

## **BOTNET – ESTUDI DEL MODEL LOGÍSTIC D'UNA SUPERILLA**

Realitzat per Vaive Logistics, S.L.

Última modificació: Juliol 2024

En l'horitzó 2030, el pla de mobilitat de la ciutat de Barcelona preveu una **extensió significativa de les pacificacions de carrers i el model d'eixos verds a bona part de la ciutat**. Un dels elements centrals d'aquesta transformació són les superilles, conjunts d'illes urbanes dissenyades per a prioritzar els vianants. En aquest context, la distribució urbana de mercaderies (DUM) es redissenyarà tenint en compte tres eixos principals: l'ús flexible de l'espai públic, els centres de distribució urbana (CDU) i la promoció de la DUM amb mitjans de baix impacte.

Segons un estudi realitzat per CARNET - CIT UPC sobre els reptes de la logística a Barcelona als anys 2017-2018, **l'última milla**, que representa l'última etapa del procés de distribució de mercaderies, entre el Centre de Distribució i el punt d'entrega, **és l'etapa més costosa i que consumeix més temps**, sovint representant fins a un 40% dels costos totals de transport. Els problemes identificats inclouen la **difficultat d'accés a certs barris**, vehicles no adaptats al centre històric, restriccions horàries i una demanda fragmentada.

El model actual de càrrega i descàrrega, que permet operacions en franges horàries limitades en els eixos verds, presenta encara **moltes inefficiències**, ja que requereix la presència de vehicles de transport dins les superilles, on les rutes de circulació estan dissenyades per desincentivar el trànsit de vehicles motoritzats.

Sumat a això, amb l'auge del comerç electrònic, s'ha produït un **increment de comandes de volums baixos**, augmentant les despeses d'enviament. Per mantenir-se competitives, les empreses necessiten millorar la seva eficiència i reduir costos. Amb la transformació que es vol implementar durant els propers anys a la ciutat, cal trobar noves solucions per fer front a tota la demanda que es genera, d'una manera sostenible i eficient. En aquest escenari, **els vehicles elèctrics autònoms emergeixen com una solució** potencial per optimitzar les operacions d'última milla, reduir la congestió, la contaminació i els costos operatius. L'Ona és un **vehicle elèctric de 6 rodes** amb capacitat de **càrrega útil de fins a 100 kg**, que pot operar tant en **carretera** (fins a 25 km/h) com en **àrees de vianants**, i **pujar desnivells** gràcies a la seva suspensió mecànica. En aquest sentit, es postula com una de les millors alternatives per fer front als problemes plantejats anteriorment.

Per reduir l'impacte ambiental i logístic de l'actual sistema de repartiment, Vaive Logistics pretén dissenyar, desenvolupar i avaluar un model de repartiment de paquets mitjançant una xarxa de vehicles elèctrics autònoms. En concret, aquesta activitat entra dins el WP2: Anàlisi dels requeriments tècnics del vehicle autònom i de les necessitats dels usuaris, **Tasca 2.2: Creació d'un model logístic optimitzat a una superilla barcelonina** del projecte BotNet. Com a principal objectiu es té simular tant el model de repartiment de paquets actual com models alternatius amb Ones, així com comparar els costos i les conseqüències associades a cadascun d'ells.

### **1. Descripció de la zona d'estudi i del problema logístic**

Aquest estudi de la logística d'última milla dins s'ha centrat en la zona del Born, a Barcelona. La zona d'estudi es situa al barri barcelonès de Sant Pere, Santa Caterina i La Ribera, al districte de Ciutat Vella. El barri té una població d'uns 23 000 habitants i una superfície de 111 hectàrees, amb una densitat de població de 204 habitants per hectàrea.

La zona d'estudi (àrea taronja a la Figura 1) té una superfície de 20 hectàrees. Conté punts emblemàtics de la ciutat com ara el Mercat del Born, el Passeig del Born o la Catedral del Mar, entre d'altres. La zona es caracteritza per tenir una elevada densitat de carrers estrets peatonals (on queda prohibida l'entrada a vehicles motoritzats), fet que fa que les operacions logístiques d'entrega d'última milla puguin resultar complicades.



Figura 1: Localització de la zona d'estudi.

El problema logístic que es planteja consisteix en optimitzar el cost que suposen les entregues d'última milla en una zona com el barri del Born, amb una densitat de carrers peatonals i estrets molt alta, així com amb pocs carrers aptes per a la circulació i estacionament de furgonetes d'entrega. Per arribar a poder optimitzar el problema logístic que es planteja, s'ha analitzat el nombre de comandes del tipus B2C (*Business to Costumer*) que es donen diàriament a la zona d'estudi, el número d'operadors logístics que poden donar servei a la zona i les característiques dels carrers de la zona d'estudi. Amb tot això, s'han plantejat diferents models de repartiment que es podrien donar a la zona d'estudi i s'han analitzat els resultats derivats de les simulacions.

## 2. Vehicle Routing Problem (VRP)

Tal i com s'ha explicat prèviament, s'ha realitzat un estudi de la logística d'última milla al barri del Born de Barcelona. Aquest estudi s'ha basat en la resolució del problema anomenat "Encaminament de vehicles" (VRP, de les sigles en anglès de *Vehicle Routing Problem*) tenint en compte les característiques pròpies dels vehicles utilitzats per a cada model i de l'entorn.

El VRP és un problema d'optimització logística que consisteix a determinar la millor manera de repartir un conjunt de paquets en una zona d'operació determinada utilitzant una flota de vehicles des d'un punt de partida fins als seus respectius destinataris, satisfent les restriccions de capacitat dels vehicles i minimitzant el cost total de les rutes.

Les característiques principals del VRP inclouen:

1. **Flota de vehicles:** Es disposa d'una flota de vehicles amb capacitat limitada per transportar els lliuraments. En funció del tipus de vehicle que realitza el repartiment, la capacitat del vehicles varia.
2. **Dipòsits i clients:** Els lliuraments s'han de fer des d'un o diversos punts de partida (dipòsits) fins als clients, que poden tenir demandes diferents.
3. **Costos:** Cada ruta té associats costos que poden ser variables, com ara la distància recorreguda, el temps de viatge o altres costos logístics.

4. **Altres restriccions:** S'han de satisfer les restriccions dels vehicles, com ara la capacitat màxima de càrrega, les restriccions de temps (hores de treball de l'operari i finestra de temps en què es poden fer entregues a la zona) i altres limitacions logístiques.

Hi ha diferents tècniques heurístiques que resolen de manera quasi òptima el VRP. En aquest cas, s'ha utilitzat l'heurística de Clark and Wright, juntament amb l'heurística Greedy per a resoldre'l. La combinació d'aquestes 2 heurístiques ha donat molt bons resultats en el passat.

**Heurística de Clark and Wright.** L'heurística de Clark and Wright és una tècnica heurística utilitzada per a resoldre el problema del VRP. Essencialment, es basa en calcular els estalvis que suposa combinar punts d'entrega en comptes de fer les entregues individualment. A continuació es detallen els principals passos de l'heurística:

1. Inicialització: s'estableixen tantes rutes com clients hi ha per servir, i cada ruta es conforma del trajecte des del dipòsit fins al client, i des del client fins al dipòsit.
2. Per a cada parell de clients  $i$  i  $j$  es calculen els estalvis que suposa combinar les rutes individuals en una única ruta, mitjançant la següent fórmula:

$$S_{ij} = d_{0i} + d_{j0} - d_{ij}$$

on  $d_{0i}$  representa la distància entre el dipòsit i el client  $i$ ,  $d_{j0}$  representa la distància entre el client  $j$  i el dipòsit, i  $d_{ij}$  representa la distància entre els clients  $i$  i  $j$ .

3. S'ordenen els parells de clients en funció dels estalvis calculats, per ordre decreixent.
4. Per a cada parell de clients (començant pel parell de clients amb major estalvi  $S_{ij}$ , es combinen rutes si i només si:
  - Els clients  $i$  i  $j$  no es troben a la ruta.
  - La nova ruta resultant no supera la capacitat del vehicle ni el temps màxim d'operació.

**Heurística Greedy.** És una heurística que es basa en prendre decisions locals òptimes amb l'objectiu de trobar l'òptim global. En aquest sentit, tracta de millorar iterativament una ruta fent una cerca local. Aquesta heurística s'ha aplicat utilitzant un mètode de la llibreria VRPy. El mètode permetia aplicar l'heurística durant un temps determinat. En aquest cas, i per a tots els models, s'ha utilitzat un temps de 20 segons.

### 3. Models considerats

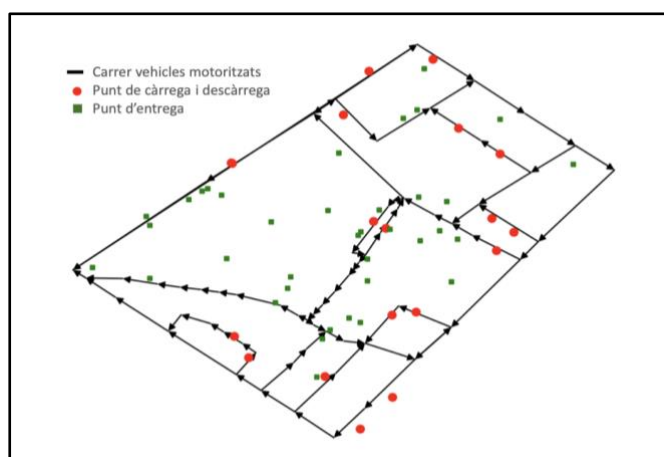
En aquesta secció s'expliquen els diferents models plantejats per resoldre el problema logístic. En tots els casos, ens referim com a **punt de descàrrega a tots els punts del carrer on els vehicles poden aturar-se i descarregar paquets**. En altres paraules, són els punts del VRP general on els vehicles paren. Aquests punts es representen a totes les figures com a punts vermells. D'altra banda, els **punts d'entrega són tots aquells punts on es situen els clients**, els receptors finals dels paquets. A les figures d'aquest informe es representen com a quadrats verds. Finalment, el graf negre representa el graf viari dels carrers per on poden circular els vehicles motoritzats.

#### 3.1. Model 1: *Business-as-Usual*

Aquest model pretén simular la metodologia logística utilitzada a l'actualitat, utilitzant furgonetes. Les furgonetes van des del Centre de Distribució, situat a la Zona Franca, fins al barri del Born, on comencen a donar servei. Aquestes furgonetes circulen pels carrers del Born a on es permet l'entrada a vehicles motoritzats, i es poden aturar als 19 punts de càrrega i descàrrega (CiD) disponibles. Des d'allà, l'operari va a peu des de la furgoneta (aparcada al punt de CiD) fins als punts d'entrega, veure Figura 2.

Inicialment, a cada punt d'entrega final se li ha assignat un punt de CiD de referència; el punt de CiD on la furgoneta para per poder realitzar aquella entrega. Així, cada punt de CiD té diversos punts d'entrega final assignats.

Després, s'ha aplicat un VRP on el dipòsit és el Centre de Distribució de la Zona Franca i els punts d'entrega són els punts de CiD. Al seu torn, s'ha aplicat una segona fase de VRPs entre cadascun dels punts de CiD i els seus punts d'entrega finals assignats.



*Figura 2: punts de descàrrega del model 1.*

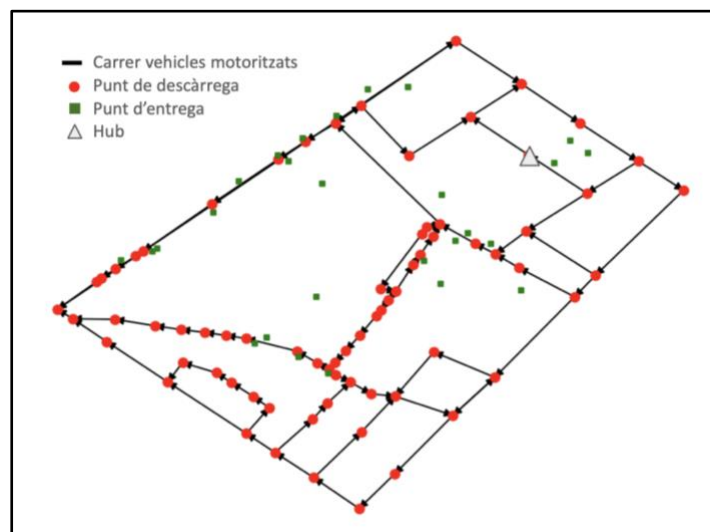
Donat que la finestra de temps en què es poden realitzar operacions logístiques a la zona d'estudi és de 4 hores, s'ha assumit que les furgonetes tenen un màxim de 4 hores per entrar al barri, realitzar les entregues i sortir del barri. En aquest sentit, no s'ha inclòs el temps de desplaçament entre el Centre de Distribució i el barri en el temps total en què s'han de fer les entregues. Amb altres paraules, la finestra temporal del VRP general ha estat de 4 hores més el temps que suposa anar i tornar del Centre de Distribució a la zona d'estudi.

### **3.2. Model 2: Repartiment amb Ones circulant per vies per a vehicles motoritzats**

Aquest model representa el repartiment dels paquets mitjançant Ones que circulen pels mateixos carrers per on poden circular les furgonetes del Model 1, pels carrers a on es permet l'entrada a vehicles motoritzats. Aquest és un model en tres fases. En primer lloc, les furgonetes transporten els paquets des del Centre de Distribució de la Zona Franca fins al Hub, situat al Mercat del Born. Des d'allà, es carreguen els paquets a les Ones, que comencen a donar servei. En aquest model, es contempla que circulin pels mateixos carrers per on poden circular les furgonetes del Model 1, pels carrers del barri a on es permet l'entrada a vehicles motoritzats. Això sí, poden parar a qualsevol intersecció entre carrers del barri.

Per tant, el VRP s'aplica per les Ones, on el dipòsit és el Hub, i els punts de descàrrega són qualsevol de les interseccions de carrers de la zona (punts vermells a la Figura 3). En aquest model, s'està assumint la mateixa finestra temporal que al Model 1, 4 hores, per fer les entregues amb les Ones.





*Figura 3: punts de descàrrega del model 2.*

Per a aquest model, s'han realitzat dos submodels.

### 3.2.1. Model 2.1

El **model 2.1** assumeix que l'Ona **circula de manera autònoma**, és a dir, que no va acompanyada físicament de cap operari (als costos sí que s'inclou un concepte en referència als operaris del centre de control, detallat més endavant). Llavors, quan para per fer una entrega, s'assumeix que els clients arriben des dels punts on ells són (els punts d'entrega verds) fins a on ha parat l'Ona per recollir els seus paquets. Per tant, s'assumeix que el temps en què l'Ona s'atura a cada punt és proporcional al número de clients que han d'anar a buscar un paquet en aquell punt.

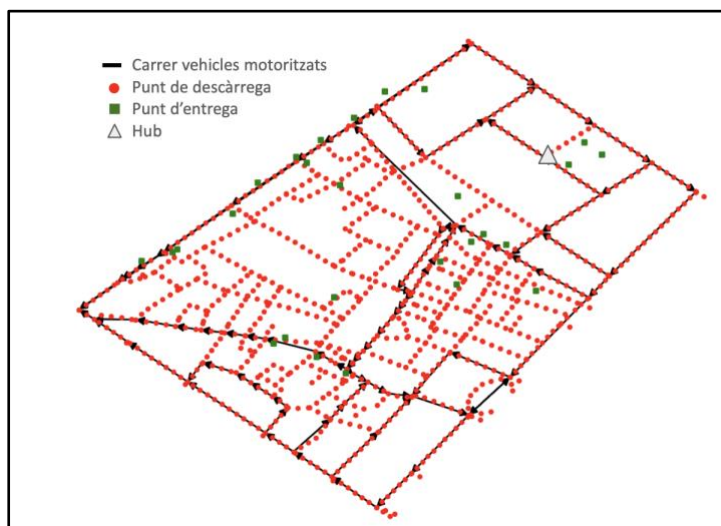
### 3.2.2. Model 2.2 – *Follow-me mode*

El **model 2.2** assumeix que l'Ona **va acompanyada d'un operari** i estaria funcionant en mode "Follow-me", seguint el recorregut de l'operari. En aquest model, l'Ona para als mateixos punts que al model 2.1, però és l'operari qui hi agafa els paquets i els porta fins als punts d'entrega. Aquest recorregut de l'operari entre el punt on para l'Ona (punt de descàrrega) i els diferents punts d'entrega s'ha calculat mitjançant un VRP, on el dipòsit és el punt on para l'Ona i els punts d'entrega són els punts d'entrega finals dels clients.

### 3.3. Model 3: Repartiment amb Ona circulant per tots els carrers

Aquest model representa el repartiment dels paquets mitjançant Ones que poden circular per qualsevol carrer de la zona d'estudi i que poden parar a qualsevol punt d'aquests carrers. A efectes pràctics, s'ha discretitzat el graf de carrers de la zona d'estudi en punts separats 10 metres, llavors les Ones poden parar a qualsevol d'aquests punts per fer les entregues, veure Figura 4. Conseqüentment, els vehicles autònoms poden parar just davant dels punts d'entrega. A la Figura 4, les línies discontinues vermelles corresponen als carrers peatonals de la zona, on els vehicles motoritzats no hi estan autoritzats, tenint en compte la normativa vigent.

Al igual que als models 2.1 i 2.2, s'ha considerat que una furgoneta porta els paquets des del Centre de Distribució fins al Hub urbà, i des d'allà les Ones carreguen els paquets per fer les entregues.



*Figura 4: punts de descàrrega del model 3.*

#### 4. Fonts i descripció de les dades utilitzades

En aquest apartat es detalla quines són les dades utilitzades per a realitzar aquest estudi i la seva procedència.

##### 4.1. Carrers, punts de CiD, punts d'entrega

Per tal d'obtenir el **graf de la zona d'estudi** on realitzar la simulació del model logístic, s'han utilitzat les dades del graf viari per tram de carrer de la ciutat de Barcelona, obtingut mitjançant el portal web de l'[Open Data de l'Ajuntament](#). En particular, s'ha pres l'arxiu *graf\_viari.shp*, que conté la malla de línies de tots els trams de carrer de la ciutat. A partir d'aquí, mitjançant l'eina del programari QGIS "Points along geometry", s'han discretitzat les línies en punts, separats a una distància de 10 metres. Destacar que s'ha escollit aquesta separació entre punts per tal d'obtenir un bon equilibri entre versemblança amb la realitat i reducció del cost computacional que pot suposar tenir una malla de punts molt més refinada a l'hora de calcular les distàncies entre aquests.

A partir d'aquí, s'ha exportat l'arxiu que conté les coordenades geogràfiques dels punts en format *csv*. Mencionar que s'ha escollit el sistema de referència de coordenades EPSG:25831, ja que té els metres com a unitat de mesura i facilita el posterior càlcul de distància entre punts.

Els **punts de càrrega i descàrrega** de la ciutat de Barcelona també es poden trobar llistats a l'[Open Data de Barcelona](#). Per aquesta tasca, s'han ubicat els punts de càrrega i descàrrega situats dins de la zona d'estudi. En total, s'han trobat 19 punts de càrrega i descàrrega.

Per últim, era necessari definir un altre graf (en aquest cas direccionat), aquell que conté **tots els carrers per on poden circular els vehicles motoritzats** (per als Models 1 i 2). Cal destacar que la zona d'estudi es caracteritza per tenir una densitat de carrers molt elevada, on molts d'aquests carrers són molt estrets. A més, acostumen a tenir pilones a l'entrada per tal d'evitar el pas de vehicles motoritzats. Sabent tot això, s'ha hagut de definir el graf viari, que defineix per quins carrers de la zona d'estudi sí que poden circular els vehicles motoritzats, així com el sentit de circulació dels mateixos. Aquest graf s'ha generat de forma manual. Per fer-ho, s'ha consultat informació sobre [els carrers de la ciutat amb plataforma única sense vehicles motoritzats](#), sobre [l'inventari de les pilones de seguretat de la xarxa d'infraestructures de la ciutat](#), i també sobre el sentit de circulació dels carrers via Open Street Maps, donat que aquesta informació no s'inclou a l'Open Data.

Per tal de definir els punts d'entrega, s'ha buscat la ubicació de [tots els locals de planta baixa](#), que s'han considerat possibles punts d'entrega de les comandes a repartir. En total, s'han definit 699 possibles punts d'entrega. Per a cada simulació, s'han repartit de manera aleatòria cadascun dels paquets a entregar entre els 699 possibles punts d'entrega.

## 4.2. Operadors logístics

Per tal de simular correctament l'activitat d'un dia laborable qualsevol a la zona d'estudi, és necessari conèixer quin és el volum de paquets amb el que es treballa, així com la quantitat d'operadors.

Com a preàmbul, cal destacar que s'ha decidit centrar aquest estudi en les entregues de tipus B2C (*Business to Costumer*), ja que són el tipus d'entrega que millor podria assumir un model logístic amb robots autònoms, tant pel volum de paquets com per la seva mida.

A Barcelona, el número mitjà d'entregues B2C és de 89.950 paquets segons dades de [Barcelona Regional](#). Això inclou les entregues a domicilis, a oficines i a punts de recollida, així com les entregues fallides (és a dir, que es programen i s'intenten però no es completen donat que el client no hi és per rebre el paquet). La demanda de la nostra zona d'estudi s'ha deduït a partir del número d'entregues a tota la ciutat, la seva població i la població de la zona d'estudi. Donat que la ciutat de Barcelona té una població de 1.660.314 habitants, el barri de Sant Pere, Santa Caterina i la Ribera té 23.009 habitants i, al seu torn, la zona d'estudi representa un 40% del barri mencionat (sense comptar el Parc de la Ciutadella), el número d'entregues diàries estimat a la zona d'estudi és de **499 paquets**.

Conèixer el nombre d'operadors que donen servei a la zona és més complicat. Per començar, s'ha fet un petit estudi sobre l'impacte dels diferents operadors del mercat CEP (*Courier, Express, Parcel*) a escala nacional. La Taula 1 descriu, per a cadascun dels operadors, la seva xifra de negocis anual, així com la seva quota de mercat (*market share*), extret de [l'informe anual de la Comissió Nacional dels Mercats i la Competència](#).

Tipus d'operador	Nom de l'operador	Xifra de negocis (M€)	Market Share
Operadors nacionals	CORREOS (+ EXPRESS)	1938	26,69%
Grans operadors	AMAZON	1752	24,13%
	DHL	901	12,41%
	FEDEX	282	3,88%
	UPS	402	5,54%
Operadors urgents d'àmbit nac.	CTT EXPRESS	116	1,60%
	ENVIALIA	6	0,08%
	GLS	421	5,80%
	MRW	332	4,57%
	NACEX	261	3,59%
	SENDING	66	0,91%
	SEUR	35	0,48%
	TIPSA	100	1,38%
	ZELERIS	409	5,63%
Resta	Resta	241	3,32%
	<b>Total</b>	<b>7262</b>	<b>100,00%</b>

Taula 1: xifra de negocis i quota de mercat dels operadors del mercat CEP.

Donat que no hi ha informació disponible sobre quins operadors en concret operen a la zona d'estudi, s'ha decidit deduir aquesta informació a partir de la informació esmentada anteriorment. Ja que el volum de paquets a la zona d'estudi no és gaire elevat, s'ha optat per assignar paquets a distribuir als operadors amb un *market share* superior al 5%. S'ha considerat que els operadors amb un *market share* més baix tindrien una quantitat de paquets estimada a repartir molt baixa i que, amb aquests volums, no tindria sentit que operessin. D'aquesta forma, hi hauria un total de 6 operadors operant a la zona d'estudi. La Taula 2 mostra la quantitat de paquets que hauria d'entregar cada operador.

Operador	CORREOS	AMAZON	DHL	UPS	GLS	ZELERIS
Nre. comandes diàries	166	150	77	34	36	35

*Taula 2: nombre de comandes diàries per operador a la zona d'estudi.*

En aquest estudi no s'ha considerat cap estratègia de consolidació. Cada empresa logística distribueix els paquets que corresponen a la seva demanda. L'anàlisi d'aquestes estratègies de consolidació entre operadors logístics i com afecten els costos operacionals de les empreses es podrà treballar en futurs estudis.

#### 4.3. Repartiment amb furgonetes i operadors

El Model 1 es basa en un repartiment d'última milla amb furgonetes, des del Centre de Distribució fins la zona d'estudi. S'ha assumit que el Centre de Distribució se situa, per a tots els operadors i models, a la Zona Franca de Barcelona, a 7,3 km del Hub, trigant 22 minuts en completar aquest recorregut. Aquestes dades s'han obtingut mirant el recorregut que indica Google Maps des de la Zona Franca fins la zona d'estudi durant un dia laborable a les 12h.

S'ha assumit que la capacitat de la furgoneta per a cada operador és de 200 paquets (per tant, en un viatge pot assumir tota la demanda per a cada operador). S'ha entès una velocitat mitjana de les furgonetes a la zona d'estudi de 10 km/h, i una velocitat mitjana dels operaris (en els seus trajectes a peu entre la furgoneta aparcada i els punts d'entrega) de 80 m/min. També s'ha assumit un temps per entrega de 2 minuts, i que calen 2 minuts per aparcar. Finalment, la capacitat de l'operador (és a dir, la quantitat màxima de paquets que l'operador pot portar a peu entre la furgoneta i els punts d'entrega) és de 10 paquets. Destacar que per a això s'ha assumit que l'operador utilitza una bossa/motxilla de *delivery* on porta els paquets. Tots els valors estan resumits a la Taula 3.

Capacitat de la furgoneta (paquets)	200
Velocitat mitjana de la furgoneta a la zona d'estudi (km/h)	10
Velocitat mitjana a peu de l'operari (m/min)	80
Temps d'entrega (min)	2
Temps necessari per aparcar (min)	2
Capacitat de l'operador (paquets)	10

*Taula 3: Informació considerada als models*

#### 4.4. Repartiment amb Ona

S'ha assumit que l'Ona té una capacitat de 20 paquets. Per tant, cada cop que surt del Hub per realitzar les entregues d'última milla, pot portar un màxim de 20 paquets. La velocitat mitjana del vehicle s'ha assumit de 5 km/h, tant quan circula per la calçada (models 2.1 i 2.2) com quan circula per qualsevol tipus de carrer (model 3). També s'ha considerat un temps d'entrega d'1 minut per paquet.

- En el cas dels models 2.1 i 3, on els clients venen a buscar el paquet al punt on pot parar l'Ona, es considera necessari de mitjana 1 minut per client. Per tant, quan l'Ona para en una cruïlla i han de venir 10 persones a buscar 10 paquets, s'assumeix que l'Ona s'hi atura durant 10 minuts.
- En el cas del model 2.2, on l'operari camina des del punt on para l'Ona fins als punts d'entrega, es considera que triga de mitjana 1 minut en realitzar l'entrega un cop arriba al punt d'entrega

Capacitat Ona (paquets)	20
-------------------------	----



Velocitat Ona (km/h)	5
Temps d'entrega (min)	1

*Taula 4: informació considerada als models amb l'Ona.*

## 4.5. Costos

En aquest apartat es detallen els paràmetres i els valors que s'han tingut en compte per calcular els costos de cadascun dels models.

### 4.5.1. Costos associats al transport en furgoneta

A tots els models hi ha un cost associat al transport de paquets mitjançant una furgoneta, ja sigui per transportar les mercaderies des del Centre de Distribució fins al Hub (models 2.1, 2.2 i 3) com per realitzar aquest transport juntament amb les entregues d'última milla (model 1). Una estimació dels costos que pot suposar el transport amb furgoneta s'ha pogut fer gràcies a les [dades publicades per l'Observatori de Costos del Transport de Mercaderies en Carretera](#). Per a cada tipus de vehicle, es detallen els costos per temps (amortització i financiació del vehicle, personal de conducció, segurs...) i per quilòmetre (combustible, manteniment...). Per a aquest estudi, s'han obtingut directament els costos per quilòmetre i hora totals en càrrega, de 0,3981 € per quilòmetre i 30,84 € per hora, respectivament. La Taula 5 detalla els costos de cada concepte en el cas d'una furgoneta.

	COSTES ANUALES	
	Euros (€)	Distribución (%)
<b>Costes totales</b>	<b>56.561,64</b>	<b>100,0%</b>
<b>Costes directos</b>	<b>53.109,52</b>	<b>93,9%</b>
<b>Costes por tiempo</b>	<b>38.181,17</b>	<b>67,5%</b>
Amortización del vehículo	2.412,58	4,3%
Financiación del vehículo	697,24	1,2%
Personal de conducción	30.526,79	54,0%
Seguros	4.016,97	7,1%
Costes fiscales	527,59	0,9%
<b>Costes kilométricos</b>	<b>14.928,35</b>	<b>26,4%</b>
Combustible	6.770,27	12,0%
Consumo de disolución de urea	273,83	0,5%
Neumáticos	691,90	1,2%
Mantenimiento	515,40	0,9%
Reparaciones	916,30	1,6%
Dietas	5.760,65	10,2%
Peajes	0,00	0,0%
<b>Costes indirectos</b>	<b>3.452,12</b>	<b>6,1%</b>

COSTES UNITARIOS	TOTAL	EN CARGA
kilometraje anual (km / año)	50.000	37.500
Horas anuales (h / año)	1.800	1.350
<b>Costes unitarios</b>	<b>Costes totales</b>	<b>Costes en carga</b>
1. Costes por kilómetro: Costes totales / km (€/km)	1,1312	1,5083
2. Costes por hora: Costes totales / horas (€/hora)	31,42	41,90
3. Costes por kilómetro y hora. Suma de:		
Costes kilométricos / kilómetros (€/km)	0,2986	0,3981
Costes temporales e indirectos / horas (€/hora)	23,13	30,84

Nota: estos costes corresponden a la media nacional en las condiciones indicadas de explotación de este tipo de vehículo.

*Taula 5: relació de costos anuals d'una furgoneta (Font).*

#### 4.5.2. Costos associats al transport amb l'Ona

Els costos de transport de l'Ona s'han estimat a partir del cost d'una Ona i dels costos de la furgoneta mostrats anteriorment. Considerant que el cost d'una Ona és de 25.000€ i pot tenir un temps d'ús de 3 anys, s'ha considerat un cost anual d'amortització del vehicle de 8.333€. Juntament amb un cost de segur de 4.000€ i costos fiscals de 600€ anuals, i assumint que el número d'hores anuals d'operació és de 1.350 hores, s'han obtingut uns costos totals de temps de **9,58 € per hora**.

Pel que fa als costos quilomètrics, s'ha considerat una capacitat de la bateria de 3 kWh, un cost de l'energia de 0,1134 €/kWh i una autonomia de 20 km (Lemardelé et al., 2023)<sup>1</sup>. Amb això, els costos energètics monten a 0,017 € per km. Afegint els costos de manteniment i reparacions (extrapolats directament dels costos de la furgoneta), el cost quilomètric total és de **0,055 € per km**.

Adicionalment, als models 2.1 i 3 s'ha considerat un cost associat als operaris que controlen en remot el correcte funcionament dels vehicles autònoms. S'ha considerat que un operari pot assumir el control d'un màxim de 5 vehicles autònoms simultàniament. **El cost horari d'aquest operari és de 30 €/h**.

#### 4.5.3. Altres costos

A tots els models on es fan els repartiments d'última milla amb l'Ona (models 2.1, 2.2 i 3), s'ha inclòs un **cost derivat del lloguer del Hub**. S'ha considerat un cost de 20€/m<sup>2</sup> (preu mitjà del metre quadrat en locals de planta baixa al districte de Ciutat Vella) i també que cada paquet requereix d'un [espai de 0,5 m<sup>2</sup> de mitjana](#).

Pel model 2.1, en què l'Ona pot parar només qualsevol cruïlla entre carrers i, per tant, els clients ha d'apropar-se des del seu domicili/localització fins on està l'Ona, s'ha considerat **un cost en concepte del valor del temps perdut dels clients**. Soriguera (2014)<sup>2</sup> situa aquest valor en uns **15€/h**.

### 5. Programació dels models logístics

#### 5.1. Llenguatge de programació i principals llibreries utilitzades

El llenguatge de programació utilitzat ha estat Python, versió 3.8. A continuació es llisten les principals llibreries utilitzades:

- [Networkx](#): permet crear, estudiar i analitzar grafs amb facilitat. Tots els grafs utilitzats (explicats més endavant) s'han generat amb aquesta llibreria, així com el càlcul de distàncies entre punts.
- [VRPy](#): permet resoldre instàncies de diferents tipus de VRP. Es construeix a partir dels grafs de Networkx, i permet incloure-hi restriccions de capacitat o temps, així com indicar el mètode de resolució del VRP.
- [Matplotlib](#): permet generar gràfics per visualitzar dades o grafs.
- [Openpyxl](#): permet exportar dades amb facilitat des del codi de Python fins a un arxiu Excel. S'ha utilitzat per exportar de manera automàtica a l'arxiu de resultats Excel les principals dades generades als models.

#### 5.2. Metodologia

---

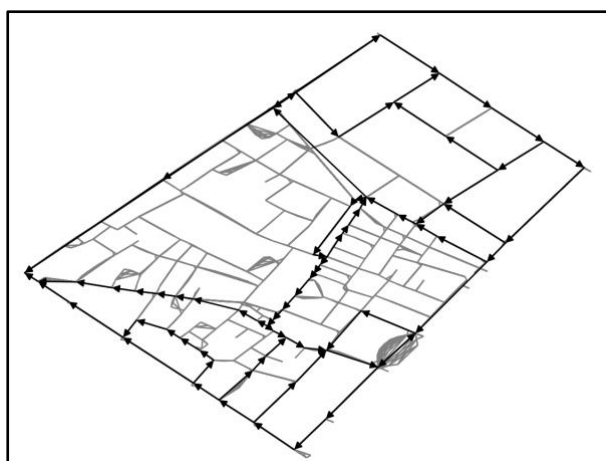
<sup>1</sup> Lemardelé, C. (2023). Life-cycle analysis of last-mile parcel delivery using autonomous delivery robots. Elsevier, 121(1). 10.1016/j.trd.2023.103842

<sup>2</sup> Soriguera, F. (2014). On the value of highway travel time information systems. Transportation Research Part A: Policy and Practice, Volumen 70, 294-310. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2014.10.005>

S'ha aplicat el VRP per a crear els models logístics. S'ha utilitzat el programari QGIS per tal de generar la malla de punts necessària per al VRP, i després s'han generat les rutes mitjançant un codi de Python, pel qual s'ha utilitzat les llibreries mencionades anteriorment. Al llarg d'aquesta secció es detalla cada pas de la metodologia utilitzada, per a cada model i operador analitzat.

- Inicialment, es va utilitzar el programari QGIS per obtenir les coordenades dels carrers, punts de càrrega i descàrrega, locals comercials i portals de la zona d'estudi.
- A continuació, es van importar les dades al codi i es van crear els dos grafs sobre els quals es construeixen els models:
  - Graf peatonal: conté tots els carrers de la zona d'estudi. En concret, s'ha discretitzat cada carrer en punts separats per 10 metres, pel que el graf conté nodes separats cada 10 metres i les arestes que els uneixen, formant la malla de carrers.
  - Graf viari: conté tots els carrers pels quals poden circular vehicles motoritzats a la zona d'estudi. Aquest graf vindria a ser un subgraf del graf peatonal, i s'ha generat manualment a partir dels nodes del graf peatonal, que s'han unit amb arestes representant els carrers.

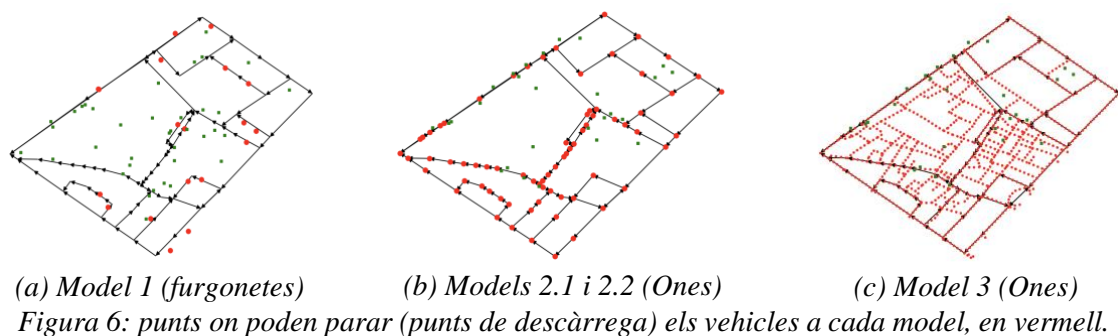
La Figura 5 mostra el graf peatonal en gris, i el graf vial direccionat en negre.



*Figura 5: graf peatonal (gris) i graf viari (negre).*

- Després d'això, es van integrar els punts de càrrega i descàrrega als dos grafs. Bàsicament, es van afegir els punts de CiD com a nodes del graf, i es van integrar a cada graf respectivament amb arestes amb els dos nodes del graf més propers.
- També es va assignar aleatòriament el punt d'entrega per a cadascun dels 499 paquets entre tots els possibles portals i locals comercials de planta baixa de la zona d'estudi, i acte seguit es van integrar aquests punts d'entrega al graf peatonal. A tots els escenaris s'ha assignat, per a cada punt d'entrega, un punt de descàrrega de referència. Aquest punt és on el vehicle (al model 1, la furgoneta, i als models 2 i 3, l'Ona) para i descarrega el paquet.
  - Per al model 1, els punts de descàrrega són justament els punts de càrrega i descàrrega (en vermell).
  - Per als models 2.1 i 2.2, els punts de descàrrega són totes les interseccions entre carrers de la zona d'estudi.
  - Per al model 3, els punts de descàrrega poden ser qualsevol dels punts de la xarxa de carrers de la zona d'estudi (tècnicament, com ja s'ha comentat abans, s'ha discretitzat

el graf de carrers en punts separats cada 10 metres, pel que els punts de descàrrega poden ser tots aquests punts; veure Figura 6).



- L'assignació de cada punt d'entrega a cada punt de descàrrega s'ha fet per un criteri de proximitat: cada punt d'entrega té assignat el punt de descàrrega més proper a peu (és a dir, el punt de descàrrega més proper utilitzant el graf peatonal per accedir-hi). La Figura 7 mostra, per al Model 1 i l'operador Correos, quin punt de CiD (rodones amb punt vermell al centre) té assignat cada punt d'entrega (quadrats). Per exemple, el punt de CiD 12 (a la Figura 7, el punt de CiD més a la dreta; de color verd clar) té assignades 2 entregues. Això significa que quan la furgoneta hi pari, l'operari haurà de portar des del punt de CiD número 1 2 paquets fins als seus destinataris.

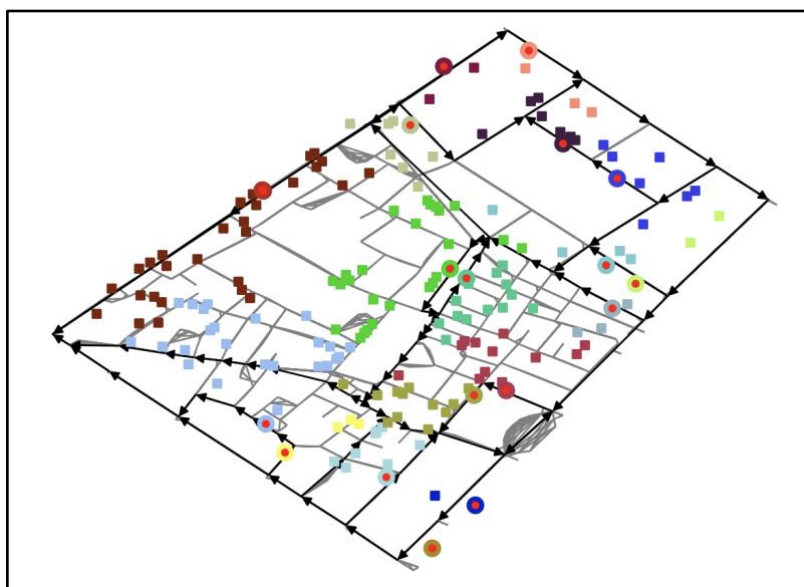


Figura 7: punts d'entrega assignats a cada punt de CiD, per al Model 1 i operador Correos (166 entregues).

- A continuació, es procedeix a fer el càlcul de temps i distància de tots els recorreguts entre punts de descàrrega i punts d'entrega.
  - Per als models 1 i 2.2, aquests recorreguts es calculen fent, per a cada punt de descàrrega amb demanda, un VRP entre el punt de descàrrega (on el vehicle para) i les ubicacions dels destinataris assignats. Aquests VRPs són els que fan els operaris, caminant pel graf peatonal, amb una capacitat de 10 paquets.
  - Per als models 2.1 i 3, s'assumeix que els clients van fins on ha parat l'Ona (al model 2.1, a la cruïlla d'un carrer amb calçada més propera), i que es triga 1 minut en realitzar cada entrega a cada client.

- Després del darrer pas, ja coneixem el temps total que està parat cada vehicle a cada punt de descàrrega, així com la distància que l'operari (en els casos en què n'hi ha) recorre per entregar els paquets.
- Per últim, cal aplicar el VRP general.
  - Per al model 1, és el VRP entre el Centre de Distribució, la zona d'estudi i la tornada al Centre de Distribució.
  - Per la resta de models, és el VRP entre el Hub, els punts d'entrega i la tornada al Hub de nou.
- Finalment, podem conèixer el nombre de rutes que requereix el VRP global, així com la seva duració, la distància que recorren els vehicles al VRP global i també totes les dades de les entregues.

Per a cada model i operari analitzat s'han fet 10 iteracions, amb diferents llavors per generar diferents números pseudoaleatoris. Donat que s'han analitzat 4 models i s'han considerat 6 operadors logístics, s'han realitzat un total de 240 simulacions.

## RESULTATS

Per al **model 1**, per a cada operador i iteració, s'han obtingut els següents resultats del programa:

- **Distància total recorreguda per les furgonetes** (en metres), que inclou les rutes entre el Centre de Distribució, el recorregut per la zona d'estudi i la tornada al centre de Distribució.
- **Distància total recorreguda pels operaris**, a peu (en metres), que inclou els trajectes entre cadascun dels punts de CiD fins als punts d'entrega.
- **Nombre de rutes** que han calgut fer entre el Centre de Distribució, la zona d'estudi i el Centre de Distribució.
- **Duració de cadascuna de les rutes** (en hores). Cal destacar que cada ruta està limitada a un màxim de 4,73 hores, ja que la finestra de temps en què es poden realitzar operacions logístiques a la zona d'estudi és de 4 hores, més el temps dedicat a anar i tornar des del Centre de Distribució fins la zona d'estudi.
- **Costos:**
  - **Cost total de l'operació en furgoneta**, que inclou els costos de l'operari i del vehicle, utilitzant els valors explicats a la secció 3.3.

Per al **model 2.1**, en què les Ones funcionen de manera autònoma, per a cada operador i iteració, s'han obtingut els següents resultats del programa:

- **Distància total recorreguda per les Ones** (en metres), que inclou les rutes entre el Hub, els punts de descàrrega i la tornada al Hub.
- **Distància total dels clients** per anar i tornar des del seu domicili fins al punt on para l'Ona (en metres).
- **Nombre de rutes** que han calgut fer entre el Hub, els punts de descàrrega i el Hub.
- **Duració de cadascuna de les rutes** (en hores). Cada ruta està limitada a un màxim de 4 hores, que és la finestra de temps en què es poden realitzar operacions logístiques a la zona d'estudi.
- **Quantitat d'Ones** necessàries per a realitzar totes les rutes en un dia.
- **Distància total recorreguda per la furgoneta** (en metres), entre el Centre de Distribució, el Hub i el Centre de Distribució. És una distància fixa i constant, ja que només cal fer un viatge en tots els casos.
- **Temps del recorregut de la furgoneta** (en hores), també fix.
- **Costos:**
  - **Cost en concepte del transport dels paquets des del Centre de Distribució fins al Hub** (considerant el cost de la furgoneta i de l'operari). És un cost constant, ja que es basa en la distància total recorreguda per les furgonetes, que en aquest model és fixa.
  - **Costos del personal de control de les Ones**. Tot i que els vehicles operin autònomament, és necessària la presència d'un operador treballant en remot que



s'asseguri del correcte funcionament dels vehicles durant les seves tasques. S'ha assumit que un operador pot controlar 3 vehicles simultàniament.

- **Costos d'amortització de les Ones.**
- **Cost del Hub.** S'ha considerat que cada paquet requereix un espai de  $0,5\text{m}^2$ , i que el cost mensual d'un local a la zona d'estudi és d'uns  $20 \text{ €/m}^2$  (veure secció anterior).
- **Cost en concepte del valor del temps dels clients**, donat que aquests estan dedicant temps en desplaçar-se fins al punt més proper del barri on pot parar l'Ona i entregar el paquet.

Per al **model 2.2**, per a cada operador i iteració, s'han obtingut els següents resultats del programa:

- **Distància total recorreguda per les Ones** (en metres), que inclou les rutes entre el Hub, els punts de descàrrega i la tornada al Hub.
- **Distància total a peu dels operaris** (en metres), entre els punts de descàrrega (on paren les Ones) i els punts d'entrega.
- **Nombre de rutes** que han calgut fer entre el Hub, els punts de descàrrega i el Hub.
- **Duració de cadascuna de les rutes** (en hores). Cada ruta està limitada a un màxim de 4 hores, que és la finestra de temps en què es poden realitzar operacions logístiques a la zona d'estudi.
- **Quantitat d'Ones** necessàries per a realitzar totes les rutes en un dia.
- **Distància total recorreguda per la furgoneta** (en metres), entre el Centre de Distribució, el Hub i el Centre de Distribució. És una distància fixa i constant, ja que només cal fer un viatge en tots els casos.
- **Temps del recorregut de la furgoneta** (en hores), també fix.
- **Costos:**
  - **Cost en concepte del transport dels paquets des del Centre de Distribució fins al Hub** (considerant el cost de la furgoneta i de l'operari). És un cost constant, ja que es basa en la distància total recorreguda per les furgonetes, que en aquest model és fixa.
  - **Costos dels operaris** que acompanyen l'Ona i després, un cop l'Ona para i descarrega els paquets als punts de descàrrega, apropen els paquets als punts d'entrega.
  - **Costos d'amortització de les Ones.**
  - **Cost del Hub.** S'ha considerat que cada paquet requereix un espai de  $0,5\text{m}^2$ , i que el cost mensual d'un local a la zona d'estudi és d'uns  $20 \text{ €/m}^2$  (veure secció anterior).

Per al **model 3**, en què les Ones funcionen de manera autònoma, per a cada operador i iteració, s'han obtingut els següents resultats del programa:

- **Distància total recorreguda per les Ones** (en metres), que inclou les rutes entre el Hub, els punts de descàrrega i la tornada al Hub.
- **Nombre de rutes** que han calgut fer entre el Hub, els punts de descàrrega i el Hub.
- **Duració de cadascuna de les rutes** (en hores). Cada ruta està limitada a un màxim de 4 hores, que és la finestra de temps en què es poden realitzar operacions logístiques a la zona d'estudi.
- **Quantitat d'Ones** necessàries per a realitzar totes les rutes en un dia.
- **Distància total recorreguda per la furgoneta** (en metres), entre el Centre de Distribució, el Hub i el Centre de Distribució. És una distància fixa i constant, ja que només cal fer un viatge en tots els casos.
- **Temps del recorregut de la furgoneta** (en hores), també fix.
- **Costos:**
  - **Cost en concepte del transport dels paquets des del Centre de Distribució fins al Hub** (considerant el cost de la furgoneta i de l'operari). És un cost constant, ja que es basa en la distància total recorreguda per les furgonetes, que en aquest model és fixa.
  - **Costos del personal de control de les Ones.** Tot i que els vehicles operin autònomament, és necessària la presència d'un operador treballant en remot que s'asseguri del correcte funcionament dels vehicles durant les seves tasques. S'ha assumit que un operador pot controlar 3 vehicles simultàniament.
  - **Costos d'amortització de les Ones.**

- **Cost del Hub.** S'ha considerat que cada paquet requereix un espai de  $0,5\text{m}^2$ , i que el cost mensual d'un local a la zona d'estudi és d'uns  $20\text{ €/m}^2$  (veure secció anterior).

Per a tots els operadors, **el model que resulta en un menor cost mitjà per paquet és el model 3** (Ona operant de forma autònoma i per tots els carrers). A més, per a tots els models, el cost mitjà per paquet és més elevat quan el número de comandes de l'operador és més baix. És a dir, **els operadors amb més comandes tenen menors costos per paquet** en qualsevol dels models.

## 1. Resum dels resultats per model

### 1.1. Model 1

Pel que fa al **model 1**, la distància recorreguda per les furgonetes és molt elevada. Això es deu a diversos motius. En primer lloc, **el nombre de carrers per on poden circular és molt limitat**, pel que s'han de donar voltes en alguns casos per a accedir a determinats carrers. A més, per als operadors amb més comandes, **s'han de realitzar diversos viatges Centre de Distribució - zona d'estudi - Centre de Distribució**, fet que també augmenta la distància a recórrer per les furgonetes. En relació a això, **la restricció limitant són les 4,73 hores que, com a màxim, poden durar les rutes entre el Centre de Distribució, la zona d'estudi i el Centre de Distribució**, i no pas la capacitat del vehicle. Això fa que calguin tantes furgonetes com rutes hi ha programades i, donat que no es considera que hi hagi un Hub a la zona d'estudi on emmagatzemar els paquets, que calguin molts desplaçaments fins al Centre de Distribució per carregar nous paquets. En aquest sentit, es podria disminuir la distància recorreguda per les furgonetes si hi hagués un Hub a la zona d'estudi, donat que només caldria fer un únic cop el trajecte Centre de Distribució - zona d'estudi - Centre de Distribució. Tot i això, caldria estudiar si és més econòmic tenir el Hub o realitzar el quilometratge extra.

També és el model en què **els operaris han de recórrer més distància a peu** (considerant els recorreguts entre els punts de descàrrega i els punts d'entrega). Això es deu a que el nombre de punts de descàrrega dels vehicles en aquest model és molt baix, només 19 (que corresponen als punts de CiD de la zona). Per tant, és el model en què **més temps estan aparcats els vehicles mentre l'operari realitza les entregues**. Aquest fet, de nou, suposa un gran desavantatge donat que els vehicles estan inactius durant períodes prolongats, cosa que fa que els altres vehicles s'hagin d'esperar més temps per poder utilitzar els punts de descàrrega. Això disminueix l'eficiència operativa global i pot causar retards en la cadena de subministrament, afectant negativament el rendiment del servei de distribució.

### 1.2. Model 2.1

Pel que fa al model 2.1, la distància total recorreguda pels vehicles (Ones i furgoneta) és més baixa, en general. En essència, **s'estalvien els múltiples viatges al Centre de Distribució per als operadors amb més comandes**. Tot i això, els vehicles autònoms segueixen **recorrent una elevada quantitat de quilòmetres** diàriament. Això es deu novament a que només poden circular per alguns carrers de la zona d'estudi i en un únic sentit. La distància que han de caminar els clients fins als punts on para l'Ona no és molt elevada (es tracta de poc més d'un centenar de metres, com a màxim), pel que tampoc suposa un elevat cost addicional en concepte del valor del temps. Això sí, **el nombre de rutes que es realitzen és força elevat**. En aquest cas, **la restricció limitant és la capacitat del vehicle autònom** i no pas el temps màxim d'operació. En moltes rutes, els vehicles entreguen menys de 20 paquets (la seva capacitat màxima), fet que mostra que l'heurística utilitzada no és òptima.

Tot i això, és **un model més econòmic que el model 1 pel que fa als operadors amb més comandes**. D'altra banda, el cost per paquet per als operadors amb menys comandes és molt més elevat en el model 2.1.

### 1.3. Model 2.2

La distància recorreguda pels vehicles autònoms en aquest model és pràcticament la mateixa que en el model 2.1, donat que les Ones poden circular amb les mateixes restriccions en ambdós models. Així però, la distància a recórrer a peu entre els punts on paren les Ones (punts de descàrrega) i els punts d'entrega és més baixa, donat que en aquest model són els operaris els que realitzen aquests desplaçaments, i no han d'estar anant i tornant al vehicle cada cop que realitzen una entrega sinó que poden portar múltiples paquets simultàniament i fer les entregues de manera més òptima; realitzen un VRP entre el punt de descàrrega i els punts d'entrega.

El nombre de rutes requerides és similar al del model 2.1, així com la seva duració. **El cost dels operaris, però, és molt més gran** que per al model 2.1, donat que els operaris acompanyen en tot moment els vehicles autònoms. Llavors, tot i que s'ha assumit que no calen els operaris de control treballant remotament (i s'estalvien aquests costos), els costos associats als operaris acompanyant els vehicles és molt més elevat. La clau és que la suma dels costos del personal de control de les Ones i el valor del temps dels clients (model 2.1) és més baixa que els costos dels operaris del model 2.2 per a tots els operadors logístics. Això demostra que **és més rentable que les Ones operin de manera completament autònoma que no pas en mode *follow-me*.**

### 1.4. Model 3

Al model 3, les Ones operen de manera autònoma i per qualsevol carrer de la zona d'estudi. Això es veu reflectit en **la distància total que han de recórrer per a fer les entregues, que és molt més baixa** que en tots els models anteriors. A més, no hi ha costos associats ni al valor del temps dels clients, ni al temps que dediquen els operaris a portar els paquets als punts d'entrega, donat que els vehicles paren davant de cada punt d'entrega. El nombre de rutes fetes també és més baix en comparació a la resta de models, donat que és més senzill buscar rutes (més) òptimes, i també calen menys Ones en els casos dels operadors més grans.

En resum, els costos en aquest model són més baixos donat que no hi ha cap cost associat al valor del temps dels clients i els costos associats a l'amortització dels vehicles no són tan grans donat que es recorren menys quilòmetres.

## 2. Comparació entre models i operadors

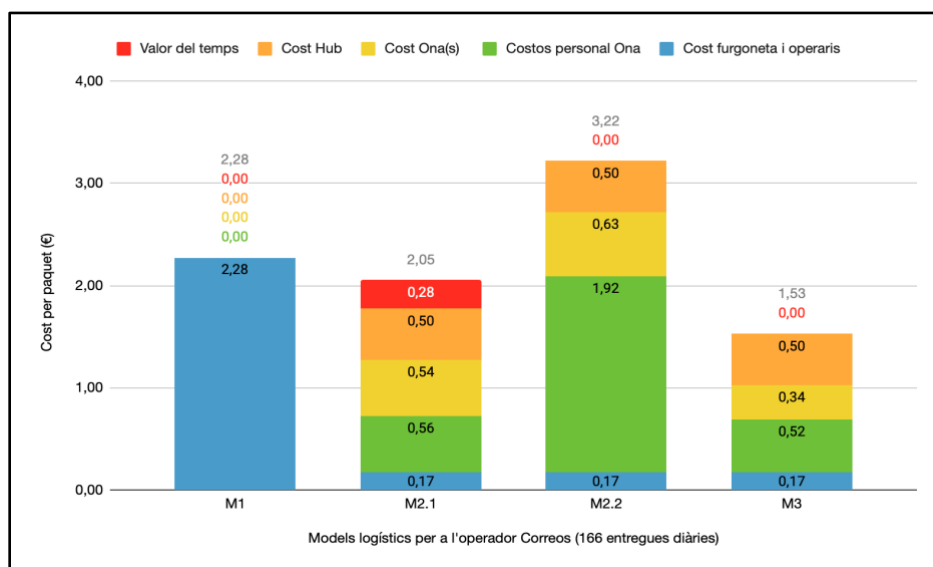
Per a tots els models, els costos per paquet (és a dir, els costos totals dividits entre la quantitat de comandes) són més baixos per als operadors amb un major nombre de comandes (Correos i Amazon). La Taula 6 mostra la relació de costos per paquet per a cada operador i model.

Operador	Model	Cost furgoneta i operari (€)	Costos personal Ona (€)	Cost Ona(s) (€)	Cost Hub (€/dia)	Valor del temps dels clients (€)	Cost per paquet (€)
CORREOS	M1	2,28	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>2,3</b>
	M2.1	0,17	0,56	0,54	0,50	0,28	<b>2,1</b>
	M2.2	0,17	1,92	0,63	0,50	0,00	<b>3,2</b>
	M3	0,17	0,52	0,34	0,50	0,00	<b>1,5</b>
AMAZON	M1	2,28	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>2,3</b>
	M2.1	0,19	0,69	0,54	0,50	0,29	<b>2,2</b>
	M2.2	0,19	1,95	0,63	0,50	0,00	<b>3,3</b>

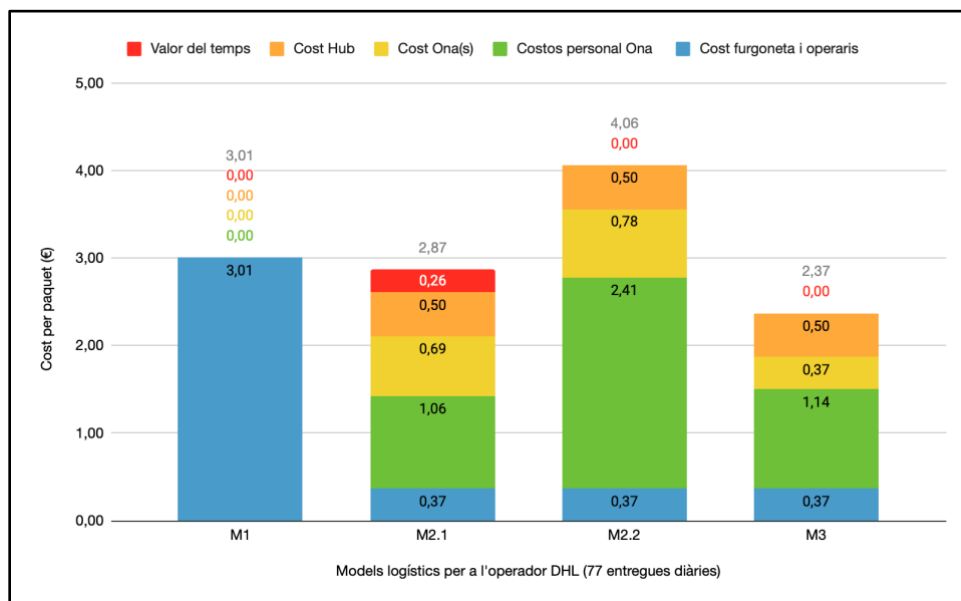
	M3	0,19	0,55	0,36	0,50	0,00	<b>1,6</b>
DHL	M1	3,01	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>3,0</b>
	M2.1	0,37	1,06	0,69	0,50	0,26	<b>2,9</b>
	M2.2	0,37	2,41	0,78	0,50	0,00	<b>4,1</b>
	M3	0,37	1,14	0,37	0,50	0,00	<b>2,4</b>
UPS	M1	3,72	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>3,7</b>
	M2.1	0,83	2,93	0,96	0,50	0,29	<b>5,5</b>
	M2.2	0,83	3,46	1,13	0,50	0,00	<b>5,9</b>
	M3	0,83	1,45	0,47	0,50	0,00	<b>3,3</b>
GLS	M1	3,59	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>3,6</b>
	M2.1	0,79	2,48	0,87	0,50	0,27	<b>4,9</b>
	M2.2	0,79	3,09	1,01	0,50	0,00	<b>5,4</b>
	M3	0,79	1,33	0,43	0,50	0,00	<b>3,1</b>
ZELERIS	M1	3,83	0,00	0,00	0,00	0,00	<b>3,8</b>
	M2.1	0,81	2,48	1,00	0,50	0,29	<b>5,1</b>
	M2.2	0,81	3,53	1,15	0,50	0,00	<b>6,0</b>
	M3	0,81	1,41	0,46	0,50	0,00	<b>3,2</b>

*Taula 6: relació de costos per paquet de cada operador i per a cada model.*

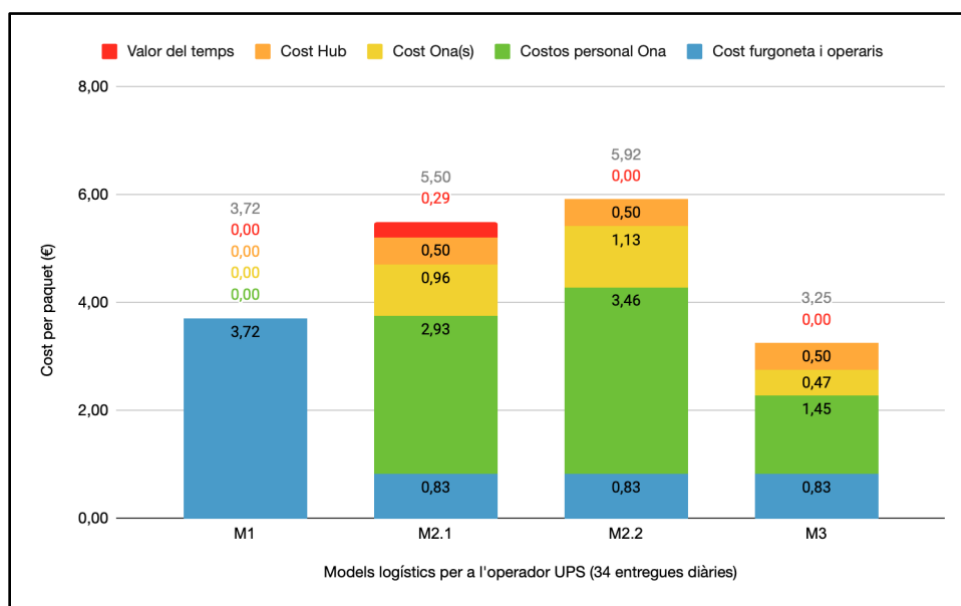
A continuació es mostren gràfics de columnes per a 3 operadors diferents. La Figura 8 detalla els costos per paquet de Correos, l'operador amb més comandes diàries, 166. La Figura 9 inclou els costos per paquet de DHL, l'operador amb un nombre de comandes intermig, 77. Finalment, la Figura 10 mostra els costos per paquet de UPS, l'operador amb menys comandes diàries a la zona d'estudi, 34.



*Figura 8: costos per paquet de Correos per a cada model.*



*Figura 9: costos per paquet de DHL per a cada model.*



*Figura 10: costos per paquet de UPS per a cada model.*

La Figura 11 mostra un gràfic de columnes amb cada tipus de cost per a cada model, agrupats per operador.



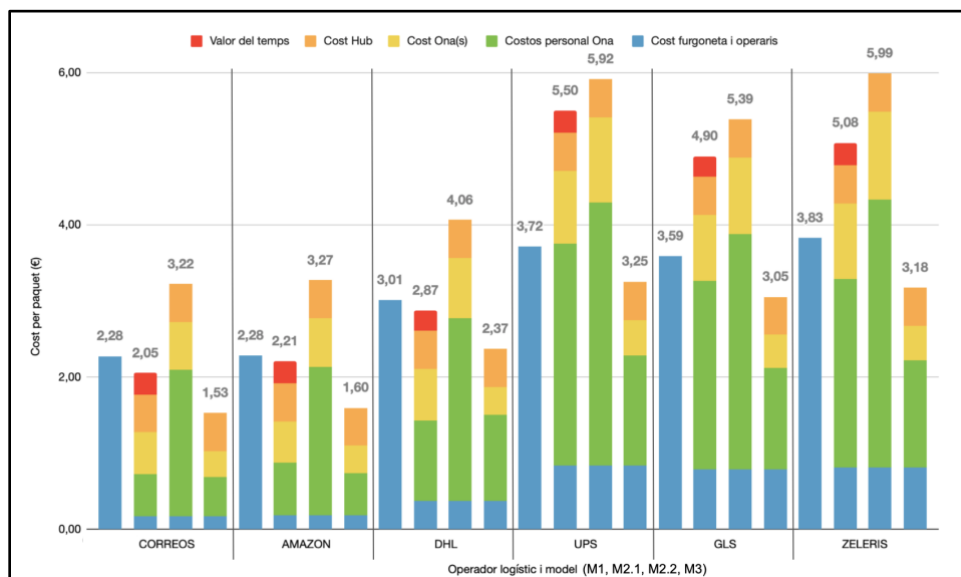


Figura 11: costos per paquet de cada operador i model.

L'anàlisi dels diferents models logístics per a la distribució de paquets en una zona d'estudi de Barcelona revela que l'eficiència i els costos operatius varien considerablement segons el mètode utilitzat per fer les entregues. Els resultats mostren que les limitacions en la circulació i la necessitat de múltiples viatges entre el Centre de Distribució i la zona d'estudi en el **Model 1** resulten en distàncies recorregudes molt elevades i una **baixa eficiència operativa**.

Els models que incorporen vehicles autònoms, com els **Models 2.1 i 2.2**, redueixen la distància total recorreguda en eliminar els múltiples viatges al Centre de Distribució. Tot i això, encara es recorren **molts quilòmetres diàriament a causa de les restriccions de circulació**, i els costos varien en funció de la capacitat del vehicle i la necessitat d'operaris que acompanyen els vehicles.

**El Model 3 destaca per la seva major eficiència**, ja que permet la circulació autònoma dels vehicles per qualsevol carrer, reduint significativament les distàncies recorregudes i eliminant els costos associats al temps dels clients i operaris. **Aquest model presenta els costos operatius més baixos i una major eficiència en la distribució de mercaderies.**

En aquest estudi, a part de considerar les assumpcions descrites durant les seccions anteriors per dissenyar els models logístics, també **s'ha considerat que els vehicles autònoms funcionen i circulen de manera fluida i completament integrada en l'ecosistema urbà**. Com a anàlisi complementària a aquest estudi i que es durà a terme en el marc del projecte BotNet, caldrà avaluar com afecta la presència de les Ones als carrers, ja que necessitaran aturar-se a les voreres o places d'aparcament, podent requerir adaptacions urbanístiques per garantir una integració òptima sense interferir excessivament en la mobilitat de vianants i altres vehicles. En consonància amb això, és necessari analitzar com es farà la integració del Hub dins la ciutat, assegurant que sigui un lloc adequat per a la circulació i estacionament de vehicles motoritzats. Al mateix temps, ha de permetre una entrada i sortida fluida dels vehicles autònoms, facilitant la seva operativa sense causar disrupcions significatives en el trànsit urbà. Aquestes línies d'investigació seran l'objecte de la segona part del projecte BotNet.

Amb tot això, es pot concloure que **l'ús de vehicles autònoms**, sumat a la flexibilització de les restriccions de circulació per aquests, **pot oferir solucions més eficients i econòmiques per a la distribució urbana de mercaderies**, millorant significativament l'eficiència operativa i reduint els costos associats.