTV Vissim

La primera versió va ser desenvolupada el 1992, sembla utilitzar un llenguatge de programació uniforme i és de pagament, presenta una millor integració de les seves parts i un desenvolupament actiu per part de PTV Group⁵.

Alguns desavantatges a destacar són:

1. **Cost elevat:** enfocada a empreses grans, i queda fora del pressupost de petites i mitjanes empreses, també cal recalcar que cada una de les eines requereix llicència individualment.
2. **Importació:** La importació de xarxes acostuma a ser complexa i menys intuïtiva que altres programes. En carreteres simples o projectes més petits això pot suposar més entrebancs dels que hi hauria.
3. **Suport i documentació:** l'eina té una comunitat més petita, això implica menys tutorials, menys dubtes resolts en fòrums i retroacció més lenta. Per tant, l'usuari es veu limitat a la documentació existent com a principal recurs.

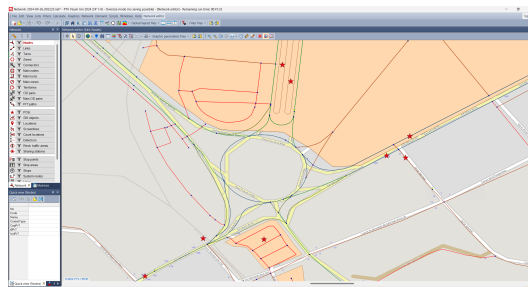


Figura 2: Visualització de xarxa viària a PTV Vissim.
Font: Elaboració pròpia.

2.1.3 Contribucions del projecte

Tenint en compte l'anàlisi d'aquestes eines i observant les seves febleses, el sistema a construir volem que ofereixi satisfactòriament el següent:

1. **Rendiment equiparable:** Es busca assolir un rendiment similar en les simulacions que s'ofereixen respecte a dimensions de vies de trànsit i nombre de vehicles circulant.

PTV Vissim: <https://www.ptvgroup.com/en/products/ptv-vissim>

2. **Modernització:** Incorporació de tecnologies més actuals de renderitzat, visualització de les simulacions i interfícies.
3. **Unificació:** Solució integrada de les eines necessàries que pot requerir un estudi complet en l'entorn de treball.
4. **Monitoratge:** Facilitat pel monitoratge, incorporat en el sistema amb mètriques enfocades a l'anàlisi del rendiment i amb expectatives d'anàlisi de l'impacte ambiental.
5. **Facilitat d'ús:** Oferir una interfície d'usuari senzilla que respecti les necessitats de la tasca desenvolupada per l'usuari.

2.2 Selecció del programari

Per decidir el programari, tenim algunes de les característiques que han de ser possibles desenvolupar en l'apartat d'abast. En base això tenim aquestes opcions:

C++⁶ amb OpenGL⁷: API de baix nivell, ofereix un gran rendiment i control en 2D i 3D. Dit això requereix la implementació dels diferents sistemes des de zero, exigint un coneixement ampli i específic en diferents àrees. Alguns dels que cal remarcar: entrada/sortida de fitxers, interfície, exportar a múltiples plataformes, renderitzat, models 3D, entrada/sortida de perifèrics...

Unity⁸: Motor 2D i 3D amb gran varietat de sistemes integrats, alguns d'ells són: la Universal Render Pipeline (URP), multiplataforma, sistema d'interfícies, gestió de models 3D/textures/àudio, C# com a llenguatge de programació, sistema d'entrada i sortida de fitxers. Els sistemes ofereixen una àmplia modularitat, adaptant-se a diferents tipus de projectes. A més, Unity és actualitzat sovint i compta amb recursos que faciliten l'aprenentatge i la resolució de problemes.

Alternatives similars a Unity són:

- **Unreal⁹**, tot i que permet 2D, està especialitzat en 3D, i no presenta les mateixes habilitats per adaptar els sistemes, a més d'això també resulta menys eficient.
- **Godot¹⁰**, de codi obert especialitzat en 2D i sistemes més simples, però a la vegada menys flexible, quant a altres aspectes com el suport, la comunitat i recursos, tot i que creixents, són inferiors als que té Unity.

Finalment, **l'opció més viable és Unity**, ja que ens permetrà desenvolupar amb suficient llibertat l'eina i amb plenes capacitats en tots els sistemes. Tal com s'ha dit, ens ofereix un molt bon balanç entre rendiment, control i un gran ventall d'eines per als diferents requisits.

Alguns dels compromisos que ens suposa són: sacrificar lleugerament en els aspectes de rendiment respecte a C++ amb OpenGL, l'alta fidelitat gràfica d'Unreal i els

C++: <https://isocpp.org/>

Open GL: <https://www.opengl.org/>

Unity: <https://unity.com>

Unreal Engine: <https://www.unrealengine.com/en-US/home>

Engine, Godot: <https://godotengine.org>

avantatges del codi obert de Godot.

Unity respecta el millor equilibri de les nostres necessitats: sistemes integrats, versatilitat, capacitat multiplataforma amb flexibilitat tant en 2D com 3D, i es presenta com un estàndard i amb àmplia implicació de la comunitat.

3 Abast

3.1 Objectius

L'objectiu principal del projecte és desenvolupar una eina gràfica que permeti la simulació i l'anàlisi de sistemes viaris d'acord amb múltiples mètriques.

3.1.1 Objectius Específics

Els objectius específics del treball són els següents:

1. Modelització de les estructures viàries.
 - (a) Creació d'un sistema de fitxers de les vies.
 - (b) Dissenyar un sistema de creació i modificació de xarxes viàries.
2. Simulació de la circulació i els elements viaris.
 - (a) Caracteritzar modificacions en comportaments dels agents.
 - (b) Desenvolupar els sistemes de simulació i les seves interaccions.
3. Anàlisi i monitoratge de les xarxes.
 - (a) Visualització de les xarxes viàries i del trànsit en temps real.
 - (b) Extracció i anàlisi de mètriques que caracteritzin la xarxa.
 - (c) Investigar i valorar la possibilitat d'utilitzar mètriques amb relació a l'impacte mediambiental de certes situacions de trànsit d'acord amb la configuració de l'àrea viària en estudi.
4. Estudi i validació del traspàs de la realitat a la simulació.

3.2 Requeriments

Es poden dividir en dues clares categories, funcionals i no funcionals, les quals defineixen el que cal esperar de l'eina.

3.2.1 Funcionals

Alguns dels requeriments ja queden definits en els objectius, tot i així, aquí tenim alguns més:

Obtenció de resultats: ha de permetre extreure dades de les simulacions.

Sistema de fitxers: ha de ser capaç d'importar, modificar i guardar els projectes.

Multiplataforma: s'ha de poder utilitzar en diversos sistemes operatius.

3.2.2 No Funcionals

Aquests requisits defineixen la resta de característiques i restriccions per conformar una eina amb uns mínims estàndards.

Eficiència: ser capaç de treballar sobre àrees delimitades considerablement grans, on per avaluar el rendiment s'utilitzarà el frame time en diferents casuístiques.

Usabilitat: en tractar-se d'una eina extensa, cal que sigui fàcilment intel·ligible i que l'usuari pugui utilitzar-ho amb facilitat.

Versàtil: fàcilment adaptable a les necessitats del cas d'estudi de l'usuari.

3.3 Obstacles

Com ja se sap el desenvolupament mai està lliure d'obstacles, per això és important fer una previsió de possibles problemes que poden sorgir.

3.3.1 Eficiència

El nombre de vehicles que pot circular en una ciutat és significativament gran, tot i les millores en el hardware, el software ha de facilitar i mantenir un codi altament eficient, és per això que en el desenvolupament en tot moment s'ha d'avaluar les parts més freqüentment executades per assegurar la millor escalabilitat possible i veure les limitacions que apareixen.

3.3.2 Fidelitat

De res serveix una gran eficiència si els resultats que s'extreuen no són fidels a la realitat, mantenir un estudi dels comportaments i interaccions reals és essencial.

3.3.3 Complexitat

Múltiples sistemes intervenen en la construcció del programa, de manera que un desenvolupament estructurat és fonamental. Això ens permetrà establir una base sòlida, on podrem afegir i modificar característiques de manera modular, sense alentir el progrés.

3.3.4 Dades

L'accés a dades del trànsit i vies poden estar restringides, tot i que és responsabilitat de l'usuari de definir la zona i els paràmetres, s'han de trobar formes per suplementar la informació.

3.4 Riscos

Els següents riscos poden posar en compromís el projecte, tot i que són improbables, s'han de valorar.

3.4.1 Integritat dels fitxers

El codi del projecte es troba emmagatzemat localment en l'ordinador i portàtil de l'estudiant, paral·lelament, s'ha utilitzat GitHub¹¹ com a eina de control de versions i còpia de seguretat en els seus servidors.

GitHub: <https://github.com/>

Respecte a la memòria, es treballa directament a Overleaf¹², per evitar deixar-ho únicament a les mans dels seus servidors, l'estudiant es descarrega els fitxers de forma habitual.

3.4.2 Complicacions del desenvolupament

Una de les principals tasques que s'ha de complir en els projectes són els terminis, no es pot subestimar el temps que cal dedicar a cada part, aquests poden sorgir principalment a conseqüència d'imprevistos en el desenvolupament del programa i s'haurà de valorar com redirigir el treball.

Overleaf: <https://www.overleaf.com>

4 Metodologia i Rigor

En aquest apartat es descriu la metodologia que es seguirà al llarg del treball per garantir la correctesa, direcció i l'assoliment d'objectius.

4.1 Metodologia de treball

Pel desenvolupament del projecte utilitzarem una metodologia SCRUM¹³. Això vol dir que hem organitzat la feina per iteracions de dues o tres setmanes anomenades *sprints*. Cadascuna d'aquestes iteracions començarà i acabarà amb una reunió de l'equip de treball (el projectista i les directores). En les reunions s'exposarà el progrés fet, problemes a resoldre i es fa una avaluació de l'estat actual i que cal posteriorment treballar de cara a la següent iteració. Per gestionar el projecte farem servir Jira¹⁴, una eina que ofereix una distribució enfocada a aquesta metodologia.

En particular, les següents activitats s'han de portar a terme al llarg de tot el projecte:

- Llegir documentació acadèmica i tècnica fonamental per la creació i ús d'eines de simulació de trànsit.
- Lectura de documents (digitals) tècnics (informes, manuals i tutorials) i eines de les mètriques utilitzades en aquest tipus de sistemes.
- Redactat parcial d'informes tècnics.
- Desenvolupament i implementació de programes.
- Manteniment d'un repositori del programari.
- Configuració de la plataforma experimental.
- Definir i possiblement refinar mètriques per analitzar en diferents casos d'ús.
- Execució de l'algoritme implementat i mesures de les mètriques seleccionades.
- Analitzar i informar sobre els resultats.

4.2 Eines de seguiment

Per fer el seguiment del treball, s'han utilitzat les següents eines:

Git¹⁵, que és un sistema de control de versions, coordinat per un repositori de GitHub, aquesta és una plataforma que permet als desenvolupadors mantenir el codi d'un projecte.

Overleaf, on s'estableixen seguiment de documentació, idees i pensaments que s'aniran contrastant al llarg del treball. Servirà per tenir una visió i seguiment constant del projecte i la direcció que pren.

SCRUM: <https://www.scrum.org/index>

Jira: <https://www.atlassian.com/software/jira>

Git: <https://git-scm.com/>

4.3 Mètode de validació

Pel que fa a la validació de la direcció, com hem dit abans, en les reunions setmanals/bisetmanals amb la directora i codirectora del treball s'exposarà el progrés fet, problemes a resoldre i es farà una valoració de l'estat del projecte respecte a les activitats posteriors. Respecte a feedback més immediat es fa servir el correu electrònic per dirigir els dubtes.

En relació amb la validació de les parts més tècniques, es duran a terme diverses proves:

- Pel rendiment, proves d'estrès per minimitzar el frame time.
- Per la usabilitat, es provaran que les interaccions amb la interfície siguin intuïtives.
- També es faran proves amb multitud de casos per provar la correctesa i verificar que no continguin errors.

Per a la realització de les proves de rendiment i correctesa anirem dissenyant diferents escenaris per executar les simulacions. La complexitat d'aquests escenaris s'anirà escalant a mesura que avanci el desenvolupament, on es provaran les diferents característiques del sistema.

5 Planificació Temporal

En aquest apartat, s'estableix la planificació temporal del projecte, on es farà un desglossament de les tasques, i l'estimació temporal d'aquestes.

La data d'inici del treball és el 3 de juliol del 2024, i la finalització és entre el 20 i 24 de gener del 2025¹⁶. Per tant, la duració total és de 201 a 205 dies, valorant una dedicació diària de 3 hores, la dedicació total serà de 603 a 615 hores.

Com a normativa en la facultat, els Treballs de Fi de Grau sumen un total de 18 crèdits de treball¹⁷, això vol dir una càrrega estimada de 30 hores per cada crèdit. En base aquests valors, la dedicació s'hauria d'apropar a les 540 hores establertes, i podem veure doncs com s'ajusta als requisits establerts.

5.1 Recursos

Els recursos necessaris per portar el projecte a terme es poden dividir en humans i materials. Des d'eines fins a personal necessari per a complir els objectius.

5.1.1 Recursos humans

Els actors implicats es troben distribuïts en els següents rols del projecte:

- *Director del projecte* [DP], encarregat de fer la planificació, seguiment i coordinació de l'equip.
- *Programador* [PR], dissenya i desenvolupa el sistema amb les eines escollides.
- *Analista o Tester* [A], fa proves pel correcte i òptim funcionament del sistema.
- *Redactor* [RE], documentar en la memòria i redactar informes del projecte.

5.1.2 Recursos materials

Pel que fa al material que necessitem, es detallaran eines digitals i recursos, que fan possibles i són imprescindibles pel progrés del treball, també es descriurà l'equipament.

- *Ordinador* [PC], el desenvolupament en un ordinador de sobretaula és necessari per fer les tasques, i de forma més eficient que en un portàtil.
- *Portàtil* [PO], necessari per fer les tasques fora de l'entorn de treball.
- *Unity* [U], eina escollida pel desenvolupament del sistema.
- *Blender* [B]¹⁸, útil per la manipulació i creació de models 3D dels vehicles.
- *Visual Studio Code* [VS]¹⁹, editor de codi utilitzat per la implementació.

FIB UPC: <https://www.fib.upc.edu/sites/fib/files/calendari-academic-2024-2025-graus.pdf>

FIB UPC: <https://www.fib.upc.edu/ca/estudis/graus/grau-en-enginyeria-informatica/treball-de-fi-de-grau>

Foundation, Blender: <https://www.blender.org/>

Visual Studio Code: <https://code.visualstudio.com/>

- *Overleaf* [OV], editor de LaTeX²⁰ que servirà per fer la redacció i documentació del projecte.
- *Google Workspace* [GO], servei de correu electrònic, calendari, documents, presentacions... que seran profitoses al llarg del treball.

5.2 Descripció de les tasques

A continuació, definirem les tasques que constitueixen el projecte, per cada una farem una descripció i determinarem el temps de dedicació estimat.

5.2.1 Gestió del projecte [G]

Aquest apartat defineix la planificació i avaluació del projecte, la qual s'estima la seva durada en 90 hores, i queda dividida en 4 tasques, durant el progrés d'aquesta serà necessari la coordinació de rols de director del projecte (DP) i redactor (RE).

5.2.1.1 Context i Abast [G1]

Aquesta primera tasca té com a objectiu definir el projecte, emmarcar el seu context, concretar l'abast amb possibles obstacles i determinar la seva metodologia, tot això cal documentar-ho, fer un estudi d'eines (P1) i una lectura d'altres treballs (P4), s'estima la seva duració en 35 hores.

5.2.1.2 Planificació temporal [G2]

Posteriorment, el projecte s'ha de dividir en tasques i subtasques, determinar les seves dependències, i fer una aproximació del temps a dedicar a cada una d'elles. Cal definir els recursos humans i materials. També serà necessària una lectura d'altres treballs (P4). Tindrà una duració estimada de 25 hores.

5.2.1.3 Pressupost i sostenibilitat [G3]

A més d'això, és essencial fer un pressupost dels costos del projecte i un informe de sostenibilitat. Acompanyat amb una lectura d'altres treballs (P4). Es calcula una duració de 25 hores.

5.2.1.4 Informe final [G4]

L'últim pas és recopilar els tres documents amb petites correccions i canvis, una duració de 5 hores és el que s'espera d'aquesta tasca.

5.2.2 Desenvolupament [D]

En quant el desenvolupament, en totes les seves tasques suposa una part d'estudi i disseny, amb la seva posterior implementació. Podríem dir que aquesta és la tasca amb més pes de tot el projecte, el desenvolupament del sistema es destina principalment al rol de programador, s'estima amb un total de 255 hores, i queda dividit en les següents tasques:

LaTeX: <https://www.latex-project.org/>

5.2.2.1 Creació de xarxes [D1]

Aquesta tasca es compon per la caracterització i estudi de les vies de trànsit (P2), l'estudi és necessari per a una correcta implementació, aquesta té una durada aproximada de 50 hores.

5.2.2.2 Importació de xarxes [D2]

Posteriors al bloc de creació de xarxes (D1), la incorporació de fitxers amb informació sobre les vies és incondicional per a la solidesa del sistema, s'estableixen 40 hores per la seva implementació.

5.2.2.3 Elements viaris [D3]

Respecte als elements viaris que modifiquen i interactuen en les vies, necessiten també un estudi de les vies de trànsit (P2). Es preveu un total de 30 hores.

5.2.2.4 Vehicles [D4]

Una de les tasques claus pel correcte desenvolupament del sistema, són els vehicles, s'ha de fer un estudi obligatori sobre els vehicles (P3), per un disseny i implementació correctes. El seu pes serà de 60 hores.

5.2.2.5 Sistema de guardat [D5]

Per donar sentit al sistema, cal poder guardar i carregar els canvis a les vies de forma senzilla i consistent, d'aquesta forma els usuaris poden treballar en diferents prototips. Per a aquest bloc, cal primer haver desenvolupat la creació de xarxes (D1) i elements viaris (D3), es necessiten un total de 30 hores.

5.2.2.6 Eines d'anàlisi [D6]

En últim lloc, però no menys important, les eines per monitoratge i anàlisi del sistema, són aquestes les eines que doten d'utilitat al sistema, per fer-ho, però, cal desenvolupar la creació de xarxes (D1), elements viaris (D3) i els vehicles (D4). Representa 40 hores del desenvolupament.

5.2.3 Proves [T]

Al llarg del desenvolupament de diferents característiques del sistema, s'han de dur a terme múltiples proves per verificar el seu correcte i òptim funcionament. Comprenent un total de 40 hores i les podem dividir en dos grups:

5.2.3.1 Proves de funcionalitat [T1]

Les proves de funcionalitat es faran paral·lelament durant el desenvolupament (D) de les característiques específiques del sistema. Un total de 25 hores serien convingents pel perfecte progrés del projecte.

5.2.3.2 Proves de rendiment [T2]

Pel que fa a les proves de rendiment, aquestes seran més puntuals, i s'avaluaran diferents regions del codi quan el sistema es posa en casos i situacions més extremes. Podem dir que comprendran una duració de 15 hores.

5.2.4 Elaboració memòria [M]

Aquesta tasca inclou la gestió del projecte (G4), a més de la resta de memòria necessària del Treball de Final de Grau, cal també fer lectura d'altres treballs (P4), es valora en un treball de 90 hores.

5.2.5 Defensa [E]

S'ha de destinar temps a la preparació de la defensa, aquesta partirà de la base de la memòria feta (M) i es destacaran les diferents parts del projecte. Es projecten 50 hores a dedicar a la creació d'aquesta.

5.2.6 Reunions [R]

Per poder fer un seguiment de la direcció del projecte es faran reunions setmanals/bisetmanals repartides en 28 setmanes. Les reunions seran una trobada amb la directora i codirectora del treball, on entraran en joc els rols implicats en el desenvolupament de totes les tasques i s'utilitzaran principalment les eines de Google Workspace. S'aproxima un total de 30 hores dedicades a les reunions.

5.3 Representació de les tasques

A continuació, per millorar la interpretabilitat de la planificació, s'han elaborat múltiples figures per representar les tasques.

5.3.1 Taula Resum

Conté la informació completa de les tasques del projecte, utilitza les abreviacions de recursos i dependències prèviament definides:

Id.	Tasca	Temps	Dependències	Recursos Materials — Humans
G: Gestió del projecte (90 h)				
G1	Context i abast	35 h	P1, P4	PO, OV, GO — DP, RE
G2	Planificació temporal	25 h	P2, P3, P4	PO, OV, GO — DP, RE
G3	Pressupost i sostenibilitat	25 h	P4	PO, OV, GO — DP, RE
G4	Informe final	5 h	G1, G2, G3	PO, OV — RE
P: Treball previ (60 h)				
P1	Estudi d'eines	15 h	G1	PO, OV — RE
P2	Estudi de xarxes viàries	15 h	G2	PO, OV — RE
P3	Estudi de vehicles	25 h	G2	PO, OV — RE
P4	Lectura de TFGs	5 h	—	PO, OV — RE
D: Desenvolupament (255 h)				
D1	Creació de xarxes	50 h	P2	PC, U, VS — PR
D2	Importació de xarxes	40 h	D1	PC, U, VS — PR
D3	Elements viaris	30 h	P2	PC, U, VS — PR
D4	Vehicles	65 h	P3, D1	PC, U, VS, B — PR
D5	Sistema de guardat	30 h	D1, D3	PC, U, VS — PR
D6	Eines d'anàlisi	40 h	D1, D3, D4	PC, U, VS — PR
T: Proves (40 h)				
T1	Proves de funcionalitat	25 h	D	PC, U, VS — PR, A
T2	Proves de rendiment	15 h	D	PC, U, VS — PR, A
M	Elaboració de la memòria	90 h	G, D, P	PO, OV — RE
E	Defensa	50 h	M	OR, GO — DP
R	Reunions	30 h	—	PO, GO — DP, PR, A, RE
Total: 615 h				

Taula 1: Resum de les tasques del projecte.

Font: Elaboració pròpia.

5.3.2 Diagrama de Dependències

Ens permet, com el seu nom indica, veure les dependències, però, en canvi, no representa les dates ni els recursos de les tasques. S'ha elaborat l'esquema amb l'eina Draw.io²¹.

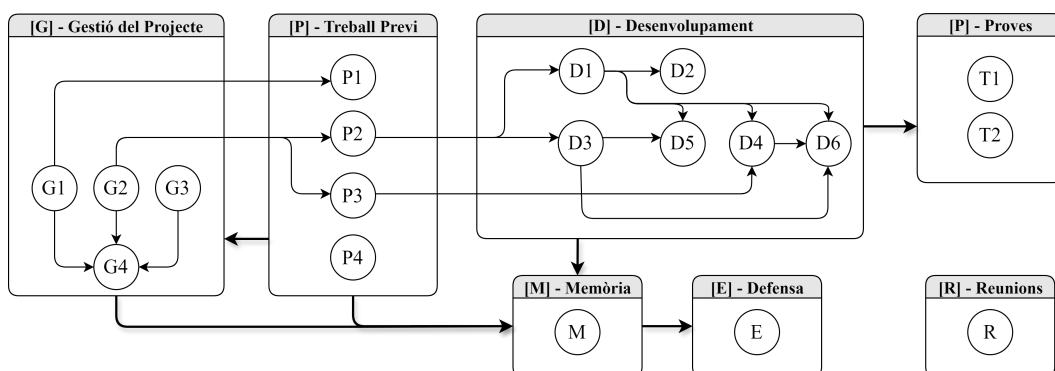


Figura 3: Diagrama de dependències de tasques.

Font: Elaboració pròpia.

Draw.io: <https://www.drawio.com/>

5.3.3 Diagrama de Gantt

Aquest diagrama ens permet visualitzar de forma ràpida la línia temporal de tasques d'inici a fi, amb les seves agrupacions i algunes de les seves dependències. Per fer-ho s'ha utilitzat l'eina Instagantt²².

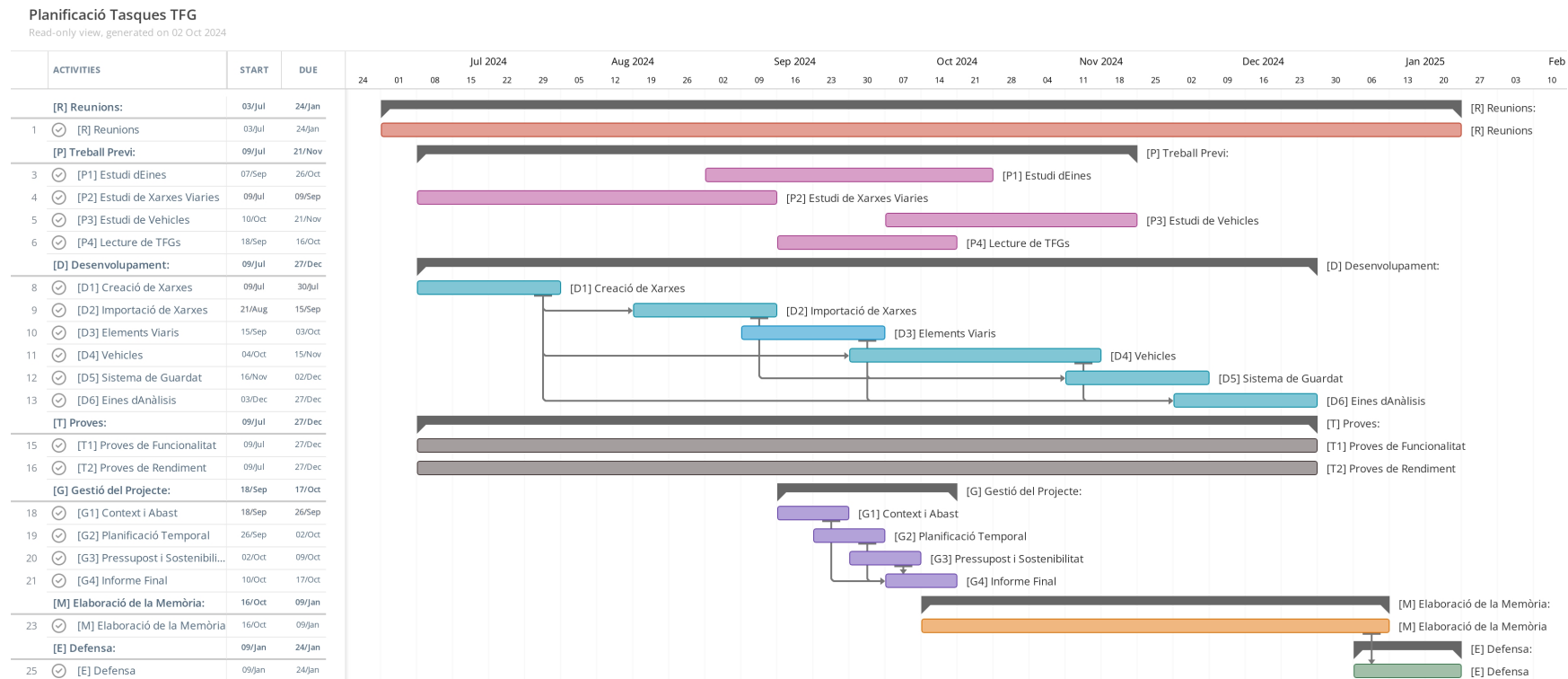


Figura 4: Diagrama de Gantt

Font: Elaboració pròpia.

5.4 Gestió del risc: Plans alternatius i obstacles

Com ja s'ha descrit anteriorment, no es pot deixar de banda ni subestimar les possibles dificultats que apareguin durant el progrés del projecte, principalment podem destacar els probables o altres endarreriments deguts al desenvolupament, ja que és on es presenten més incògnites, i poden anar lligats a factors com el rendiment o la correctesa, personalment en destacaria els següents:

- **[Risc Mitjà] Importació de xarxes (D2)**, el correcte processament de formats dels fitxers és desconegut, pot tenir una complexitat elevada a causa de restriccions d'informació o inaccessibilitat a documentació sobre estructura dels fitxers.

Alternatives: continuar amb l'exploració d'altres formats de fitxers per veure si és possible el que es vol aconseguir, incrementar el temps dedicat al desenvolupament de la importació de xarxes o en el pitjor dels casos, descartar aquesta característica.

- **[Risc Elevat] Vehicles (D4)**, el comportament dels vehicles no és una tasca fàcil de desenvolupar, cal ser fidel a la realitat, i el seu desplaçament ha de ser alhora que eficient, apropiat i realista, això pot suposar possibles dificultats que de moment són imprevisibles i s'haurà de veure quines solucions es proposen als problemes que van sortint.

Alternatives: reduir la fidelitat respecte a la realitat podria facilitar en el desenvolupament, en cas de ser necessari, incrementar les hores per desenvolupar les característiques pot ser positiu, però en tot cas la característica no es pot descartar del sistema.

- **[Risc Baix] Eines d'anàlisis (D6)**, aquestes depenen de l'èxit en el desenvolupament dels altres blocs, si no se segueixen amb un bon ritme les planificacions, es podrien produir retalls en aquestes, això seria una mala imatge, ja que són un pilar fonamental de la utilitat del sistema.

Alternatives: reduir les possibles mètriques i centrar-se en les que es considerin més essencials o, per altra banda, redefinir la forma de captar-les perquè sigui el més senzill possible.

Sobre la resta de les tasques, es considera que els riscos són bastant més baixos i poden sortir menys imprevistos que puguin alentir el progrés del projecte.

6 Gestió econòmica

En aquest apartat es tractarà la part econòmica del projecte, l'estimació del cost d'execució i el control d'aquests costs.

6.1 Identificació i estimació dels costs

Primerament, s'identificaran els costs, aquests queden dividits segons el seu tipus, i en la part final es farà una valoració del cost total.

6.1.1 Costos genèrics

Considerem els costos genèrics aquells que no són de personal, i que estan involucrats en les activitats específiques del projecte. Trobem en aquest punt: el cost de l'electricitat, la contractació del servei d'internet, l'espai físic que requereix, el material i el programari associat.

6.1.1.1 Cost elèctric

Per valorar el cost elèctric s'han d'identificar primer quins aparells utilitzaran electricitat, en aquest cas tenim: llums, ordinador, pantalles, portàtil i calefacció/aire condicionat.

Per determinar el total de llums que necessitem, partim del següent:

L'entorn de treball s'estima en una àrea de 3x3 metres, és a dir, 9 m². Un llum LED funciona aproximadament amb 10 W i té una eficiència de 100 lúmens/W²³, la qual cosa suposa 1000 lúmens per llum.

Els nivells de llum estàndard que es garanteixen en una oficina són de 320 luxs²⁴. Per obtenir els lúmens necessaris, cal multiplicar el nivell de luxs per l'àrea en metres quadrats, obtenint els següents resultats:

$$\begin{aligned} \text{Lúmens necessaris} &= 320 \text{ lux} \cdot 9 \text{ m}^2 = 2880 \text{ lúmens} \\ \frac{2880 \text{ lúmens}}{1000 \text{ lúmens/llum}} &= 2.88 \text{ llums} \end{aligned}$$

Així doncs, concloem que necessitem un mínim de 3 llums LED de 10 W per cobrir adequadament l'àrea de treball, per tant, tenim 30 W destinats a la llum. Determinem al seu ús en cada hora del treball:

$$\text{Energia Llums (kWh)} = \left(\frac{30 \text{ W}}{1000} \right) \cdot 615 \text{ h} = 0.03 \text{ kW} \cdot 615 \text{ h} = 18.45 \text{ kWh}$$

Pel que fa a pantalles de l'ordinador, s'ha considerat tenir dues pantalles durant el desenvolupament, tot i que no és essencial, millora la productivitat. Algunes de les característiques de les dues pantalles són: 1920x1080 de resolució, 60 Hz de freqüència d'actualització, 23.6" de mida, amb un consum de 18 W²⁵.

Pel que fa a l'ordinador, els requisits aproximats serien els següents:

Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/LED_lamp

Wikipedia: <https://en.wikipedia.org/wiki/Lux>

AOC: <https://aoc.com/es/products/monitors/m2470swh/specification>

- AMD Ryzen 5 2600, té un consum màxim de 65 W²⁶.
- NVIDIA GTX 1050, amb un consum màxim de 75 W²⁷.
- 2 mòduls de 8 GB de RAM, un consum total de 4 W²⁸.
- 1 disc SSD de 512 GB²⁹, amb un consum de 4 W³⁰.

Sumant el consum dels seus components, destinarem 184 W pel seu funcionament. El seu ús serà de 255 h de desenvolupament, 50 h de defensa, 40 h amb proves de funcionalitat i rendiment, un total de 345 hores, d'acord amb les hores tenim:

$$Energia\ Ordinador\ (kWh) = \left(\frac{184\ W}{1000} \right) \cdot 345\ h = 0.184\ kW \cdot 345\ h = 63.48\ kWh$$

En quan al portàtil, aquest compleix tasques menys simples, els requisits són més baixos, considerem un model de Dell XPS 13 9350³¹:

- Pantalla del mateix nivell de l'ordinador, 18 W.
- Intel Core i3-6006U, té un consum màxim de 15 W³².
- Intel HD Graphics 520, amb un consum màxim de 15 W³³.
- 2 mòduls de 4 GB de RAM, un consum total de 4 W.
- 1 disc SSD de 512 GB, amb un consum de 4 W.

Sumant el consum dels seus components, destinarem 56 W pel seu funcionament. El seu ús serà de 90 h de gestió del projecte, 60 h de Treball previ, 90 h d'elaboració de la memòria, 30 h de reunions, un total de 270 hores, d'acord amb les hores tenim:

$$Energia\ Portàtil\ (kWh) = \left(\frac{56\ W}{1000} \right) \cdot 270\ h = 0.056\ kW \cdot 270\ h = 15.12\ kWh$$

Pel que fa al sistema d'aire condicionat/calefacció, s'assumeix un aire condicionat amb bomba de calor, per suplir tant en els mesos de juliol i agost, com de desembre i gener, l'estàndard està a 1500 W³⁴, tot i que per mantenir la temperatura d'una habitació no requereix que l'aparell s'utilitzi al màxim, una aproximació seria la meitat, 750 W.

Les hores d'utilització seran, en els mesos de juliol i agost, 50 h de creació de xarxes, 10 h d'estudi de xarxes viàries, 10 h de reunions, 10 h amb proves de funcionalitat i rendiment, 80 hores durant l'estiu.

TechPowerUp: <https://www.techpowerup.com/cpu-specs/ryzen-5-2600.c2015>

NVIDIA:

<https://www.nvidia.com/es-la/geforce/products/10series/geforce-gtx-1050/>

Crucial: <https://www.crucial.es/memory/ddr4/ct16g4sfd824a>

Crucial: <https://www.crucial.es/ssd/bx500/ct500bx500ssd1>

SuperSSD: <https://www.superssd.com/kb/ssd-power-consumption/>

Dell Technologies: https://dl.dell.com/manuals/all-products/esuprt_laptop/esuprt_xps_laptop/xps-13-9350-laptop_reference%20guide_en-us.pdf

Intel: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/sku/91157/intel-core-i3-6006u-processor-3m-cache-2-00-ghz.html>

Intel: <https://www.intel.com/content/www/us/en/products/sku/91157/intel-core-i3-6006u-processor-3m-cache-2-00-ghz.html>

TechPowerUp:

<https://www.techpowerup.com/gpu-specs/hd-graphics-520-mobile.c2783>

Wikipedia: https://en.wikipedia.org/wiki/Air_conditioning

Durant els mesos de desembre i gener, tenim 40 h d'eines d'anàlisis, 10 h amb proves de funcionalitat i rendiment, 10 h d'elaboració de la memòria, i 50 h de defensa, 10 h de reunions, 120 hores a l'hivern.

En base aquestes hores i consum tenim:

$$\text{Energia AC (kWh)} = \left(\frac{750 \text{ W}}{1000} \right) \cdot 200 \text{ h} = 0.75 \text{ kW} \cdot 200 \text{ h} = 150 \text{ kWh}$$

La tarifa que agafem és la de Naturgy³⁵, 0,114900 €/kWh, i en base això, l'energia total i cost d'energia són:

$$\text{Energia Total (kWh)} = 18.45 \text{ kWh} + 63.48 \text{ kWh} + 15.12 \text{ kWh} + 150 \text{ kWh} = 247.05 \text{ kWh}$$

$$\text{Cost Energia} = 247.05 \text{ kWh} \cdot 0.114900 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 28.39 \text{ €}$$

Sobre el cost de l'electricitat, cal sumar el cost de la potència contractada, el qual la potència mínima, de 3.45 kW³⁶. Hi ha 2 períodes amb tarifes: diferents 30,776376 €/kW a l'any (P1 i P2) i 8,004240 €/kW a l'any (P3)³⁷:

$$\begin{aligned} \text{Cost Potència} &= 3.45 \text{ kW} \cdot 205 \text{ dies} \cdot \frac{1 \text{ any}}{365 \text{ dies}} \cdot \left(30.776376 \frac{\text{€/kW}}{\text{any}} + 8.004240 \frac{\text{€/kW}}{\text{any}} \right) \\ &= 75.14 \text{ €} \end{aligned}$$

Sumant el cost d'energia i el cost de potència, tenim que el cost total d'electricitat és de **103.53 €**.

6.1.1.2 Cost d'internet

Pel càlcul del cost d'internet tenim un factura de 31.9 €/mes³⁸. La necessitat d'aquest servei és des de l'inici fins al final del projecte, ho sigui 7 mesos, aquest és el cost resultant:

$$\text{Cost Internet} = 31.9 \frac{\text{€}}{\text{mes}} \cdot 7 \text{ mesos} = \mathbf{223.3 \text{ €}}$$

6.1.1.3 Cost de material i programari

Pel que fa als costos de materials tenim, l'ordinador el qual està format per la següent llista de components:

- Pantalla AOC, cost de 95.66 € x 2³⁹.
- AMD Ryzen 5 2600, cost de 119.65 €⁴⁰.
- NVIDIA GTX 1050, 129.99 €⁴¹.
- 8 GB de RAM Crucial, cost de 22,99 € x 2.

Naturgy: <https://www.naturgy.es/hogar>

Naturgy: https://www.naturgy.es/hogar/blog/potencia_contratada_en_el_hogar

Naturgy: https://www.naturgy.es/cuadro_tarifas_naturgy_recarga_pymes_page

Movistar: <https://www.movistar.es/fibra-optica/fibra-300mb/>

Amazon: [https://www.amazon.es/AOC-M2470SWH-resoluci%C3%B3n-technolog%C3%ADa-contraste/dp/B0004ATF2Q/](https://www.amazon.es/AOC-M2470SWH-resoluci%C3%B3n-tecnolog%C3%ADa-contraste/dp/B0004ATF2Q/)

Amazon:

<https://www.amazon.es/AMD-5600-12-Thread-Unlocked-Processor/dp/B09VCHR1VH>

Amazon: <https://www.amazon.com/ZER-LON-GTX-1050-Ti-7680x4320/dp/B09KTMN3PK/>

- Disc SSD de 512 GB Crucial, cost de 37.99 €.
- Placa mare ASRock B450M-HDV, cost de 59.99 €⁴².
- Font d'alimentació Tacens Anima, cost de 17.9 €⁴³.
- Torre Nox Kore, cost de 31.99 €⁴⁴.
- Teclat Logitech, cost de 17 €⁴⁵.
- Ratolí Lenovo, cost de 8.99 €⁴⁶.

El preu total de l'ordinador, sumant el cost d'enviament, on podem esperar un total de 15 €, tenim el que el cost puja a 675.8 €. El temps de vida útil esperat són 6 anys, amb un ús de 7 mesos:

$$\text{Cost Ordinador} = \frac{675.8 \text{ €}}{6 \cdot 12 \text{ mesos}} \cdot 7 \text{ mesos} = \frac{675.8 \text{ €}}{72 \text{ mesos}} \cdot 7 \text{ mesos} = 65.66 \text{ €}$$

El portàtil es pot trobar a plataformes de segona mà per 216.22 €, les conseqüències d'aquest són una reducció de la seva vida útil, i també el cost de l'enviament, assumim un cost de 10 €. La vida útil esperada és de 2 anys, amb un ús de 7 mesos:

$$\text{Cost Portàtil} = \frac{226.22 \text{ €}}{2 \cdot 12 \text{ mesos}} \cdot 7 \text{ mesos} = \frac{226.22 \text{ €}}{24 \text{ mesos}} \cdot 7 \text{ mesos} = 65.14 \text{ €}$$

També cal incorporar el cost de l'escriptori, està per un preu de 39 €⁴⁷, afegim l'enviament de 9.9 €⁴⁸, total de 48.9 €. La vida útil esperada és de 15 anys, amb un ús de 7 mesos:

$$\text{Cost Escriptori} = \frac{48.9 \text{ €}}{15 \cdot 12 \text{ mesos}} \cdot 7 \text{ mesos} = \frac{48.9 \text{ €}}{180 \text{ mesos}} \cdot 7 \text{ mesos} = 1.9 \text{ €}$$

Pel que fa a la cadira, tenim el cost de 71.99 €⁴⁹, enviament per un cost de 10 €, puja a 82.99 €. La vida útil esperada és de 10 anys, amb un ús de 7 mesos:

$$\text{Cost Cadira} = \frac{82.99 \text{ €}}{10 \cdot 12 \text{ mesos}} \cdot 7 \text{ mesos} = \frac{82.99 \text{ €}}{120 \text{ mesos}} \cdot 7 \text{ mesos} = 4.83 \text{ €}$$

El desenvolupament pot ser plenament en programari lliure o de codi obert, el cost d'aquest és 0 €.

El cost total dels recursos tenim que és de **137.53 €**.

Amazon: <https://www.amazon.com/>

ASRock-B450M-HDV-R4-0-Promontory-Motherboard/dp/B07MWGKHR9?th=1

Amazon: <https://www.amazon.es/Tacens-APIII500-Alimentaci%C3%B3n-Tecnolog%C3%ADa-Ultra-silencioso/dp/B09V5G5R4G>

Amazon: <https://www.amazon.es/Nox-Kore-Ordenador-Torre-Color/dp/B012S146SK/>

Amazon: <https://www.amazon.com/Logitech-Wireless-Keyboard-K270-Long-Range/dp/B004N627KS/>

Amazon: <https://www.amazon.com/Lenovo-Wired-Computer-Laptop-Windows/dp/B0BXV1SZQ/?th=1>

Ikea: <https://www.ikea.com/es/en/p/lagkaptten-adils-desk-white-s29416758/>

Ikea: <https://www.ikea.com/es/en/customer-service/services/delivery/>

Amazon: <https://www.amazon.es/SONGMICS-Giratoria-Regulable-Inclinaci%C3%B3n-Transpirable/dp/B082PWGGMD?th=1>

Amazon: <https://www.amazon.es/SONGMICS-Giratoria-Regulable-Inclinaci%C3%B3n-Transpirable/dp/B082PWGGMD?th=1>

6.1.1.4 Cost d'espai de treball

A Manresa el lloguer es troba a 8.3 €/m²⁵⁰, si necessitem un espai de 9 m², tenim un total de 74.7 €/mes, si la utilització es troba en un total de 7 mesos, el preu final serà de **522.9 €**.

6.1.1.5 Costos genèrics totals

Recollint els resultats dels apartats anteriors, obtenim la següent distribució dels costos genèrics totals, on el cost més destacat es troba centralitzat en l'espai de treball:

Concepte	Cost (€)
Electricitat	103.53 €
Internet	223.30 €
Material i programari	137.53 €
Espai de treball	522.90 €
Total	987.26 €

Taula 2: Costos genèrics totals

Font: Elaboració pròpia.

6.1.2 Costos personals

Els rols del personal es divideixen, com hem comentat en l'apartat de planificació, en cap de projectes, programador, analista i redactor. Pel que fa al cas de programador, hi ha parts del desenvolupament que és necessari el coneixement mitjà/alt de l'entorn, així que els dividirem en programador júnior i sènior. Pel que fa al càrrec de redactor, quedarà repartit en els altres rols.

El salari mitjà anual brut de cada rol és: 36,000 € de director del projecte⁵¹, 39,000 €⁵² d'analista, 40,500 €⁵³ de programador sènior, 26,100 € de programador júnior. La distribució d'hores per tasca en cada un dels rols queda així (pàgina següent):

Idealista: <https://www.idealista.com/sala-de-prensa/informes-precio-vivienda/alquiler/cataluna/barcelona-provincia/manresa/>

InfoJobs: <https://salarios.infojobs.net/>

gestor-de-proyectos-de-tic-gestora-de-proyectos-de-tic/barcelona

InfoJobs: <https://salarios.infojobs.net/analista-de-software/barcelona>

InfoJobs: <https://salarios.infojobs.net/desarrollador-de-software/barcelona>

Id.	Cap de projectes	Analista	Programador sènior	Programador júnior
G1	20 h	15 h	—	—
G2	15 h	10 h	—	—
G3	15 h	10 h	—	—
G4	—	5 h	—	—
P1	10 h	5 h	—	—
P2	10 h	5 h	—	—
P3	15 h	10 h	—	—
P4	2 h	3 h	—	—
D1	—	5 h	13 h	32 h
D2	—	4 h	30 h	6 h
D3	—	3 h	7 h	20 h
D4	—	6 h	40 h	19 h
D5	—	3 h	17 h	10 h
D6	—	4 h	20 h	16 h
T1	1 h	14 h	5 h	5 h
T2	1 h	9 h	3 h	2 h
M	50 h	25 h	15 h	—
E	50 h	—	—	—
R	10 h	10 h	10 h	—
Total	199 h	146 h	160 h	110 h

Taula 3: Distribució temporal de les tasques*Font: Elaboració pròpia.*

El següent pas és calcular el cost del sou brut que s'ha de pagar a cada un dels treballadors, per fer-ho necessitem el cost d'hora, es considera que a Espanya es treballen 1900 h⁵⁴ anuals aproximadament, també tenir en compte que el cost per hora s'ha calculat així:

$$\text{Cost per Hora} = \frac{\text{Sou Brut Anual}}{\text{Hores Anuals}}$$

Rol	Cost per Hora (€/h)	Hores (h)	Cost total (€)
Cap de projectes	18.95 €/h	199 h	3,771.05 €
Analista	20.52 €/h	146 h	2,995.92 €
Programador sènior	21.31 €/h	160 h	3,409.60 €
Programador júnior	13.73 €/h	110 h	1,510.30 €
Total		615 h	11,686.87 €

Taula 4: Costos personals totals.*Font: Elaboració pròpia.*

Basant-nos en el total de cost calculat fins ara, encara ens queda aplicar sobre el sou brut: les contingències comunes (23.6%), prestacions per desocupació (5.5%), contingències professionals (3.5%), formació (0.6%) i a Fons de Garanties Socials (0.2%)⁵⁵.

$$\text{Contribucions} = 23.6\% + 5.5\% + 3.5\% + 0.6\% + 0.2\% = 33.4\%$$

$$\text{Total amb Contribucions} = 11,686.87 \text{ €} \cdot 1.334 = 15,581.13 \text{ €}$$

Així que el total amb les contribucions aplicades seria de **15,581.13 €**.

INE: https://www.ine.es/ss/Satellite?L=es_ES&c=INESeccion_C&cid=1259925463134&p=%5C&pagename=ProductosYServicios%2FPYSLayout¶m1=PYSDetalle¶m3=1259924822888

Personio: <https://www.personio.es/glosario/coste-de-trabajador-para-empresa/>

6.1.3 Cost de contingència

Les contingències són possibles problemes puntuals i dificultats que poden aparèixer durant el projecte, és important tenir-les en compte, per poder-les cobrir en cas que sorgeixin. Tot i estar ben planificat el projecte, considerem adequat destinar un 15% del pressupost a contingències, ja que està subjecte a l'evolució del desenvolupament, on es presenten més riscos.

$$\begin{aligned} \text{Cost Contingències} &= (\text{Cost}_{\text{Personal}} + \text{Cost}_{\text{Genèric}}) \cdot (\text{Contingència}) \\ &= (15,581.13 \text{ €} + 987.26 \text{ €}) \cdot 0.15 \\ &= \mathbf{2,485.26 \text{ €}} \end{aligned}$$

6.1.4 Cost d'imprevistos

Els possibles imprevistos que apareguin durant el projecte també poden incrementar el cost, alguns ja s'han valorat en apartats anteriors, per exemple, les possibles ampliacions en el desenvolupament.

Ens plantegem la següent enumeració de problemes:

- **Mal funcionaments d'ordinadors:** els possibles problemes relacionats amb mal funcionaments poden suposar una o en el pitjor dels casos dues coses:
 - *Renovació de l'equipament:* l'equipament es podria malmetre, en aquest cas, algun component de l'ordinador o el portàtil són els més probables, ho farem tenint en compte una probabilitat del 5% sobre els costos dels recursos materials (137.53 €).
 - *Pèrdua d'informació:* això suposaria hores extres haver de refer la feina ja feta. En la planificació del projecte, s'estableixen un seguiment de còpies de seguretat que farien l'endarreriment inferior a l'avanç de 20 h en les tasques.
- **Extensions del desenvolupament:**
 - *Importació de xarxes (D2):* creiem que aquesta part pot incrementar el seu temps de desenvolupament en unes 20 h del que s'estima.
 - *Vehicles (D4):* pel que fa als vehicles, el seu marge d'error és una mica superior, considerem unes possibles 30 h extres al seu desenvolupament.
 - *Eines d'anàlisi (D6):* l'increment en aquest cas és més petit, els possibles problemes s'esperen resoldre amb no més de 10 h sobre les esperades.
 - *Altres:* podrien aparèixer obstacles no valorats anteriorment, aquests els qualifiquem amb 50 h extres.

En base aquest llistat obtenim la següent taula de costos, on es troben centrats de forma general en els imprevistos de desenvolupament del sistema:

Imprevist	Probabilitat	Hores (h)	Cost per Hora (€/h)	Cost total (€)
Renovació equipament	5 %	—	—	6.88 €
Pèrdua d'informació	—	20 h	19 €/h	380.00 €
Importació de xarxes	—	20 h	20.09 €/h	401.80 €
Vehicles	—	30 h	19.08 €/h	572.40 €
Eines d'anàlisis	—	10 h	18.20 €/h	182.00 €
Altres	—	50 h	19 €/h	950.00 €
Total				2,493.08 €

Taula 5: Cost d'imprevistos

Font: Elaboració pròpia.

6.1.5 Cost total

Recopilant el total de costos de cada apartat obtenim el cost final estimat del projecte:

Concepte	Cost (€)
Costs genèrics	987.26 €
Costs personals	15,581.13 €
Costs de contingència	2,473.98 €
Costs d'imprevistos	2,493.08 €
Total	21,535.45 €

Taula 6: Cost total

Font: Elaboració pròpia.

6.2 Control de gestió

El seguiment dels costos identifica l'evolució de les despeses al llarg del projecte. Per fer-ho es mantindrà un recompte d'hores destinades a cada tasca, amb els càrrecs extra que poden suposar el seu manteniment. Aquestes s'aniran comparant amb els costos estimats per veure si segueix en línia de la previsió inicial.

Per valorar la desviació de la planificació inicial, veiem com el cost del projecte és definit principalment pel cost del personal, relacionat directament amb les hores destinades, és per això s'han valorat les hores extres que poden suposar diferents parts del desenvolupament.

En cas de trobar-nos endarrerits sobre la planificació caldrà fer valoració si s'ha de destinar més temps, ho sigui un cost econòmic per a compensar aquella tasca, o si caldrà fer una reestructuració d'alguna característica per guanyar temps.

Les desviacions es calcularan de la següent forma:

$$\text{Desviació Cost Genèric} = \text{Cost}_{\text{Estimat}} - \text{Cost}_{\text{Real}}$$

$$\text{Desviació Cost Personal} = (\text{Hores}_{\text{Estimades}} - \text{Hores}_{\text{Reals}}) \cdot \text{Cost Hora}$$

Aquests dos seran els indicadors de control i ens ajudaran a mantenir un seguiment del cost econòmic del projecte, supervisant les possibles desviacions que puguin aparèixer.

6.3 Cost final i desviacions

En aquest projecte s'han donat desviacions respecte al cost dedicat al desenvolupament, aquest cost s'ha degut a un temps afegit dedicat a àrees previstes inicialment, però també a ampliacions que s'han considerat positives per la seva millora, també un increment substancial pel que fa a redacció de la memòria.

Les àrees afectades del desenvolupament han estat: importació i guardat de xarxes, vehicles, eines d'anàlisi, detecció i correcció d'errors, aquí en veiem la desviació pel que fa a hores dedicades:

Tasca	Hores Estimades (h)	Hores Reals(h)
Importació de xarxes (D2)	40 h	55 h
Vehicles (D4)	60 h	90 h
Sistema de guardat (D5)	30 h	35 h
Eines d'anàlisi de guardat (D5)	40 h	55 h
Proves de funcionalitat (T1)	25 h	30 h
Proves de rendiment (T2)	15 h	20 h
Elaboració de la memòria (M)	90 h	120 h
Total	300 h	405 h

Taula 7: Desviació temporal de les tasques.

Font: Elaboració pròpia.

Això suposa un increment en les hores del personal i costos energètics, el temps final total del projecte és de 720 h, que queden repartides així entre el personal:

Rol	Cost per Hora (€/h)	Hores (h)	Cost total (€)
Cap de projectes	18.95 €/h	235 h	4,453.25 €
Analista	20.52 €/h	170 h	3,488.40 €
Programador sènior	21.31 €/h	185 h	3,942.35 €
Programador júnior	13.73 €/h	130 h	1,784.90 €
Total		720 h	13,668.90 €

Taula 8: Costos personals totals finals.

Font: Elaboració pròpia.

Aquest és el valor en brut, cal afegir les contribucions que suposen aproximadament un 33.4%, un cost total final de **18,234.31 €**.

Respecte a costos genèrics, tenim el cost elèctric on hem d'actualitzar les hores de consum en els aparells utilitzats:

$$Energia Llums (kWh) = 0.03 \text{ kW} \cdot 720 \text{ h} = 21.6 \text{ kWh}$$

$$Energia Ordinador (kWh) = 0.184 \text{ kW} \cdot 420 \text{ h} = 77.28 \text{ kWh}$$

$$Energia Portàtil (kWh) = 0.056 \text{ kW} \cdot 300 \text{ h} = 16.8 \text{ kWh}$$

$$Energia AC (kWh) = 0.75 \text{ kW} \cdot 235 \text{ h} = 176.25 \text{ kWh}$$

$$Cost Energia = 291.93 \text{ kWh} \cdot 0.114900 \frac{\text{€}}{\text{kWh}} = 33.54 \text{ €}$$

El cost que tindrem en total d'electricitat serà el cost energètic més el cost en potència, un total de 108.68 €, si sumem la resta de costos genèrics, tenim un cost total final de genèrics de **992.41 €**.

Si consultem els indicadors de control, veurem com hi ha una desviació del cost genèric de:

$$\text{Desviació Cost Genèric} = 987.26\text{€} - 992.41\text{€} = -5.15\text{€}$$

Amb una desviació respecte al cost de personal de:

$$\text{Desviació Cost Personal} = (620h - 720h) \cdot \text{Cost Hora} = -2,653.18\text{€}$$

Tot i que tenim desviacions negatives, ho sigui, que ens sobrepassem dels costos plantejats des d'un inici, s'havien destinat uns costos a contingències i imprevistos.

Finalment, el cost del projecte suma un total de 19,226.72 €, ho veiem en la taula següent:

Concepte	Cost (€)
Costs genèrics	992.41 €
Costs personals	18,234.31 €
Total	19,226.72 €

Taula 9: Cost total
Font: Elaboració pròpia.

Comparant-ho amb el pressupost fet inicialment, 21,535.45 €, el cost final està dins del nostre rang valorat en un principi, on la desviació màxima valorada era de 4,967.06 €, i la desviació final ha estat de 2,658.33 €.

7 Informe de sostenibilitat

En aquest apartat, es descriu l'anàlisi de sostenibilitat del projecte, on primerament, es farà l'autoavaluació, i posteriorment, es valoraran les dimensions econòmiques, ambientals i socials.

Aquest és un aspecte important, ja que ens aporta una avaluació de tres aspectes que comprenen l'impacte en la societat, d'acord amb el diagnòstic del projecte des del seu inici, planificació, desenvolupament, fins a la fi de la seva vida útil.

7.1 Autoavaluació

L'enquesta del projecte d'investigació EDINSOST2-ODS⁵⁶, m'ha permès fer una retrospectiva personal de multitud de conceptes, com són: coneixements generals, impacte ambiental, conseqüències de salut, seguretat, justícia, impacte social, mètodes de viabilitat econòmica, gestió de recursos, àmbit professional, interacció de processos, principis deontològics i de sostenibilitat.

Sobre aquests conceptes, pel que fa a l'impacte ambiental, penso que tinc un nivell alt de conscienciació, per això mostro intencionalitat d'utilitzar recursos i mètriques per avaluar-ho, però, en canvi, no mantinc un seguiment constant pel que fa a l'aplicació de les noves lleis i normatives que s'estan seguint.

Pel que fa a viabilitat econòmica, hi he donat força importància, penso que a causa de desconèxions pràctics el nivell és força millorable. D'altra banda, considero els costos que estan presents en un projecte els comprenc de forma bastant completa.

Respecte als impactes socials, no m'he trobat en projectes implicats a representar justícia, actuació, diversitat, drets, però, d'altra banda, mantinc un interès personal per la millora de les vides de les persones, alhora que tinc present que em fa falta donar més pes sobre aquests matisos.

7.2 Dimensió econòmica

Has estimat el cost de realització del projecte (recursos humans i materials)?

Si, s'han estimat tant costos humans com materials, això ha estat gràcies a una planificació prèvia de les tasques, que posteriorment ens ha permès estimar els recursos requerits.

Com es resol actualment el problema que vols afrontar?

Les eines comercials amb preus elevats acostumen a ser la solució. També, acostumen a ser difícils d'utilitzar, això incrementa el temps de formació i anàlisi, suposant un cost afegit.

En què millorarà econòmicament la teva solució en comparació a les existents?

Aquesta oferirà una base més moderna i fàcil d'utilitzar, que permetrà ràpidament

EDINSOST2-ODS: https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSfVgBxcxZfh7pB_OVRUNGQmRpFDFlhAskukNcpQBowLRF4-sA/viewform?usp=embed_facebook

importar, modificar, simular i analitzar les infraestructures de trànsit. S'enfoca principalment a reduir costos temporals, en base de facilitar l'ús i millorar el rendiment.

Has quantificat el cost humà i material de la realització del projecte?

Sí, s'han quantificat de forma exhaustiva i s'ha fet un seguiment durant el desenvolupament del treball.

Quines decisions has pres per reduir el cost?

S'han pres algunes decisions, però les reduccions en els costos no han estat significatives.

Has quantificat aquest estalvi?

No, ja que els estalvis no han estat rellevants en comparació els augments temporals en algunes tasques.

S'ha ajustat el cost previst amb el cost final?

Tot i que no s'ha produït una reducció sobre els costos del projecte, sí que no s'ha sobrepassat del pressupost total, incloent-hi imprevistos i contingències. Això ha estat gràcies l'enfocament i treball durant el transcurs del desenvolupament que ha permès valorar si s'anaven complint les dates establertes.

Has justificat les diferències?

Sí, s'han justificat les diferències, les quals han estat reduccions en els costos en quant a contingències i imprevistos dels esperats en la planificació inicial.

Quin cost estimes que tindrà el projecte durant la seva vida útil?

El cost és molt baix a excepció de què existissin errors greus o grans canvis de programari i maquinari. En cas que fos així, es valora que el cost en algunes poques hores a actualitzar la versió compilada als canvis d'arquitectura que hi hagi al mercat, nous sistemes operatius o per fer possibles correccions.

Es podria reduir aquest cost per fer-lo més viable?

Es valora que no, s'ha d'assegurar que el sistema és fiable i compatible abans de començar el seu període de vida útil, el qual es valora en un mínim de cinc anys, per tant, com que no hi ha cost afegit sobre el cost total al llarg d'aquests anys, no hi ha cap quantitat a reduir.

S'ha tingut en compte el cost dels canvis/actualitzacions/reparacions durant la vida útil del projecte?

Sí, s'han considerat, però no són representatives.

Podrien produir-se escenaris que perjudiquessin la viabilitat del projecte?

Sí, el mercat s'omplís d'altres productes que proporcionessin el mateix o més, o, per altra banda, el mercat fos ple o amb altre sistema ja establert. Algunes altres possibilitats és que es formés un canvi en l'arquitectura de xarxes de trànsit, o pel que fa a nivell informàtic, hi hagués grans canvis de programari o maquinari.

Has justificat les diferències?

Pensem que no aplica, ja que no són realistes les possibilitats que es produís un canvi així.

7.3 Dimensió ambiental

Has estimat l'impacte ambiental que tindrà la realització del projecte?

No al mateix nivell que el cost de realització econòmic, però s'ha valorat que la realització tindrà un consum elèctric, el qual majoritàriament prové de fonts d'energia no renovable⁵⁷. D'altra banda, el sistema que es proposa desenvolupar busca millorar l'eficiència no només de circulació, sinó també està lligat amb l'energia consumida i emissions dels vehicles.

T'has plantejat minimitzar l'impacte, per exemple, utilitzant recursos?

Si, l'objectiu no només és fer el projecte sinó finalitzar-lo en el temps establert, per això s'han valorat la utilització dels recursos. Un exemple és haver triat Unity, una eina que ja incorpora sistemes bàsics, la qual cosa evita haver de dedicar temps a desenvolupar aquestes parts i ens permet centrar en els sistemes del projecte. Per tant, això redueix el temps de desenvolupament i l'electricitat requerida.

Com es resolt actualment el problema que vols afrontar?

Les eines actuals fan la seva funció, permeten importar, modificar i simular les infraestructures de trànsit.

En què millorarà ambientalment la teva solució en comparació a les existents?

Busca millorar les capacitats de modificar les vies, per una millor iterabilitat, alhora que millora les capacitats per monitoritzar les xarxes, reduint temps i electricitat en el procés complet d'anàlisi d'una via. També es busca afegir mètriques d'impacte ambiental que en els altres sistemes actuals s'han deixat de banda.

Has quantificat l'impacte ambiental de la realització del projecte?

Sí, l'impacte de la realització es troba centralitzat en el consum energètic del projecte.

Quines mesures has pres per reduir l'impacte?

Utilitzar eficientment el temps del desenvolupament i redacció, amb un enfocament important de trobar un bon balanç de qualitat i retorn.

Has quantificat aquesta reducció?

No, no ha estat quantificada. En cas que ho fos, hi hauria un augment sobre el previst, per culpa de l'ampliació del temps dedicat al desenvolupament del projecte, aquest ha suposat un augment dels recursos utilitzats esperats.

Si fessis de nou el projecte, podries realitzar-lo amb menys recursos?

Sí, gràcies a l'experiència i coneixements adquirits, el projecte es podria realitzar amb menys recursos, pel que fa a dedicació de temps, i fins i tot aportar algunes millores.

Quins recursos estimes que es faran servir durant la vida útil del projecte?

Principalment, recursos energètics, en tractar-se d'un sistema executat digitalment, requereix electricitat per funcionar.

IEA: <https://www.iea.org/countries/spain>

Quin serà l'impacte ambiental d'aquests recursos?

L'impacte dependrà del nombre d'usuaris interessats i la quantitat de maquinari utilitzat per crear/computar/analitzar les infraestructures viàries, però depèn en gran magnitud de la procedència de l'energia elèctrica.

El projecte permetrà reduir l'ús d'altres recursos?

Sí, considerablement, aquesta és un dels grans impactes que pot tenir el projecte, gràcies al càlcul d'energia, combustibles i emissions, permet la valoració des d'un punt de vista mediambiental la creació o modificació d'infraestructures que s'adaptin a les necessitats del moment.

Un exemple, es valorar l'impacte de reducció d'una proporció de vehicles de combustió i la reducció d'emissions, però per altre veurà les implicacions energètiques i demanda elèctrica o d'hidrogen que necessitarien els vehicles.

Globalment, l'ús del projecte millorarà o empitjorarà la petjada ecològica?

Depèn de l'ús i les intencions de les persones encarregades d'avaluar el sistema o prendre les decisions finals. Podrien centralitzar els seus esforços en millorar el rendiment en l'àmbit de congestió o d'altres interessos, deixant de banda l'impacte ecològic i social que puguin tenir.

Però, sens dubte, les característiques del sistema desenvolupat donen suport a la millora de la petjada ecològica, i en el pitjor dels casos, l'impacte neutre o nul.

Podrien produir-se escenaris que fessin augmentar la petjada ecològica del projecte?

Sí, un possible escenari seria que el cost computacional de les simulacions i les seves avaluacions requerís una quantitat d'energia desorbitada, sense que això comportés una millora substancial energètica que en justifiqués l'ús.

7.4 Dimensió social

Que creus que t'aportarà al nivell personal la realització del projecte?

En l'àmbit individual, m'aporta una consolidació de conceptes i metodologies de treball adquirides durant la meva formació en el grau. Personalment, també presenta una continuació del desenvolupament en l'estudi de la mobilitat el qual sempre hi he dedicat interès.

Com es resolt actualment el problema que vols afrontar?

Les eines actuals no estan prou modernitzades i mai destaquen en tots els aspectes de l'anàlisi completa de les vies, afegint temps al disseny de noves estructures i sense un estudi prou detallat, reduint el possible efecte positiu.

En què millorarà socialment la teva solució en comparació a les existents?

L'impacte de millorar en els dos aspectes de la pregunta anterior, ajuda a tenir un procés de prototipatge i d'anàlisis més ràpid, per tant, el producte final arribarà a la societat més aviat, alhora que es podrà tenir una experimentació més acurada, ajudant a prendre una decisió més informada.

Existeix una necessitat real del projecte?

Personalment, penso que l'habilitat de trobar propòsit del projecte està vinculat a la fase de desenvolupament. Si aquesta fase se supera exitosament, es pot assolir un sistema potent, amb un propòsit i repercussió reals.

La realització d'aquest projecte ha implicat reflexions significatives a escala personal, professional o ètic de les persones que hi han intervingut?

Sí, per exemple, si únicament es té l'enfocament de la millora estrictament d'eficiència temporal pels vehicles, podrien resultar perjudicials, com un increment d'accidentalitat, de consum desproporcionat de recursos o reducció de la qualitat de vies dels altres usuaris com vianants o ciclistes.

Qui es beneficiarà de l'ús del projecte?

Els principals beneficiaris són les persones que utilitzen la infraestructura viària per desplaçar-se, ja que gaudiran d'una mobilitat més eficient. També, el projecte busca tenir un impacte positiu en el nostre planeta, promovent una millor qualitat d'aire i reduir la necessitat d'extreure recursos de manera agressiva.

Hi ha algun col·lectiu que es pot veure perjudicat en el projecte?

Sí, el sistema porta a decisions per la millora dels vehicles, però, per altra banda, pot descuidar la qualitat de la infraestructura per vianants o ciclistes, cal tenir-ho present per no obviar-los.

En quina mesura?

Aquesta mesura dependrà de les prioritats de les persones responsables d'executar el projecte. Si fan canvis o ampliacions a les vies on, en la creació del projecte no es fa cap mena de valoració per vianants o ciclistes, aquest dos es podrien quedar clarament apartats i en possibles desavantatges.

En quina mesura soluciona el projecte el problema plantejat inicialment?

Satisfactòriament, tot i que sempre hi ha marge per la millora, el sistema permet la construcció, modificació i iteració de xarxes, proporcionant suport a la presa de decisions orientades a optimitzar la circulació dels vehicles amb consideració de l'impacte ambiental.

Podrien produir-se escenaris que fessin que el projecte fos perjudicial per a algun segment particular de la població?

Sí, com ja s'ha explicat prèviament, depèn de com es prioritzen les necessitats en el desenvolupament i implementació del projecte. Per exemple, si l'objectiu principal és millorar la fluïdesa del trànsit motoritzat sense considerar les necessitats de vianants o ciclistes, aquests col·lectius podrien veure's perjudicats.

Podria crear el projecte algun tipus de dependència que deixes als usuaris en posició de debilitat?

No, el projecte actua com una eina de suport per a la presa de decisions, però no és imprescindible per dur a terme projectes d'infraestructures. Tot i això, sense el sistema, no hi hauria una forma objectiva d'avaluar els avantatges o inconvenients dels canvis proposats. L'alternativa seria recórrer a càlculs manuals o a un altre simulador similar.

8 De la realitat a l'entorn digital

Aquest apartat recull un seguit de decisions preses per aconseguir traslladar els entorns reals d'infraestructures de trànsit al sistema digital de forma fidel alhora que versàtil.

L'apartat queda dividit en dues fases, la identificació dels elements d'una infraestructura viària i posteriorment tractarem la seva caracterització dins del sistema, això ens ajudarà a tenir un desenvolupament estructurat, sòlid i ben documentat del nostre sistema.

Per dur a terme la planificació del sistema s'han consultat els següents llibres i articles:

- “*Traffic Flow Theory*” [1]. Llibre molt complet sobre l'explicació dels comportaments i les seves modelitzacions.
- “*The Physics of Traffic*” [2]. Tracta sobre l'aplicació de la física en la modelització d'un gran ventall d'aspectes de la simulació de trànsit.
- “*Fundamentals of Traffic Simulation*” [3]. Descripció de tècniques utilitzades en moltes de les eines de la indústria.
- “*Trends in Real-time Traffic Simulation*” [4]. Documentació de característiques dels sistemes de simulació actuals.

8.1 Identificació dels elements

Primerament, cal fer una anàlisi de quins són els principals actors de les infraestructures viàries. Observant la gran majoria de les vies, els actors es poden classificar en dues categories principals:

- **Escenari/entorn:** en aquest conjunt tenim la xarxa de trànsit i els elements de control, com els semàfors, la seva participació és més passiva i estàtica.
- **Actors/agents:** són aquells que es desplacen i es relacionen amb l'entorn d'una forma més activa, els principals són els vehicles, però també podem identificar els vianants.

8.2 Modelització dels elements

Seguidament, després d'identificar els elements principals que caracteritzen les infraestructures, cal precisar quin serà el mètode, les raons i adaptacions que s'ha seguit per modelitzar-los.

Abans, però, cal fer una introducció a les diferents possibilitats que hi ha a l'hora d'implementar un sistema de simulació de trànsit, els podem destacar en tres grans grups segons el tipus d'aproximació a l'hora de recrear el comportament del flux dels vehicles:

- **Macroscòpica:** la modelització es fa des del punt de vista de l'evolució espai, temps dels fluxos, que queden caracteritzats per volum, velocitat i densitat.

S'utilitzen mètodes numèrics similars a la simulació de fluids a causa dels seus paral·lels.

- **Microscòpica:** es descriu de forma individual cada vehicle, on cada un d'ells pren decisions en reacció del seu entorn. Aquesta aproximació permet arribar a un nivell molt més precís pel que fa a la modelització de fins al més mínim detall, aquesta és l'opció escollida per les eines vistes anteriorment: SUMO i PTV Vissim.
- **Mesoscòpica:** combina tècniques de les de metodologia macroscòpica i microscòpica, la idea és fer la simulació a partir de grups de vehicles i amb simplificacions sobre el seu comportament individual.

L'opció escollida en aquest sistema és la simulació microscòpica, la raó a favor de triar aquesta és principalment l'alta proximitat amb la realitat, que ens permet fer canvis focalitzats en l'àmbit dels vehicles, com per exemple comprovar canvis en les distribucions del tipus de vehicle, en els comportaments dels vehicles o els paràmetres de les vies.

D'acord amb això, les explicacions següents seguiran la direcció general de la modelització microscòpica de cada un dels elements.

8.2.1 Xarxes viàries

Si ens posem a observar un sistema de carreteres des de l'aire, la visió general que tenim és la d'estar observant un teixit, una interconnexió de multitud de punts, això ens recorda molt a la representació del concepte de grafs, amb algunes ampliacions per adaptar-se a la nostra casuística.



Figura 5: Visualització aèria de l'àrea de Barcelona.

Font: Elaboració pròpia.

Aquesta formalització de les vies a través de grafs és la més àmpliament utilitzada pels sistemes de simulació, cada una amb les seves modificacions. Això és degut al fet, que presenten una clara relació directa a la realitat i extensa modularitat.

8.2.1.1 Posicions

En primer lloc, les xarxes que volem representar es troben esteses en ubicacions d'arreu del planeta, és aquí on apareix la primera propietat que és important definir: els vèrtexs del graf contenen informació sobre les seves posicions en l'espai on es representen.

Cal fer notar que en tractar-se d'un planeta, les seves posicions estan projectades en una forma aproximadament esfèrica, ho sigui una superfície tancada, la qual implica un espai cíclic o no-euclidià, com el que podem trobar definit en “*Introduction to non-Euclidian geometry*” [5]. La modelització d'aquest tipus espai, tot i que interessant, es considera fora del marc del projecte, i per tant l'espai de representació serà el d'un espai no tancat i infinit.

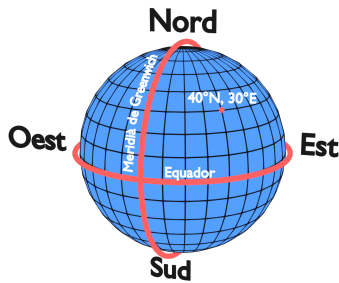


Figura 6: Visualització de coordenades sobre la Terra.
Font: Elaboració pròpia.

8.2.1.2 Connectivitat

Ja centrant-nos en escales més petites, cal observar que en qualsevol ciutat o poble les seves vies estan constituïdes per interseccions, bifurcacions i encreuaments. Aquestes zones representen la interconnexió entre diversos vèrtexs mitjançant arestes.

A més d'això, aquestes connexions també van seguides d'un ordre relatiu al vèrtex, establint vèrtexs precedents i posteriors, això es coneix com la direcció de les arestes.

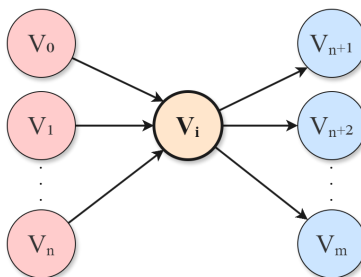


Figura 7: Connectivitat dels vèrtexs.
Font: Elaboració pròpia.

8.2.1.3 Corbes

Ampliant sobre les connexions en l'espai de representació, tenim que les carreteres presenten formes més complexes que simples rectes traçades entre els punts, per això és necessari fer una ampliació de la definició de la geometria de les arestes entre els punts.

La tècnica que s'ha escollit són les corbes Bèzier, les podem trobar definides en “*Defining a curve as a Bezier curve*” [6], on el seu autor original és en Pierre Étienne Bèzier, a continuació tenim l'explicació del seu funcionament i la seva aplicació en el nostre cas:

La primera ampliació necessària per calcular la forma d'aquestes corbes, és la utilització d'un conjunt de punts de control auxiliars P_0, P_1, \dots, P_n , on n és l'ordre de la corba, ja que n estableix el grau del polinomi per aconseguir la corba Bèzier.

Per entendre el seu funcionament, les equacions d'una corba Bèzier són equivalents a la utilització d'interpolacions entre els punts. La formalització de les interpolacions es pot expressar amb aquesta funció:

Algoritme 1 Interpolació lineal entre dos punts

Entrada: Punts P_0, P_1 , paràmetre $t \in [0, 1]$

Sortida: Punt interpolat P en el paràmetre t

- 1: **Funció** INTERPOLAR(P_0, P_1, t)
 - 2: **Retornar** $(1 - t) \cdot P_0 + t \cdot P_1$
 - 3: **Final Funció**
-

Donat dos punts i un paràmetre t entre 0 i 1, ens permet obtenir un punt P dins la línia que connecta P_0 i P_1 .

En base el valor de t , ens permet obtenir punts més pròxims a P_0 amb valors inferiors a 0.5, el contrari passa quan és més gran, llavors el punt P que obtenim és més pròxim a P_1 .

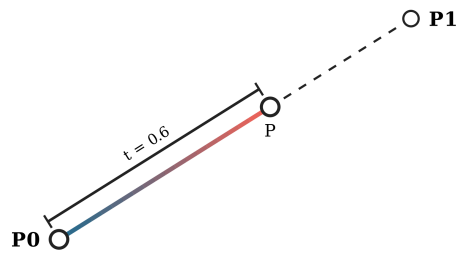


Figura 8: Representació d'interpolació entre dos punts.

Font: Elaboració pròpia.

Un cop definides les interpolacions fem servir el següent algoritme recursiu, conegut com De Casteljaou, per més detall consultar “*On de Casteljaou’s algorithm*” [7], originalment proposat pel matemàtic Paul de Casteljaou, aquest algorisme rep com a paràmetres el conjunt de punts $\{P_0, P_1, \dots, P_n\}$ i un número t entre 0 i 1. L'algoritme, de forma recursiva aplica a partir del paràmetre t un seguit d'interpolacions al conjunt de punts.

Per exemple, en la primera iteració aplica la interpolació de la següent forma:

$$\{\text{Interpolar}(P_0, P_1, t), \text{Interpolar}(P_1, P_2, t), \dots, \text{Interpolar}(P_{n-1}, P_n, t)\}$$

Aquest procés es repeteix fins a obtenir el punt final, aquest algoritme convergeix, ja que en cada iteració reduïm la mida del conjunt en una unitat.

Ho veiem representat en un conjunt de 4 punts. Pel nostre cas específic, P_0 i P_1 són vèrtexs del graf, H_0 i H_1 són punts auxiliars associats a l'aresta.

El conjunt de punts seria: $\{P_0, H_0, H_1, P_1\}$, i triem per exemple un valor de 0.6 pel paràmetre t .

Algoritme 2 Algoritme de De Casteljaou

```

1: Funció DECASTELJAU( $P, t$ )
2:   Entrada: Un conjunt de punts  $P = \{P_0, P_1, \dots, P_n\}$  i un valor  $t$  entre 0 i 1.
3:   Sortida: El punt resultant de la interpolació.
4:   Si mida( $P$ ) = 1 llavors
5:     Retornar  $P_0$                                 ▷ Si només queda un punt, retornem-lo
6:   Final Si
7:    $Q \leftarrow \emptyset$ 
8:   Per a i fins mida( $P$ ) - 2 fes
9:      $Q[i] \leftarrow \text{Interpolar}(P_i, P_{i+1}, t)$ 
10:  Final Per a
11:  Retornar DeCasteljau( $Q, t$ ) ▷ Crida recursiva amb el nou conjunt de punts
12: Final Funció

```

En les iteracions de l'algoritme avancen de la següent manera, aplicant recursivament interpolacions sobre el conjunt de punts:

$$\{\text{Interpolar}(P_0, H_0, 0.6), \text{Interpolar}(H_0, H_1, 0.6), \text{Interpolar}(H_1, P_1, 0.6)\} = \{A, B, C\}$$

$$\{\text{Interpolar}(A, B, 0.6), \text{Interpolar}(B, C, 0.6)\} = \{D, E\}$$

$$\{\text{Interpolar}(D, E, 0.6)\} = \{P\}$$

El resultat de l'última interpolació és el punt final P amb un t de 0.6.

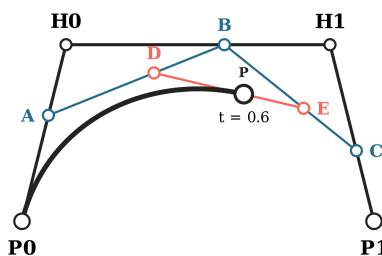


Figura 9: Representació de l'algoritme de De Casteljaou.

Font: Elaboració pròpia.

Així doncs, gràcies a l'algoritme de Casteljaou amb la utilització d'interpolacions podem aconseguir qualsevol punt dins de la corba Bézier formulada pel conjunt de punts.

En aquest moment, prenem la decisió d'utilitzar les corbes Bézier de grau tres o cúbiques, aquestes corbes generen dos punts auxiliars per cada aresta. Aquest grau específic ens permet tenir un control intuïtiu alhora que precís, per això mateix és el grau més àmpliament utilitzat per plataformes digitals.

En base això, transformem l'algoritme en la seva forma matemàtica, limitant la seva entrada a quatre punts: dos dels vèrtexs i els dos punts auxiliars de l'aresta. Donades aquestes restriccions que hem aplicat, serà possible passar de la forma recursiva a una simple equació.

Procedim doncs amb substitució de les funcions $\text{Interpolar}(C, t)$ per la seva forma matemàtica:

$$\begin{aligned}
\mathbf{A}(t) &= \text{Interpolar}(P_0, H_0, t) = (1-t)P_0 + tH_0, \\
\mathbf{B}(t) &= \text{Interpolar}(H_0, H_1, t) = (1-t)H_0 + tH_1, \\
\mathbf{C}(t) &= \text{Interpolar}(H_1, P_1, t) = (1-t)H_1 + tP_1, \\
\mathbf{D}(t) &= \text{Interpolar}(\mathbf{A}, \mathbf{B}, t) = (1-t)\mathbf{A} + t\mathbf{B}, \\
\mathbf{E}(t) &= \text{Interpolar}(\mathbf{B}, \mathbf{C}, t) = (1-t)\mathbf{B} + t\mathbf{C}, \\
\mathbf{P}(t) &= \text{Interpolar}(\mathbf{D}, \mathbf{E}, t) = (1-t)\mathbf{D} + t\mathbf{E}.
\end{aligned}$$

Si anem substituint el valor dels punts per les seves equacions en l'equació de $P(t)$, la fórmula que obtenim, ens mostra el punt segons els punts auxiliars i l'instant t :

$$\begin{aligned}
\mathbf{P}(t) &= P_0 \cdot (-t^3 + 3t^2 - 3t + 1) + \\
&\quad H_0 \cdot (3t^3 - 6t^2 + 3t) + \\
&\quad H_1 \cdot (-3t^3 + 3t^2) + \\
&\quad P_1 \cdot t^3
\end{aligned}$$

Aquesta forma rep el nom de polinomial de Bernstein, veure “*Bezier Curves and Surfaces Based on Modified Bernstein Polynomials*” [8] per més detalls, aquesta va ser formulada per Sergei Natanovich Bernstein, i serà la fórmula que utilitzarem per obtenir la geometria de les arestes. Ens expressa en cada instant de t , la suma ponderada dels pesos de cada un dels vectors dels punts, la suma dels pesos sempre suma 1.

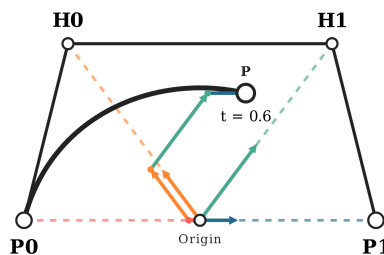


Figura 10: Representació de la suma ponderada.
Font: Elaboració pròpia.

En aquesta figura, veiem com tractem els punts com a vectors des de l'origen, aquests queden ponderats segons la seva equació en l'instant t , i igual que els altres algoritmes, la suma d'aquests ens retorna el punt esperat de la corba.

Si continuem simplificant, obtenim la fórmula utilitzada en la següent funció:

Algoritme 3 Calcular un punt en la corba Bézier cúbica

Input: Punts de control P_0, P_1, P_2, P_3 , paràmetre t

Output: Punt $P(t)$ en la corba

- 1: **Funció** PUNTBÉZIERCÚBIC(P_0, P_1, P_2, P_3, t)
 - 2: **Retornar** $(1-t)^3 P_0 + 3(1-t)^2 t P_1 + 3(1-t)t^2 P_2 + t^3 P_3$
 - 3: **Final Funció**
-

En relació amb la fórmula recursiva de Casteljau, aquesta implementació amb la incorporació del guardat d'algunes de les operacions, ens permet estalviar-nos més de la meitat de les operacions i ens serà útil per mantenir un òptim rendiment.

Amb tots aquests elements, ja tenim totes les eines que ens fa falta per assignar la forma de les nostres corbes, per fer-ho utilitzem el paràmetre p , que defineix el nombre de passos/subdivisions/punts que utilitzarem per generar la corba Bézier i quedaran connectats de forma consecutiva en la fase de la creació de la geometria.

Algoritme 4 Dibuir una corba Bézier cúbica

Entrada: Punts de control p_0, p_1, p_2, p_3 , renderitzador de línies *línia*, passos p

Sortida: Assignació a la línia els punts de la corba Bézier calculada

```

1: Funció DIBUIXARCORBA( $p_0, p_1, p_2, p_3, \text{línia}, n$ )
2:    $\text{punts} \leftarrow$  llista buida
3:   Per a  $i = 0$  fins  $p$  fes
4:      $t \leftarrow \frac{i}{n}$  ▷ Calcular  $t$  com una fracció dels passos
5:      $\text{punt} \leftarrow$  PUNTBÉZIERCÚBIC( $p_0, p_1, p_2, p_3, t$ )
6:      $\text{punts.afegir}(\text{punt})$ 
7:   Final Per a
8:    $\text{línia.punts} \leftarrow \text{punts}$ 
9: Final Funció
  
```

L'últim concepte que ens falta implementar és la geometria de les corbes, la línia que els connecta els punts té sempre certa amplada, una geometria i textures la qual ens permet visualitzar-la en pantalla.

El responsable d'aquest procés és Unity, que ens proporciona una component anomenat *LineRenderer*, el qual ens permet assignar els punts i l'amplada de la línia que els connecta. El component genera la geometria segons el llistat de punts i la dibuixa segons el material assignat.

En la següent figura podem veure representada una geometria similar a la que crea el motor:

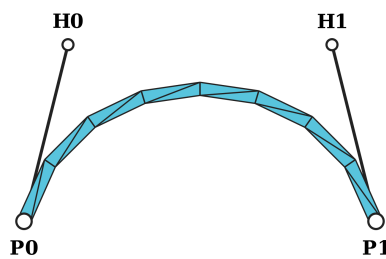


Figura 11: Representació de la geometria de les corbes.

Font: Elaboració pròpia.

Per computar aquesta geometria, s'acostuma a utilitzar el vector perpendicular entre els segments i el valor d'amplada de la corba, això permet generar els triangles de la malla.

En aquest procés, es fa una interpolació entre els vèrtexs resultants de l'extrapolació de la malla, això es fa per assegurar que els vèrtexs dels segments estableixen un punt comú intermedi per definir els seus triangles.

Ara sí, ja tenim totes les eines per a definir la curvatura de les carreteres amb gran detall i flexibilitat.

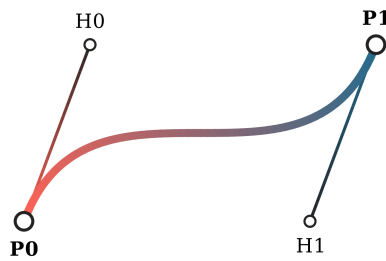


Figura 12: Representació d'una corba Bézier cúbica.
Font: Elaboració pròpia.

8.2.1.4 Velocitats

A diferents vies, diferents velocitats, per això que cal atribuir als trams que connecten els vèrtexs, les arestes, la velocitat màxima establerta aquell tram. Simplement, igual que en els punts auxiliars, les arestes contindran informació sobre la velocitat d'aquella via, aquesta informació serà utilitzada posteriorment pels vehicles durant la simulació.

8.2.1.5 Probabilitats

Com ja s'ha dit anteriorment, en les xarxes de trànsit trobem bifurcacions o punts en el que els vehicles decideixen per on segueix la seva ruta, no totes les opcions són igual de probables. Per tant, cada aresta també tindrà associada a ella una probabilitat de ser escollida.

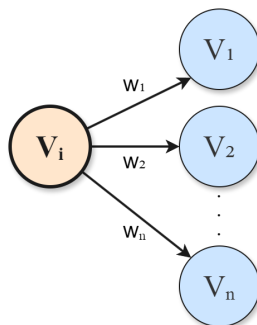


Figura 13: Probabilitat dels vèrtexs posteriors.
Font: Elaboració pròpia.

Cada aresta té definida una probabilitat de ser escollida, el conjunt d'arestes que tenen el d'origen el mateix vèrtex compleixen:

$$w_1 + w_2 + \dots + w_n = 1$$

Els valors de les probabilitats de les arestes verifiquen:

$$0 \leq w_i \leq 1$$

8.2.1.6 Preferències

En la modelització també és important poder indicar als vehicles l'ordre de preferència de les vies, així aquests poden decidir si són ells els que han de cedir o són

la resta de vehicles, això permetrà recrear incorporacions, rotondes i altres possibles situacions amb ple control.

De forma similar a casos anteriors, aquests valors queden definits en les arestes:

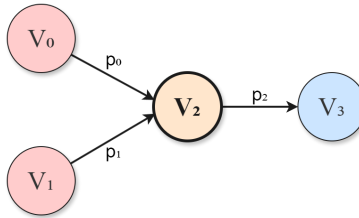


Figura 14: Preferència dels trams.
Font: Elaboració pròpia.

Les preferències ens ajuden a establir un ordre per qualsevol aresta, per exemple, si tenim un vehicle desplaçant-se del vèrtex v_0 al vèrtex v_2 , en el cas que el valor p_0 sigui inferior a p_1 haurà de cedir el pas a qualsevol vehicle que viatgi del vèrtex v_1 al vèrtex v_2 .

8.2.1.7 Propietats

Aquí tenim un recull important de les propietats que defineixen les xarxes, els vèrtexs i les arestes:

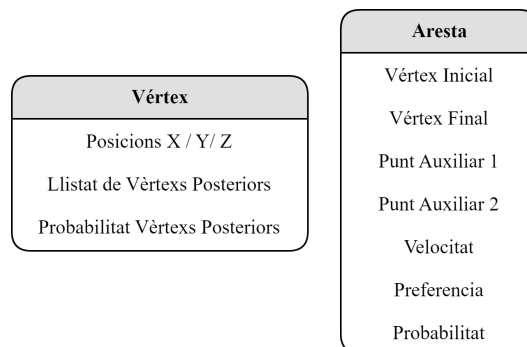


Figura 15: Resum de propietats dels vèrtexs i arestes.
Font: Elaboració pròpia.

8.2.1.8 Integració

Finalment, passem del marc teòric al desenvolupament amb les eines escollides, utilitzem *Sprites* per mostrar els punts i punts auxiliars dels vèrtexs, *LineRenderers* per mostrar la geometria de les arestes i *Colliders* per detectar possibles interaccions de l'usuari amb els punts.

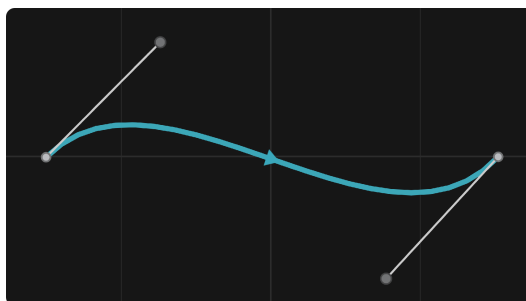


Figura 16: Edició de la xarxa dins el sistema.
Font: Elaboració pròpia.

Gràcies a poder crear i assignar materials personalitats, quan l'usuari finalitza l'edició de la infraestructura es pot visualitzar l'estructura amb un aspecte similar en què trobem en una carretera asfaltada:

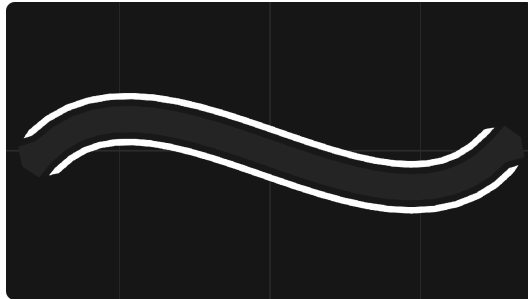


Figura 17: Visualització de la xarxa dins el sistema.

Font: Elaboració pròpia.

8.2.2 Elements de control

Pel que fa als elements de control que definirem seguidament, aquests estaran associats obligatòriament un punt, ho sigui, que compartiran les seves posicions i alguns altres dels paràmetres que els hi facin falta. Els elements defineixen propietats i comportaments especials als punts i permeten aplicar recrear situacions reals de trànsit, dins d'aquest grup tenim:

- Semàfors, regulació del pas de vehicles temporitzat.
- Passos de vianants, bloqueig de la via aleatori.
- Generadors, introdueixen els vehicles a la xarxa.
- Destructors, eliminen els vehicles de la xarxa.

8.2.2.1 Semàfors

Els semàfors són elements reguladors del trànsit que permeten controlar i cedir de forma intermitent el trànsit, cal fer notar que l'únic efecte que tenen sobre els vehicles és indicar quan estan obligats a frenar.

Ajuden a cedir de forma intermitent i segura els vehicles, especialment en interseccions, també fa que sigui possible una circulació més eficient en cas que hi hagi una bona sincronització entre el sistema de semàfors.

A més, els semàfors faciliten el pas segur dels vianants per les vies, evitant comportaments aleatoris i esgraonats. Això ens ajuda a aconseguir no només un trànsit més ordenat sinó també més segur per a tothom.



Figura 18: Semàfor en una via.

Font: El Nacional.cat

Estats

Els seus tres possibles estats principals són els següents:

- **Verd**, els vehicles segueixen el seu curs de forma normal.
- **Taronja**, els vehicles prenen la decisió de si hi ha prou temps per frenar abans d'arribar al semàfor.
- **Vermell**, els vehicles estan obligats parar fins que se'ls indica el contrari.

En tot moment, es tindrà accés a l'estat que es troba el semàfor perquè els vehicles puguin reaccionar correctament.

Durada

Els estats quedaran definits dins d'un interval de temps en el qual estaran actius:

- Δt_g : duració de l'estat verd.
- Δt_o : duració de l'estat taronja.
- Δt_r : duració de l'estat vermell.

Ordre

Aquests estats segueixen sempre un ordre cíclic i sense superposicions, començant per exemple pel verd, després sempre ve el taronja i posteriorment el vermell, finalment per tornar a començar el cycle, passem del vermell al verd:

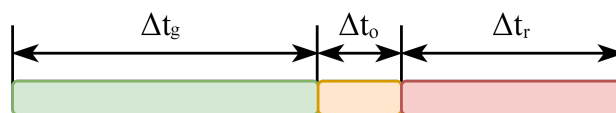


Figura 19: Duració i ordre dels estats d'un semàfor.

Font: Elaboració pròpia

Sobre aquests cicles s'afegeix la possibilitat d'aplicar un retard inicial (Δt_d), a més de poder seleccionar el seu estat inicial, això permet obtenir un control més elevat sobre el funcionament dels semàfors.

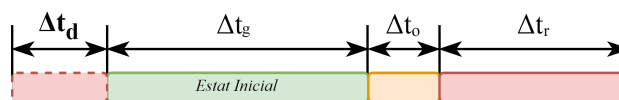


Figura 20: Estat i retard inicial.

Font: Elaboració pròpia

Sincronització

Com és freqüent en la realitat la majoria dels semàfors funcionen de forma sincronitzada entre ells, per això és d'ajuda afegir la capacitat dels semàfors de vincular-se els uns amb els altres en el sistema.

Si un semàfor està sincronitzat amb un altre, aquest copiarà els seus estats i qualsevol canvi que es faci en el semàfor vinculat serà compartit.

En definir aquesta sincronització també ens permet definir el contrari, l'estat complementari dels semàfors, quan el semàfor es troba en complementari complirà el

següent: si el semàfor es troba en verd o taronja, el semàfor complementari estarà en vermell, just passa el contrari amb el vermell.

En base això, també s'incorporen un seguit possibles modificacions sobre la vinculació, com un temps de seguretat, que redueix la durada de l'estat verd, aquests és fidel al que trobem a la realitat, ja que té en compte possibles cotxes que puguin travessar els semàfors al límit del vermell o anticipar-se al senyal verd i també es continua mantenint la possibilitat d'afegir un retard inicial.

Anem a veure un cas del procediment per programar un semàfor que es troba vinculat, comencem pel semàfor original:

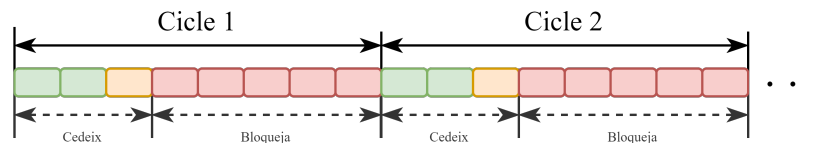


Figura 21: Estat original, exemple per programar un semàfor.

Font: Elaboració pròpia.

Les gràfiques a continuació són aplicades al semàfor vinculat, al qual apliquem l'operació complementària on ens quedarà aquesta seqüència:

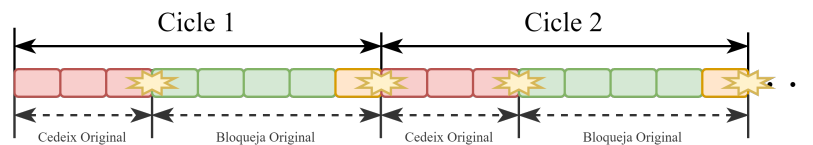


Figura 22: Estat complementari, programació de semàfors.

Font: Elaboració pròpia.

L'estat verd i taronja s'interpreta com a vermell, mentre que l'estat vermell s'interpreta com a verd i taronja. Aquest semàfor tot i que es correctament complementari, en la realitat podria comportar problemes, per exemple, imaginem el cas d'una intersecció, en què just abans que el semàfor canviï a vermell, un vehicle continua amb la seva trajectòria, i en l'instant següent el semàfor indica vermell i el complementari senyalitza verd, fent avançar els vehicles de les vies adjacents, bàsicament, la recepta perfecta per a un accident, sense haver considerat encara factors humans.

És per això mateix, que en el següent pas apliquem el temps de seguretat, el qual amplia el temps d'actuació de l'estat vermell (reduint en conseqüència els dos altres):

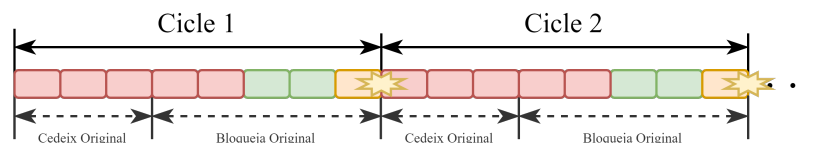


Figura 23: Estat complementari + temps de seguretat, programació de semàfors.

Font: Elaboració pròpia.

Ja quasi tenim el nostre semàfor correctament programat, la seqüència que tenim ara ens ajudarà a distanciar temporalment el canvi de semàfor verd a vermell del semàfor original, però no en el canvi de vermell a verd del semàfor vinculat.

Utilitzarem la meitat del temps que ens ofereix el temps de seguretat prèviament definit, això desplaçarà la seqüència a partir de la propietat retard:

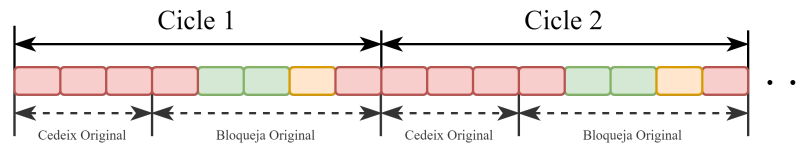


Figura 24: Estat complementari + temps de seguretat + retard, programació de semàfors.
Font: Elaboració pròpia.

Amb aquests canvis ja tindrem dos semàfors vinculats funcionant amb sintonia i de forma complementària, veiem com amb la vinculació, la complementarietat, el temps de seguretat i el retard podem reproduir encreuaments amb més facilitat i precisió.

Propietats

Seguidament, el recull de les propietats que defineixen els semàfors del sistema:

Semàfor
Duració Verd
Duració Taronja
Duració Vermell
Estat Inicial
Retard
Semàfor Associat
Retard de Seguretat
És Complementari

Figura 25: Resum de propietats dels semàfors.
Font: Elaboració pròpia.

Integració

Pel que fa a la implementació dins l'eina, utilitzem *Sprites* per mostrar les icones dels semàfors i *Colliders* per detectar les interaccions de l'usuari, visualitzem l'estat del semàfor canviant el color del *Sprite*:

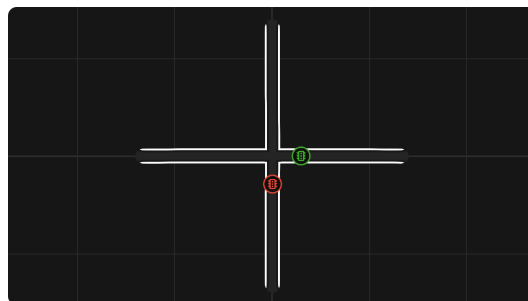


Figura 26: Visualització de semàfors dins el sistema.
Font: Elaboració pròpia.

8.2.2.2 Passos de Vianants

Pel que fa a la modelització dels vianants, s'ha optat per limitar el seu impacte únicament dins dels passos de vianants, això vol dir que no hi ha simulació de vianants en voreres, edificis..., la seva presència es limita simplement dins dels passos de vianants.

Per fer-ho, sabem que els vianants tenen un caràcter aleatori, mai se sap el temps exacte en el qual començaran a passar o deixaran de passar vianants, també depèn de la longitud del pas de vianants, de la quantitat dels vianants que passen al mateix temps, de la seva velocitat i quan apareixen per començar a travessar-lo.



Figura 27: Pas de vianants en una via.

Font: Diari de Rubí

Per mantenir un comportament fidel aquesta variabilitat es presenten els següents paràmetres per aconseguir-ho:

Intervals

Definirem el mínim i el màxim temps possible en què els passos de vianants estan buits, també definirem el mínim i el màxim temps possible en què hi ha vianants travessant el pas.

Com és coherent la durada d'aquests intervals de temps seran escollits de forma aleatòria entre els mínims i màxims establerts, i actuaran de forma complementària, després de passar per l'estat de pas de vianants buit, passarà de nou a l'estat de vianant creuant sense superposicions.

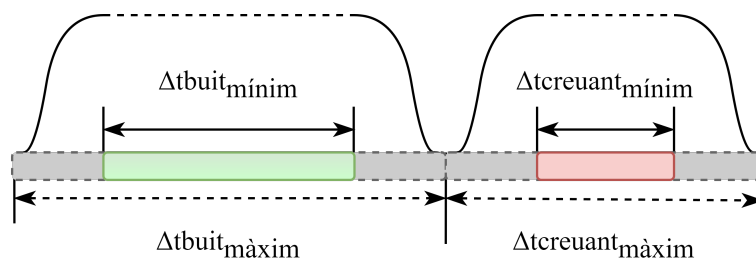


Figura 28: Duració i estats d'un pas de vianants.

Font: Elaboració pròpia.

Aleatorietat

Hi ha diferents formes de triar un valor aleatori, aquestes ens serviran per adaptar-se a diferents formes de comportament d'un pas de vianants, per aquesta raó definim l'aleatorietat d'intervals amb diferents distribucions a escollir.

Per fer-ho utilitzem algunes de les definicions del llibre següent “*Introduction to probability models*” [9], i que han resultat útils per definir les distribucions exponencial i normal.

Així doncs, adaptem els valors originals obtinguts dins de l'interval: $[0, 1]$ per transformar-los dins de l'interval amb les distribucions desitjades:

- **Uniforme**, la més directa, la probabilitat d'escollir un valor és la mateixa per a tots els valors que es troben dins de l'interval.

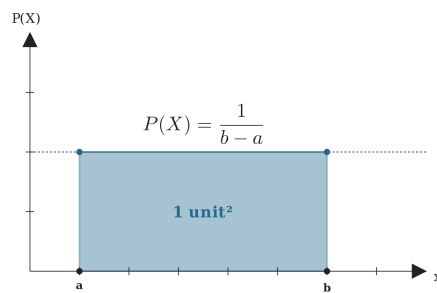


Figura 29: Representació de la distribució de probabilitat uniforme.
Font: Elaboració pròpia.

- **Normal**, o gaussiana, aquesta concentra els valors en base la mitjana i la desviació de forma simètrica.

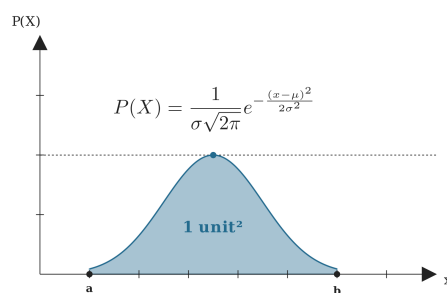


Figura 30: Representació de la distribució de probabilitat normal.
Font: Elaboració pròpia.

- **Exponencial**, els valors més pròxims al mínim són els més probables i la probabilitat de valors més grans cau exponencialment, es calcula d'acord amb el paràmetre lambda.

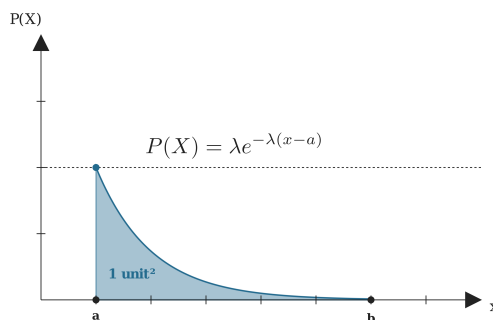


Figura 31: Representació de la distribució de probabilitat exponencial.
Font: Elaboració pròpia.

- **Exponencial Inversa**, al contrari de l'exponencial els més probables són els valors que es troben prop del màxim.

Sincronització

De forma similar als semàfors, els passos de vianants poden estar regulats per semàfors, és per això que es permet fer aquests pas, per la còpia exacta de l'estat del semàfor.

La còpia és exacta, ja que els protagonistes de la simulació són els vehicles, i no els vianants, en cas d'afegir vianants seria necessari introduir la interpretació inversa des de la seva perspectiva.

Per ser més clars, els passos de vianants copiaran l'estat del semàfor, això vol dir que si el semàfor està en vermell, se simularà el pas d'un vianant. Això és necessari, ja que quan un semàfor està en vermell, els cotxes no poden travessar, el que és paral·lel en un pas de vianants, és que hi estiguin creuant persones.

D'aquesta forma podem distingir els passos de vianants dels passos de vianants amb semàfors i compartir el comportament amb el del semàfor vinculat.

Propietats

Seguidament, tenim el recull de propietats, tant dels intervals, com la distribució que utilitza el pas de vianants.

Pas de Vianants
Màxim Interval Buit
Mínim Interval Buit
Màxim Interval Creuant
Mínim Interval Creuant
Distribució

Figura 32: Resum de propietats dels passos de vianants.
Font: Elaboració pròpia.

Integració

Pel que fa a la implementació dins l'eina, utilitzem *Sprites* per mostrar les icones dels semàfors i *Colliders* per detectar les interaccions de l'usuari, visualitzem l'estat del pas de vianants canviant el color del *Sprite*:

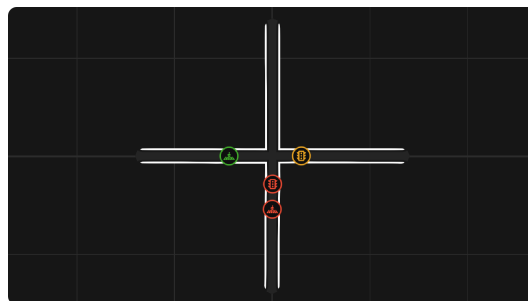


Figura 33: Visualització de passos de vianants dins el sistema.
Font: Elaboració pròpia.

8.2.3 Generadors

Els generadors són els elements que permeten introduir els vehicles dins la xarxa, aquests es trobaran sovint a la perifèria d'on està delimitada la xarxa i faran possible la definició del flux d'entrada des dels punts on es troben definits.

Els fluxos determinen el nombre de vehicles que apareixen per unitat de temps, aquest valor és variable al llarg del dia, és per això que a més d'utilitzar el seu valor, s'utilitza el multiplicador de l'escala global d'aquesta manera:

$$\text{Flux de Vehicles}(t) = \text{Flux Individual} \cdot \text{Multiplicador Global}(t)$$

Pel que fa al multiplicador global es pot definir de forma cíclica amb un seguit de multiplicadors al llarg del dia:

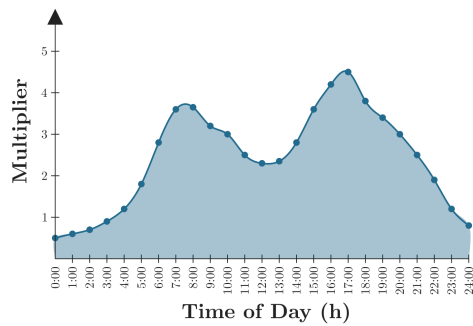


Figura 34: Distribució de vehicles al llarg del dia.
Font: Elaboració pròpia.

8.2.3.1 Propietats

El recull de propietats que definim pels generadors és simplement el flux de vehicles:

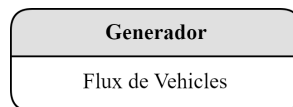


Figura 35: Resum de propietats dels generadors.
Font: Elaboració pròpia.

8.2.3.2 Integració

Pel que fa a la implementació dins l'eina, utilitzem *Sprites* per mostrar les icones dels semàfors i *Colliders* per detectar les interaccions de l'usuari:

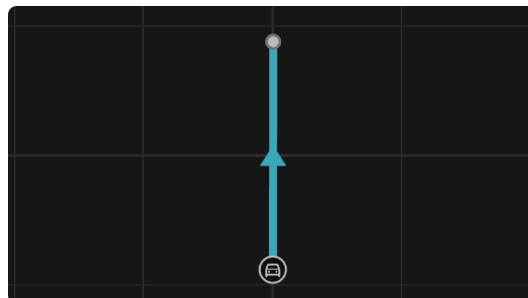


Figura 36: Visualització dels generadors dins el sistema.
Font: Elaboració pròpia.

8.2.4 Destructors

A la via trobem tres tipus de vèrtexs, vèrtexs inicials, els quals tenen vèrtexs posteriors, vèrtexs intermedis, els que tenen precedents i posteriors, finalment vèrtexs finals, els que només tenen vèrtexs precedents.

Aquests últims actuaran de forma automàtica com a destructors, això vol dir que quan arribin vehicles aquesta destinació, els vehicles seran eliminats de la simulació.

La raó de no estar representats es deu al soroll visual que podria provocar indicar tots els punts finals de forma visual, a més de la inherent intuïció de ser punts finals de via i, per tant, on els vehicles surten/desapareixen del sistema simulat.

8.2.5 Vehicles

En últim lloc, tenim els vehicles, aquests són els agents que actuen de forma dinàmica sobre el sistema, són els elements que posaran a prova la infraestructura.



Figura 37: Vehicles en una via.

Font: El Nacional.cat

Seguidament, està descrita la modelització de les característiques necessàries per implementar-los en el sistema:

8.2.5.1 Classe

En les vies podem trobar diversos tipus de vehicles, cada un d'aquest compleix amb condicions específiques, tot i això, aquí tenim generalitzades algunes de les classes en el sistema:

- **Motos**, àgils amb capacitat per a un màxim de dues persones i poca càrrega.
- **Cotxes**, vehicles majoritàriament amb capacitat de 4 a 5 persones, càrrega moderada.
- **Furgonetes**, amb capacitat per a 2 o 3 persones, amb càrrega elevada i menor maniobrabilitat.
- **Autobusos**, capacitat per a 30 a 100 persones, càrrega, mida elevades i maniobrabilitat baixa.
- **Camions**, sovint amb un sol ocupant, dissenyats per transportar càrregues molt elevades i maniobrabilitat baixa.

8.2.5.2 Dimensions

Com es d'esperar, un vehicle ocupa un espai a la via, aquest espai depèn clarament de la classe de vehicle, les motos són els que ocupen menys, mentre que els camions o els autobusos poden suposar un gran cost en dimensions.

En el cas del sistema, en aquest cas farem ús especialment de la longitud, aquesta dimensió és la que té més impacte en la capacitat de les vies i les distàncies de seguretat.

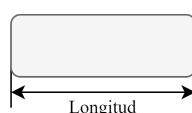


Figura 38: Dimensions del vehicle.

Font: Elaboració pròpia.

8.2.5.3 Posició

Igual que en els vèrtexs, els vehicles contindran informació sobre les seves posicions, aquesta posició com és evident es veurà reflectida contínuament al llarg del seu desplaçament en pantalla.

Tot i que tenim accés als 3 components, farem servir en la majoria dels casos només les coordenades del pla on es representa la via, en el nostre cas els eixos x i y .

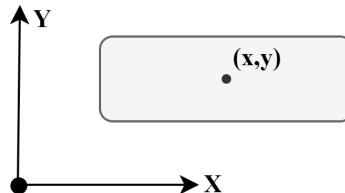


Figura 39: Posició del vehicle.

Font: Elaboració pròpia.

8.2.5.4 Rotació

Els vehicles sempre tindran una rotació, aquesta serà la direcció en què avançaran, això els permetrà canviar la direcció i adaptar-se a les trajectòries a seguir.

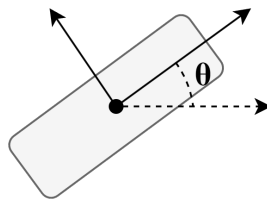


Figura 40: Rotació del vehicle.

Font: Elaboració pròpia.

De manera similar a les posicions, tot i que tenim accés a les 3 components, farem servir en la majoria dels casos només l'angle format pels eixos x i y , l'angle θ .

8.2.5.5 Velocitat

Cada vehicle tindrà una velocitat en la qual es desplaçarà, que pot ser zero, on el cotxe està estàtic, o pot ser més gran a zero, en aquest cas es desplaçarà amb relació a la velocitat d'aquell instant.

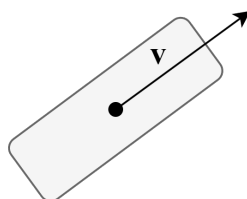


Figura 41: Velocitat del vehicle.

Font: Elaboració pròpia.

8.2.5.6 Medi

El desplaçament dels vehicles sempre estarà comprès dins l'espai del graf, o sigui, dins de les posicions dels vèrtexs i la geometria de les corbes Bézier definides anteriorment.

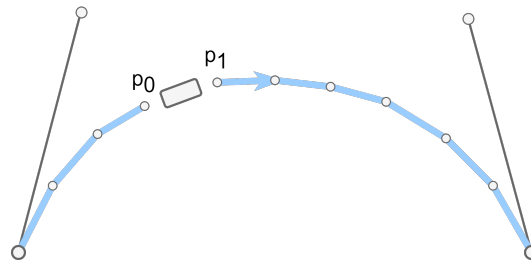


Figura 42: Medi del vehicle.
Font: Elaboració pròpia.

De forma aproximada les trajectòries aniran de punt origen a destí a partir de les línies rectes que uneixen els punts.

8.2.5.7 Informació de l'entorn

Els vehicles guien el seu comportament d'acord amb informació obtinguda de l'entorn, aquesta informació s'obté a partir dels punts que es recorren:

- Un cop el vehicle arriba a un punt, aquest ens diu quin és el següent punt de destí a seguir, on aquest punt s'obté a partir de les distribucions de probabilitat descrites anteriorment. Fet això, ja està determinat el tram (aresta) que recorrem, per tant, agafem els valors assignats de velocitat i preferència, també es retorna el següent de punts que la conformen i els vehicles han de seguir, aquests serien els valors més destacables relacionats directament amb els punts.
- Altra informació també continguda en els punts són els elements de control, tant passos de vianant com semàfors vinculats als punts, faran possible la detecció de les senyalitzacions i del correcte comportament dels vehicles.
- Finalment, l'altre conjunt d'informació a destacar dels punts, és el seguiment de quins vehicles es troben a cada tram, això permet als vehicles fer consultes sobre possibles vehicles que es poden trobar.

Aquest subministrament es retroalimenta un cop s'arriba al següent punt destí i es repeteix fins a arribar a un vèrtex terminal, en el qual el vehicle és destruït.

8.2.5.8 Desplaçament

El seu desplaçament dins dels medis està subjecte a les condicions següents:

- **Propietats de la via**, la velocitat límit i la preferència especificada dels trams.
- **Elements de control**, l'estat en el qual es troben passos de vianants i semàfors.
- **Altres vehicles**, vehicles que es trobin en la mateixa via o vies adjacents.
- **Condicions del vehicle**, algunes a destacar són el tipus de vehicle, el pes, l'acceleració i la desacceleració.

- **Estat actual del vehicle**, propietats dinàmiques com la posició, velocitat i rotació.

Entrem en una mica més de detall en com els vehicles seguiran les seves trajectòries al llarg de les vies:

Primer de tot cal una petita introducció al funcionament de la simulació, el funcionament d'aquesta està dividit en passos, els passos són els moments en què es calculen les interaccions/comportaments en el sistema i provoca l'actualització de valors, com ara les posicions, rotacions, estats dels semàfors.

Cada pas està associat a un interval de temps, el qual determina el temps transcorregut entre una actualització i l'altra. Aquest interval és important perquè permet calcular la durada en què tenen lloc els comportaments, en direm Δt .

Com es desplaça el vehicle i com sap calcula la següent posició?

La informació de la qual disposa el vehicle és la següent: la posició actual del vehicle, la velocitat, la direcció en la qual està mirant i l'interval de temps.

Dos d'aquests valors són variables entre intervals de temps, un d'ells és la velocitat, que s'obté d'aquesta relació entre l'interval de temps i acceleració (o desacceleració) en cas de frenada:

$$v_f = v_0 + a \cdot t$$

L'altre valor que presenta canvis és la rotació del vehicle:

$$\theta_f = \theta_0 + \Delta t \cdot w \cdot (\theta_{objectiu} - \theta_0)$$

On tenim $\theta_{objectiu}$, l'angle que formen la posició del vehicle i el punt objectiu, pel que fa a w , aquesta és la velocitat de rotació (angular).

Finalment, amb la posició inicial, la velocitat i la direcció (associades a un interval de temps), per tant, podem calcular el canvi de posició o desplaçament mitjançant la fórmula següent:

$$\mathbf{P}_{final} = \mathbf{P}_{inicial} + v \cdot \begin{bmatrix} \cos(\theta) \\ \sin(\theta) \end{bmatrix} \cdot \Delta t$$

Aquí veiem representat un exemple de les conseqüències del càlcul entre passos, el desplaçament dels vehicles:

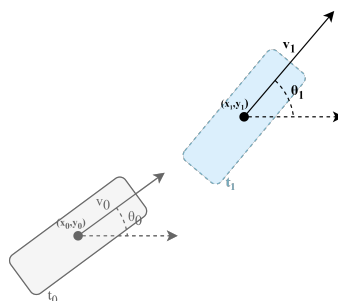


Figura 43: Desplaçament del vehicle.
Font: Elaboració pròpia.

Com funciona el desplaçament entre punts i la detecció?

Com ja s'ha descrit abans, el vehicle es desplaça per un medi, resultant dels càlculs dels punts de la corba Bézier, el vehicle va viatjant entre aquests punts calculats fins a assolir el punt final.

Per calcular la direcció de gir $\theta_{objectiu}$ utilitzada abans, fem el següent:

$$\theta_f = \arctan \frac{y_{objectiu} - y_0}{x_{objectiu} - x_0}$$

Si el vehicle es troba a una distància inferior a la distància mínima respecte al punt objectiu, un cop assolit aquest llindar es fan les operacions necessàries com si el vehicle hagués arribat al punt.

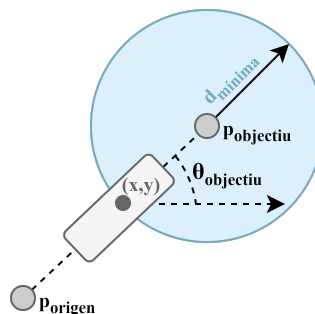


Figura 44: Detecció de la proximitat de punts del vehicle.

Font: Elaboració pròpia.

Aquesta implementació és necessària, ja que seria inviable aproximar la posició del vehicle distància zero, això és degut als intervals de temps entre passos i velocitats.

Què passa quan un vehicle assoleix el punt final de la corba?

Dues opcions, no té més punts a seguir i és esborrat del sistema, o de forma alternativa, si el punt final conté punts posteriors, d'acord amb les distribucions definides, defineix quin és el seu següent punt a seguir i s'actualitza la velocitat d'acord amb el tram en què circula el vehicle.

Incorporades les característiques anteriors, els vehicles són capaços de circular pel sistema segons les restriccions de les propietats dels vèrtexs i les seves connexions.

Aquestes no seran suficients, ja que els vehicles han de ser capaços de reaccionar a elements de control com els semàfors o els passos de vianants, i també, molt important, als altres vehicles de la via.

La resolució de les situacions següents es fan des d'un punt de vista únicament de frenat, el vehicle es preguntarà si és necessari frenar, en cas contrari, el vehicle accelera fins a la velocitat màxima de la via.

Per resoldre aquests casos de frenat utilitzarem recurrentment alguns paràmetres:

- **Longitud del vehicle**, com el nom indica utilitzarà a la llargada del vehicle, on aquesta dependrà del tipus de vehicle i ens permetrà establir les distàncies respecte als altres elements de l'entorn (m).

- **Distància de separació**, aquesta distància és la mateixa per tots els vehicles, afegeix una longitud afegida per evitar el contacte directe entre vehicles (m).
- **Velocitat del vehicle**, depenent de la seva velocitat fa falta incrementar o disminuir les distàncies (m/s).
- **Desacceleració del vehicle**, la capacitat del vehicle per reduir la velocitat, permet valorar si situar-se més a prop o lluny dels elements de control (m/s^2).

També cal clarificar com funciona la detecció dels elements i agents de la via, per mantenir el seguiment el que es fa és guardar els vehicles que es troben en una via en el moment que entren en el tram, i en el moment que desapareixen són esborrats del seguiment d'aquella via, pel que fa als elements estàtics són guardats en el vèrtex que estan vinculats.

Ho veiem explicat en el següent exemple:

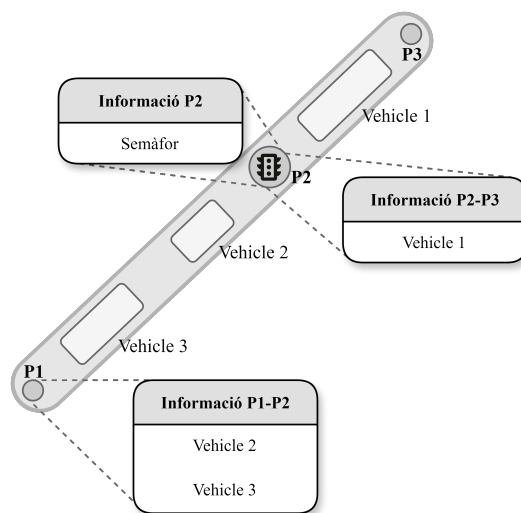


Figura 45: Informació dels vèrtexs i arestes dels elements de la via.
Font: Elaboració pròpia.

En la connexió entre $P1 - P2$, conté la referència del *Vehicle2* i *Vehicle3*, el punt $P2$ conté la referència del semàfor, i la connexió $P2 - P3$ la referència al *Vehicle1*.

D'aquesta manera tenim referència del contingut d'agents i elements en els trams de la via de forma dinàmica, gràcies a això, un vehicle pot fer una exploració dels trams posteriors per reaccionar als obstacles futurs i exploració de trams anteriors per valorar la incorporació del vehicle en una via.

Comencem per la resolució dels passos de vianants, aquest és el cas més simple, la pregunta que es faran els vehicles constantment és: S'ha de frenar?

Aquesta pregunta la formularem a partir de comparació de la distància, veure “*Euclidean distance geometry*” [10], entre el vehicle i el pas de vianants, l'anomenarem $d_{pasVianants}$, i la distància necessària per frenar del vehicle d_{stop} , la primera l'obtenim així:

$$d_{pasVianants} = \sqrt{(x_{pasVianants} - x_{vehicle})^2 + (y_{pasVianants} - y_{vehicle})^2}$$

Seguidament, els càlculs de la distància per frenar:

Volem obtenir una fórmula que donada la velocitat del vehicle i la seva desacceleració de frenat, ens retorni la distància necessària per frenar fins a aturar-se, això ens permetrà fer comparacions directes.

- Partim de l'equació de moviment rectilini uniformement accelerat (MRUA), consultar “*Graphical Analysis and Equations of Uniformly Accelerated Motion-A Unified Approach*” [11] per entendre les definicions, bàsiques en mecànica clàssica:

$$x(t) = x_0 + v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$$

- El nostre objectiu és eliminar el temps d'aquesta forma i quedar-nos la distància, una de les fórmules que podem utilitzar per substituir t és la relació entre velocitat i acceleració:

$$v_f = v_0 + a \cdot t$$

On podem aïllar la variable t :

$$t = \frac{v_f - v_0}{a}$$

- Ara ens toca substituir l'equació anterior en la fórmula del MRUA:

$$x = x_0 + v_0 \cdot \frac{v_f - v_0}{a} + \frac{1}{2} \cdot a \cdot \left(\frac{v_f - v_0}{a} \right)^2$$

- Operem i simplifiquem:

$$x = x_0 + \frac{v_0 v_f - v_0^2}{a} + \frac{1}{2} \cdot a \cdot \left(\frac{v_f^2 - 2v_0 v_f + v_0^2}{a^2} \right)$$

- Continuem operant:

$$x = x_0 + \frac{2 \cdot (v_0 v_f - v_0^2) + (v_f^2 - 2v_0 v_f + v_0^2)}{2a}$$

- Operarem i simplifiquem:

$$x = x_0 + \frac{v_f^2 - v_0^2}{2a}$$

- Arribats aquest punt hem de fer dues consideracions, la primera, la velocitat final és zero ($v_f = 0$), ja que volem calcular el temps necessari fins a tenir el vehicle frenat del tot:

$$x = x_0 + \frac{-v_0^2}{2a}$$

Segon, la posició inicial és la mateixa posició del vehicle, per tant, la podem considerar zero ($x_0 = 0$), això fa possible també la interpretació de x com una distància respecte al vehicle:

$$x = \frac{-v_0^2}{2a}$$

Tot i que ja tenim les dues distàncies, cal aplicar les dimensions del vehicle i la distància de separació mínima sobre la distància de frenat, aquestes longituds seran

considerades com a necessàries perquè el vehicle freni:

$$d_{stop} = \frac{-v^2}{2a} + \frac{longitudVehicle}{2} + distanciaSeparació$$

Si no es tinguessin en compte, no es deixarien uns mínims marges de separació i tampoc es tindrà en compte la part frontal del vehicle respecte al seu origen.

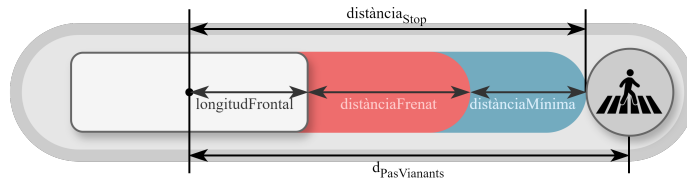


Figura 46: Distància de frenat del vehicle respecte a un pas de vianants.
Font: Elaboració pròpia.

Finalment, podem fer la comparació de les dues distàncies, si la distància del pas de vianants és inferior a la distància per frenar i un vianant està creuant el vehicle accionarà el pedal de fre:

$$activarFre = d_{pasVianants} < d_{stop}$$

Anem ara a veure un cas molt similar, els semàfors, en el qual es fan els mateixos càlculs, però en cas de trobar el semàfor en taronja i no existir suficient distància per frenar, aquests continuaran el seu trajecte.

Pel que fa al càlcul de la distància del semàfor és paral·lela a la dels passos de vianants:

$$d_{semàfor} = \sqrt{(x_{semàfor} - x_{vehicle})^2 + (y_{semàfor} - y_{vehicle})^2}$$

La distància de frenada no canvia segons l'element de control, per tant, d_{stop} es calcula igual en aquest, i tots els casos. La condició per activar el fre en el cas dels semàfors en estat vermell:

$$activarFre = d_{semàfor} < d_{stop}$$

Si l'estat és taronja, i la distància del semàfor és considerablement menor a la de frenat es deixa el vehicle continuar. La raó és que no seria segur frenar sí en aquell moment passes a vermell el semàfor:

$$activarFre = d_{semàfor} + d_{seguretat} < d_{stop}$$

La següent part que necessita la nostra atenció és la frenada en cas de trobar altres vehicles en la via i reaccionar de forma efectiva:

Per fer-ho hem de tenir en compte la distància relativa al vehicle de davant, la qual ha de ser de mínim la longitud frontal del nostre vehicle, la longitud posterior del

vehicle del davant i una distància de separació mínima.

$$d_{vehicleDavant} = \frac{longitudVehicle}{2} + \frac{longitudVehicleDavant}{2} + distànciaSeparació$$

Amb això ja ho tindríem, però cal tenir en compte el següent: si dos vehicles viatgen a la mateixa velocitat en fila i el vehicle de davant frena, immediatament el marge de distància serà inferior el mínim i el cotxe anterior frenarà.

Això sempre ens funcionaria on els dos vehicles comparteixen el mateix marc inercial, ho sigui, que les seves velocitats siguin idèntiques, amb el petit detall que també han de compartir la mateixa desacceleració en les frenades.

El que podem extreure de tot això és el següent, s'ha de mantenir un equilibri entre la distància de frenat del vehicle i el vehicle de davant, ja que si el vehicle de davant pot reduir la seva velocitat significativament més ràpidament, el vehicle que el segueix ha de guardar més distància, i el contrari passa quan el vehicle posterior té una capacitat de frenada més elevada, per tant, pot aproximar-se sense deixar tanta distància entre els dos.

El mateix també es pot dir per la velocitat, si la velocitat nostra es superior a la del vehicle del davant la distància he de ser més gran, en canvi, si el vehicle de davant té una velocitat més elevada a la del vehicle posterior, es podria reduir la seva proximitat amb aquest.

Podem veure com hi ha una clara relació entre velocitat i capacitat de desacceleració per decidir el frenat, justament el que la fórmula de la distància de frenat ens proporciona.

Utilitzem la fórmula anteriorment vista per calcular les distàncies de frenat:

$$d_{frenada} = \frac{-v^2}{2a}$$

$$d_{frenadaVehicleDavant} = \frac{-v_{vehicleDavant}^2}{2a_{vehicleDavant}}$$

Així, de forma similar als altres casos, calculem les distàncies de frenat pels dos vehicles i on també afegim la distància respecte al vehicle.

$$d_{vehicleDavant} < (d_{frenada} - d_{frenadaVehicleDavant})$$

Si la distància és inferior a la diferència de distàncies de frenat, simplement frenem per evitar tenir una col·lisió, d'aquesta manera, el vehicle s'adapta progressivament als canvis de velocitat del vehicle que té al davant, on sempre evitarà tenir una distància de frenat superior a la distància respecte al vehicle del davant i la seva distància de frenat.

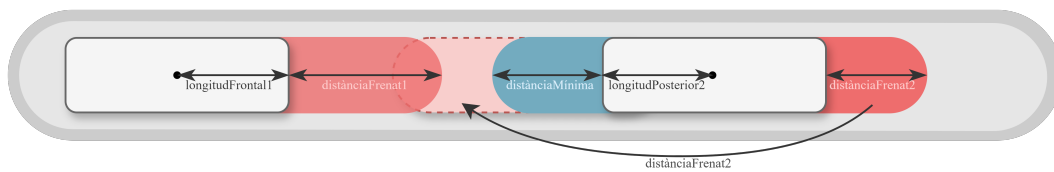


Figura 47: Distància de frenat del vehicle respecte al vehicle del davant.

Font: Elaboració pròpia.

En aquesta figura podem veure com les distàncies de frenat, les longituds dels vehicles i la distància mínima es comparen, una forma visual de veure es col·locant la distància de frenat del segon vehicle en la seva part posterior després de la distància mínima, si hi ha superposició, el primer vehicle ha de frenar.

Abans de començar amb la següent casuística resoldrem el dubte següent:

Com troba els vehicles i elements de control el vehicle?

Gràcies a la informació dels vèrtexs sobre els elements de control que contenen i les arestes sobre els vehicles que hi circulen, els vehicles poden fer una exploració sobre els nodes posteriors.

L'exploració sobre previsió d'obstacles frontals, funciona de la següent manera:

Els vehicles obtenen no només el seu següent punt d'acord amb les distribucions de probabilitat, sinó que obtenen el camí de punts que seguiran, on aquesta extracció de punts està limitada per nombre de punts i longitud del camí, per evitar que el camí sigui massa curt (provocant problemes de detecció) o contingui un llistat de punts massa llarg (increment de la memòria i baix rendiment).

Un cop obtingut el llistat de punts el vehicle explora el contingut d'aquests i les arestes formades pels punts, on guarda el primer element de control trobat, i també guarda el primer vehicle trobat en la cerca.

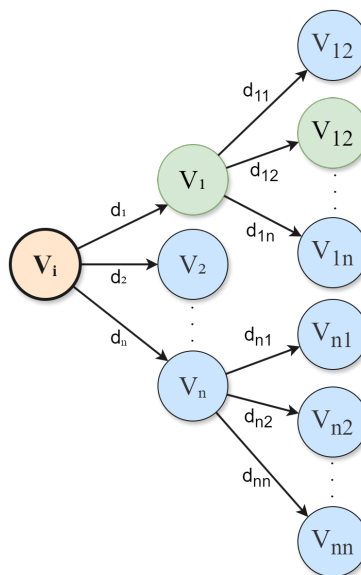


Figura 48: Exploració de vèrtexs posteriors pels vehicles.

Font: Elaboració pròpia.

Aquest procediment de només accedir al més proper és possible, ja que el vehicle reaccionarà primer als elements més propers, on aquests reaccionaran als següents

més propers i així de forma encadenada, amb aquest funcionament s'aconsegueix adaptar a la majoria de les construccions.

Ara ens queda per considerar un últim cas, les incorporacions, aquests són els casos més complexos que trobem en el funcionament dels vehicles, per fer-ho, considerem el següent:

Just com hem vist anteriorment, s'ha de produir la detecció de vehicles per les incorporacions, per fer-ho caldrà avaluar trams que condueixen al mateix vèrtex objectiu del vehicle (en exclusió del tram del vehicle), aquesta exploració es fa amb múltiples vèrtexs posteriors per assegurar que s'avaluen amb suficient antelació les distàncies.

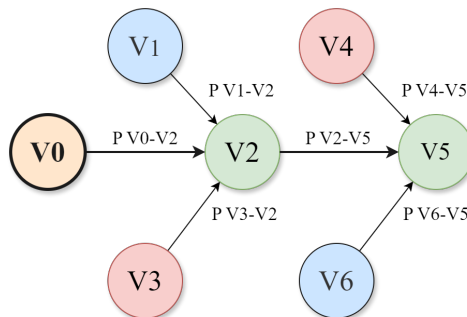


Figura 49: Exploració de vèrtexs posteriors pels vehicles.
Font: Elaboració pròpia.

De forma visual, podem veure en la figura com marcats en vermell tenim els vèrtexs/arestes excloses, aquests no tenen una preferència superior o igual a la del tram que recorre, per exemple, l'aresta que surt V3 no serà considerada, ja que la preferència d'aquesta és inferior a la preferència de V0 a V2. Bàsicament, tenim aquesta relació entre les preferències de la figura:

$$P_{V1-V2} \geq P_{V0-V2} > P_{V3-V2}$$

$$P_{V6-V5} \geq P_{V2-V5} > P_{V4-V5}$$

Les úniques arestes considerades per les incorporacions són les arestes dels vèrtexs V1 i V6, marcades en blau.

Pel que fa al càlcul específic de les incorporacions, l'aproximació serà diferent de les anteriors:

Primer de tot, hem de tenir en compte la regió que ocuparà el nostre vehicle en accedir a la via, la podem delimitar de la següent manera:

$$x_{frontal} = x_{origen} + \text{distànciaSeparació} + \frac{\text{longitudVehicle}}{2}$$

$$x_{posterior} = x_{origen} - \text{distànciaSeparació} - \frac{\text{longitudVehicle}}{2}$$

La posició en què es troba el punt dins l'espai, que en aquest cas serà el nostre origen, la distància mínima de separació entre vehicles, la longitud frontal i la posterior del vehicle.

Aquestes mesures ens serviran per estimar possibles col·lisions amb vehicles de la

via a la qual s'incorpora el vehicle, per fer-ho, sabem que el nostre vehicle mantindrà una trajectòria d'acceleració des d'una velocitat inicial, en cas de tenir prou temps, aquesta acceleració serà fins a la velocitat màxima de la via, en cas contrari, l'acceleració es posposa a dins la via.

Anem a veure com resollem l'entrada del vehicle a la via, per fer-ho, necessitem la distància restant fins al punt d'incorporació, per simplificar suposem el cas de trobar-se en una corba de geometria simple, tindriem la fórmula següent:

$$d_{punt} = \sqrt{(x_{punt} - x_{vehicle})^2 + (y_{punt} - y_{vehicle})^2}$$

Això ens permet obtenir la distància que necessita recorre el vehicle i l'interval en què es troba en entrar dins del punt d'incorporació:

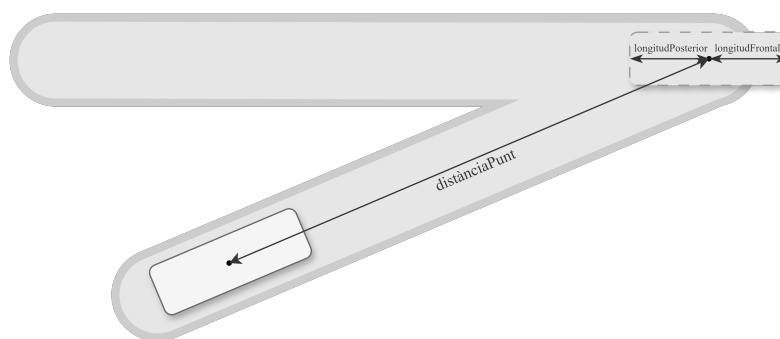


Figura 50: Vehicle en el punt d'incorporació.

Font: Elaboració pròpia.

Ara, necessitem saber que haurà passat durant l'arribada del vehicle al punt d'incorporació, el seu temps per fer-ho, per així extrapolar que haurà passat amb els altres vehicles de la via durant aquells instants.

Per fer el següents càlculs analitzarem que passaria si el vehicle es decidís a entrar, tenim primer el càlcul del temps per accelerar fins a la velocitat màxima:

- Utilitzem la relació entre la velocitat i l'acceleració:

$$v = v_0 + a \cdot t_{acceleració}$$

- Aïllem t , obtenint el temps que triga el vehicle a accelerar:

$$t_{acceleració} = \frac{v - v_0}{a}$$

Ens guardem el resultat del temps, l'utilitzarem posteriorment. Mesurarem també la distància que necessitaria el vehicle per accelerar fins a la velocitat de la via, com hem vist abans, es pot calcular així:

$$d_{acceleració} = \frac{v_f^2 - v^2}{2a}$$

Comparem la distància d'acceleració inicial amb la distància fins al punt, en cas de ser inferior, vol dir que podem assolir la velocitat màxima, en cas contrari vol dir

que el vehicle necessitaria més distància per fer-ho.

$$d_{restant} = d_{punt} - d_{acceleració}$$

En la distància restant per assolir el punt, el temps per recórrer aquesta última part serà de:

$$t_{restant} = \frac{d_{restant}}{v_{màxima}}$$

En cas que la distància restant sigui zero o negativa, aïllem el temps de la fórmula del moviment:

$$d_{punt} = v_0 \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$$

La resollem utilitzant la fórmula per equacions quadràtiques, consultar “*Beyond the quadratic formula*” [12], i ens quedem amb la resolució positiva de l'arrel:

$$t_{acceleració} = \frac{-v_0 + \sqrt{v_0^2 - 2a \cdot (-d_{punt})}}{2a}$$

Els càlculs anteriors ens permeten calcular els temps de les dues fases, en blau i vermell, en les quals es pot trobar el vehicle en recórrer la distància fins al punt:

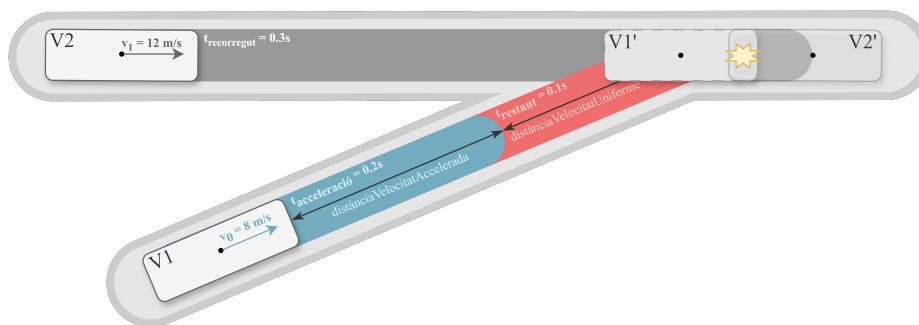


Figura 51: Acceleració del vehicle al punt d'incorporació.

Font: Elaboració pròpia.

Per tant, tenim dos temps per arribar al punt, un s'obté quan el vehicle arriba abans d'acabar la fase d'acceleració i un en el cas que l'acceleració no sigui fins a la velocitat màxima.

$$t_{recorregut} = t_{acceleració} + t_{restant}$$

Un cop ja obtingut el temps que tardarà el vehicle que s'incorpora en arribar al punt d'incorporació, estimem la posició del vehicle present en la via respecte al punt d'incorporació en haver transcorregut aquest temps.

$$d_{recorreguda} = v_0 \cdot t_{recorregut}$$

Per determinar la posició relativa al punt d'incorporació farem el següent càlcul:

$$d_{relative} = d_{recorreguda} - d_{punt}$$

Ara podem computar les posicions frontals i posteriors que tindrà el vehicle de la via un cop el vehicle que s'incorpori arribi al punt d'incorporació:

$$x_{frontal} = d_{recorreguda} + distànciaSeparació + \frac{longitudVehicle}{2}$$

$$x_{posterior} = d_{recorreguda} - \text{distànciaSeparació} - \frac{\text{longitudVehicle}}{2}$$

Per comprovar la possible superposició es fa una comparació de cada distància amb el rang de distàncies del vehicle oposat:

$$x_{frontal_2} < \mathbf{x}_{frontal_1} < x_{posterior_2}$$

$$x_{frontal_2} < \mathbf{x}_{posterior_1} < x_{posterior_2}$$

$$x_{frontal_1} < \mathbf{x}_{frontal_2} < x_{posterior_1}$$

$$x_{frontal_1} < \mathbf{x}_{posterior_2} < x_{posterior_1}$$

Si alguna de les parts dels dos vehicles es troba dins l'interval de l'altre vehicle, implicarà que tindrem una col·lisió si continuem amb el transcurs del nostre moviment, per tant, activarem els frens, en els següents instants tornarem a avaluar les situacions fins que no detectem cap possible col·lisió en continuar avançant.

En la figura següent veiem el càlcul de la zona d'acceleració (en blau) i velocitat constant (en vermell) del vehicle que s'incorpora, i utilitzem el temps total del recorregut d'aquesta zona per extrapolar la posició del vehicle de la via que ens incorporarem (en gris), en aquest cas els intervals de les seves posicions se sobreposen, detectant la col·lisió i evitant la incorporació fins que sigui segura:

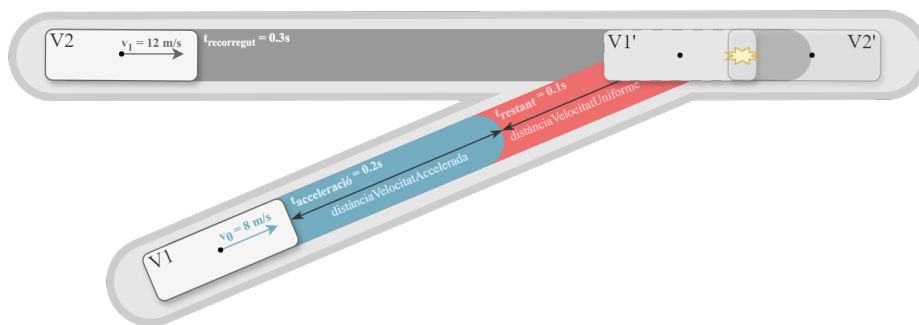


Figura 52: Càlcul de possible col·lisió en incorporació.

Font: Elaboració pròpia.

Aquest plantejament tot i que correcte, és incomplet, falta tenir en compte que quan un vehicle arriba al punt d'incorporació pot haver assolit o no la velocitat d'aquella via, per això pot existir l'escenari en el qual el vehicle anterior no xoca en el punt d'incorporació, però va guanyant metres abans que el vehicle incorpora't hagi arribat a la velocitat d'aquella via.

Per adaptar el sistema aquest escenari computarem la velocitat en incorporar-se el vehicle i el temps afegit que necessita per accelerar fins a la velocitat de la via, en el moment que arribi aquella velocitat el vehicle posterior ja no el podrà atrapar. Aquests dos valors ens ajudaran a valorar si el vehicle de la via el pot avançar o no, i així podem anticipar la frenada abans d'incorporar-se.

Pas a pas, desenvolupem el procediment per tenir en compte aquesta situació:

Primer, calculem el temps necessari per accelerar des que el vehicle arribar al punt d'incorporació, per fer-ho necessitem la seva velocitat en arribar al punt, l'obtenim amb la relació d'acceleració i velocitat:

$$v_{punt} = v_0 + a \cdot t_{acceleració}$$

És important especificar que aquest temps d'acceleració sempre és inferior o igual al temps que necessita el vehicle per arribar al punt d'incorporació, i no agafem el primer temps d'acceleració calculat (fase 1) que hi podria tenir temps afegit, ja que potser el vehicle necessita més distància per arribar a la velocitat desitjada.

Amb la seva velocitat, calculem el temps que necessita el vehicle per arribar a la velocitat de la via:

$$t_{\text{acceleració}} = \frac{v - v_{\text{punt}}}{a}$$

Ho podem veure de forma gràfica amb la següent figura, on aquest nou temps queda encapsulat dins l'àrea verda:

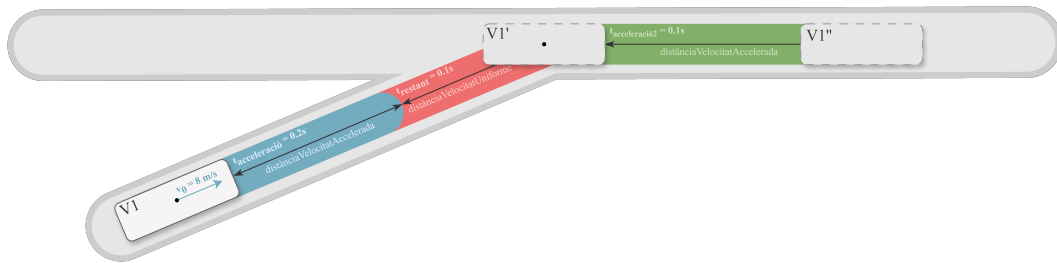


Figura 53: Càlcul de l'acceleració posterior a la incorporació.
Font: Elaboració pròpia.

Farà falta veure, si el vehicle que es troba en la via intercepta la trajectòria, marcada en verd, en aquesta franja el vehicle aconsegueix assolir la mateixa velocitat i avançaran els dos de forma uniforme, així buscarem els temps d'intersecció dels dos moviments per trobar possibles temps d'inferiors a l'acceleració, i per tant seran instants de col·lisió.

Amb aquests dos valors ja estem preparats per calcular el temps d'intercepció entre els dos vehicles i el compararem amb el temps d'acceleració que requereix el vehicle que s'incorpora dins de la via, si és superior, voldrà dir que hi haurà una col·lisió, continuem amb el càlcul de la intersecció de les trajectòries:

1. Vehicle incorporant-se:

$$x_0(t) = x_{\text{posterior}0} + v_{\text{punt}} \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$$

On $x_{\text{posterior}0}$:

$$x_{\text{posterior}0} = -\frac{\text{longitudVehicle}}{2}$$

2. Vehicle de la via:

$$x_1(t) = x_{\text{frontal}1} + v_1 \cdot t$$

On $x_{\text{frontal}1}$:

$$x_{\text{frontal}1} = d_{\text{recoreguda}} - d_{\text{punt}} + \text{distànciaSeparació} + \frac{\text{longitudVehicle}}{2}$$

Igualem les equacions, simplifiquem i resollem:

$$x_{\text{frontal}1} + v_1 \cdot t = x_{\text{posterior}0} + v_{\text{punt}} \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$$

$$0 = (x_{posterior0} - x_{frontal1}) + (v_{punt} - v_1) \cdot t + \frac{1}{2} \cdot a \cdot t^2$$

Utilitzem la fórmula per resoldre equacions quadràtiques, substituïm i simplifiquem:

$$t = \frac{-(v_{punt} - v_1) \pm \sqrt{(v_{punt} - v_1)^2 - 2 \cdot a \cdot (x_{posterior0} - x_{frontal1})}}{a}$$

En aquest cas calculem tant per l'arrel negativa com la positiva, ja que els valors que ens ofereixen totes dues poden ser positius, en els càlculs dels valors comprovarem que el valor de l'interior de l'arrel no és negatiu, i el temps resultant és positiu.

Amb aquests dos ja tindrem els instants en què els dos vehicles col·lidirien, i farem la comprovació de:

$$0 \leq t_1 \leq t_{acceleració}$$

$$0 \leq t_2 \leq t_{acceleració}$$

Si alguna d'aquestes dues es verifica, frenarem per evitar incorporar-nos, fins que alguna d'aquestes dues o la comprovació de col·lisió en el punt d'incorporació, un vehicle frontalment bloquejat el pas, un semàfor en vermell o un pas de vianants, no ens bloquegi en l'estat de frenada.

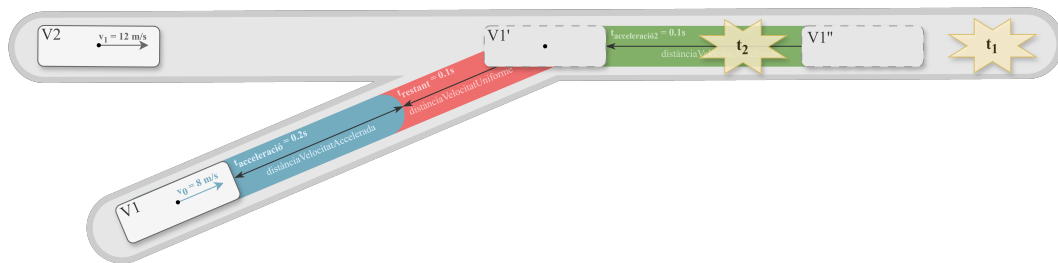


Figura 54: Càlcul de la intercepció entre els dos vehicles.
 Font: Elaboració pròpia.

L'estudi d'aquestes funcions ens porta a veure com un vehicle que s'incorpora amb velocitat menor, per tant, accelera, t2 (arrel negativa) contindrà el temps de la seva col·lisió en cas d'existir.

En el cas que la via en què s'incorpora la velocitat es menor, i per tant desaccelera, t1 (arrel positiva) ens permetrà interpretar la possible col·lisió.

8.2.5.9 Propietats

Aquí tenim un recull de les propietats que defineixen els vehicles:

Vehicle
Posicions X / Y / Z
Rotació
Velocitat
Acceleració
Desacceleració
Longitud

Figura 55: Resum de propietats dels vehicles.
 Font: Elaboració pròpia.

Aquestes només són algunes de les més rellevants que han sortit de forma freqüentada a les explicacions anteriors.

8.2.5.10 Integració

Pel que fa a la integració a dins el sistema, utilitzarem *Sprites* per a la seva visualització, i el comportament implementat s'assimila al diagrama següent:

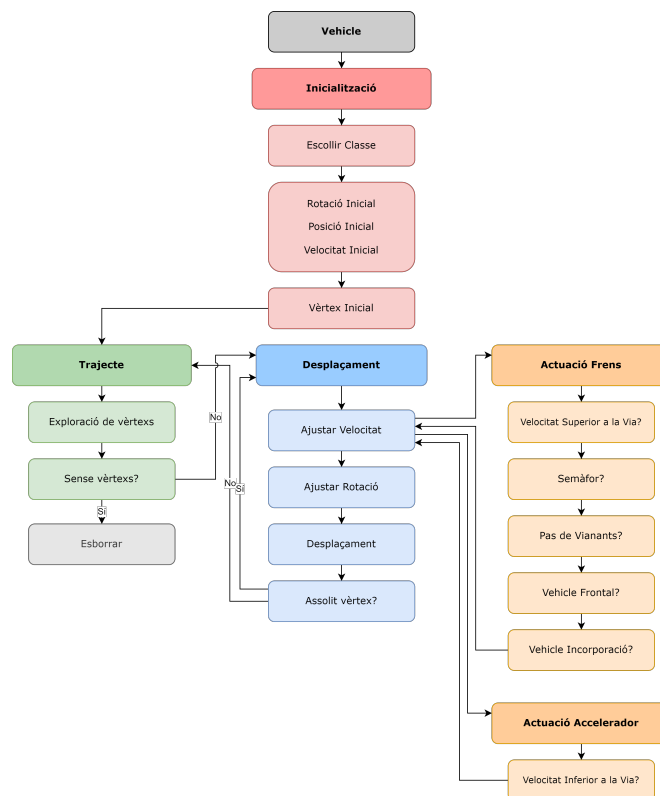


Figura 56: Diagrama de flux dels vehicles.

Font: Elaboració pròpia.

Bàsicament, primer es fa la inicialització en el punt i llavors manté en constant alimentació el sistema de desplaçament amb vèrtexs i on també s'ajusten les velocitats segons el seu entorn, un cop es queda sense, el vehicle s'esborra.

Tornant a la visualització dels vehicles, també s'han incorporat un seguit de models tridimensionals per a millorar la qualitat de l'experiència i acostar més a la persona a la reflexió de l'estudi d'un cas real i no fictici.



Figura 57: Visualització d'un dels models tridimensionals.

Font: Elaboració pròpia.

A causa de les limitacions de temps, els models que s'han afegit es troben a les

plataformes Sketchfab⁵⁸ i CGTrader⁵⁹.

Gràcies a Unity, podem afegir amb facilitat aquests models a través de *MeshRenderers*, i implementem la possibilitat de triar entre els dos formats de visualització, un en què es visualitzen els vehicles com a simples *Sprites* i l'altre com a models tridimensionals.

Un cop afegit el comportament i una forma de visualitzar-los en pantalla, ja tindrem tots els elements en integrats al sistema per poder fer les simulacions, veiem l'estat actual:

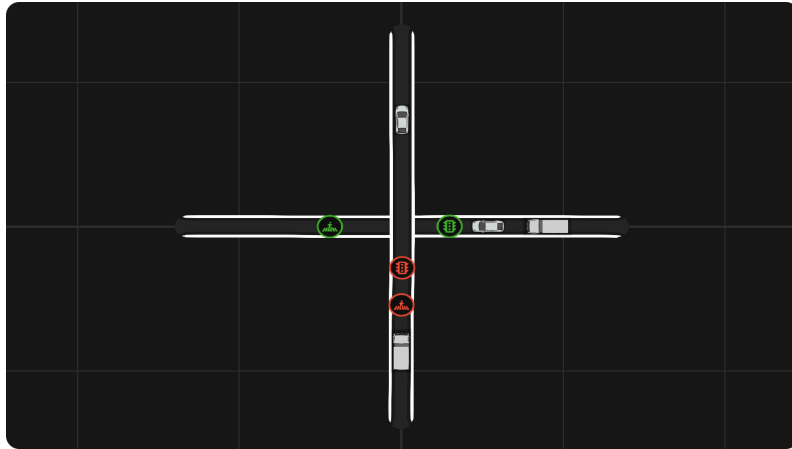


Figura 58: Visualització de vehicles dins el sistema.

Font: Elaboració pròpia.

Sketchfab: <https://sketchfab.com/feed>

CGTrader: <https://www.cgtrader.com/>

9 Creació i edició de xarxes

Tot sistema de simulació d'infraestructures facilita la recreació de les zones que s'han d'estudiar, per això implementen formes en les quals es puguin construir les vies i fer canvis sobre aquestes.

A través del *Canvas* de Unity, crearem la interfície que farà possible fer les accions necessàries per crear i modificar les infraestructures.

9.1 Creació de la xarxa

Per veure com utilitzem les diferents eines per la recreació de les vies, anirem pas a pas construint una rotonda únicament amb dues entrades i dues sortides:

- **Addició de punts**, facilita especificació dels principis, finals i interseccions del tram de les carreteres, només cal precisar una posició i el punt quedarà definit en aquelles coordenades.

Si dos punts s'afegeixen consecutivament amb aquesta eina, quedaran units per una aresta, amb la direcció del punt anterior i el nou que s'ha creat.

Utilitzem aquesta eina per traçar els punts de la rotonda, però no ens sorgeix un problema, estem limitats, ja que no podem començar cap traçat nou, sense unir els punts anteriors:

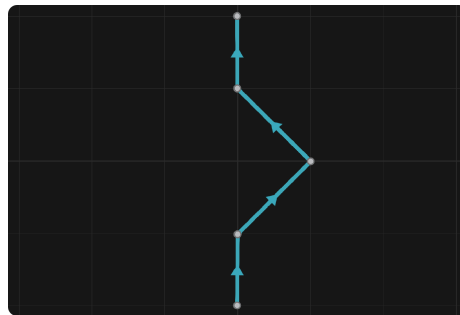


Figura 59: Construcció de la rotonda, addició de punts.

Font: Elaboració pròpia.

- **Selecció de punts**, ens permet seleccionar des del que continuar el traçat o desseleccionar un punt.

Amb la introducció d'aquesta segona eina podem començar nous traçats o continuar alguns dels ja presents, tot i així encara ens falten per unir alguns punts:

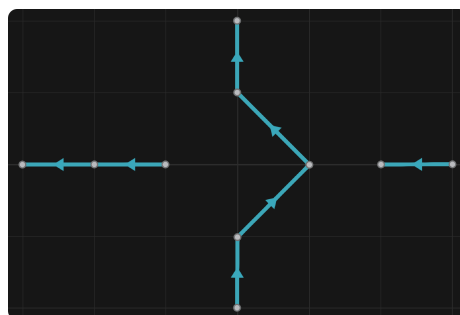


Figura 60: Construcció de la rotonda, selecció de punts.

Font: Elaboració pròpia.

- **Connexió de punts**, especifica la unió entre dos punts, i això implica la creació de dos punts auxiliars que especificaran la geometria de la corba Bézier que ara els unirà, aquesta es genera precisant un punt origen i un de destí, generant una aresta unidireccional i amb aquest mateix ordre.

Ens permet acabar d'unir tots els punts que ens feien falta per tenir les connexions necessàries de la rotonda, el punt seleccionat serà l'origen i el punt que s'interactua posteriorment és el destí:



Figura 61: Construcció de la rotonda, unió de punts.

Font: Elaboració pròpia.

- **Modificació de corbes**, un cop dos punts estan units, es pot modificar la geometria de la corba a partir dels nous punts auxiliars creats. Simplement, arrossegant a noves coordenades els punts auxiliars es fan crides per recalculer la geometria de la nova corba.

Desplacem els punts auxiliars de les arestes dels punts que es troben al mig per obtenir la forma circular característica de les rotondes, amb aquest canvi les connexions i geometria de la rotonda estaria completada:

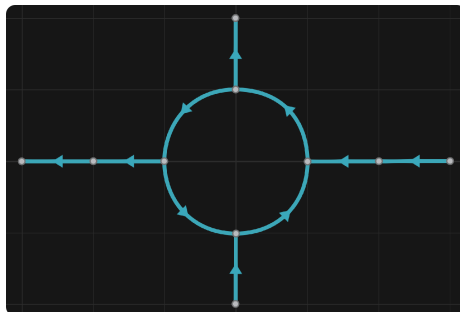


Figura 62: Construcció de la rotonda, modificació de corbes.

Font: Elaboració pròpia.

- **Desplaçament de punts**, ens ofereix la possibilitat de retocar la posició dels punts i moure'l a les noves coordenades desitjades, al mateix temps també s'actualitza la geometria de les corbes.
- **Eliminació de punts**, en eliminar un punt s'eliminen també les seves relacions, això vol dir punts que el precedien, perden la relació i els punts auxiliars associats. En seleccionar en el mode per suprimir algun dels punts, el punt i les seves relacions desapareixen.

Per la recreació del posicionament dels elements de control, tots aquests objectes estableixen un vincle amb un punt, amb el qual hi associen la seva posició:

- **Addició de semàfors**, en escollir un punt es genera el semàfor i es vincula en la posició del punt, per posar-ho en pràctica posicionem semàfors a l'entrada i sortida de la rotonda:

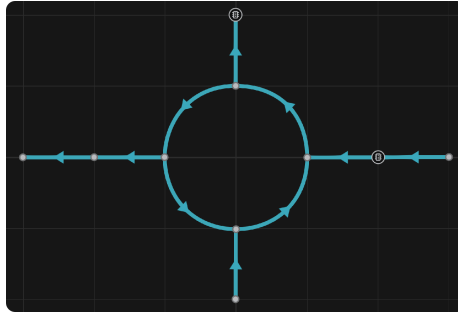


Figura 63: Construcció de la rotonda, addició de semàfors.

Font: Elaboració pròpia.

- **Addició de passos de vianants**, en escollir un punt es genera el pas de vianants i es vincula en la posició del punt, igual que en el cas dels semàfors, posicionem un pas de vianants a una sortida de les rotondes:

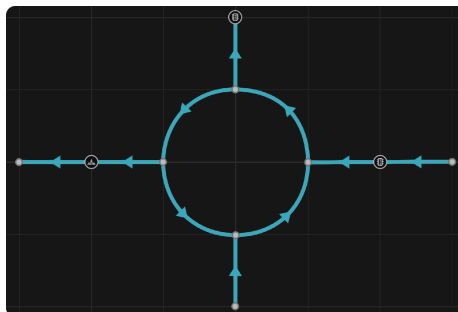


Figura 64: Construcció de la rotonda, addició de passos de vianants.

Font: Elaboració pròpia.

- **Addició de generadors**, en escollir un punt es crea el generador de vehicles i es vincula en la posició del punt, posicionem els generadors en els punts inicials per poder introduir vehicles dins el sistema:

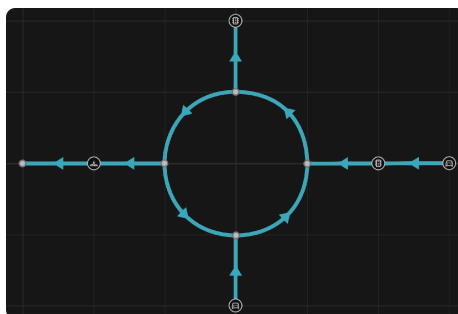


Figura 65: Construcció de la rotonda, addició de generadors.

Font: Elaboració pròpia.

- **Esborrador d'elements**, en escollir un punt simplement l'element desapareix i el seu vincle amb el punt, en cas de tractar-se d'un semàfor o pas de vianants desapareix el possible vincle amb un semàfor.

9.2 Edició de la xarxa

Pel que fa a la modificació del comportament tenim les següents opcions:

- **Edició punts**, si el punt no té cap punt posterior vinculat no és possible modificar cap propietat, ja que les propietats estan vinculades als trams. En cas que contingui algun punt posterior, per cada tram hi ha la possibilitat de modificar la velocitat, la preferència de la via i la probabilitat de ser escollida entre totes les vies posteriors del punt.

Veiem com queden recollides la velocitat i la preferència de l'aresta, i també la probabilitat de ser escollida com a següent tram a recórrer pels vehicles:



Figura 66: Panell d'edició de punts i trams.

Font: Elaboració pròpia.

Les fletxes de cada atribut permeten decidir quin dels trams queda seleccionat, també es mostra de forma visual quin dels trams està seleccionat:



Figura 67: Visualització de la selecció de trams en el sistema.

Font: Elaboració pròpia.

En el nostre cas és útil per definir les velocitats de la infraestructura, la preferència dels vehicles de l'interior de la rotonda i les probabilitats de sortida de la rotonda.

- **Edició de semàfors**, s'habilita la configuració dels temps en estat verd/taronja/vermell, estat en el qual es comença, i el retard en la inicialització. En cas de vincular-se amb un altre semàfor, només és possible especificar el retard d'inicialització, i si el seu estat és complementari al del semàfor al qual es vincula.

Queden parametritzats com podem veure el temps de cada estat, en quin estat comença, el retard inicial. En cas d'estar vinculat, es pot aplicar el retard, el

retard de seguretat i si és complementari, això ens permet regular l'entrada dels vehicles en el nostre cas:



Figura 68: Panell d'edició de semàfors.
Font: Elaboració pròpia.

Per visualitzar quan un semàfor està vinculat amb un altre es mostra una línia discontinua del semàfor vinculat al semàfor al qual es vincula:



Figura 69: Visualització de la vinculació de semàfors.
Font: Elaboració pròpia.

- **Edició de passos de vianants**, temps mínim i màxim en què travessen vianants, temps mínim i màxim en el qual està buit, i la distribució de probabilitats que segueixen. En cas d'estar vinculat amb un semàfor no es permet modificar cap propietat, sempre funcionarà de forma complementària al comportament del semàfor.



Figura 70: Panell d'edició de passos de vianants.
Font: Elaboració pròpia.

De forma similar, el pas de vianants també mostra amb una línia discontinua la vinculació amb un semàfor.

- **Edició de generadors**, es pot modificar el flux de generació de vehicles per adaptar-se a vies més o menys transitades.

Ens permetrà ajustar els fluxos al trànsit de la zona que estem estudiant, en l'exemple de la rotonda podríem provar en una zona no molt transitada, ja que les seves dimensions són de les més petites.



Figura 71: Panell d'edició de generadors.

Font: Elaboració pròpia.

Finalment, simulem la rotonda i podem veure com reacciona el sistema a l'entrada de vehicles de forma visual:

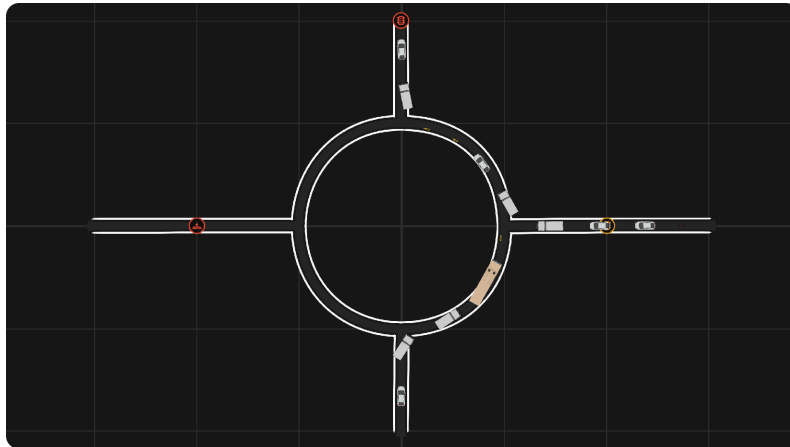


Figura 72: Visualització de la simulació de la rotonda d'exemple.

Font: Elaboració pròpia.

10 Importació i guardat de xarxes

En aquest apartat es parlarà del disseny i implementació per aconseguir: guardar els canvis aplicats en la configuració de la xarxa i la importació de xarxes d'origen de tercers.

10.1 Sistema de guardat

El sistema utilitzat pel guardat és la binarització de la informació, per fer-ho es fa servir el formatador binari, aquest té dues funcions la serialització i la deserialització.

Pel que fa a la serialització, aquesta rep com a arguments una ruta i un objecte, en base l'objecte i les seves variables genera un arbre amb les especificacions del tipus de variable, finalment converteix els valors de les variables en bytes d'acord amb l'estructura de l'arbre i les escriu en la ruta.

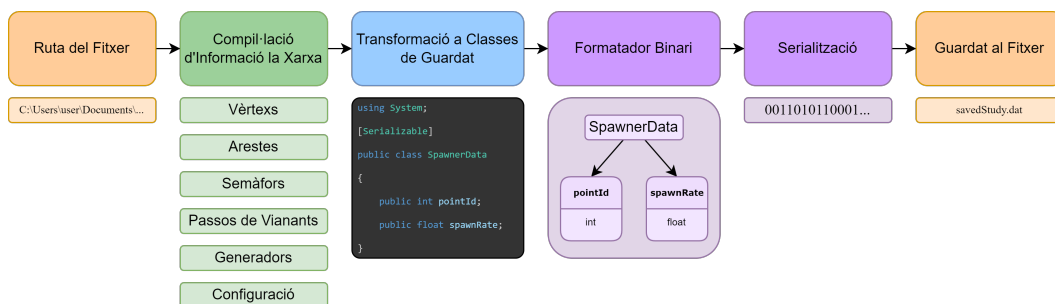


Figura 73: Procés de binarització i guardat de la xarxa.
Font: Elaboració pròpia.

Respecte a la deserialització fa el procés invers, a través de l'estructura de l'objecte sap la correspondència dels bytes als valors de les variables.

En utilitzar aquest sistema crearem classes auxiliars que contindran únicament les variables que s'han de serialitzar, alhora tindrem una classe central que mantindrà el llistat de cada una d'aquestes classes auxiliars.

En el moment de guardar, per cada un dels objectes crearem una classe auxiliar que el contingui i l'afegirem a la llista corresponent, en el pas final el formatador binari farà la serialització, en el cas invers, obtindrem les llistes, anirem una per una afegint els objectes amb els seus valors indicats.

10.2 Sistema d'importació

Centrant-nos ara en la importació de fitxers de tercers, farà falta una mica context, l'extensió que s'ha escollit és OSM (Open Street Map), la qual és de forma majoritària utilitzada per la fundació amb el mateix nom, Open Street Map⁶⁰.

Aquesta ha estat l'escollida, ja que presenta de forma oberta les contribucions de la comunitat sobre informació de geogràfica, a més de no tenir cap mena de restriccions considerables i ofereixen fàcil accés.

OpenStreetMap: <https://www.openstreetmap.org/about>

Per obtenir aquesta informació, es pot accedir a l'apartat d'exportació de la seva pàgina web, des d'allà es pot seleccionar una àrea en el mapa per exportar, amb la restricció d'un màxim de 50,000 punts.

La informació tot i ser d'extensió OSM, pren una forma molt similar als fitxers XML, aquí tenim un exemple reduït de la seva estructura:

```

1 <?xml version="1.0" encoding="UTF-8"?>
2 <osm version="0.6" generator="openstreetmap-cgimap 2.0.1 (1849
   spike-06.openstreetmap.org)" copyright="OpenStreetMap and
   contributors" attribution="http://www.openstreetmap.org/
   copyright" license="http://opendatacommons.org/licenses/
   odbl/1-0/">
3 <bounds minlat="41.7387226" minlon="1.8494836" maxlat="
   41.7387226" maxlon="1.8495781"/>
4
5 <node id="1" visible="true" version="17" changeset="52869523
   " timestamp="2018-05-18T20:03:29Z" user="JCasahuga" uid="
   581863" lat="41.7387226" lon="1.8494836"/>
6 <node id="2" visible="true" version="17" changeset="52869523
   " timestamp="2018-05-18T20:03:29Z" user="JCasahuga" uid="
   2096551" lat="41.7387226" lon="1.8495308">
7   <tag k="highway" v="crossing"/>
8 </node>
9 <node id="3" visible="true" version="17" changeset="52869523
   " timestamp="2018-05-18T20:03:29Z" user="JCasahuga" uid="
   975932" lat="41.7387226" lon="1.8495781">
10   <tag k="highway" v="traffic_signals"/>
11 </node>
12
13 <way id="4" visible="true" version="17" changeset="52869523"
   timestamp="2018-05-18T20:03:29Z" user="JCasahuga" uid="
   11725140">
14   <nd ref="1"/>
15   <nd ref="2"/>
16   <nd ref="3"/>
17   <tag k="highway" v="tertiary"/>
18   <tag k="lit" v="yes"/>
19   <tag k="name" v="Carrer d'Exemple"/>
20   <tag k="oneway" v="yes"/>
21   <tag k="surface" v="asphalt"/>
22   <tag k="lanes" v="1"/>
23   <tag k="maxspeed" v="80"/>
24 </way>
25 </osm>

```

Fragment de codi 1: Exemple de fitxer OSM

Podem veure com el codi es pot dividir en diverses parts amb informació específica de la xarxa:

El primer element a destacar és l'especificació de la versió d'XML i el format de codificació:

- **Versió** (version): 1.0.
- **Codificació** (encoding): UTF-8.

Els següents elements, de tipus node, representen punts específics i contenen la informació següent:

- **Identificador** (`id`): Número únic que identifica el node.
- **Visible** (`visible`): Si el node és visible o no.
- **Versió** (`version`): Versió del node que s'està utilitzant.
- **Canvis** (`changeset`): Identificador de l'actualització associada amb el node.
- **Data** (`timestamp`): Data i hora exactes en què es va afegir o modificar.
- **Usuari** (`user`): Nom de l'usuari que el va afegir o modificar.
- **Identificador d'usuari** (`uid`): Identificador únic de l'usuari.
- **Latitud i longitud** (`lat`, `lon`): Coordenades geogràfiques del node.

Els últims elements, de tipus way, representen camins o segments de ruta i contenen la informació següent:

- **Identificador** (`id`): Número únic que identifica la via.
- **Versió** (`version`): Versió de la via que s'està utilitzant.
- **Canvis** (`changeset`): Identificador de l'actualització associada amb la via.
- **Data** (`timestamp`): Data i hora exactes en què es va afegir o modificar.
- **Usuari** (`user`): Nom de l'usuari que el va afegir o modificar.
- **Identificador d'usuari** (`uid`): Identificador únic de l'usuari.

A més, els elements way tenen dos tipus d'elements interns:

1. Elements `nd`:

- Contenen l'atribut `ref`, que fa referència a l'`id` d'un node declarat anteriorment.
- Serveixen per definir la geometria de la via connectant diferents nodes.

2. Elements `tag`:

- Afegeixen informació addicional sobre la via, com ara:
 - **Tipus de carretera** (`k="highway"`): `v="tertiary"` (terciari).
 - **Nom de la carretera** (`k="name"`): `v="Carrer d'Exemple"`.
 - **Unidireccional** (`k="oneway"`): `v="yes"` (sí).
 - **Material de la superfície** (`k="surface"`): `v="asphalt"` (asfalt).
 - **Carrils** (`lanes="1"`): `v="1"` (1 carril).
 - **Velocitat màxima** (`k="maxspeed"`): `v="80"` (80 km/h).

Amb aquesta informació, el fitxer OSM, ja ens proporciona tot el necessari per especificar l'estructura i elements de control que es troben en la via.

A continuació, tenim la descripció del procés de lectura i importació de la informació desglossada pas a pas:

1. **Selecció del fitxer:** l'usuari especifica la ubicació del fitxer a través d'obrir l'explorador del seu sistema.
2. **Lectura de la ruta especificada:** es verifica que la ruta és correcte i conté el fitxer.
3. **Especificació paràmetres:** configuració dels paràmetres d'importació, que tenim 3 parts importants:
 - **Generació de carrils,** habilita la generació i connexió dels carrils extra en base el valor de l'atribut lanes.



Figura 74: Panell de generació de carrils OSM.
Font: Elaboració pròpia.

- **Unió de punts,** habilitar la unió de punts uneix tots els punts que es trobin a una distància inferior a l'especificada per l'usuari.

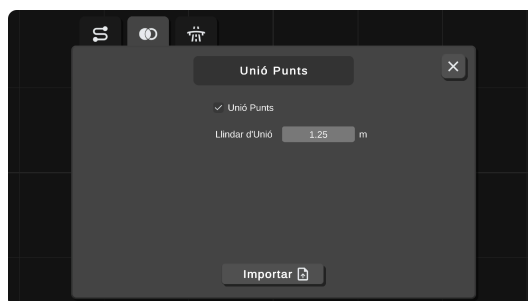


Figura 75: Panell d'unió de punts OSM.
Font: Elaboració pròpia.

- **Exclusió de vies,** l'usuari selecciona els tipus de carreteres que no han de ser incloses en la importació de la xarxa.



Figura 76: Panell d'exclusió de vies.
Font: Elaboració pròpia.

4. **Neteja de l'escena:** un cop l'usuari ja ha pres les decisions del fitxer i els paràmetres per importar, s'elimina qualsevol xarxa que existís en l'entorn.
5. **Processament del document:** com hem vist els elements que contenen la informació de la xarxa són els nodes i ways, així doncs en el processament extreure'm el següent:
 - nodes:
 - Diccionari amb l'identificador de clau i com a valor la posició dels punts en graus.
 - Posició del centre de la xarxa en graus.
 - Diccionari amb l'identificador dels punts com a clau que contenen passos de vianants.
 - Diccionari amb l'identificador dels punts com a clau que contenen semàfors.
 - ways:
 - Tipus de superfície.
 - Velocitat màxima.
 - Nombre de carrils.
 - Unidireccional.
 - Tipus de carretera, només es preservaran aquelles que no estiguin excloses en la selecció de l'usuari.
 - Diccionari amb l'identificador de les vies com a clau i conté la llista d'identificadors dels punts que la formen.
6. **Mapatge a les coordenades:** cal transformar totes les posicions adquirides en graus i projectar-les en el pla en metres.

Per fer-ho s'ha de tenir en compte el sistema que està utilitzant Open Street Map per referenciar les coordenades, el format és WGS 84, el qual té en compte que la terra és aplanada pels pols, i s'opta per aproximar la seva forma, amb la figura geomètrica de l'el·lipsoide, definida per un semi eix menor i un semi eix major.

Si tenim l'el·lipsoide caracteritzat per les següents mides en la documentació del sistema de coordandes [13]:

$$\text{Semi Eix Major } (a) = 6,378,137.0\text{m}$$

$$\text{Semi Eix Menor } (b) = 6,356,752.314245\text{m}$$

Per determinar la posició en el cas de la latitud, ens cal calcular el perímetre de l'el·lipse a partir de a i b). Per simplificar, utilitzarem la fórmula aproximada de Ramanujan, es pot trobar definida en l'estudi "*A family of high*

order approximations of Ramanujan type for perimeter of an ellipse" [14] per calcular el perímetre d'una el·lipse:

$$\text{Perímetre de latitud (perímetreLatitud)} \approx \pi \left[3(a+b) - \sqrt{(3a+b)(a+3b)} \right].$$

Per determinar la distància en metres per grau de latitud, dividim el perímetre complet de l'el·lipse, pels 360° d'una volta completa:

$$\text{Metres per grau de latitud (conversióLatitud)} = \frac{\text{perímetreLatitud}}{360^\circ}$$

El cas de longitud és més específic, ja que aquesta es redueix a mesura que ens apropem als pols, i es fa més gran en aproximar-nos a l'equador.

Per fer el càlcul tenim que al punt de màxim perímetre és en l'equador, a 0 graus, per modelitzar-ho s'utilitza el cosinus de la latitud, a més de ser el perímetre d'una circumferència, ja que no es presenten deformacions considerables "horitzontalment":

$$\text{Metres per grau de longitud (conversióLongitud)} = \frac{2\pi a \cdot \cos(\text{latitud})}{360^\circ}$$

En base aquestes definicions apliquem els factors de conversió a totes les posicions que hem obtingut.

L'últim processament que farem serà calcular la mitja de les posicions de tots els punts, això ens permetrà centrar relativament prop els punts en la posició [0,0], s'aplicarà d'aquesta manera:

$$\text{Posició Actualitzada} = \text{Posició} - \text{Mitjana de les Posicions}$$

7. **Generació de la xarxa:** Pel que fa a la generació de la xarxa simplement utilitzarem el llistat de les vies i els atributs que contenen, en el cas més simple en què les vies són d'un únic carril, primerament, però cal fer la següent clarificació:

Per crear els punts es fa servir el mateix sistema que per la creació manual, quan es crea un punt, aquell punt queda seleccionat, quan s'afegeix el següent l'anterior punt, el que estava seleccionat, estableix una nova l'aresta que els connecta. A excepció de què s'especifiqui que cap punt està seleccionat.

Pel que fa al funcionament, per cada via, va creant punt per punt a través del llistat i especificant velocitat i tipus de superfície. En acabar de generar la via, es desselecciona l'últim punt i continuem amb les següents.

Anem a veure altres casos més específics, abans de continuar amb la línia de processament:

- **Múltiples Carrils:** com a tal el contingut del fitxer, no conté les vies amb els carrils que especifica, fa falta inferir la geometria i posició d'aquests nous punts.

Per fer-ho, farem un procés similar al que es fa per donar gruix/geometria a les corbes Bézier:

Llavors, la creació de nous punts es basa en el fet que donat un punt i , calculem el vector des d'aquest fins al punt $i + 1$:

$$\vec{v} = P_{i+1} - P_i = \begin{bmatrix} x_{i+1} - x_i \\ y_{i+1} - y_i \end{bmatrix}$$

Llavors calculem el vector perpendicular des d'aquest que ens servirà per establir les posicions dels $n - 1$ carrils que ens falten, quedaria així de moment:

$$\vec{v}_\perp = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \vec{v} = \begin{bmatrix} -(y_{i+1} - y_i) \\ x_{i+1} - x_i \end{bmatrix}$$

També ens cal normalitzar, per aplicar les amplàries correctes de la via:

$$\vec{v}_{\perp,normalitzat} = \frac{\vec{v}_\perp}{\|\vec{v}_\perp\|} = \frac{\vec{v}_\perp}{\sqrt{(y_{i+1} - y_i)^2 + (x_{i+1} - x_i)^2}}$$

Llavors tenim dos casos diferents que cal tractar, el cas de què el nombre de carrils sigui senar farem això:

Utilitzant el vector perpendicular el multiplicarem per l'amplària estàndard de la via, ja que és l'amplària que ens cal entre el centre de carril i carril.

Es generen $n / 2$ nous carrils, per aquests el càlcul serà de la posició resultant serà:

$$P_{i,carrilj} = P_i - \vec{v}_{\perp,normalitzat} \cdot (ampladaStd \cdot j)$$

Es generen les posicions centrals amb normalitat exactament amb les quantitats establertes pel document.

Pels $n / 2$ carrils restants, el càlcul de la posició resultant serà:

$$P_{i,carrilj} = P_i + \vec{v}_{\perp,normalitzat} \cdot (ampladaStd \cdot j)$$

En el cas que el nombre de carrils sigui parell:

Es generen $n / 2$ nous carrils, per aquests el càlcul serà de la posició resultant serà:

$$P_{i,carrilj} = P_i - \vec{v}_{\perp,normalitzat} \cdot (ampladaStd \cdot j) + (ampladaStd \cdot 0.5)$$

Pels $n / 2$ carrils restants, el càlcul de la posició resultant serà:

$$P_{i,carrilj} = P_i + \vec{v}_{\perp,normalitzat} \cdot (ampladaStd \cdot j) - (ampladaStd \cdot 0.5)$$

Això és possible, ja que el carril central no serà generat, i podem aprofitar-ho reduint en la meitat el desplaçament de l'amplada.

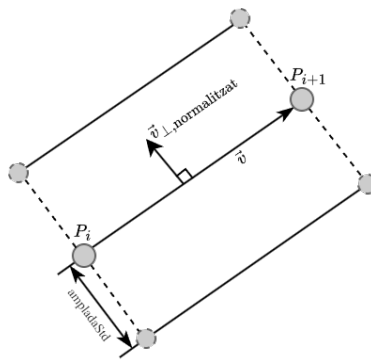


Figura 77: Generació de carrils OSM.
 Font: Elaboració pròpia.

- **Bidireccionals:** totes les vies que tinguin especificats un número superior o igual a dues vies i que no continguin l'atribut d'unidireccional, contenen carrils amb direccions oposades.

Per aconseguir generar correctament els carrils en les direccions esperades, s'especifica la generació conservant la direcció de l'original en una meitat dels carrils, en l'altra meitat es generen recorren les posicions de forma inversa.

També cal afegir que quan una via és bidireccional i només té un carril, inferim que conté almenys 2 carrils, un en una direcció l'altre en l'oposada.

- **Elements de Control:** en cas de ser especificat s'afegeix l'element de control amb uns valors arbitraris, que posteriorment es poden modificar.
- **Connexió entre Vies:** abans de crear qualsevol punt es mira si hi ha un punt a una distància molt pròxima al que es vol crear, en cas que existeixi aquell punt, se seleccionarà i es continuarà amb la creació dels altres punts de la via, aquest procés assegura que les vies estan interconnectades.

També cal fer notar que hi ha el cas específic de l'existència de múltiples carrils, la unió de la geometria no és una relació directa de la posició en la qual es troben, això passa quan el nombre de carrils no és el mateix entre dues vies, aquest és un procés que es fa posteriorment.

8. **Connexió de vies amb diferents carrils:** Ara sí, en aquesta part del procés es tracta la unió de carrils.

Per fer-ho, farem una detecció dels punts que no tinguin punts posteriors ho sigui, que són terminals, i també que siguin de vies amb múltiples carril. Sobre cada un d'aquests detectarem els punts que tinguin el mínim nombre de vèrtexs que els precedeixen i amb la mínima distància possible.

En base aquestes condicions, verifiquen que les vies amb múltiples carrils acaben trobant el següent carril més adequat al que adherir-se en cas d'estar desconnectades.

9. **Unió de punts:** sí l'usuari ha habilitat aquest apartat, a partir de la distància

especificada, els punts que estiguin sota aquest llindar s'uniran, simplement es farà punt per punt la comparació de distàncies, es repetirà aquest procés per tots els punts fins que no en quedin per unir.

Per fer la unió un dels dos punts s'eliminarà, en les connexions del punt anterior es traspassaran al nou punt.

10. **Generadors:** ja en l'últim pas, tots els punts que no tinguin un punt que els precedeix se'ls hi assigna un generador.

D'aquesta forma, el sistema permet:

1. Importar zones de forma ràpida.
2. Obtenir la base de superfícies bastant àmplies.
3. Inferir informació d'utilitat.

10.3 Extracció d'àrees

Per integrar de forma eficient en la línia de treball de l'usuari, és necessari integrar una àrea per importar des del mateix sistema els documents OSM.

De la mateixa forma que Open Street Map ofereix una plataforma on poder descarregar regions seleccionades en un mapa, això mateix pot ser recreat en el sistema, gràcies a través d'utilitzar OSM:

- Visor de mapes, pel que fa a la visualització i navegació en els mapes, cal oferir a l'usuari de primer de tot veure un mapa, desplaçar, ampliar i reduir l'àrea de visió.

El funcionament que sovint se segueix és el d'utilitzar una graella d'imatges, per aconseguir les imatges es poden fer peticions de les imatges a OSM, on la construcció del mapa serà feta pel sistema.

Per fer-ho s'han d'especificar i, per tant, controlar els següents paràmetres:

- Posició X (x): índex de les imatges segons l'eix horitzontal.
- Posició Y (y): índex de les imatges segons l'eix vertical.
- Zoom (z): nivell de zoom, com més petits són els valors, aquests contenen una àrea més gran.

Un cop especificats aquests tres paràmetres, podem obtenir requadres com el següent:

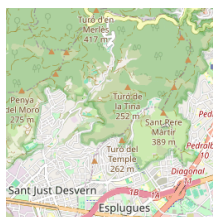


Figura 78: Resultat d'una part de la graella d'imatges.

Font: Elaboració pròpia.

Consideracions que cal tenir en compte són les següents:

- Relació nombre d'imatges per nivell de zoom: és així, com més alt és el nivell de zoom les fraccions d'imatges que componen el mapa del món és més i més gran, la relació és de 4^{zoom} .
- Camp de visió, s'ha de fer una valoració de quines imatges cal descarregar o quines no fa falta, per fer-ho hem de tenir en compte la posició de la càmera del sistema i l'amplitud del camp de visió.
- Indexació de les posicions, les imatges s'indexen començant per la part superior esquerra del mapa.
- Connexió a internet, cal tenir connexió a internet per poder utilitzar sense problemes aquest servei.

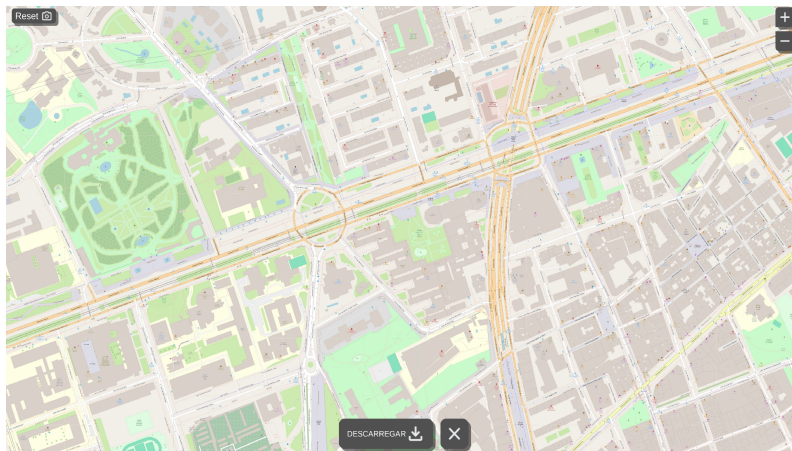


Figura 79: Resultat del visor de mapes.

Font: Elaboració pròpia.

- Descàrrega de fitxer OSM, per fer-ho utilitzarem la seva API on ens cal especificar els següents paràmetres de l'atribut bbox:
 - Longitud a l'esquerra (`left`): defineix la longitud mínima de la caixa.
 - Longitud a sota (`bottom`): defineix la latitud mínima de la caixa.
 - Longitud a la dreta (`right`): defineix la longitud màxima de la caixa.
 - Longitud a dalt (`top`): defineix la latitud màxima de la caixa.

La petició agafarà la posició que es troba l'usuari, i afegirem un desplaçament en les 4 direccions ponderades pel camp de visió de la càmera.

En rebre resposta de la petició, l'usuari podrà seleccionar la destinació del fitxer, en cas contrari, hi ha dues possibles casuístiques, l'àrea conté més de 50,000 punts o no s'ha establert connexió amb el servidor.

Ara dins del mateix sistema tenim la possibilitat de navegar la zona, descarregar el fitxer OSM d'aquesta, i importar la zona estudiar. Això ajuda a tenir un flux de treball uniforme i simple, sense tenir eines fragmentades.

Pel que fa a la generació resultant, tenim dos resultats, un sense la inferència implementada de geometria de les vies, generació multi carrils, detecció de carrils

bidireccionals, connexió de carrils, unió de punts per reduir redundància, exclusió opcional de vies no rellevants per vehicles motoritzats, l'altre fa ús de les millores implementades.

En aquest primer, veiem que hi ha continguda molta informació, però les vies manquen els seus carrils extra, les vies bidireccionals no es tenen en compte i tenim moltes vies per on no passen vehicles en la realitat:

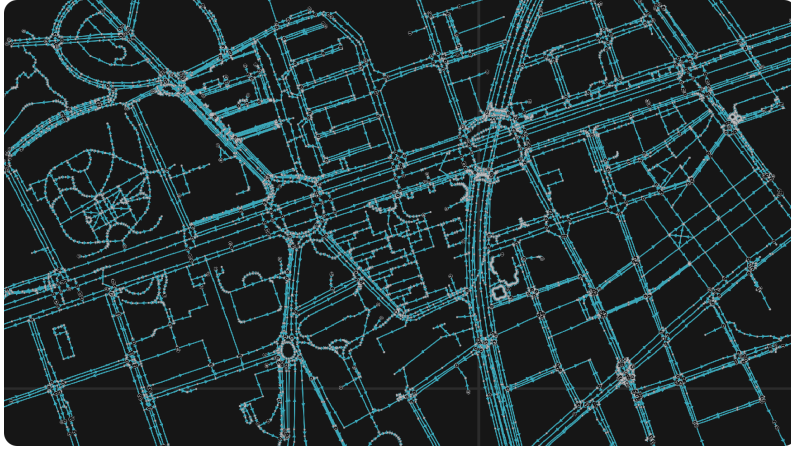


Figura 80: Resultat de la importació d'un fitxer OSM sense inferència.
Font: Elaboració pròpia.

Aplicant algunes de les tècniques d'inferència, reduïm punts de vies irrelevantes pel cas d'estudi i inferim informació útil sobre l'estructura real del sistema, això ens permet disminuir la fricció necessària per aconseguir tenir el model base en què treballar:

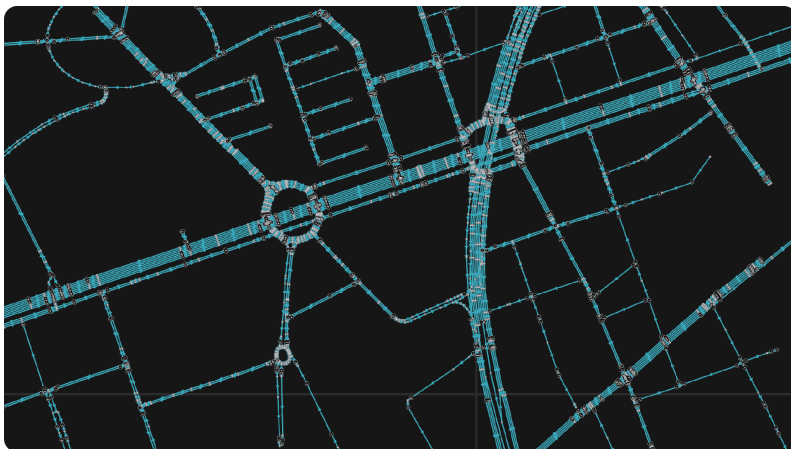


Figura 81: Resultat de la importació d'un fitxer OSM.
Font: Elaboració pròpia.

11 Definició de la simulació

En aquest apartat s'explica la simulació pas a pas per una comprensió del seu funcionament.

Anteriorment, s'ha fet una breu descripció en l'apartat de la modelització dels vehicles, aquesta explicava la introducció d'interval de temps i de la seva aplicació en els càlculs del desplaçament, en aquest cas, entrarem en més detall i parlarem de la caracterització i impacte en cada element.

Primer de tot, cal clarificar què entenem per simulació, una simulació és una aproximació d'un sistema real en un entorn digital, aquest permet aplicar la teoria per veure comportaments, d'altra banda, serien aquests serien difícilment deduïbles o bastant complexes.

Per exemple, una de les aplicacions de les simulacions, és en el comportament de les estrelles. Les estrelles han posat i encara posen a prova els límits de les teories conegudes fins al moment. Gràcies als ordinadors, es poden modelar les diferents interaccions complexes i analitzar-ne les conseqüències, això ens han ajudat a predir resultats com el col·lapse gravitatori d'una estrella en un forat negre.

Tanmateix, l'impacte de les simulacions no va ser concloure de manera rotunda la possibilitat dels forats negres, sinó que van ajudar a guiar la investigació i l'estudi d'aquest fet, és just això que busquem, fer una aproximació del comportament dels vehicles i elements de control en les infraestructures viàries fiable per ajudar a guiar i a prendre la millor decisió possible d'acord amb eficiència, factors socials i mediambientals.

El principal factor que caracteritza la simulació és el temps, el qual queda dividit en intervals en què dels vehicles, semàfors i passos de vianants, avaluaran els canvis que facin falta i s'actualitzaran a mesura que s'assoleix un nou interval.

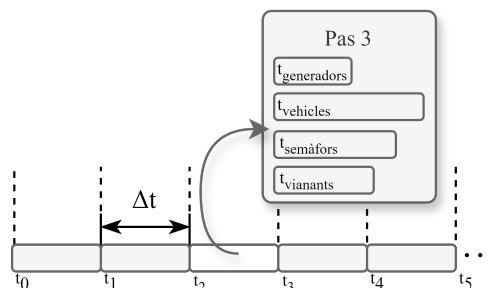


Figura 82: Resultat de la importació d'un fitxer OSM.

Font: Elaboració pròpia.

Els càlculs d'aquests intervals s'avaluaran en un temps de computació, aquest temps és el resultat del temps real que necessita la màquina a tractar cada un dels semàfors, vehicles, passos de vianants i generadors, i que pot estar per sobre o per sota del temps del pas (interval), indiferentment del temps que tardi la màquina a fer els càlculs, aquests tindran sempre en compte el temps d'interval que se'ls hi ha especificat.

La raó de dividir el temps en intervals és primer de tot decidir com són de freqüents els càlculs. Per exemple, definir intervals de només un nanosegon podria ser exces-

siu per la simulació aproximada de vehicles, ja que primer de tot no produiria canvis molt notables, i segon, tindria un gran cost computacional, per això mateix, s'assumeixen freqüències d'actualització més elevades en la que deixem que transcorrin els esdeveniments, com poden ser centèsimes o dècimes de segon entre interval i interval.

Degut això, els elements tindran accés a la duració de l'interval per així poder actuar de la forma correcta, també cal afegir que gràcies a això podem canviar la velocitat en què la simulació s'executa o parar-la en el temps.

A continuació, podem veure els tres botons, el primer començant per l'esquerra serveix per posar en marxa la simulació, el segon per aturar la simulació i l'últim per aturar la simulació.

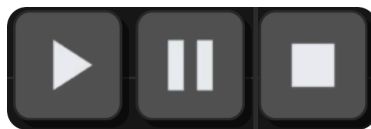


Figura 83: Controls de l'execució de la simulació.

Font: Elaboració pròpia.

Seguidament, es poden veure els controls de la velocitat de la simulació, aquests permeten controlar la mida dels passos, això vol dir encadenar passos de forma més ràpida però al cost d'una reducció en la precisió.



Figura 84: Controls de la velocitat d'execució de la simulació.

Font: Elaboració pròpia.

12 Monitoratge de les xarxes

En aquest apartat es tracten totes les eines que habiliten la capacitat d'analitzar i valorar les infraestructures durant i després de la simulació.

12.1 Preliminars

Abans de res, és adequat descriure les raons i la metodologia per destacar la importància de desenvolupar aquesta secció.

Primerament, una simulació sense retroalimentació de cap mena no ens pot aportar significat, això vol dir que d'alguna forma l'usuari ha de rebre informació sigui visual o a través d'informació.

Per aquesta raó el sistema compta amb una representació visual de les vies en la que l'usuari es pot desplaçar lliurement i detectar zones de conflicte, aquesta és la forma més senzilla tot i que essencial d'avaluar el seu funcionament.

És per això que a continuació es presenten els altres mètodes que s'han desenvolupat per aconseguir eines que aconsegueixen un gran rang de possibilitats i situacions.

12.2 Gràfiques

Les més sovint utilitzades són les gràfiques de línies, permeten visualitzar al llarg del temps l'evolució d'una mètrica. Per fer-ho, determinem primer les mètriques que es posaran a l'abast de l'usuari.

12.2.1 Mètriques

A continuació es presenten les diferents categories que s'incorporen en el sistema i les seves raons d'existir.

12.2.1.1 General

Les mètriques considerades d'abast general és informació sobre el sistema, com informació de quants vehicles s'han generat, quants s'han absorbit, quants vehicles hi ha actualment dins del sistema i la relació entre nombre de vehicles generats/absorbits.

Què ens aporta tot això? Doncs bàsicament, permet a l'usuari avaluar si de forma global la generació dels vehicles no presenta irregularitats, també permet veure si els vehicles absorbits també concorden, això pot evitar problemes de configuració o per trobar problemes de l'estructura implementada.

12.2.1.2 Fluxos

De forma similar a l'apartat anterior, en aquest cas ens trobem reflectits el nombre de vehicles per unitat de temps, un flux, ens permet avaluar si realment la construcció de la via i la implementació és el correcte, i el flux d'absorció també ens dona algunes pistes de possibles problemes de caràcter general.

Per calcular el flux es necessiten dues mesures i l'interval de temps entre aquestes dues:

$$Flux(veh/h) = \frac{3600 \cdot (vehiclesGenerats - vehiclesGeneratsAnterior)}{intervalDeTemps}$$

12.2.1.3 Velocitats

Relacionat amb les velocitats extreiem la velocitat guanyada, perduda, mitjana i percentatge de temps frenant. D'aquesta forma es pot valorar la velocitat que pren una via, alhora que també veure si es presenten molts canvis de velocitats, ho sigui, punts on els vehicles frenen i reprenent la marxa, sovint en semàfors.

En la majoria de les mètriques, el recompte el farà cada vehicle individualment, per fer-ho en aquest cas mantindrà un seguiment sobre els canvis en velocitat, segons si són positius o negatius seran guardats en una àrea diferent, també es tindrà en compte quan el vehicle està aplicant la frenada per saber el temps que ha utilitzat el fre al llarg del viatge.

Per acabar, la mesura retornada de totes aquestes mètriques serà dividida pel temps que el vehicle ha estat en ruta, això assegura que es poden extreure valors proporcionals.

12.2.1.4 Distàncies

Pel que fa a les distàncies, obtenim tant la distància de la ruta com el temps de la ruta mitjana, això ens fa que es pugui valorar si en algun lloc apareixen bucles que augmentin aquests temps i també valorar el temps esperable per recórrer el circuit.

De la mateixa forma els vehicles tenen en compte les distàncies recorregudes i el temps que han estat actius per retornar aquestes mètriques.

12.2.1.5 Energia

En aquest cas incorporem la parametrització extensiva del sistema, que ens permetrà extreure informació de l'energia aproximada que consumeix al llarg del trajecte.

Per aconseguir l'energia consumida modelitzar alguns components més, com és la distribució de vehicles, això vol dir indicar la proporció de:

1. Cotxes
2. Furgonetes
3. Motos
4. Autobusos
5. Camions

Per cada tipus de vehicle s'atribueixen la seva càrrega, el nombre de passatgers, el coeficient de rodament, el coeficient de resistència de l'aire i la superfície frontal.

La distribució de tipus de motor per cada un dels tipus de vehicles:

1. Gasolina

2. Dièsel
3. Híbrid
4. Elèctric
5. Hidrogen

Per cada motor, s'indica l'eficiència i en el cas dels elèctrics i híbrids tenim també el *retorn d'energia en frenada* i la *taxa de càrrega màxima* del vehicle. En el cas dels híbrids també s'indica el *límit d'energia abans d'entrar en joc el motor de combustió*.

Per cada un dels encreuaments de tipus de vehicle i tipus de motor es parametriza també la seva *massa*.

Finalment, amb tots aquests paràmetres podem estimar l'energia que necessiten per navegar la xarxa, per fer-ho farem servir un seguit de fórmules:

- Primer, pels càlculs posteriors necessitem la massa total del vehicle:

$$m = m_{\text{vehicle}} + m_{\text{càrrega}} + m_{\text{passatgers}}$$

$$m_{\text{passatgers}} = \text{númeroPassatgers} \cdot \text{massaMitjanaPersona}$$

Aquest valor ens permet valorar l'oposició que presenta l'objecte per ser frenat i accelerat en forma de l'energia.

- L'energia destinada al rodament del vehicle, a través de consultar l'article "*Forces on wheels and fuel consumption in cars*" [15] i algunes de les seves referències que tracten l'anàlisi del cost energètic del rodament d'un vehicle, adaptem la fórmula següent al sistema:

$$E_{\text{friccióRodament}} = \mu_{\text{rodament}} \cdot \mu_{\text{superfície}} \cdot m \cdot g \cdot d$$

$$d = v \cdot \Delta t$$

on:

- μ_{rodament} és el coeficient de rodament del vehicle.
 - $\mu_{\text{superfície}}$ és el coeficient de fricció de la superfície.
 - m és la massa total del vehicle (kg).
 - g és l'acceleració deguda a la gravetat del planeta (m/s^2).
 - d distància del desplaçament (m).
 - v és la velocitat actual del vehicle (m/s).
 - Δt és l'increment de temps (s).
- També cal considerar la fricció amb l'aire dels vehicles, on s'ha consultat "*Fuel savings on a heavy vehicle via aerodynamic drag reduction*" [16] de l'anàlisi de la fricció de l'aire i les conseqüències en consum de combustible

dels vehicles, amb algunes adaptacions al nostre cas:

$$E_{\text{aire}} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot C_d \cdot A \cdot v^2 \cdot d$$

$$d = v \cdot \Delta t$$

on:

- ρ és la densitat de l'aire (kg/m^3).
 - C_d és el coeficient de resistència aerodinàmica.
 - A és l'àrea frontal del vehicle (m^2).
 - v és la velocitat actual del vehicle (m/s).
 - Δt és l'increment de temps (s).
- Per avaluar la variació de l'energia cinètica, tenim l'article de “*Analysis of kinetic energy recovery systems in electric vehicles*” [17] sobre aquesta temàtica, igual que en els altres casos s'han fet adaptacions, on podem utilitzar la següent fórmula per calcular la diferència entre l'energia cinètica inicial i final:

$$\Delta E_{\text{cinètica}} = E_{\text{cinètica, final}} - E_{\text{cinètica, inicial}}$$

$$\Delta E_{\text{cinètica}} = \frac{1}{2} m (v_{\text{final}}^2 - v_{\text{inicial}}^2)$$

on:

- m és la massa total del vehicle (kg).
- v_{final} és la velocitat final del vehicle (m/s).
- v_{inicial} és la velocitat inicial del vehicle (m/s).

Per tant, per mantenir el vehicle a una velocitat determinada computarem les diferents energies que s'han de destinar a les friccions, i en el cas que es produeixi una variació positiva en la velocitat avaluarem la diferència en l'energia cinètica per calcular el cost que s'ha de destinar.

Alguns casos específics que ens hi cal dedicar més detall són els dels vehicles híbrids i elèctrics, els quals permeten un retorn de l'energia en la frenada.

Per fer-ho, tractarem els casos que la diferència de l'energia cinètica sigui “negativa”, aquesta energia serà ponderada per l'eficiència del sistema de recuperació en la frenada, i limitada per l'energia màxima que poden adquirir les bateries per unitat de temps, quedaria així:

$$E_{\text{recuperada}} = \min(\Delta E_{\text{cinètica}} \cdot \eta_{\text{recuperació}}, E_{\text{entrada màxima bateria}})$$

on:

- $\Delta E_{\text{cinètica}}$ és la variació de l'energia cinètica (J).
- $\eta_{\text{recuperació}}$ és l'eficiència en el retorn d'energia en el frenat.
- $E_{\text{entrada màxima bateria}}$ és l'energia màxima que pot rebre d'entrada la bateria (J).

Tant l'entrada màxima com l'eficiència en la recuperació de l'energia queden parametritzades i poden ser modificades per l'usuari pels vehicles híbrids i elèctrics.

Tot això, fa possible la recollida de les mètriques individualment per tipus de motor i el recull col·lectiu de l'energia total consumida pel sistema, d'aquesta forma:

$$\text{Energia Total} = \frac{E_{\text{cinètica}} + E_{\text{fricció aire}} + E_{\text{fricció terra}}}{\eta_{\text{motor}}}$$

12.2.1.6 Combustibles

Pel que fa als combustibles, tenim tres classes:

1. Gasolina
2. Dièsel
3. Hidrogen

En el consum de cada un dels seus components es produeix sempre una quantitat d'energia determinada, això permet extreure l'equivalent de combustible consumit per assolir l'energia necessària que està consumint el vehicle.

Per fer-ho utilitzarem la fórmula següent:

$$\text{Combustible Utilitzat (kg)} = E_{\text{total}} \cdot E_{\text{combustible}}$$

Finalment, s'aplica la conversió a litres, ja que el consum d'aquests combustibles se sol utilitzar aquesta forma, i l'hidrogen que es consumeix es troba comprimit.

$$\text{Combustible Utilitzat (L)} = \text{Combustible Utilitzat (kg)} \cdot \text{Volum (L/kg)}$$

Com tots els anteriors, els paràmetres poden ser modificats en el sistema per adaptar-se a possibles variacions a valors més fidels als esperats.

12.2.1.7 Emissions

Ara sí, en extreure el total dels combustibles consumits es poden calcular les emissions, centrades com en l'apartat anterior en els motors de:

1. Gasolina
2. Dièsel
3. Hidrogen

Per cada combustible, es pot calcular l'equivalent en emissions de cada compost químic. Per conèixer les emissions d'un compost específic, es pot utilitzar la fórmula següent:

$$\text{Emissions (g)} = \text{Combustible Utilitzat (kg)} \cdot \text{Factor d'Emissions Combustible (g/kg)}$$

A través d'alguns dels llibres referenciats de simulació de trànsit en l'apartat vuit, i els següents articles de recerca: dos en l'emissió de partícules contaminants, "A

review on air emissions assessment: Transportation” [18] i “*The transport sector as a source of air pollution*” [19], i un article en el cas específic de l’emissió en motors dièsel “*Chemical characterization of particulate emissions from diesel engines: A review*” [20].

S’han seleccionat els següents composts, amb possible ampliació a futur són els següents:

- **CO₂**: Diòxid de carboni. Gas d’efecte hivernacle responsable principal del canvi climàtic.
- **PM**: Partícules sòlides i líquides en suspensió. Afecten la qualitat de l’aire i la salut respiratòria, tenen gran impacte en zones urbanes.
- **NO_x**: Òxids de nitrogen. Compostos contaminants que contribueixen a la pluja àcida i a la contaminació atmosfèrica fotoquímica, un dels pocs contaminants dels vehicles de motor d’hidrogen, veure “*An overview of hydrogen as a vehicle fuel*” [21].
- **SO₂**: Diòxid de sofre. Contaminant que contribueix a la pluja àcida i a problemes respiratoris.
- **VOC**: Compostos orgànics volàtils. Substàncies químiques que s’evaporen fàcilment i contribueixen a la formació d’ozó i contaminació atmosfèrica.
- **CO**: Monòxid de carboni. Gas tòxic incolor produït per la combustió incompleta de combustibles.
- **HC**: Hidrocarburs no cremats. Compostos orgànics que contribueixen a la formació d’ozó troposfèric i contaminació atmosfèrica.

Seguint el procediment de mètriques anteriors, aquestes quedaran desglossades per cada un dels compostos i es veuran quantificades en el moment que un vehicle finalitzi el seu trajecte.

12.2.2 Visualització

Un cop establert el càlcul de les mètriques, és necessari recollir-les per posteriorment visualitzar-les.

La recollida d’aquests valors els portaran a terme individualment els vehicles, i un cop finalitzada la seva ruta, els seus valors seran afegits als comptadors globals d’aquella mètrica.

A mesura que anem recollint les dades, tindrem en compte el període de recollida, quan arriba el moment de la recollida, es guarda el valor de cada un dels comptadors juntament amb l’instant en què s’ha capturat la informació, això ens permet establir un seguiment entre cada interval de temps de què està passant en el sistema.

Una de les maneres més eficients de donar utilitat a les dades que recollim és la visualització amb gràfiques, d’aquesta forma es pot veure ràpidament l’evolució de les mètriques al llarg del temps.

Per fer la implementació d’aquestes cal fer extensions en l’apartat d’interfície que ofereix el motor que estem utilitzant, Unity:

- **Renderitzador de Línies per Interfície**, aquest component farà ús de l'extensió *Graphic* de *UnityEngine.UI*, i modificacions sobre la funció *OnPopulateMesh*, aquesta et permet especificar la geometria del component en la interfície.

Similar a com componem la geometria de les corbes Bézier, aquest funcionarà amb una llista de punts, per formar la geometria, calcularem el vector que els uneix, també la normal ponderada pel gruix de la línia que volem dibuixar i generarem dos triangles amb els punts resultant, això farem punt a punt fins a acabar la llista.

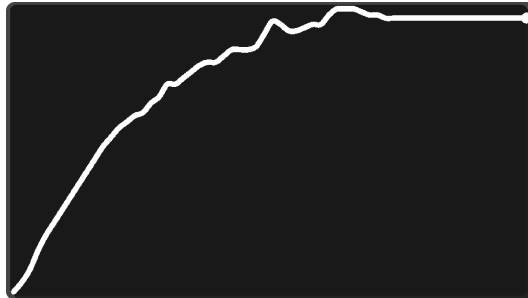


Figura 85: Renderitzat d'una línia.

Font: Elaboració pròpia.

- **Renderitzador d'Àrees per Interfícies**, similar al component de línies per fer les composicions utilitzarem l'extensió que ens ofereix Unity, aquest component ens servirà per mostrar de forma més professional les gràfiques.

Tot i continuar rebent una llista de punts, aquests defineixen el recinte de la geometria, per tal de definir la superfície, utilitzarem una tècnica anomenada tall d'orelles, consultar "*Ear-clipping based algorithms of generating high-quality polygon triangulation*" [22], on de forma progressiva: l'algoritme selecciona tres vèrtexs consecutius, assegura que cap punt de la llista es trobi dins del triangle, i elimina el punt intermedi (el tall d'orella). Es repeteix fins a triangular el polígon que necessitem.



Figura 86: Renderitzat de l'àrea de la línia.

Font: Elaboració pròpia.

Un cop tenim definits aquests dos components ja ho tenim tot per representar les dades que s'han registrat al llarg del temps, llavors només ens cal ara calcular les posicions dels punts, que per l'eix X tindrà els valors escalats dins de l'amplada del component, i l'eix tindrà les posicions dels punts escalats en l'alçada del component.

Per avaluar de forma dinàmica l'estabilitat dels valors que es visualitzen en la gràfica es proporciona la desviació estàndard com a valor auxiliar.

Finalment, el sistema ja té tot el necessari per incorporar la visualització de les dades que s'extreuen del sistema: cada vehicle en finalitzar la ruta transmet els seus valors, el comptador els agrupa i aquests es passen a la gràfica.

Per donar un valor afegit al sistema, es desglossen en diferents pestanyes segons les mètriques segons l'àrea que tracten:

- General, vehicles generats, absorbits, ràtio i diferència entre aquests dos.
- Fluxos, flux d'entrada, sortida i la ràtio entre aquests dos.
- Velocitats, velocitat mitjana, guanyada, perduda i percentatge de temps de frenada.
- Rutes, que agrupa les distàncies i el temps de ruta.
- Emissions, representades amb CO_2 , PM, NO_x , SO_2 , VOC, CO i HC.
- Combustibles, consum en litres de gasolina, dièsel i hidrogen.
- Energia, consumida pels motors de gasolina, dièsel, elèctric, hidrogen i la total.



Figura 87: Pestanyes de selecció dels gràfics.

Font: Elaboració pròpia.

De forma paral·lela les dades recaptades poden exportar-se en un fitxer de tipus CSV (Valors Separats per Coma), això facilita el processament i la visualització específica que requereixi l'usuari i no estigui present en el sistema.



Figura 88: Exportació de les mètriques de la simulació a CSV.

Font: Elaboració pròpia.

Com moltes altres àrees del sistema, es pot parametritzar la forma en què és recopilant les mètriques en un apartat de configuració, aquest apartat permet:

- Total de mostres màximes, el nombre màxim de períodes en què quedarà registrat els valors, aquestes mostres un cop arribin al màxim, sempre se sobreescrirà el valor més antic.
- Interval de temps de mostres, que especificarà el temps intermedi entre cada recopilació de valors.

- Vista gràfica de mostres, el límit de mostres que es visualitzen dins de la interfície, això permet reduir grans aglomeracions de valors.
- Mitjana de mostres, aquest és el nombre de mostres que s'utilitzarà per fer el càlcul de fluxos.
- Mostrar últimes mostres, limitat pel nombre de mostres es pot decidir si només mostrar les últimes, o mostrar la gràfica del primer valor fins a l'últim.

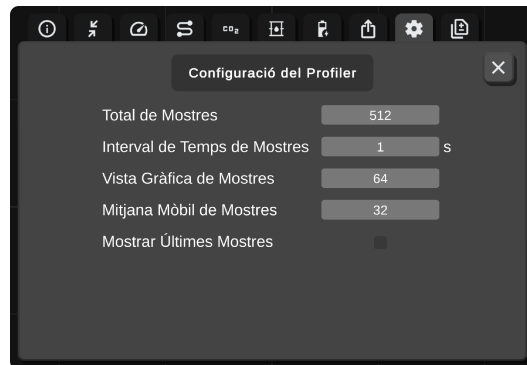


Figura 89: Exportació de les mètriques de la simulació a CSV.

Font: Elaboració pròpia.

En la figura següent tenim l'exemple de com es veu la gràfica finalment dins del sistema, amb el gradient, el màxim i els mínims en cada eix, el valor de l'últim valor, subtítols dels eixos i el títol de la gràfica:

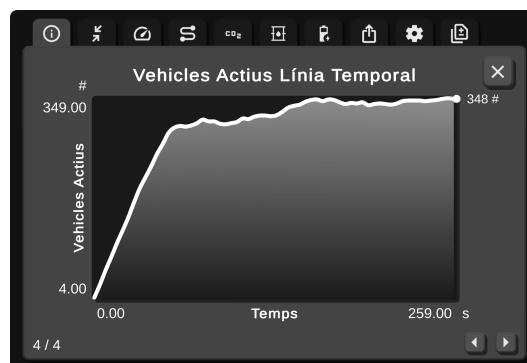


Figura 90: Configuració de la recollida i visualització del mapa de calor.

Font: Elaboració pròpia.

12.3 Comparacions de Gràfiques

El motiu final de recollir tots aquests valors és l'habilitat de comparar les diferents modificacions que es proposen al sistema, és això el que ens ajuda a establir la perspectiva necessària per valorar que ens aporten els canvis que hem aplicat.

Per habilitar la comparació de les simulacions utilitzarem els fitxers CSV exportats introduïts en l'últim apartat, l'usuari pot afegir els diferents fitxers i el sistema s'encarregarà de llegir-los i posar-los en memòria.

Un cop llegits utilitzarem el visor de gràfiques anterior, superposarem tants gràfics com fitxers llegits, pintarem cada un d'ells amb un color diferent, l'últim pas és assegurar que cada gràfic manté la mateixa escala a cada eix, per fer-ho calcularem

el valor màxim i mínim de la mètrica utilitzada i dels períodes de cada un dels fitxers llegits, juntament amb l'amplada i l'alçada del component aconseguim esclarar correctament les gràfiques.

Cada recull de dades es visualitzarà amb un color diferent on tindrem una distribució similar a la del monitoratge de gràfiques, on es veuran els valors màxims i mínims absoluts en els eixos, amb els subtítols i títol corresponents. Compta també amb les accions d'eliminar totes les seqüències carregades, o d'afegir-les individualment:

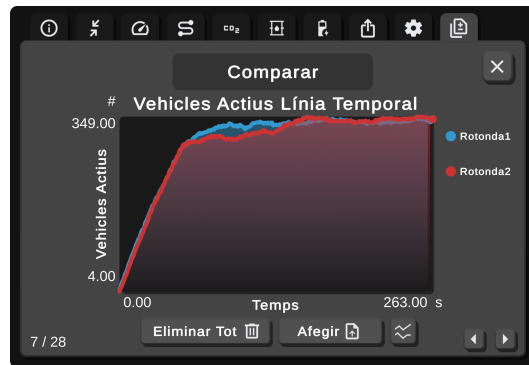


Figura 91: Gràfic de línies per la comparació de mètriques.
Font: Elaboració pròpia.

Per complementar la informació que podem extreure de la superposició de les gràfiques, també s'ha considerat necessari aconseguir una visió més global a partir dels anomenats gràfics radials.

Els gràfics radials projecten n variables una en cada eix des del centre de la gràfica a un angle equidistant. per fer la visió d'aquestes gràfiques comprensible els usuaris poden seleccionar quines són les n variables que se sobreposen, quedaria així:

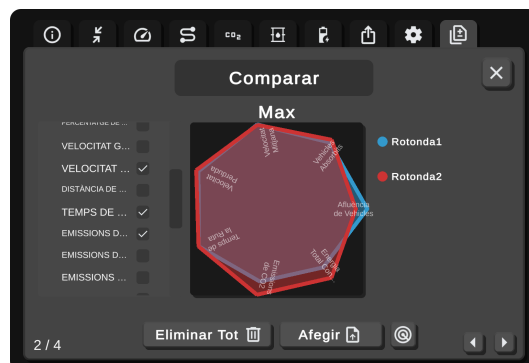


Figura 92: Gràfic radial per la comparació de mètriques.
Font: Elaboració pròpia.

12.4 Mapes de Calor

El sistema ara mateix ens proporciona l'avaluació del sistema a través de la seva representació gràfica que ens permet observar els vehicles navegant per les vies. També, en els últims apartats introduïm el recull de mètriques i la visualització d'aquestes a través de gràfiques amb la possibilitat de comparativa, tot i això, en aquestes dades no aconseguim recollir informació espacial del sistema.

És per això que en aquest apartat introduïm els mapes de calor, els mapes de calor ens permeten obtenir anteriors les mètriques i poder de forma ràpida avaluar en

quines àrees o quines són les causes d'aquestes, i al mateix temps, aconseguim de forma directa comparar els valors de cada casella dins del mapa de calor en diferents modificacions del sistema, ja que tenen una relació directa segons la posició.

Pel que fa al funcionament i la recollida de les dades del mapa de calor està centrada en diferents especificacions de l'usuari:

- Mida de la cel·la, la generació del mapa de calor s'adapta fins a les vores dels components del sistema, cobrint tota l'àrea de dins, aquesta àrea està dividida en cel·les, la seva mida determinarà la posició en què els vehicles guardaran la seva informació durant el trajecte.
- Tassa d'actualització dels vehicles, aquest paràmetre decideix la freqüència en què els vehicles envien les seves dades al mapa.

Pel que fa a propietats destinades al format de la visualització:

- Tassa de mostreig, aquest paràmetre decideix la freqüència en què s'actualitza la visualització per pantalla a l'usuari.
- Opacitat, determina com de transparent es mostra l'àrea de visualització sobre posada sobre la via.
- Mostrar/ocultar, simplement permet amagar o ensenyar el component.
- Mode, defineix la mètrica visualitzada en el mapa de calor.
- Interpolació, afegeix interpolació del color entre les cel·les amb les conseqüències d'un cost computacional més elevat.

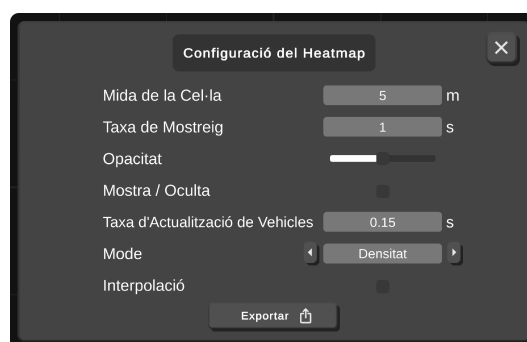


Figura 93: Configuració de la recollida i visualització del mapa de calor.

Font: Elaboració pròpia.

Per afegir valor a les mètriques, es permeten exportar aquestes dades per cada un dels modes, així es pot comparar amb altres modificacions al sistema per valorar el seu impacte en les diferents mètriques.

Seguidament, tenim la imatge del mapa de calor d'una àrea de simulació:



Figura 94: Retall del mapa de calor exportat.
Font: Elaboració pròpia.

Cal destacar, que el sistema també compta amb una llegenda en la qual s'indiquen els colors dels valors màxims i els mínims dels requadres, i el ventall de colors entre aquests dos, en aquest cas estan indicats amb els colors blaus i vermell.

13 Altres característiques

L'apartat a continuació recull el seguit d'algunes de les característiques que milloren el sistema i són d'agrair a l'hora d'utilitzar-lo.

13.1 Suport d'idiomes

Per facilitar l'ús del sistema es necessari poder proporcionar els textos en pantalla en l'idioma de l'usuari, per poder-ho incorporar s'acostuma a fer de la següent forma: cada element de text queda vinculat a una clau/variable, en el moment de mostrar el text, es busca la fila on es troba la clau, i s'agafa la columna corresponent a l'idioma seleccionat del sistema.

La tasca que cal fer és assignar a cada text una variable i crear la taula amb les variables i les traduccions de cada paraula, en aquest cas ho farem pel català, castellà i anglès, però per fer l'ampliació a altres idiomes únicament cal afegir una nova columna i fer les traduccions per cada paraula.

Per fer l'ampliació a idiomes amb caràcters diferents dels del llatí s'haurà d'associar una família de text que permetí adaptar-se als seus caràcters, però no provocarà cap més dificultat afegida.

13.2 Configuració de la finestra

Poder posicionar còmodament el programa per treballar és bàsic per millorar l'experiència de l'usuari, en aquest cas es permet canviar els diferents estats de la finestra en pantalla completa, finestra o finestra sense marges, en cas que l'usuari disposi de més d'una pantalla i trobar-se en pantalla completa podrà decidir en quin pantalla es posiciona el programa, també es pot decidir la resolució en què es visualitza i la freqüència d'actualització.

13.3 Capacitats del visor

Durant la utilització de l'eina s'utilitza la càmera per visualitzar els elements en l'escena, per determinar com es veu utilitza factors com la seva posició i rotació, per la gran majoria de situacions la càmera utilitzada serà en mode ortogràfic, això vol dir que la forma en què veurem la imatge no tindrà un punt de fuga, les projeccions seran totes perpendiculars al pla de visió de la càmera, sobre aquesta aplicarem modificacions de la posició en dos eixos per aconseguir desplaçar-nos per l'entorn i canvis en la mida del pla de visió per ampliar o allunyar-nos.

Una ampliació feta sobre aquestes característiques és la possibilitat de canviar a una visualització tridimensional a través del mode de la càmera, utilitzant en aquest cas la visió en perspectiva. Per controlar la càmera en aquest cas apliquem canvis de posicions en els tres eixos i rotacions per canviar l'orientació de la càmera. Pel que fa al desplaçament s'aplicaran restriccions respecte a l'alçada.

13.4 Interfície

La creació i planificació de la interfície ha tingut en tot moment com a objectiu mantenir un format simple i estructurat.

En la banda superior esquerra trobem un desplegable amb els diferents modes a escollir:

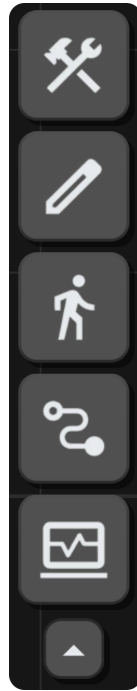


Figura 95: Menú de selecció de mode en el sistema.

Font: Elaboració pròpia.

En la part inferior esquerra trobem la posició del visor i l'opció de tornar a l'origen de coordenades:



Figura 96: Informació de la càmera en el sistema.

Font: Elaboració pròpia.

En la part superior dreta tenim els fotogrames per segon, el botó per obrir el menú de configuració general, el nombre de punts en escena, el nombre de vehicles en escena i el límit de temps d'execució per pas:

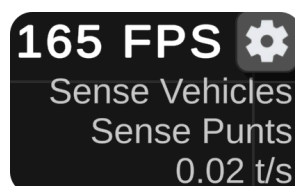


Figura 97: Informació general de l'entorn i configuració.

Font: Elaboració pròpia.

En la part inferior dreta situem accions específiques per cada secció del sistema com per exemple, guardar, edició de punts, afegir generadors, inspector d'elements o canviar velocitat de la simulació:



Figura 98: Panell d'inspecció d'elements.

Font: Elaboració pròpia.

En la part inferior central situem alguns elements específics com els de la secció de simulació que són les accions de control de la simulació, la configuració d'elements de la simulació, el monitoratge de mètriques i la configuració del mapa de calor:



Figura 99: Controls en el mode de simulació del sistema.

Font: Elaboració pròpia.

Aquí tenim la visió general del que és la secció de simulació del sistema:

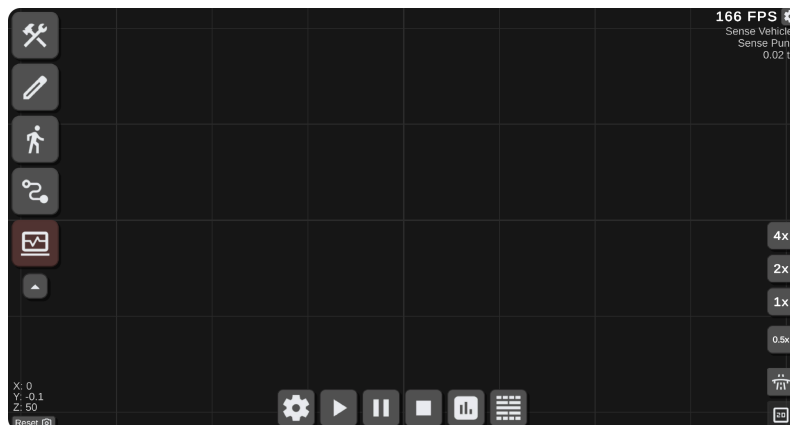


Figura 100: Exemple de la visualització de la interfície.

Font: Elaboració pròpia.

En la interfície trobem diferents elements a diferència dels botons per adaptar-se millor a les necessitats de l'acció a fer, com per exemple entrades de text:



Figura 101: Camp de text de la interfície.
Font: Elaboració pròpia.

Menús desplegable:



Figura 102: Menú desplegable de la interfície.
Font: Elaboració pròpia.

Botons de selecció:



Figura 103: Botó de selecció de la interfície.
Font: Elaboració pròpia.

Llistes de selecció:

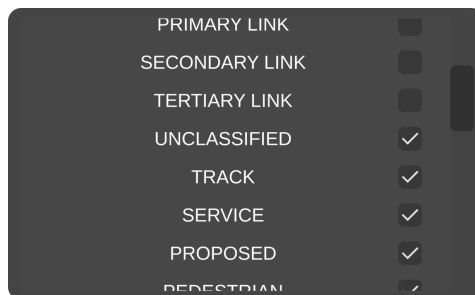


Figura 104: Llista de botons de selecció de la interfície.
Font: Elaboració pròpia.

Per proporcionar informació sobre els botons que mostren únicament icones en la seva àrea de selecció, afegim caixes de text descriptives en el moment que l'usuari arrossega el ratolí per sobre dels botons:

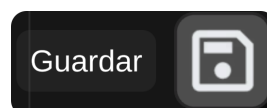


Figura 105: Informació associada als botons amb icones.
Font: Elaboració pròpia.

En la interacció dels botons, trobem tres canvis visuals, el canvi de cursor per defecte al punter de selecció/mà, per indicar a l'usuari que es troba sobre una àrea d'interacció, també s'incrementa la mida del botó visualment i quan l'usuari interactua amb el botó, aquest redueix la seva mida fins a finalitzar la interacció, finalment retorna a l'estat per defecte quan la interacció acaba.

13.5 Tècniques d'optimització

Per poder proporcionar un sistema escalable i adaptable a multitud de casos, es recullen algunes de les tècniques utilitzades per millorar la seva eficiència.

En avaluació dels canvis per determinar si eren positius o negatius pel rendiment s'ha fet d'acord amb resultats extrets del frame time del programa, i la utilització del *Unity Profiler* per avaluar quines parts del codi suposaven un cost temporal més elevat.

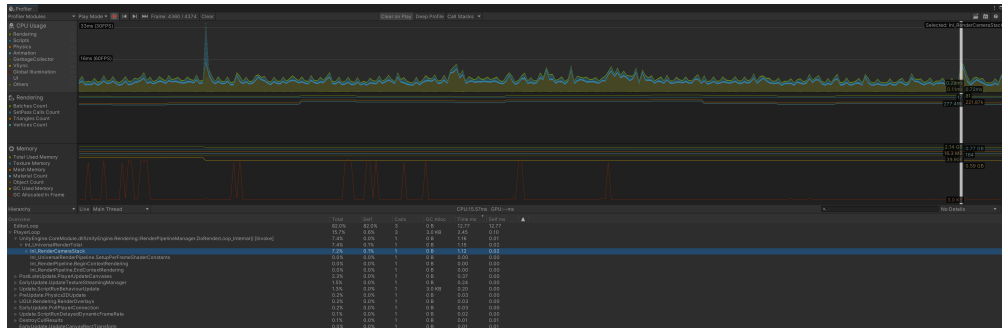


Figura 106: Captura de pantalla del Unity Profiler.

Font: Elaboració pròpia.

13.5.1 Vehicles

Hi han múltiples millores de rendiment aplicades als vehicles, ja que aquests són els que produeixen els càlculs de forma constant i poden acostumen a ser els que apareixent amb més quantitat al semàfor en consideració a altres agents dinàmics com passos de vianants o semàfors.

Una de les millores ha estat en l'apartat de renderitzat, en el que s'han creat models amb diferents nivells de detall, on més detall significa més vèrtexs definint la malla, lligat al seu corresponent cost computacional, segons si l'usuari es troba a prop d'un model o lluny s'escull el nivell de detall:

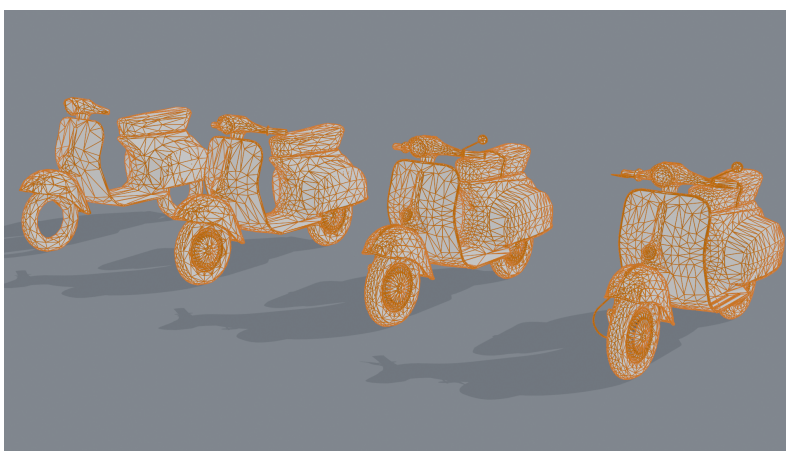


Figura 107: Nivells de detall en els models.

Font: Elaboració pròpia.

Respecte al renderitzat dels *Sprites*, tenim dos factors per a adreçar un és la complexitat de les malles que se'ls hi assigna (aquests utilitzen malles, ja que el renderitzat en dues dimensions és una extensió del renderitzat en tres dimensions de *Unity*), que podem modificar manualment:

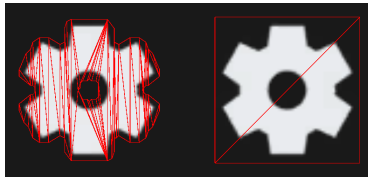


Figura 108: Comparació d'una malla complexa i una simple.

Font: Elaboració pròpia.

Aquesta simplificació pot suposar increments de costos temporals a causa de la superposició de diferents *Sprites* a l'estar menys ajustats als seus píxels, per aquesta raó, es busca trobar un balanç entre una malla amb pocs polígons, però que s'ajusti bé als píxels de color de la imatge, aquí tenim un exemple de la visualització de la superposició de píxels:

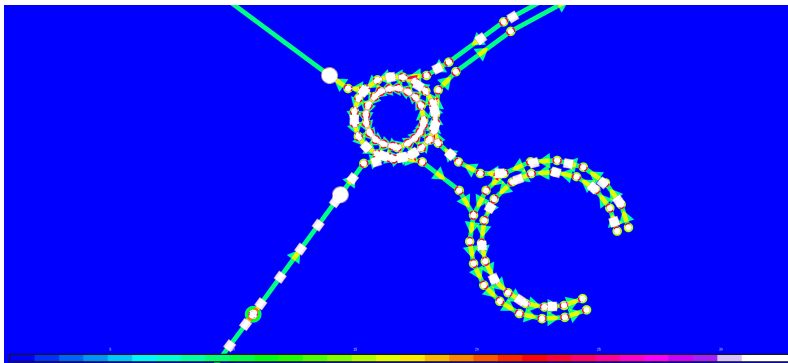


Figura 109: Mostra de la superposició de píxels en el sistema.

Font: Elaboració pròpia.

Les optimitzacions realitzades són varies, algunes a destacar són:

- Creació d'un seguit de vehicles, on només s'activen els que es van necessitant, i es desactiven els que no es necessiten, aquesta tècnica es coneix com a *object pooling*, i evita el cost de crear i eliminar els objectes, a més dels problemes de *Garbage Collection*.

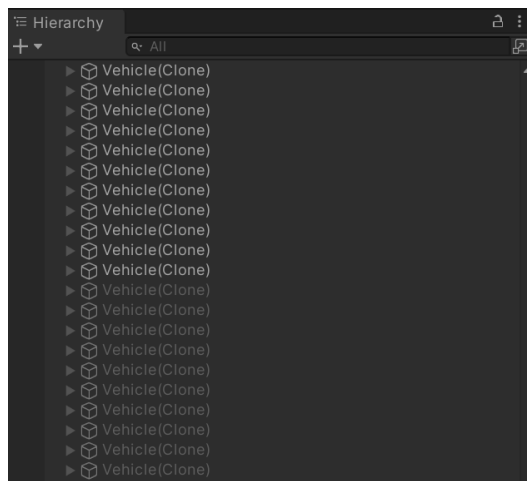


Figura 110: Vehicles creats i desactivats prèviament a ser utilitzats.

Font: Elaboració pròpia.

- La recollida de les mètriques s'acumulen i es comparteix només en finalitzar el seu trajecte.

- La utilització de *Rigidbody.MoveRotation()* i *Rigidbody.MovePosition()* en comptes d'actualitzar els canvis en el *transform*.
- El càlcul d'algunes de les distàncies es fan sense utilitzar arrels, les quals són operacions costoses.

13.5.2 Corbes

D'aquestes podem destacar tres optimitzacions:

- Resolució, per resolució entenem el nombre de punts que són calculats de la corba Bézier, per poder millorar en aquest aspecte, si l'usuari no modifica els punts auxiliars, es manté la resolució més baixa de dos punts.
- Els vehicles accedeixen a les posicions d'aquestes corbes, aquesta és una llista de posicions que es precalculada i tots els vehicles utilitzaran la mateixa.
- En ampliar o reduir la proximitat de la càmera, les corbes i les icones actualitzen la seva mida per adaptar-se a aquests canvis, per evitar la modificació simultània d'aquests, es fa de forma asíncrona i únicament en els objectes que es troben dins la visió de la càmera.

13.5.3 Mapa de calor

Les regions del mapa de calor són una gran matriu de comptadors, que es mantenen actualitzats per la informació que enviant a cada pas els vehicles, això és inevitable, però una de les grans limitacions que presentava és la renderització en forma d'imatge de la graella, aquesta dependrà de la via i pot sobrepassar fàcilment els milions de píxels, això suposa un gran cost computacional, i hi ha altres alternatives, però per limitacions s'ha deixat aquesta metodologia i s'ha aplicat l'actualització asíncrona de la imatge i la còpia i càlcul de píxels amb tires.

13.5.4 Navegació de mapes

La navegació de mapes utilitza tres tècniques, la càrrega asíncrona de cada una de les parts de la graella, el guardat en disc de la part de la graella per evitar peticions a través d'internet d'informació ja present i per últim la utilització de *object pooling*.

13.5.5 Altres

Algunes de les altres optimitzacions han estat els següents:

- Guardat de l'objecte *WaitForSeconds* de les corutines.
- Simplificació de les interfícies.
- Utilització de *StringBuilders* per modificar eficientment *strings*.
- Utilització de *ScriptableObjects* per reduir el volum de memòria utilitzat per objectes similars.
- Utilització de *SpriteAtlas* per reduir el número de vegades que necessita dibuixar en renderitzar.
- Utilització de potències de dos en les imatges importades.

- Limitat el nombre d'elements de la interfície amb *Raycast*.
- Desactivació d'elements que no interactuen entre ells en la matriu de col·lisions.
- Modificació dinàmica del *FixedTimeStep* per adaptar-se a situacions més intenses de computació.
- Revisió constant de les parts que contribuïen en el *frame time*.

14 Descripció del sistema final

Per resumir la comprensió completa del sistema desenvolupat tenim el procés que es continuaria utilitzant l'eina de principi a fi per l'estudi d'una infraestructura viària:

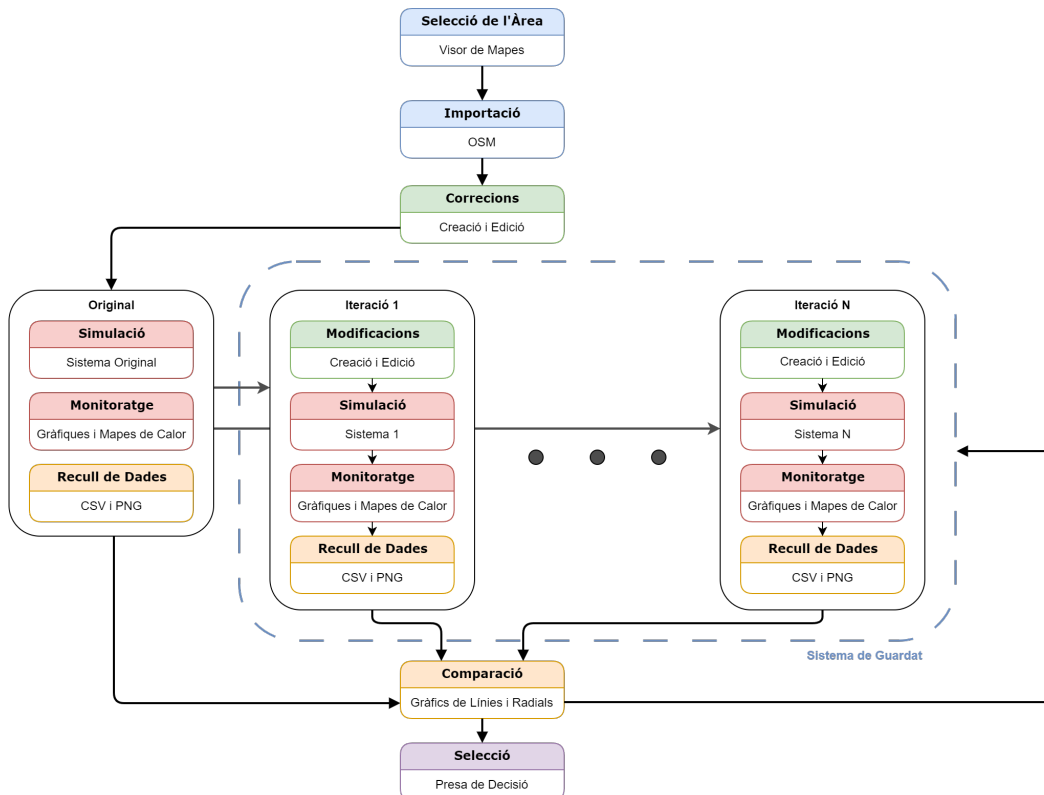


Figura 111: Flux de treball integrat del sistema.

Font: Elaboració pròpia.

En blau: els sistemes de descàrrega de mapes, importació i guardat, ens permeten de forma ràpida descarregar la zona d'interès a estudiar des del visor de mapes o també de fitxers ja existents de format OSM. Ajuda a tenir una empenta inicial a l'hora de fer el prototipatge des d'una maqueta aproximada de la zona i poder fer múltiples iteracions d'una infraestructura.

En verd: les àrees d'edició del sistema, ens permeten afegir, suprimir o modificar la xarxa. Aquestes són essencials per crear una xarxa des de zero o fer canvis necessaris sobre algunes parts, per exemple, afegir un semàfor, reduir la velocitat de la via o substituir un encreuament per una rotonda.

En vermell: els sistemes de simulació i monitoratge, ens permeten fer una anàlisi visual, però també mètrica a partir dels gràfics i mapes de calor. Bàsic per veure el rendiment en diferents àrees que van des del rendiment pur a l'impacte ambiental.

En taronja: la comparació de les dades compilades dels sistemes, amb la visualització en gràfics temporals i radials. La comparació és el que dona sentit a tot el sistema, ja que permet fer valoracions sobre canvis sistema.

En lila: la selecció, d'acord amb la fase de comparació extrema del sistema dona suport a la presa de decisions sobre el futur del sistema tan de forma estructural com vehicular.

Anem a veure doncs un exemple fictici però mantenint les respectives decisions i

condicions d'un cas real:

Es planteja la millora d'una part de la via d'una ciutat, ja que la vida al llarg dels anys s'ha produït un increment en el nombre de vehicles, que ha suposat un evident impacte en la zona i un creixent nombre de queixes rebudes.

Per fer-ho, s'ha decidit fer un estudi de la zona, primer de tot es decideix delimitar el perímetre en el qual es voldran aplicar els canvis, des d'on s'estudiaran els fluxos d'entrada de vehicles de la zona, aquesta feina, però queda fora del que pot proporcionar l'eina i serà únicament per proporcionar dades més exactes per la simulació.

Un cop recollides, volem traslladar l'àrea delimitada al sistema, aconseguim això a través d'utilitzar la navegació de mapes i descarregar l'àrea que volum avaluar:

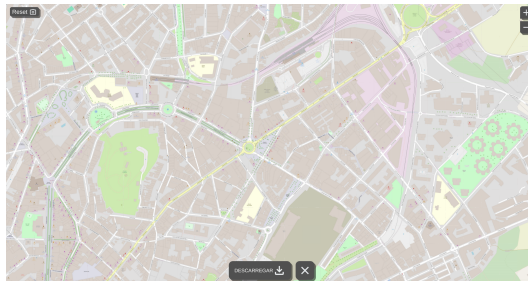


Figura 112: Exemple de descàrrega d'un cas real.
Font: Elaboració pròpia.

Seguidament, un cop tenim el fitxer OSM, importem el fitxer per poder tractar-lo dins el sistema:

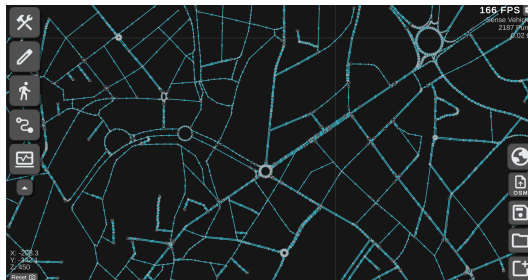


Figura 113: Exemple d'importació d'un cas real.
Font: Elaboració pròpia.

Llavors, ens fa falta polir i fer els canvis necessaris de velocitat, preferències, geometria, i introduir els valors anteriorment estudiats sobre fluxos d'entrada en el sistema, com també temporitzar correctament els semàfors, gràcies al sistema de guardat podem recuperar els resultats i assegurar-nos que no perdem cap dels canvis que estiguem fent:



Figura 114: Exemple d'edició d'un cas real.
Font: Elaboració pròpia.

Un cop tenim definit correctament l'estat actual de la via, ja podem procedir a la creació de les vies amb diferents propostes de com possiblement millorar la infraestructura, provar canvis de direccions, implementació de noves vies, temporització dels semàfors, desplaçament de passos de vianants, seguint les restriccions que tinguin definides de pressupost, socials o mediambientals.

Un cop dissenyats els circuits en el sistema, fem la simulació, si fes falta especificaríem les diferències d'escala de flux entre cada una de les franges horàries o especificacions dels paràmetres en la manera en què es calculen les mètriques.

Simulem cada una de les propostes i valorem en les diferents mètriques els seus resultats, en base l'impacte de les mètriques en què l'equip de tècnics estigui interessat a millorar, en aquest cas eficiència, anirien comparant mètrica a mètrica quin resulta més adequat per aquestes necessitats:

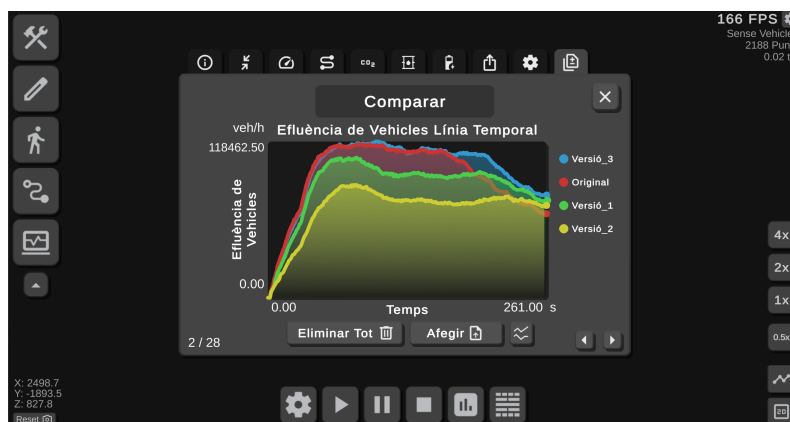


Figura 115: Exemple de comparació amb un gràfic de línies d'un cas real.

Font: Elaboració pròpia.

On la gràfica radial ens pot ser útil per observar els punts forts i dèbils d'entre totes les seqüències de mètriques:



Figura 116: Exemple de comparació amb un gràfic radial d'un cas real.

Font: Elaboració pròpia.

Un cop fet el triatge es podria donar suport a la decisió presa d'acord amb la comparació de les mètriques del sistema respecte al sistema original, finalment entraria en fase d'aplicació del projecte amb els consegüents estudis afegits que facin falta.

15 Conclusions

15.1 Valoració personal

Ara mateix, i un cop acabat el treball puc afirmar que el desenvolupament i la planificació del projecte m'han portat a l'aplicació de coneixements i experiència adquirida durant la meva formació acadèmica, però també a la interessant recerca de nous coneixements que han tingut aplicació en la creació de cada una dels blocs del sistema i la seva cohesió.

Així mateix, voldria destacar algunes de les parts del treball que més m'han aportat i de les que tenia més desconeixement, aquestes han estat:

- La interacció amb la *API* d'OpenStreetMap per poder generar la graella dels mapes i descarregar la informació necessària.
- El tractament de fitxers OSM per facilitar la importació dins del sistema i poder extreure'n el màxim profit.
- L'estudi i la modelització dels diferents elements viaris, on en podria remarcar el comportament dels vehicles a través de l'aplicació de la mecànica clàssica i l'elegant funcionament de les corbes Bézier per recrear les vies.
- La introducció i la ideació d'eines d'anàlisi per poder facilitar la comparació de xarxes.
- Finalment, també afegir els càlculs del consum energètic, que han fet possibles les conversions a consum de combustibles i les emissions generades que són necessitats creixents de la nostra societat.

Cal afegir que gràcies a la incorporació d'aquestes mètriques d'impacte energètic i d'emissions, penso que és interessant el plantejament de comparacions entre diferents sistemes, això fa possible avaluar el canvi de vehicles de combustió a elèctrics, on ens pot ajudar a resoldre preguntes com: en quina proporció es reduiran les emissions? Quina proporció és necessària per complir amb les planificacions d'emissions fetes? Quanta energia elèctrica necessitarem per cobrir la demanda? Quina implicació tenen les reduccions de velocitat quant a emissions i consum energètic? I moltes altres preguntes, que són necessàries que busquem una resposta per poder decidir sobre el nostre futur.

Aquestes serien algunes de les variades aplicacions on es contribueix en la recerca per poder tenir més clares les nostres necessitats energètiques, i poder entendre si la direcció en què anem és la que volem, de la mateixa manera, això queda reflectit en l'impacte de les emissions, no només en la qualitat de l'aire que respirem, sinó a efecte del planeta i el medi.

Tot i que aquests àmbits s'hagin representat, altres com l'accidentalitat, contaminació sonora, vianants... han quedat de banda, amb l'afegit de la necessària correcció i extensió del sistema presentat. Deixant això a part, em trobo satisfet en l'aportació d'aquest treball més enllà del nivell personal, tant per la seva possible aplicació, com el valor afegit de les possibles seves ampliacions a futur, a més de descriure com confeccionar la base d'un sistema de simulació d'infraestructures de trànsit per

la presa de decisions.

15.2 Reptes

Cada un dels blocs del sistema ha suposat alguns reptes, que a través de recerca i la iteració de diferents plantejaments s'han pogut assolir.

Primer de tot, tot i que no en aquest ordre d'aparició, trobem la navegació de mapes i importació d'àrees directament en el sistema, on mancàvem d'accés a la representació topogràfica, alhora que presentava clares necessitats de capacitat en disc i memòria, per superar això es va fer una cerca de diferents possibilitats, on va destacar l'opció d'utilitzar OpenStreetMap per poder mostrar el mapa, alhora que descarregar les àrees seleccionades.

L'altre repte va ser la implementació del comportament dels vehicles, sobretot en les incorporacions de vehicles, on va suposar gran part del temps invertit d'aquest bloc, primerament es la resolució es va intentar fer directament, això va suposar la prova i error que no portava enlloc, posteriorment, gràcies a desglossar el problema en petits blocs i l'extracció dels seus principis, finalment es va aconseguir un comportament bastant sòlid.

Un dels altres aspectes va ser aconseguir el funcionament correcte alhora que eficient de tots els blocs, l'impacte del rendiment de vehicles, recopilació de mètriques de forma dinàmica en el mapa de calor, la generació de gràfiques, els canvis d'escala per la còmoda visualització de les xarxes, per això es van anar a fer millores i polint els sistemes des de la seva primera versió, tot i que va suposar un increment en la dedicació de temps, era de prioritat cobrir la majoria dels problemes o circumstàncies que podien limitar el sistema.

15.3 Assoliment d'objectius

A continuació s'avaluen el seguit els objectius i requeriments definits en la planificació del projecte, això ens permet valorar l'assoliment del projecte.

15.3.1 Objectius Específics

Pel que fa als objectius i subobjectius del treball:

1. Modelització de les estructures viàries.

- (a) *Creació d'un sistema de fitxers de les vies.*

Assolit correctament, es permet guardar infraestructures i carregar per continuar treballant sobre aquestes.

- (b) *Dissenyar un sistema de creació i modificació de xarxes viàries.*

Assolit correctament, es permet crear gran multitud de casuístiques en les quals es poden fer modificacions per ajustar-se millor a l'estudi.

2. Simulació de la circulació i els elements viaris.

- (a) *Caracteritzar modificacions en comportaments dels agents.*

Assolit correctament, els vehicles tenen capacitat de reacció a multitud de casos, i els passos de vianant i els semàfors s'adapten als comportaments definits prèviament.

(b) *Desenvolupar els sistemes de simulació i les seves interaccions.*

Assolit correctament, es té control sobre la simulació i algunes de les seves característiques, en què transcorren les interaccions entre vehicles i elements de control.

3. Anàlisi i monitoratge de les xarxes.

(a) *Visualització de les xarxes viàries i del trànsit en temps real.*

Assolit correctament, es pot visualitzar la xarxa i els comportaments dels vehicles a temps real.

(b) *Extracció i anàlisi de mètriques que caracteritzin la xarxa.*

Assolit correctament, s'extreuen gran diversitat de mètriques, amb la possibilitat de visualització, comparació i guardat.

(c) *Investigar i valorar la possibilitat d'utilitzar mètriques amb relació a l'impacte mediambiental de certes situacions de trànsit d'acord amb la configuració de l'àrea de viària en estudi.*

Assolit correctament, s'extreuen mètriques com el consum energètic, el consum de combustibles i les emissions per poder avaluar l'impacte.

4. *Estudi i validació del traspàs de la realitat a la simulació.*

Assolit correctament, s'han estudiat les modelitzacions dels elements per assolir un nivell suficient de fidelitat.

15.3.2 Requeriments

Dividits en dues categories, aquests són els requeriments:

15.3.2.1 Funcionals

Obtenció de resultats: *ha de permetre extreure dades de les simulacions.* Assolit correctament, s'extreuen dades en format tabular i en imatges representant els mapes de calor.

Sistema de fitxers: *ha de ser capaç d'importar, modificar i guardar els projectes.* Assolit correctament, el sistema permet importar fitxers OSM, modificar i guardar els projectes en el format del sistema.

Multiplataforma: *s'ha de poder utilitzar en diversos sistemes operatius.* Assolit correctament, amb especial suport als sistemes *Windows* i *Linux*.

15.3.2.2 No Funcionals

Eficiència: *ser capaç de treballar sobre àrees delimitades considerablement grans, on per avaluar el rendiment s'utilitzarà el frame time en diferents casuístiques.* As-

solit correctament, s'han utilitzat superfícies d'aproximadament a 10 km^2 i quantitats màximes de 5000 vehicles, per observar un rendiment suficient, tot i que el rendiment clarament dependrà de la màquina utilitzada.

Usabilitat: *en tractar-se d'una eina extensa, cal que sigui fàcilment intel·ligible i que l'usuari pugui utilitzar-ho amb facilitat.* Assolit correctament, en tot moment s'ha volgut mantenir la interfície el màxim de simple possible, abans d'interactuar amb un element es mostra un curt text descriptiu del que fa, el sistema també compta amb traduccions a l'anglès i castellà, que es poden canviar en les preferències.

Versàtil: *fàcilment adaptable a les necessitats del cas d'estudi de l'usuari.* Assolit correctament, s'aconsegueixen formular algunes de les situacions més habituals de trànsit, tot i que clarament és fàcil proposar situacions en les quals el sistema no sigui capaç a causa de la gran varietat de casos possibles.

15.4 Treballs futurs

Tot i que hauria estat excel·lent, en tan sols aquest treball, desenvolupar el sistema perfecte per simular infraestructures de trànsit, no ha estat possible, per això en aquest apartat exposem algunes de les possibles millores i integració que es podrien aplicar posteriors al treball.

La primera de totes fem referència a la descàrrega d'àrees, aquesta queda limitada a xarxes de 50,000 punts pel servei que hem decidit utilitzar d'OpenStreetMap, hi ha la possibilitat de quan una àrea es descarrega, dividir-ho en descarregues de subzones més petites, que sí que compleixin amb el límit de punts, i posteriorment unificar-les en un sol fitxer, això ens ajudaria a importar dins del sistema regions d'un ordre superior a les fins ara possibles.

L'altra àrea amb clares millores, relacionada amb la descàrrega, és navegació de mapes, no és del tot precisa, presenta certa fricció a l'hora d'utilitzar-la i seria útil poder especificar l'àrea a descarregar de forma més exacta.

Respecte al guardat i càrrega dels fitxers, actualment es fa en binari, seria útil fer-ho en formats més fàcilment interpretables des del punt de vista humà, per poder facilitar la interpretació i en cas d'haver-hi algun error, per poder identificar millor les raons, com per exemple fer servir un format similar al *JSON*, també en *XML* o en una nou format que s'adaptés a les necessitats d'aquests sistemes.

En l'àrea de modificació i creació de les vies, falten més eines per facilitar la creació i edició, per exemple: subdivisió de corbes, selecció en àrea d'elements a esborrar, edició de múltiples elements al mateix temps, definició dels valors per defecte dels elements afegits, la utilització real de l'eix Z, la possibilitat d'utilitzar coordenades geodèsiques i d'assignar les posicions per entrades de text no únicament per interaccions amb el ratolí, facilitar la sincronització de semàfors de forma més visual. Aquestes serien algunes de les possibilitats que clarament el sistema necessitaria.

Pel que fa a la modelització, seria convenient valorar la implementació d'un sistema de vianants com a alternativa a la seva modelització aleatòria, respecte als semàfors seria donar ampliacions que els dotessin de l'aplicació en més casos, com facilitar la possibilitat de dos o més funcionaments diferents depenent de la franja horària.

Sobre les vies, seria la possibilitat de fer vies bidireccionals amb les conseqüències resultants en el comportament dels vehicles, i també la millor incorporació i interpretació de les carreteres amb més d'un carril, això ajudaria a fer més fàcil la modificació, però també comportaria l'ampliació dels vehicles per utilitzar de forma realista i correcta aquest el desplaçament entre carrils, en quant els vehicles seria convenient millorar més el seu comportament i fer proves amb més situacions per verificar el seu funcionament i per últim, incorporar factors humans, com el temps de reacció, distraccions, aparcament en vorals de vies..., pel que fa a autobusos seria interessant afegir la possibilitat de definir línies, i respecte a les motos, afegir el filtratge que aporten en situacions urbanes, també valorar la modelització de bicicletes i patinets, ja que en alguns casos requereixen la utilització de la carretera, generant un impacte real i directe sobre les vies.

En el funcionament de les simulacions, fa falta certa millora en la implementació correcta de tots els càlculs en intervals, això donaria com a resultat un millor rendiment. També cal remarcar que l'usuari manca de la possibilitat de modificar els intervals de temps entre passos, pel que fa als semàfors seria interessant afegir un algoritme iteratiu per la configuració dels seus temps, això ajudaria a guiar quins valors podrien ser preferibles. També alguna forma de poder visualitzar passos previs, d'aquesta forma rebobinar i veure accions ja passades, fent possible la visualització i anàlisi visual de diferents zones en xarxes extenses.

En el recull i visualització de les mètriques seria interessant millorar la precisió d'aquestes per donar resultats més fiables, a més d'això afegir més mètriques ens el mapes de calor i millorar la seva qualitat. Sobre les gràfiques, caldria acabar de polir la seva visualització, corregir algun problema de la comparació i afegir valors en les gràfiques radials.

Com a última d'aquestes característiques a desenvolupar el sistema, seria bastant interessant rebre informació en viu (gràcies al "*Internet of Things*"), dels fluxos d'entrada d'una via, d'aquesta forma permetria al sistema simular la xarxa i inferir les conseqüències, gràcies a això, s'hi podrien desplegar sistemes d'actuació dinàmica que adaptessin la sincronització dels semàfors, o el canvi de certs carrils, fent la via altament flexible a les condicions que s'hi plantegin.

Bàsicament, de tot plegat, en podem extreure la necessitat de fer extensions i modificacions sobre el sistema actual, ja que aquest proposa una base sòlida, on s'afavorirà molt d'aquestes ampliacions, també és important destacar que l'aplicació d'un cas real faria evident les possibles necessitats afegides del sistema.

En qualsevol cas, tota correcció, millora i proposta serà benvinguda si significa un avenç cap a un sistema més eficient, robust i adaptat a les necessitats reals.

Referències

- [1] Nathan H Gartner, Carrol JI Messer i Ajay Rathi. “Traffic flow theory-A state-of-the-art report: revised monograph on traffic flow theory”. A: (2002).
- [2] Boris S Kerner. “The physics of traffic”. A: *Physics World* 12.8 (1999), pàg. 25.
- [3] Jaume Barceló et al. *Fundamentals of traffic simulation*. Vol. 145. Springer, 2010.
- [4] Andreas Pell, Andreas Meingast i Oliver Schauer. “Trends in real-time traffic simulation”. A: *Transportation research procedia* 25 (2017), pàg. 1477 - 1484.
- [5] Harold E Wolfe. *Introduction to non-Euclidean geometry*. Courier Corporation, 2012.
- [6] Senay Baydas i Bulent Karakas. “Defining a curve as a Bezier curve”. A: *Journal of Taibah University for Science* 13.1 (2019), pàg. 522 - 528.
- [7] Wolfgang Boehm i Andreas Müller. “On de Casteljaou’s algorithm”. A: *Computer Aided Geometric Design* 16.7 (1999), pàg. 587 - 605.
- [8] Kh Khan, DK Lobiyal i Adem Kilicman. “Bézier Curves and Surfaces Based on Modified Bernstein Polynomials.” A: *Azerbaijan Journal of Mathematics* 9.1 (2019).
- [9] Sheldon M Ross. *Introduction to probability models*. Academic press, 2014.
- [10] Leo Liberti i Carlile Lavor. *Euclidean distance geometry*. Vol. 3. Springer, 2017.
- [11] Warren Turner i Glenn Ellis. “Graphical Analysis and Equations of Uniformly Accelerated Motion-A Unified Approach”. A: (2009).
- [12] Ronald S Irving. *Beyond the quadratic formula*. Vol. 43. MAA, 2013.
- [13] United States Defense Mapping Agency. *Department of Defense World Geodetic System 1984: its definition and relationships with local geodetic systems*. Vol. 8350. Defense Mapping Agency, 1987.
- [14] Jing-Feng Tian et al. “A family of high order approximations of Ramanujan type for perimeter of an ellipse”. A: *Revista de la Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales. Serie A. Matemáticas* 115 (2021), pàg. 1 - 20.
- [15] J Güémez i M Fiolhais. “Forces on wheels and fuel consumption in cars”. A: *European Journal of Physics* 34.4 (2013), pàg. 1005.
- [16] Zulfaa Mohamed-Kassim i Antonio Filippone. “Fuel savings on a heavy vehicle via aerodynamic drag reduction”. A: *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 15.5 (2010), pàg. 275 - 284.
- [17] Carlos Armenta-Déu i Hernán Cortés. “Analysis of kinetic energy recovery systems in electric vehicles”. A: *Vehicles* 5.2 (2023), pàg. 387 - 403.
- [18] Yee Van Fan et al. “A review on air emissions assessment: Transportation”. A: *Journal of cleaner production* 194 (2018), pàg. 673 - 684.
- [19] RN Colville et al. “The transport sector as a source of air pollution”. A: *Atmospheric environment* 35.9 (2001), pàg. 1537 - 1565.
- [20] M Matti Maricq. “Chemical characterization of particulate emissions from diesel engines: A review”. A: *Journal of Aerosol Science* 38.11 (2007), pàg. 1079 - 1118.

- [21] H Fayaz et al. “An overview of hydrogen as a vehicle fuel”. A: *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 16.8 (2012), pàg. 5511 - 5528.
- [22] Gang Mei, John C Tipper i Nengxiong Xu. “Ear-clipping based algorithms of generating high-quality polygon triangulation”. A: *Proceedings of the 2012 International Conference on Information Technology and Software Engineering: Software Engineering & Digital Media Technology*. Springer, 2013, pàg. 979 - 988.