

Universitat Autònoma de Barcelona

# Un sistema de suport a la presa de decisions en la coordinació de serveis d'emergència en accidents de trànsit

Daniel Guimarans Serrano

PRESENTAT COM A REQUERIMENT PARCIAL  
PER A L'OBTENCIÓ DE LA  
SUFICIÈNCIA INVESTIGADORA  
A LA UNIVERSITAT AUTÒNOMA DE BARCELONA

Setembre, 2007



Dr. Juan José Ramos González, professor de la Universitat Autònoma de Barcelona,

CERTIFICA:

Que el treball titulat “**Un sistema de suport a la presa de decisions en la coordinació de serveis d'emergència en accidents de trànsit**”, realitzat per Daniel Guimarsans Serrano i presentat com a requeriment parcial per a l’obtenció de la Suficiència Investigadora, ha estat desenvolupat i escrit sota la seva supervisió.

Dr. Juan José Ramos González

Bellaterra, Setembre 2007



# Agraïments

Aquells que millor em coneixen saben perfectament que sóc una persona més aviat tímida expressant els meus sentiments, especialment si són d'afecte o agraïment. Això no vol dir que no en sigui, d'agraït. Per aquest motiu, volia escriure aquestes línies, recordant i donant les gràcies a totes aquelles personnes que d'alguna manera o altra han contribuït i m'han ajudat durant l'elaboració d'aquest treball. Malgrat faci l'intent de no deixar-me a ningú, la meva memòria a vegades no vol funcionar com jo voldria. Per avançat, demano disculpes sinceres a qui no llegeixi el seu nom en aquestes línies. Encara que la memòria falli el record perdura.

En primer lloc, vull donar les gràcies als meus pares, perquè sense ells no seria qui sóc. Amb el seu esforç, em van donar una educació i el bé més important que he rebut: la llibertat de decidir quin camí volia seguir en la meva vida. En totes les decisions importants, encara que no les comparteixin, sempre m'he sentit recolzat per la meva família.

Només puc tenir paraules d'agraïment cap a la Marina, possiblement la persona que més ha patit aquest treball durant totes les etapes, des dels neguits inicials fins a l'empenta final. Gràcies a ella, i a la seva família, per ser-hi sempre al meu costat i per tot el recolzament que m'han donat, especialment quan no veia gaire clar el meu futur. Marina, gràcies per estimar-me i deixar-te estimar, perquè un és només un i dos són dos i mig.

Fins i tot en els moments durs, mai m'he sentit sol. Sempre sabia que hi havia algun amic recolzant-me i donant-me la mà per fer que em tornés a aixecar. A tots ells, els hi estic profundament agraït perquè sense la seva ajuda no seria la persona que sóc ara. Al Julio i a l'Edu, perquè sense ells ara no seria aquí, per tants moments compartits i perquè aquests no acabin mai. A l'Iker, per obligar-me sempre a millorar, a donar un pas més, a canalitzar els

meus sentiments cap a quelcom positiu i compartir-ho amb mi; la distància ens separa, però la nostra filosofia convergeix. Al Jordi, l'Enric i el Cristian, per compartir amb mi tants moments des de fa tants anys, especialment aquells que hem passat a prop d'alguna paret. Al Tomás, per ser el meu "germà" i caminar al meu costat des que vam aprendre a fer-ho; per fer-me sentir que segueix al meu costat, malgrat que puguem veure'ns tan poc. Al David, per tenir sempre paraules d'ànim en el moment adient.

A tots els meus companys de departament no puc més que agrair el seu suport i que molts d'ells hagin esdevingut més que companys. A la Laia i la Sònia, per tants bons moments compartits en el despatx i per tota la seva ajuda quan vaig aterrjar al departament. A la Mònica, la Chantal i l'Orlando, per permetre'm formar part de la seva família i compartir viatges, il·lusions i grans moments; en definitiva, compartir la seva amistat. Al Miguel, per totes les estones compartides al pic, esperant la nostra onada, per molt remoguda que estigués la mar. Al Pedro, per tots els seus consells i el seu bon humor; sota una aparença "alpha" s'amaga una gran persona. Al Roman, per compartir amb mi la seva experiència, els seus coneixements i els seus consells, des que era alumne seu fins ara. Al Carles, per tota la seva ajuda amb l'enrevessat món burocràtic del doctorat, pel seu optimisme i per tenir sempre a punt una paraula amable. Al Dani Riera, per comptar amb mi quan jo només era "el noi de la sala d'ordinadors". Al Fausto, per tota la seva ajuda quan les màquines no volen funcionar com voldríem. A l'Asier, pel seu esperit crític que sempre m'ha ajudat a intentar anar una mica més enllà. Al David, per aguantar-me tot i ser del "lado oscuro".

Al meu tutor i confident, el Juanjo, per tota l'ajuda que he rebut d'ell des que vaig arribar a aquest departament, ja sigui en qüestions professionals o personals. A vegades penso què estaria fent ara mateix si no hagués rebut la seva trucada per involucrar-me en el projecte que va iniciar tot.

A Miquel Àngel Piera, per recordar-se de mi quan ja feia temps que havia deixat la universitat i creure en les meves capacitats. Ell, conjuntament amb el Toni Guasch i el Ramon Vilanova, va formar part del tribunal avaluador d'aquest treball. A tots ells, els vull agrair la seva disponibilitat per prendre-hi part, així com les seves observacions i els seus consells.

Finalment, m'agradaria tenir un petit record pel Fufi, amb qui vaig compartir vint-i-dos anys de la meva vida i ens va deixar poc abans de la conclusió d'aquest treball. Allà on estiguis, descansa en pau.

# Proemi

Actualment, la reducció de la sinistralitat i la millora de la seguretat a les carreteres constitueix un dels principals reptes que afronten els òrgans de govern responsables. La consecució d'aquests objectius es pot aconseguir mitjançant l'adequació de la xarxa viària i el foment d'una conducció responsable que redueixi les probabilitats de patir un accident.

Malgrat l'implantació d'aquestes mesures, es fa impossible reduir del tot el nombre d'accidents de trànsit que es produeix en un territori. En aquest cas, un factor de millora en la seguretat viària correspon a la correcta actuació dels serveis d'emergència implicats en la seva atenció. Actualment, les dades indiquen que els temps de resposta dels diferents serveis són clarament milloables, fet que repercuteix en el nombre de morts i en la gravetat de les lesions provocades per l'accident.

D'altra banda, la tasca de presa de decisions que realitzen els diferents serveis de forma independent pot fer minvar l'eficàcia de la seva intervenció conjunta. Així, els serveis d'emergència implicats en aquest tipus d'atenció segueixen uns protocols bàsics de col·laboració en l'escenari de l'accident, però un factor crític com el procés d'assignació de recursos es duu a terme separadament, tot i haver alguns elements comuns com l'ordre de notificacions que cal realitzar entre serveis. En aquest sentit, la centralització de les comunicacions i de les tasques de coordinació i presa de decisions podrien introduir una millora substancial en la capacitat de resposta dels serveis, reduint el temps de resposta a una situació donada i optimitzant la distribució dels recursos disponibles.

Les característiques que envolten l'atenció d'un accident de trànsit provoquen que aquest tipus de coordinació sigui altament complexa, ja que cal considerar un flux d'informació continu, amb un ampli marge d'incertesa, des

de l'escena de l'accident que pot fer variar les assignacions inicials de recursos. Així, la resposta dels sistemes dissenyats com a elements de suport a la presa de decisions en aquest tipus de situacions ha de ser prou ràpida com per permetre acceptar aquests canvis sense pèrdua d'eficàcia.

En el present treball es presenta l'apropament adoptat per abordar el disseny i implementació d'un sistema de suport a la presa de decisions en la coordinació dels serveis d'emergències en accidents de trànsit. L'estratègia suggerida consisteix en una aproximació dividida en dues etapes diferenciades: una primera, on es gestiona l'ingent volum d'informació geogràfica disponible per adaptar-lo a les característiques del problema; una segona fase, on es procedeix a la resolució del problema, tasca consistent en el càlcul de les possibles rutes i les alternatives que aquestes configuren i en l'assignació dels recursos disponibles per satisfer les necessitats de l'accident tractat.

Cal destacar, però, que el desenvolupament de l'eina presentada no hagués estat possible sense el disseny, configuració, implementació i validació previs de la plataforma de càlcul distribuït sobre la que ha estat concebuda. Aquesta tasca tècnica, sovint feixuga, ha absorbit una gran quantitat de recursos temporals però ha permès desenvolupar una arquitectura eficient i versàtil, fàcilment adaptable a diferents problemes logístics. Sense la seva implantació prèvia, molts dels resultats presentats en el present treball no haguessin estat possibles, penalitzant substancialment en el rendiment del sistema.

La informació continguda en el present treball permet extreure dues conclusions importants. En primer lloc, s'ha pogut demostrar que l'estratègia d'apropament al problema de coordinació dels serveis d'emergència és una aproximació eficaç, capaç de respondre a les necessitats del problema amb un temps de resposta adequat. En segon lloc, els resultats obtinguts amb l'eina dissenyada permeten validar i verificar l'eficàcia de la plataforma distribuïda implementada com a entorn de simulació i optimització. Així, s'estableix un lligam entre els dos elements presentats, ja que els resultats obtinguts amb el sistema de suport a la presa de decisions estan clarament marcats pel rendiment propi de l'arquitectura sobre la que se sustenta.

# Índex

<b>Proemi</b>	<b>vii</b>
<b>1 Introducció</b>	<b>3</b>
<b>2 Problema de coordinació dels serveis d'emergència</b>	<b>9</b>
2.1 Vehicle Routing Problem - VRP . . . . .	10
2.1.1 Variants del VRP . . . . .	11
2.1.2 Mètodes de resolució del VRP . . . . .	13
2.2 Coordinació dels serveis d'emergència . . . . .	17
<b>3 Entorn de presa de decisions</b>	<b>21</b>
3.1 Arquitectura CORBA . . . . .	21
3.2 Mòduls implementats . . . . .	22
<b>4 Tractament de la informació geogràfica</b>	<b>27</b>
4.1 Mètodes de cerca heurística . . . . .	28
4.2 Algorismes <i>Best-First</i> . . . . .	30
4.2.1 Algorisme A* . . . . .	31
4.3 Generació de l'estructura de <i>clusters</i> . . . . .	34
<b>5 Metodologia d'assignació dels serveis</b>	<b>39</b>
5.1 Càcul de rutes . . . . .	40
5.2 Assignació de recursos . . . . .	45

<b>6 Aplicació i resultats</b>	<b>49</b>
6.1 Marc experimental . . . . .	50
6.2 Resultats . . . . .	53
<b>7 Conclusions i línies de futur</b>	<b>59</b>
<b>Bibliografia</b>	<b>64</b>
<b>A Model de simulació</b>	<b>69</b>
<b>B Disseny de la base de dades</b>	<b>73</b>
<b>C Articles publicats</b>	<b>79</b>

# Capítol 1

## Introducció

La millora de la seguretat a les carreteres mitjançant la incorporació de noves tecnologies i la reducció del nombre de víctimes en accidents de trànsit constitueixen alguns dels principals reptes actuals en matèria de seguretat vial a Europa. Actualment, les dades indiquen que els temps de resposta dels diferents serveis implicats en l'assistència dels accidents de trànsit són clarament millorables (Trànsit 2005), fet que repercuteix en el nombre de morts i en la gravetat de les lesions provocades per l'accident.

La complexitat de les tasques que s'han de dur a terme per atendre un accident de trànsit requereixen la intervenció d'un equip multidisciplinari, format per diversos serveis d'emergència: assistència sanitària, policia i bombers. La seva coordinació és essencial per garantir una intervenció ràpida i efectiva en situacions crítiques. Així, es fa necessària una gestió eficient dels tres serveis i les seves respectives flotes per poder distribuir dinàmicament els recursos de manera adient, respondent a les necessitats pròpies de cada accident.

Aquesta gestió esdevé una tasca complexa, ja que no totes les variables crítiques de decisió relatives a cada accident són conegeudes des del primer moment. Igualment, les diferents fonts de procedència de la informació afegeixen un cert marge d'incertesa a les variables de decisió, de manera que pot ser necessari un posterior reajustament dels recursos assignats per respondre efectivament a les dinàmicament canviants condicions de l'accident.

D'altra banda, no hi ha un sistema automatitzat que reguli l'assignació del tipus i nombre de recursos dels diferents serveis per assolir una coordinació efectiva i una distribució òptima. En aquest sentit, un sistema centralitzat

de comunicació, coordinació i decisió podria millorar la resposta dels serveis d'emergència davant d'un accident de trànsit, reduint el temps de resposta i optimitzant la utilització dels recursos disponibles.

Bàsicament, les decisions implicades en l'atenció d'un accident de trànsit consisteixen en determinar quins recursos són assignats i de quina base han de ser seleccionats, tenint en compte tota la informació accessible, amb l'objectiu de reduir el temps de ruta entre la base i l'escenari de l'accident. El nombre i el tipus de recursos mobilitzats en una situació particular depèn de les variables pròpies de l'accident, com el nombre de vehicles implicats, el nombre de víctimes i la seva gravetat o si hi ha víctimes atrapades, així com de les variables pròpies de la flota, com el nombre d'unitats disponibles de cada tipus, el seu estat i la seva localització. Cal observar que els recursos són assignats dinàmicament per respondre als canvis que es produueixen en les variables de decisió, ja que el flux d'informació és continu des del moment en què l'accident es produeix fins que els serveis finalitzen la seva intervenció.

Cada recurs pot dividir el seu procés d'intervenció en quatre fases principals, en funció de les necessitats de l'accident i del tipus de servei (Al-Ghamdi 2002):

1. Des de la notificació de l'accident fins que la unitat arriba a l'escenari on s'ha produït.
2. Des de l'arribada a l'escenari fins que finalitza la seva intervenció en el lloc de l'accident.
3. Des de la finalització de la intervenció en l'escenari de l'accident fins a l'arribada a l'hospital i el registre de les víctimes.
4. Des de l'inici del retorn a la base fins que arriba a aquesta.

La figura 1.1 mostra el diagrama esquematitzat de l'actuació dels serveis d'emergència durant l'atenció d'un accident de trànsit.

Durant la primera fase, es rep una notificació de l'accident i es recull tota la informació disponible per determinar quins recursos cal mobilitzar per atendre-la. En tots els casos, s'envia com a mínim un vehicle de policia, ja que la seva funció principal consisteix en controlar el trànsit al voltant de l'accident, facilitant l'accés a l'escenari als recursos dels altres serveis. D'altra banda, es determina el nombre i el tipus d'unitats corresponents als serveis mèdics que

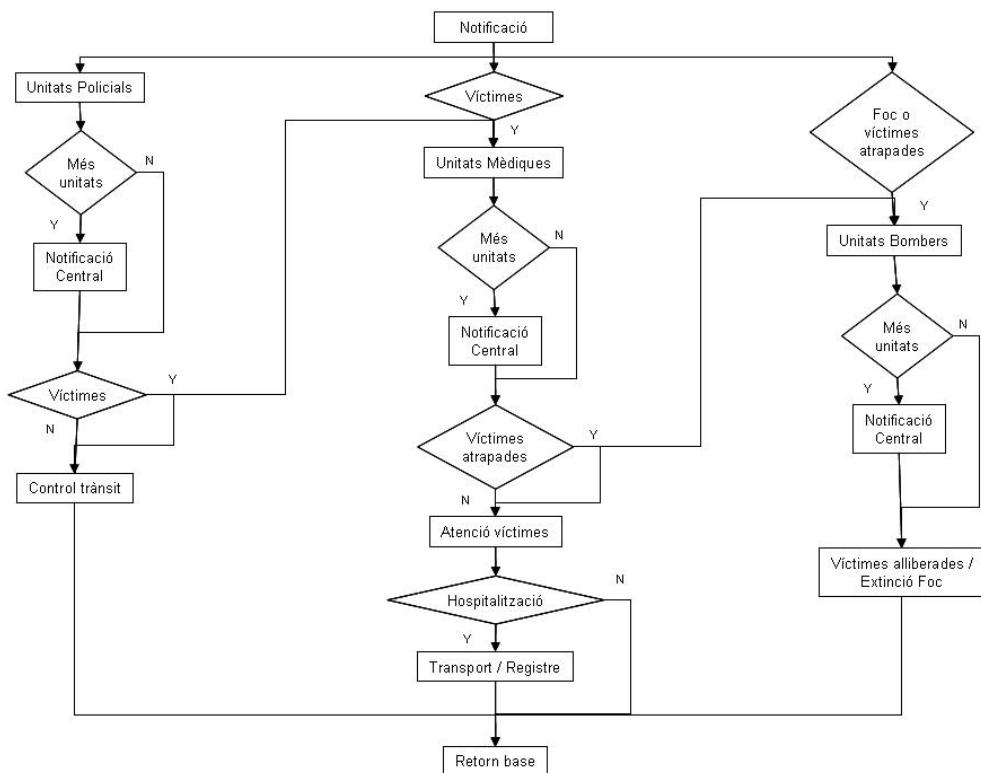


Figura 1.1: Diagrama d'actuació dels serveis d'emergència durant un accident de trànsit.

cal enviar, en funció del nombre de víctimes i de la seva gravetat. Finalment, els recursos corresponents al servei de bombers només són assignats en cas que hi hagi víctimes atrapades o si hi ha presència de foc o elements potencialment perillosos.

En la segona fase, les unitats dels diferents serveis arriben a l'escenari de l'accident i valoren el seu estat, comprovant les variables prèviament conegudes i fixant aquelles que restaven indeterminades. Així, la transmissió dels resultats de la seva avaliació a les corresponents estacions permet determinar la necessitat d'assignar més recursos a un accident donat. Tanmateix, durant aquesta fase té lloc l'atenció de les víctimes, que constitueix la part més complexa de tota la intervenció, ja que es poden derivar moltes situacions diferents

en funció de les característiques de l'accident, fent essencial una intervenció coordinada eficient per reduir els possibles efectes (Urbano *et al.* 1998). En cas que sigui necessària l'hospitalització d'alguna de les víctimes, durant aquesta fase es determina l'hospital d'ingrés en funció de la gravetat del seu estat i de la distància i temps necessaris per a la realització del trasllat.

Durant la tercera fase, es realitza el transport i el registre de les víctimes en l'hospital seleccionat, prenent part únicament els serveis mèdics i policials. Durant el procés, la víctima és registrada en l'hospital i es realitza una primera valoració abans de procedir a la seva hospitalització, de manera que les unitats del servei mèdic encarregades del seu transport resten durant aquest període a l'hospital a l'espera de la confirmació. Si la primera valoració estima la necessitat que el pacient sigui tractat en un altre hospital, aquestes unitats seran les encarregades de transportar-lo a la nova destinació.

En l'última fase, les unitats assignades retornen a la base provinents del lloc de l'accident o de l'hospital, en cas que aquest procediment hagi estat necessari. En funció del servei, aquestes unitats hauran de realitzar diferents tasques abans de comunicar el seu estat novament operatiu, com són les operacions de neteja i la substitució del material usat. Únicament les unitats corresponents al servei de policia tornen a estar plenament operatives i disponibles per a ser assignades a un nou accident un cop abandonen l'escenari de l'accident on han realitzat la seva intervenció, sense necessitat d'haver arribat a la base.

En tot aquest procediment es poden distingir dues regions temporals específicament crítiques: la primera fase, on cal donar una resposta gairebé immediata per reduir l'impacte de l'accident sobre les víctimes; la segona fase, on cal determinar la ruta óptima que minimitzi el temps de trasllat per arribar a l'hospital de destí seleccionat. Així, les restriccions temporals queden naturalment impòsades, especialment durant la primera etapa, de manera que el temps emprat en la planificació de les diferents rutes d'accés al lloc de l'accident esdevé crític, ja que aquestes han de ser assignades durant la finestra temporal d'intervenció. D'altra banda, la configuració de la xarxa viària i la distribució de les bases corresponents als diferents serveis són factors determinants que influeixen en la capacitat de resposta de cada flota a una situació concreta. Igualment, aquests elements també afecten a la determinació de les rutes óptimes d'accés a l'escenari de l'accident des de les diferents bases, esdevenint factors decisius en el temps de resposta.

La utilització d'un entorn realista amb dades geogràfiques reals augmenta

considerablement la complexitat del càlcul, atès que el volum d'informació que cal tractar és molt elevat, augmentant el temps de resposta del sistema en la determinació de les rutes òptimes necessàries per atendre un accident. El processament i reordenació de la informació geogràfica ha demostrat ser una estratègia efectiva en molts camps d'aplicació, com els problemes d'enrutament en logística (Dondo and Cerdá 2007), de transport (Anily *et al.* 1999) o de xarxes de telecomunicacions (Frey and Görgen 2005). En tots aquests casos, tota la informació de les visites i dels punts de connexió és coneguda a priori, de forma que aquesta és utilitzada per disminuir la complexitat del càlcul i reduir el temps necessari per a la seva realització. Tanmateix, en el cas del tractament dels accidents de trànsit tota la informació és desconeguda fins que l'accident es produueix, de manera que esdevé necessari adoptar una estratègia de tractament diferent que compleixi amb els següents objectius:

- Definir una metodologia eficient per gestionar la informació geogràfica continguda en un escenari realista, adaptada a les necessitats pròpies del problema tractat.
- Proporcionar una aproximació que permeti guiar la solució del problema d'assignació de recursos, mitjançant la reducció dels dominis de les variables de decisió en funció de les restriccions imposades.

L'apropament adoptat ha de proporcionar una manera eficient de treballar amb volums de dades realistes, amb l'objectiu de simplificar els càlculs i reduir el temps de resposta, mentre que l'optimalitat del resultat retornat roman garantida. En els casos que, per les característiques de l'accident, no sigui possible l'obtenció d'una solució òptima, el sistema ha de ser capaç de proporcionar un resultat acceptable en un temps raonable. De la mateixa manera, ha de permetre l'obtenció de rutes òptimes en temps d'execució amb un cost temporal assumible.

D'altra banda, l'estratègia emprada ha de permetre disminuir les dimensions del problema, limitant els dominis de les variables de decisió. Així, aquesta aproximació ha de facilitar la conversió d'un problema amb  $n$  bases a una versió simplificada amb un conjunt de  $n$  problemes amb una única base que, en el millor dels casos, proporcionarà una única opció per a cada un dels serveis implicats en l'atenció de l'accident. Al seu torn, els dominis acotats de les variables permeten simplificar la presa de decisions en la fase d'assignació de recursos, guiant la resolució del problema de satisfacció de restriccions

mitjançant la reducció del volum d'informació i proporcionant una primera aproximació a la solució del problema.

En el present treball es presenten les característiques principals del sistema desenvolupat per a l'ajuda en la presa de decisions en el problema de coordinació dels serveis d'emergència en l'atenció d'accidents de trànsit. Malgrat que aquest ha estat dissenyat específicament per respondre a les necessitats característiques d'un accident de trànsit, la metodologia adoptada és fàcilment aplicable a altres situacions pròpies del camp de la logística, com són els problemes de distribució o aquells on la localització de les visites no és coneguda *a priori*.

El sistema ha estat desenvolupat sobre una plataforma de simulació i càlcul distribuït, on els mòduls han estat dissenyats de manera genèrica per admetre la parametrització adient a cada tipus de problema tractat. L'eina de suport a la presa de decisions ha estat implementada en base a una aproximació de dues fases on es combina la utilització de mètodes heurístics i de tècniques de satisfacció de restriccions: una primera etapa, on es tracta i classifica la informació geogràfica disponible per assegurar una reducció en el temps de càlcul i l'acompliment de les restriccions temporals del problema, mentre es manté garantida l'optimalitat de la solució proporcionada; una segona fase, on els recursos necessaris són assignats en funció de les característiques pròpies de l'accident i de la flota de cada servei i les rutes òptimes són calculades a partir de la informació geogràfica obtinguda durant la primera etapa.

## Capítol 2

# Problema de coordinació dels serveis d'emergència

En la majoria de problemes relacionats amb sistemes de distribució tractats en el camp de la logística, la correcta planificació de rutes per cobrir la demanda existent constitueix un element essencial. En aquest tipus de situacions, es fa necessària una gestió eficient de la flota disponible amb l'objectiu de minimitzar el cost associat, expressat en termes econòmics, de distància, de temps de desplaçament, de nombre de vehicles o en funció d'una combinació més o menys complexa d'aquests elements.

L'interès en aquest tipus de problemes, designats com problemes d'enrutament de vehicles (*Vehicle Routing Problem - VRP*), sorgeix a partir de la seva rellevància pràctica, així com de la dificultat de resolució exacta que presenten (Bektaş 2006). Actualment, el VRP està considerat com un dels problemes més importants en el camp de l'optimització combinatòria, atès que constitueix un problema *NP-Hard*, amb un creixement exponencial del cost de resolució en funció de les seves dimensions.

Els mètodes emprats en la resolució dels problemes VRP poden classificar-se en dos grups (Puig *et al.* 2003): procediments exactes, els quals exploren tot l'espai de cerca definit pel problema; procediments basats en mètodes heurístics i metaheurístics, que intenten reduir l'espai de cerca aplicant la informació disponible. Malauradament, el fet de constituir un problema *NP-Hard* fa que, en moltes ocasions, la resolució exacta d'una instància particular no sigui possible o requereixi un temps de càlcul excessiu. Aquest fet ha provocat que,

amb el temps, la majoria d'estratègies adoptades per resoldre aquest tipus de problemes es basen en mètodes heurístics i metaheurístics (Laporte *et al.* 2000), capaços de retornar una bona solució utilitzant un temps de càlcul raonable, malgrat que en moltes ocasions no es pugui garantir l'optimalitat del resultat trobat.

## 2.1 Vehicle Routing Problem - VRP

El problema d'enrutament de vehicles (*Vehicle Routing Problem - VRP*) constitueix un problema de programació entera classificat en la categoria de problemes *NP-hard*, amb un creixement exponencial del cost de resolució en funció de les dimensions del problema.

Formalment, es pot definir el VRP com un problema de disseny de rutes per a un conjunt de vehicles, de capacitat coneguda, que operen des de una única base, els quals han de subministrar algun tipus de bé a un conjunt de clients de localització i demanda conegeudes (Toth and Vigo 2002). L'objectiu de la planificació d'aquestes rutes consisteix en la minimització d'una funció objectiu basada, habitualment, en la distància recorreguda i el nombre de vehicles utilitzats. Conceptualment, aquests problemes es troben en la intersecció de dos tipus de problemes ben coneguts en optimització combinatòria: cal visitar un cert nombre de clients minimitzant la distància de desplaçament, com en el problema del viatjant i cal considerar les limitacions de capacitat dels vehicles que constitueixen la flota, de manera similar a com es fa en el problema d'empaquetat de contenidors.

El problema del viatjant (*Traveling Salesman Problem - TSP*), constitueix el tipus més simple de model de distribució. El TSP és una instància del problema VRP amb una flota consistent en un únic vehicle de capacitat infinita, el qual ha de distribuir els béns que transporta a un cert nombre de clients minimitzant la distància recorreguda, iniciant i finalitzant la ruta en la mateixa base. Formulacions més complexes del problema inclouen la utilització de més d'un vehicle, configurant el *Multiple Traveling Salesman Problem - MTSP*, mantenint sempre la restricció que cada client ha de ser atès únicament per un vehicle (Bektas 2006).

El problema d'empaquetat de contenidors (*Bin Packing Problem - BPP*) consisteix en determinar com col·locar el màxim nombre de béns en el nombre mínim de contenidors d'espai fixat, amb l'objectiu de maximitzar el nombre

d'objectes empaquetats (Puig *et al.* 2003). Es pot interpretar el BPP com una instància del problema VRP, on els vehicles tenen una certa capacitat fixada i tots els costos de desplaçament són nuls, de manera que totes les solucions possibles del problema tinguin el mateix cost.

Així, es pot considerar el TSP com una instància del problema VRP on s'han relaxat les restriccions referents a la capacitat dels vehicles de la flota, és a dir, l'estructura BPP del problema. D'altra banda, es pot interpretar el BPP com un problema VRP on s'ha relaxat l'estructura de planificació de rutes pròpia del TSP. D'aquesta manera, la ruta planificada en el problema TSP que permeti visitar a tots els clients mentre es compleixen les restriccions de capacitat, interpretades com restriccions d'empaquetat, constituirà una solució factible del problema VRP plantejat. Malauradament, tant el TSP com el BPP constitueixen clars exemples de problemes *NP-Hard*, de forma que la majoria d'instàncies del problema VRP són difícils de resoldre a la pràctica.

### 2.1.1 Variants del VRP

En una situació real, la formulació bàsica del problema VRP es troba habitualment complementada amb un conjunt de restriccions diferents, com poden ser la capacitat dels vehicles o el temps de servei. D'altra banda, la distribució i el tipus de vehicles que constitueixen la flota, el nombre de bases o les característiques del servei poden configurar instàncies molt complexes del problema VRP.

En funció de les restriccions i consideracions addicionals introduïdes, es poden distingir les següents variants del problema VRP bàsic (Puig *et al.* 2003):

- **VRP capacitatiu (*Capacitated VRP - CVRP*)**: es tracta d'un problema VRP on una flota de vehicles de capacitat uniforme ha de servir un únic tipus de bé a un conjunt de clients amb una demanda coneguda, partint d'una única base i minimitzant la distància de desplaçament. Així, el CVRP constitueix una instància del VRP amb una restricció addicional que limita la capacitat dels vehicles, de manera que aquests estan obligats a retornar periòdicament a la base. Considerant que aquesta restricció està present en tots els problemes reals, el CVRP constitueix la variant bàsica del problema VRP.
- **VRP amb múltiples bases (*Multiple Depot o Multi-Depot VRP - MDVRP*)**: en aquest tipus de problemes es disposa d'un nombre concret

de bases, amb una flota de vehicles ubicada en cada una d'elles, des d'on s'ha de cobrir la demanda generada per tots els clients. Si les visites estan agrupades al voltant de les bases, es pot dividir el problema en un conjunt d'instàncies independents del problema VRP amb una única base. En cas contrari, cal assignar els clients a les diferents bases i determinar les rutes dels vehicles seleccionats, finalitzant sempre en la base d'origen, mentre s'intenta minimitzar la distància de desplaçament i el nombre de vehicles emprats.

- **VRP periòdic (*Periodic VRP - PVRP*)**: es tracta d'un problema VRP on l'horitzó de planificació s'estén a un període superior a un dia, límit temporal habitual en la majoria de casos.
- **VRP amb entrega repartida (*Split Delivery VRP - SDVRP*)**: aquesta variant correspon a una relaxació del problema VRP on es permet que un mateix client sigui visitat i servit per diferents vehicles si així s'aconsegueix una reducció del cost global. Aquest tipus de relaxació esdevé especialment important en aquells casos on la demanda del client iguala o supera la capacitat dels vehicles presents en la flota.
- **VRP estocàstic (*Stochastic VRP - SVRP*)**: es tracta d'un problema VRP on una o més variables són desconegudes i poden prendre un valor aleatori, sent les més habituals aquelles variables que fan referència a la presència d'una visita donada en una instància concreta, a la demanda dels clients o al temps de servei i de desplaçament. En aquest tipus de problemes, l'estrategia adoptada habitualment per trobar una solució consisteix en resoldre el problema abans de conèixer els valors aleatoris, aplicant posteriorment les correccions necessàries per satisfer les restriccions del problema un cop aquests es fan patents.
- **VRP amb recollida i entrega (*VRP with Pick-up and Delivery - VRPPD*)**: en aquesta variant del problema VRP, els objectes transportats han de ser lliurats d'un conjunt de clients a un altre, de manera que els vehicles inicien la ruta buits des de la base corresponent, recullen els béns en un conjunt definit de clients i els reparteixen entre els altres segons la seva demanda, retornant a la base sense càrrega. La principal dificultat que sorgeix en resoldre aquest tipus de problemes consisteix en trobar l'ordre correcte de recollides i lliuraments, atès que, en la majoria

d'ocasions, cada client ha de ser servit per un únic vehicle. Aquest fet pot induir a una incorrecta utilització de la capacitat dels vehicles, incrementant així el nombre de vehicles usats i, en conseqüència, la distància de desplaçament global.

- **VRP amb devolucions ( *VRP with Backhauls - VRPB* )**: es tracta d'un problema VRP en què els clients poden demandar o retornar un cert nombre de béns, de forma que cal fer una gestió eficient de la capacitat dels vehicles emprats. Habitualment, el nombre d'objectes que cal lliurar i recollir està fixat i és conegit prèviament al procés de resolució. Aquesta variant del problema VRP pot interpretar-se com un VRPPD amb la particularitat que tots els lliuraments han de realitzar-se abans d'iniciar el procés de recollida, evitant així la necessitat de reordenar la càrrega de cada vehicle en cada visita.
- **VRP amb finestres temporals ( *VRP with Time Windows - VRPTW* )**: en aquest tipus de problema, s'afegeix a la definició del VRP una restricció addicional a cada client, on es defineix un interval temporal dins del qual aquest ha de ser atès. Sovint, és possible definir una finestra temporal per a la base, determinant així l'horitzó de planificació. En la solució del problema, es pot permetre que un vehicle arribi a un client abans que la finestra temporal d'aquest estigui oberta, provocant un determinat temps d'espera, però no està permès que cap vehicle atengui la petició d'un client un cop ha finalitzat el seu interval temporal de servei. En determinades situacions, aquestes restriccions es poden relaxar, incorporant la violació de les finestres temporals de servei en la funció objectiu amb un cost de penalització.

### 2.1.2 Mètodes de resolució del VRP

Les tècniques més utilitzades en la resolució dels problemes VRP poden classificar-se, bàsicament, en dos grups: els mètodes exactes i aquells basats en procediments heurístics i metaheurístics. Atès que el VRP constitueix un problema considerat com a *NP-Hard*, no hi ha cap algorisme exacte que garanteixi trobar una solució óptima en un temps de còmput raonable, especialment quan el nombre de clients presents en el problema és considerable. Per aquesta raó, l'aplicació de mètodes heurístics i, més recentment, metaheurístics, ha esdevin-

gut la línia principal d'investigació en la cerca d'una metodologia de resolució satisfactòria per a aquesta categoria de problemes.

Entre els diferents mètodes de resolució dels problemes VRP, destaquen:

- **Algorismes exactes:** aquest tipus d'aproximacions calculen totes les possibles solucions del problema fins a assolir la solució òptima, o una d'elles en cas que hi hagi més d'un resultat òptim.

Entre aquests mètodes destaca l'algorisme *Branch and Bound* (Fisher 1994), basat en la utilització de *K-trees*. L'estrategia emprada en aquest algorisme consisteix en dividir de forma iterativa l'espai de solucions en un conjunt de subproblems i, seguidament, realitzar el procés d'optimització individualment sobre cada un d'ells.

- **Mètodes heurístics:** aquests mètodes realitzen una exploració relativament limitada de l'espai de cerca, proporcionant una bona solució, malgrat que no es pugui garantir la seva optimalitat, en un temps de càlcul raonable.

Es poden classificar en:

- *Mètodes constructius:* aquests algorismes construeixen gradualment d'una solució factible, mitjançant el càlcul seqüencial o paral·lel de rutes per a cada vehicle, en funció del cost acumulat. Es caracteritzen per la inexistentia d'una etapa de millora de la solució posterior al càlcul inicial.

Entre aquests mètodes cal destacar les següents aproximacions:

- \* Savings (Clarke and Wright 1964)
- \* Matching Based (Altinkemer and Gavish 1991)(Desrochers and Verhoog 1989)
- \* Heurístiques multi-ruta de millora:
  - Thompson and Psaraftis (Thompson and Psaraftis 1993)
  - Van Breedam (Breedam 1994)
  - Kinderwater and Savelsbergh (Kinderwater and Savelsbergh 1997)
- *Algorismes en dues fases:* l'aproximació d'aquests mètodes consisteix en la descomposició del problema en els seus dos components

naturals: l'agrupament de les visites en rutes factibles i la construcció de les rutes que donen lloc a la solució, amb possibles iteracions entre aquestes dues fases.

Destaquen dos tipus d'aproximacions:

- \* Algorismes *Cluster-First, Route-Second*: aquests mètodes agrupen els clients en *clusters* utilitzant la seva localització i les finestres temporals del problema, constraint seguidament una ruta per a cada *cluster* mitjançant l'ús de tècniques heurístiques (Dondo and Cerdá 2007). Destaquen els següents algorismes:
  - Fisher and Jaikumar (Fisher and Jaikumar 1981)
  - Algorisme pètal (Ryan *et al.* 1993)
  - Algorisme d'escombrat (Gillet and Miller 1974)
  - Talliard (Talliard 1993)
- \* Algorismes *Route-First, Cluster-Second*: aquests mètodes realitzen el procés invers, constraint les rutes corresponents per, seguidament, comprovar quines agrupacions de clients compleixen les restriccions imposades.

- **Mètodes metaheurístics:** aquestes aproximacions realitzen una exploració acurada de les regions de l'espai de cerca amb més opcions de contenir una solució òptima, proporcionant així solucions de millor qualitat que les trobades mitjançant l'ús de mètodes heurístics clàssics.

Entre els mètodes metaheurístics més utilitzats en la resolució dels problemes VRP destaquen:

- *Algorismes formiga* : s'han realitzat diferents aproximacions amb aquesta metodologia (Glover and Kochenberger 2003) per a diferents variants del problema VRP (Bullnheimer *et al.* 1997), destacant aquella aplicada al VRPTW (Gambardella *et al.* 1999). Aquest apropament consisteix en el desenvolupament d'un sistema de colònies de formigues amb una jerarquia orientada a l'optimització successiva d'una funció objectiu múltiple: la primera colònia minimitza el nombre de vehicles mentre que la segona redueix el cost de desplaçament, comunicant-se entre elles mitjançant l'ús de feromones.

- *Programació amb restriccions (Constraint Programming - CP)* (Shaw 1998): es tracta d'un paradigma que permet representar i resoldre una àmplia varietat de problemes, els quals són expressats amb variables, les restriccions que les relacionen i els seus respectius dominis. La metodologia bàsica de resolució es basa en tècniques d'exploració completa com la cerca en profunditat per problemes de satisfacció de restriccions o l'algorisme *Branch and Bound* per problemes d'optimització.

Els mètodes CP milloren l'eficiència de la cerca mitjançant la propagació de restriccions: si es poden delimitar els valors d'una variable a partir de les restriccions imposades, aquests canvis són propagats a totes les altres restriccions, amb l'objectiu de reduir els dominis de les variables relacionades. Tanmateix, aquest mecanisme pot induir a l'algorisme a eliminar tots els valors factibles d'una variable, de manera que la branca explorada no condueixi a una solució del problema. En aquestes situacions, l'algorisme de cerca pot retornar al punt on s'ha realitzat la propagació de la restricció corresponent, descartant així el subarbre explorat.

- *Simulated Annealing*: es tracta d'una tècnica de relaxació estocàstica fonamentada en principis propis de la física estadística. En aquesta aproximació, l'algorisme de cerca estableix una analogia amb el procés de refredament dels sòlids, on aquest és escalfat a altes temperatures i refredat progressivament amb l'objectiu d'aconseguir una estructura cristal·lina, corresponent a la configuració de mínima energia (Glover and Kochenberger 2003).
- *Deterministic Annealing*: correspon a un apropament molt similar al proposat amb la tècnica de *Simulated Annealing*, llevat que utilitza regles deterministes per avaluar la validesa d'un moviment (Dueck and Scheurer 1990)(Dueck 1993).
- *Algorismes genètics*: aquests mètodes es caracteritzen per la utilització de mecanismes genètics i de selecció natural per forçar l'evolució de les solucions d'un problema donat (Glover and Kochenberger 2003) (Goldberg 1989). En aquest apropament, una població d'individus evoluciona i dóna lloc a una nova generació seguint un procés iteratiu, fins que es compleix un criteri de convergència concret: l'obtenció d'un nombre màxim de generacions, una població

homogènia amb individus similars o una solució òptima. Aleshores, es descodifica el millor cromosoma generat, proporcionant la corresponent solució al problema. Així, aquesta aproximació permet treballar amb una població de solucions candidates, realitzant una cerca múltiple de forma simultània i reduint el temps emprat en l'execució.

- *Cerca Tabú*: el concepte bàsic d'aquesta aproximació correspon a la superposició d'una metaheurística sobre un mètode heurístic subjacent (Glover 1986). Mitjançant aquest procediment, s'explora iterativament l'espai de cerca amb un conjunt de modificacions permeses dins d'una estructura de solucions *veïnes*, provocant en ocasions el deteriorament de la qualitat de la solució. Per evitar que aquest fet generi l'aparició de cicles en la cerca, es cataloguen aquelles modificacions que condueixen a solucions explorades recentment com a prohibides, o *tabú*. L'ajustament del nombre d'iteracions en què una determinada modificació roman prohibida o la definició de criteris d'aspiració, que permeten violar aquestes prohibicions, són factors que influeixen en el rendiment de l'algorisme i en la qualitat de les solucions proporcionades (Glover and Kochenberger 2003).

## 2.2 Coordinació dels serveis d'emergència

Les característiques del problema plantejat en el present treball permeten classificar-lo com un problema VRP amb múltiples bases, amb una flota heterogènia, unes finestres temporals molt restrictives i valors estocàstics per a les variables de decisió, ja que aquests són desconeguts a priori. Addicionalment, el problema VRP que cal resoldre per a cada un dels serveis presents en el sistema representa una variació del VRPPD.

En primer lloc, cal considerar una aproximació *multi-depot* per modelar el fet que cada servei té les seves bases repartides per tot el territori cobert. Addicionalment, cada servei disposa de diferents tipus de vehicles localitzats en les seves bases, amb capacitat i característiques d'intervenció diferents, proporcionant una flota heterogènia en cada una d'elles. Les característiques del problema imosen, a més, unes finestres temporals fortament restrictives, ja que aquest tipus de situacions requereixen una intervenció ràpida i eficient. Tanmateix, altres factors, com són la densitat del trànsit en les àrees adjacents

al lloc de l'accident, la seva localització, el nombre de víctimes i la seva gravetat o el nombre de vehicles implicats, poden influir en la capacitat de la flota de respondre a les necessitats d'un problema particular, provocant que en determinats casos no sigui possible satisfer les restriccions temporals imposades.

D'altra banda, en algunes situacions es pot interpretar el procés d'actuació dels diferents serveis com una instància d'un problema general de tipus VRPPD, simplificant la seva formulació. Així, la intervenció dels serveis mèdics i policials en un accident de trànsit on es requereix l'hospitalització de les víctimes pot considerar-se com un problema VRPPD, on el punt de destinació s'assigna dinàmicament avaluant les variables pròpies de l'accident. En cas contrari, quan la gravetat de les víctimes involucrades en l'accident no requereix el trasllat a un hospital, la resolució del problema se simplifica considerablement, sent necessari considerar únicament la capacitat d'atenció de cada vehicle assignat, esdevenint una instància del problema CVRP, variant bàsica del VRP.

La classificació i formulació del problema de coordinació dels serveis d'emergència en un accident de trànsit dins de les categories esmentades, permet estendre el tractament proposat en aquest treball a altres instàncies que compleixin amb les mateixes característiques i que, per tant, acceptin un planejament similar. Així, la mateixa estratègia de tractament de la informació geogràfica i de resolució del problema pot ser aplicada a altres problemes comuns en logística, classificats en les mateixes categories:

- Distribució de mercaderies des d'un conjunt de bases, sense que existeixi un procés de recollida prèvia.
- Gestió de l'assistència en carretera.
- Subministrament de combustible a particulars des d'un conjunt de dipòsits.

En general, es pot considerar que l'aproximació estudiada en el present treball és vàlida per a qualsevol problema amb múltiples bases de localització fixa susceptible de ser reduït a un conjunt de problemes amb una única base, en funció de la seva cobertura geogràfica i del seu rang temporal d'accés. D'altra banda, aquest apropament permet tractar tant flotes homogènies com

heterogènies, atès que les característiques dels vehicles utilitzats només es consideren durant l'etapa d'assignació de recursos, realitzada independentment del tractament de la informació geogràfica i del càlcul de rutes inicial.



## Capítol 3

# Entorn de presa de decisions

El sistema d'ajuda a la presa de decisions en el problema de coordinació dels serveis d'emergència en un accident de trànsit ha estat dissenyat com una plataforma distribuïda basada en CORBA (Ramos *et al.* 2005). Aquesta arquitectura proporciona una eina per simplificar la comunicació i la coordinació entre els diferents mòduls que la componen, així com una gran versatilitat mitjançant la substitució o inclusió de nous mòduls per satisfer les necessitats pròpies de cada un dels problemes VRP que es vulgui abordar.

### 3.1 Arquitectura CORBA

CORBA és un estàndard independent de llenguatge que s'encarrega d'especificar la interoperabilitat entre objectes en un entorn distribuït heterogeni, tant en el llenguatge de programació com en la plataforma d'execució, definint l'arquitectura i els protocols que es poden utilitzar per regular les interaccions entre objectes (OMG 2004).

En la base del funcionament de CORBA es troba l'*Interface Definition Language - IDL*, un llenguatge que permet descriure les *interfaces* dels objectes remots, on es troben els mètodes remots d'accés públic, amb un alt nivell d'abstracció i independentment del llenguatge d'implementació. Una aplicació client invocarà els mètodes de l'objecte remot definits en la seva *interface*, transmetent la seva petició mitjançant el nucli de l'arquitectura CORBA, l'*Object Request Broker - ORB* basat en el protocol *Internet Inter-ORB Protocol - IIOP*, que constitueix el context i el nexe d'unió entre els components

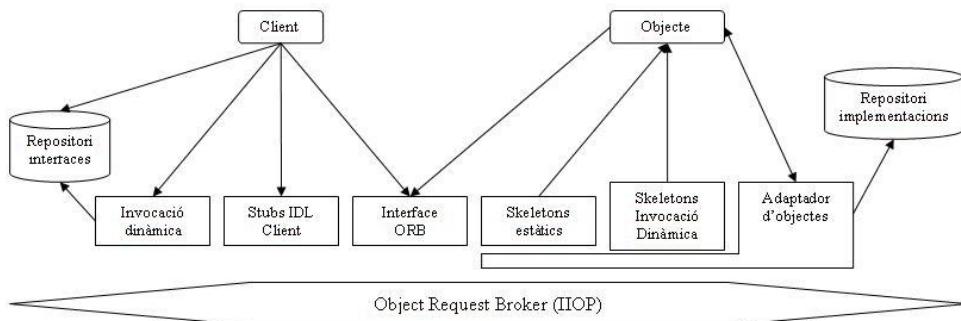


Figura 3.1: Esquema bàsic de funcionament de l'arquitectura CORBA.

de l'entorn distribuït. Qualsevol resposta per part de l'objecte o el servidor (dades resultants, excepcions, etc.) es transmetran pel mateix procediment en sentit invers. La figura 3.1 mostra l'esquema bàsic de funcionament d'una arquitectura basada en CORBA.

Un client remot pot trobar un objecte prèviament enregistrat mitjançant el *Servidor de Noms*, un servei propi definit en l'especificació CORBA, cridar els seus mètodes i rebre dades de la mateixa manera que si aquest objecte fos local en la màquina del client. Un objecte enregistrat a CORBA és accessible a qualsevol client implementat en un llenguatge compatible amb *IDL*.

### 3.2 Mòduls implementats

El disseny del sistema sobre la plataforma distribuïda ha estat dividit en quatre mòduls principals: el *Sistema d'Informació*, el *Simulador de Flotes*, les *Eines de Suport a la Presa de Decisions* i les *Eines de Visualització*. La implementació de la funcionalitat pròpia de cada mòdul, així com les eines emprades, ha fet necessària la integració de diferents sistemes operatius, llenguatges de programació i programari específic de càcul. En la figura 3.2 es pot observar un esquema simplificat de l'estructura de l'aplicació plantejada pel problema de coordinació dels serveis d'emergència en un accident de trànsit.

El **Sistema d'Informació** és l'encarregat de gestionar tota la informació estàtica i dinàmica present en el sistema. La informació estàtica està composta per la informació geogràfica (*Geographical Information System - GIS*), obtin-guda a partir d'una base de dades cartogràfica mitjançant el filtrat de les dades

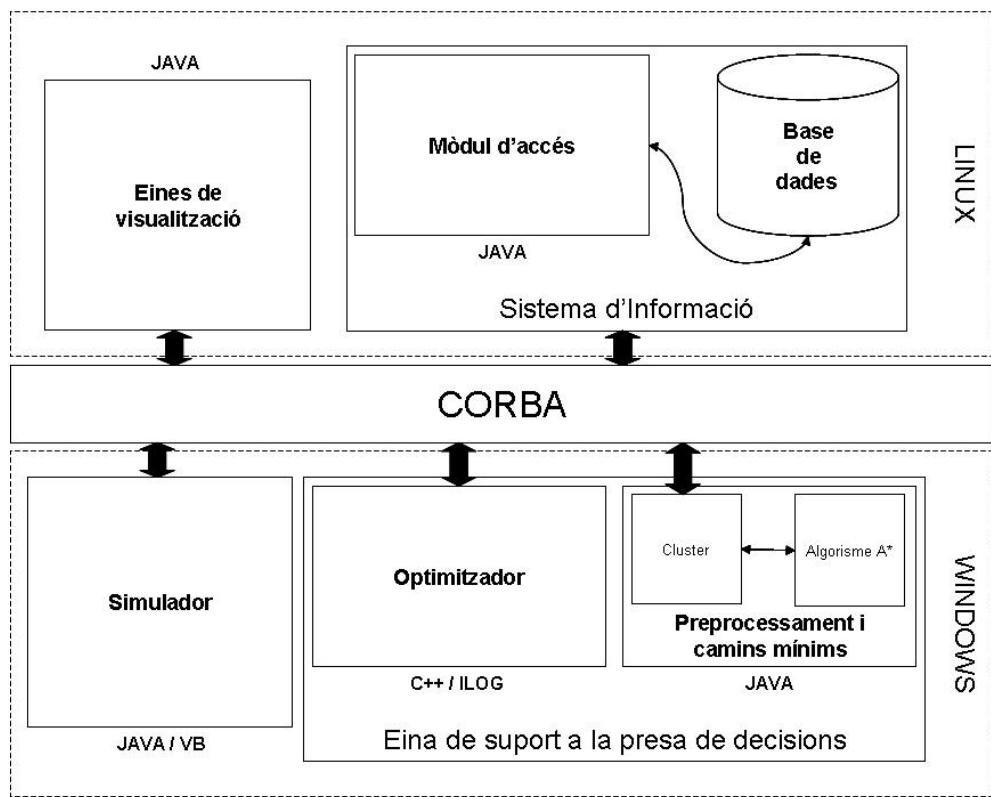


Figura 3.2: Arquitectura distribuïda sobre CORBA de l'aplicació dissenyada pel problema de coordinació dels serveis d'emergència en un accident de trànsit.

originals per generar una representació adequada a l'ús requerit de la xarxa de carreteres, adaptant l'estructuració i ordenació de les dades disponibles en funció de les necessitats del problema VRP abordat. Aquesta informació està formada per un conjunt de nodes i arcs que configuren una estructura de graf dirigit, sobre la que actua l'eina d'optimització per obtenir un graf reduït de camins mínims durant el procés de resolució.

Les dades dinàmiques del *Sistema d'Informació* estan constituïdes per la informació característica de cada problema abordat: estructura de les flotes (tipus de vehicle, capacitat, estat, etc.) i posició geogràfica de cada vehicle en cada instant de temps; característiques de cada visita o, en el cas particular del present treball, de cada accident de trànsit, incloent la seva posició geogràfica, el nombre de vehicles involucrats, el nombre de víctimes i la seva gravetat i les restriccions temporals d'aplicació; informació de les rutes configurades pel mòdul de suport a la presa de decisions que conté la seqüència d'arcs, el cost estimat i el vehicle associat a ella.

Per a la utilització de les dades contingudes en el *Sistema d'Informació*, s'ha dissenyat una aplicació que permeti gestionar l'accés concurrent i remot a la base de dades (Guimarsans 2005). Aquest mòdul controla i centralitza les operacions realitzades sobre el *Sistema d'Informació* i retorna les dades sol·licitades, posteriorment a la seva conversió per facilitar el procés de comunicació mitjançant l'arquitectura basada en CORBA.

El **Simulador de Flotes** es basa en el model presentat en la figura 3.3 (per l'especificació completa, veure apèndix A), definit segons el formalisme de les Xarxes de Petri Acolorides (Jensen 1997). Aquest mòdul és l'encaregat de generar les càrregues de treball del sistema pròpies de cada problema, així com les seves característiques particulars: visites a realitzar, amb les dades de capacitat, finestra temporal de servei i localització; accidents, amb la informació sobre el nombre de vehicles involucrats, nombre de víctimes i la seva gravetat i localització. Al mateix temps, el *Simulador de Flotes* obté la posició de cada vehicle, genera la següent localització i actualitza les dades en el *Sistema d'Informació*, mitjançant l'aplicació d'accés a aquest últim, amb l'objectiu de mantenir un registre actualitzat de l'estat de les flotes i fer que aquesta informació estigui disponible per les *Eines de Suport a la Presa de Decisions* i l'*Eina de Visualització*. En el cas particular del problema de coordinació dels serveis d'emergència en accidents de trànsit, aquest mòdul és l'encaregat de generar les actualitzacions de les variables pròpies de cada accident, emulant

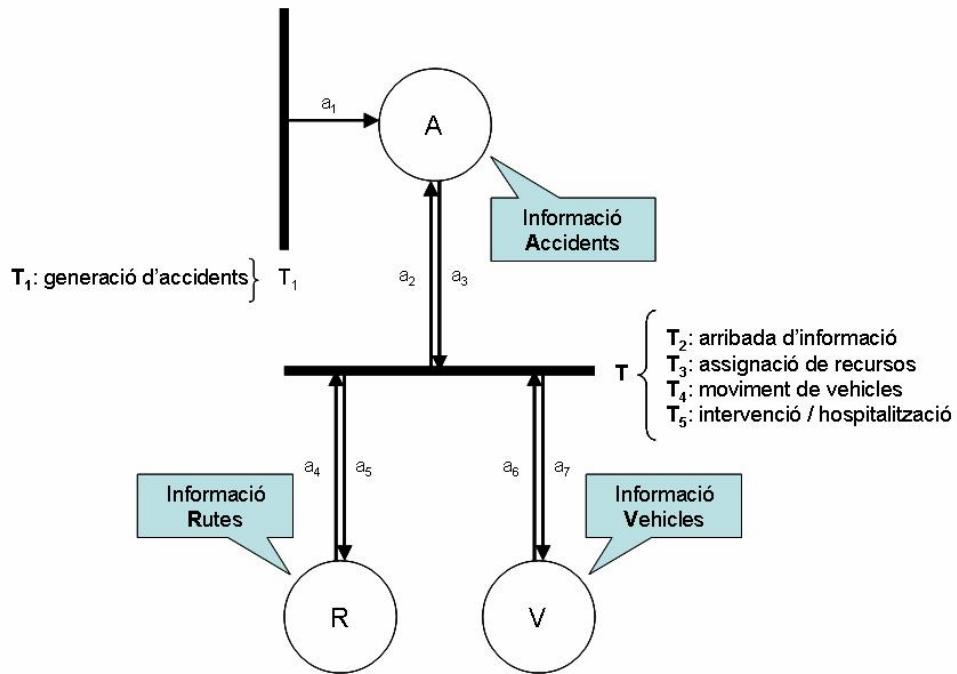


Figura 3.3: Model de simulació del problema plantejat, basat en el formalisme de Xarxes de Petri Acolorides.

el flux continu d'informació característic d'una situació real, així com possibles pertorbacions en l'estat de la flota o de la xarxa viària.

L'**Eina de Visualització** està constituïda per un mòdul que permet observar gràficament l'evolució de l'estat de la flota durant la simulació, localitzant sobre les imatges de satèl·lit proporcionades per l'aplicació comercial *Google Earth* (Google 2007) la posició dels vehicles en cada instant de temps i les rutes configurades per les *Eines de Suport a la Presa de Decisions*. Mitjançant l'accés a la informació actualitzada disponible en el *Sistema d'Informació*, aquest mòdul pot realitzar una representació de les dades del sistema en el format propi de l'aplicació gràfica de manera que estigui disponible per a la seva visualització local o en un sistema remot. D'igual forma, el període d'actualització de la informació mostrada per l'aplicació també ha estat sincronitzat per evitar interferències amb el *Simulador de Flotes*.

Les **Eines de Suport a la Presa de Decisions** constitueixen l'objectiu de disseny de la plataforma distribuïda, ja que tenen com a finalitat la cerca d'una solució al problema plantejat, sempre dintre de la categoria dels VRP. Atès que es tracta de problemes considerats com a *NP-Hard*, amb un creixement exponencial del nombre d'estats a explorar durant el procés de resolució, no hi ha algorismes exactes que puguin garantir trobar una solució òptima en un temps de càlcul raonable. Així, es fa necessària la introducció d'heurístiques i metaheurístiques que permeten reduir el temps de càlcul, malgrat que en la majoria d'ocasions la seva definició impedeix garantir que la solució trobada és òptima (veure secció 2.1.2).

El disseny de la plataforma utilitzada permet integrar diferents mòduls de suport a la presa de decisions, l'estructura i funcionament dels quals respon a les característiques pròpies del problema abordat. En el problema plantejat en el present treball, atenent a l'aproximació en dues fases adoptada, s'ha dissenyat una eina de suport a la presa de decisions constituïda per dos mòduls diferenciats: una primera aplicació, encarregada del preprocessament de la informació geogràfica obtinguda mitjançant el *Sistema d'Informació* i del càlcul de camins mínims per obtenir una representació adaptada al problema tractat i a l'algorisme d'optimització emprat en la seva resolució; un segon mòdul, destinat a l'obtenció d'una solució del problema fent ús de l'eina comercial *ILOG* a partir de la representació reduïda proporcionada pel primer mòdul.

## Capítol 4

# Tractament de la informació geogràfica

El tractament de la informació geogràfica en un entorn realista suposa la gestió d'un ingest volum de dades, incorrent en un greu problema de cost computacional que fa inviable abordar la seva resolució en temps d'execució. L'agrupament d'aquestes dades, generant una estructura de *clusters*, ha demostrat ser una estratègia molt efectiva en la resolució d'alguns tipus de problemes logístics (Dondo and Cerdá 2007), de transport (Anily *et al.* 1999) i de telecomunicacions (Frey and Görzen 2005) quan totes les dades referents a les visites són conegeudes amb anterioritat. En canvi, en el cas dels accidents de trànsit en un escenari realista, el valor de les variables del problema són desconegudes durant el procés de tractament de dades geogràfiques, sent conegeudes només a partir de l'instant en què l'accident succeeix i, per tant, dins de la finestra temporal d'actuació. Així, es fa necessària l'adopció d'una estratègia diferent de preprocessament de les dades geogràfiques amb l'objectiu de reduir el temps de càlcul durant l'etapa de resolució.

La gestió dels serveis d'emergència en l'atenció d'un accident de trànsit pot ser interpretada com un problema VRP multi-depot (veure secció 2.2). L'objectiu del tractament de la informació geogràfica consisteix en simplificar un problema VRP multi-depot amb les característiques plantejades a un conjunt de problemes VRP amb un nombre de bases inferior que, en el millor dels casos, podrà ser reduït a una única base, de manera que només calgui resoldre un d'ells per a cada servei d'emergència quan té lloc un accident. D'aquesta

forma, els dominis de les variables es veuen considerablement reduïts, millorant el temps de resposta dels algorismes en la cerca de la solució òptima.

Amb aquesta finalitat, es preprocesa la informació continguda en el mòdul GIS, classificant els nodes cartogràfics de la xarxa viària segons la distància i el temps de viatge des de les diferents bases. Així, es considera que cada node només és accessible per a aquells vehicles localitzats en aquelles bases que minimitzen la distància i el temps de viatge fins el node, generant una estructura basada en *clusters*. Per a la realització del tractament de la informació geogràfica i la generació d'aquesta estructura s'ha utilitzat l'algorisme A\*, basat en procediments heurístics, perquè permet garantir l'optimalitat de la solució trobada sota certes condicions (Russell and Norvig 2003). Malgrat aquesta classificació, aquest tractament proporciona la flexibilitat suficient per respondre a les diferents situacions que poden aparèixer naturalment en la resolució de problemes d'aquest tipus en un escenari realista.

## 4.1 Mètodes de cerca heurística

Els mètodes exactes d'optimització garanteixen trobar una solució global, però a un cost que augmenta ràpidament amb el nombre de variables que compo- nen el problema. Aquest fet va provocar l'aparició dels mètodes alternatius de cerca que, malgrat no garantir que la solució trobada és un òptim global en la majoria dels casos, poden arribar a una bona solució amb un cost menor. Aquests mètodes, anomenats de *cerca heurística*, poden utilitzar-se en la resolució d'alguns tipus de problemes de combinatòria on els algorismes exactes són difícils d'aplicar o convergeixen molt lentament, especialment en aquells casos on el nombre de variables implicades i d'estats que cal avaluar creix exponencialment.

Una mesura de l'eficiència d'un algorisme dissenyat per resoldre certa classe de problemes de combinatòria consisteix en considerar el temps requerit per resoldre qualsevol instància del problema d'una determinada mida. El temps de càcul, o cost computacional, es mesura mitjançant el nombre d'operacions aritmètiques realitzades per l'algorisme durant l'execució, o bé considerant el nombre d'avaluacions de les restriccions i de la funció objectiu realitzades fins a trobar la solució. Si, per a una determinada classe de problemes, el temps requerit per l'algorisme per resoldre qualsevol instància del problema es pot expressar de forma polinomial en funció dels paràmetres del problema,

aleshores es considera que l'algorisme resol aquesta classe de problemes en un temps polinomial. En la majoria de problemes de combinatòria, però, cap algorisme conegut pot resoldre totes les instàncies d'un problema en un temps polinomial. En aquesta classe de problemes, definits com a *NP-Hard*, és on els mètodes de cerca heurística i metaheurística (Glover and Kochenberger 2003) esdevenen especialment importants, ja que tot i no poder garantir que la solució trobada és un òptim global, han demostrat una bona eficiència en la cerca de bones solucions amb un cost computacional raonable.

Els algorismes de cerca heurística estan basats, majoritàriament, en algorismes de cerca local (*Local Search - LS*) (Edgar *et al.* 2000). Aquest tipus de mètodes de cerca comencen des d'una solució inicial i progressivament la milloren aplicant una sèrie de modificacions locals, anomenades *moviments*. En cada iteració, la cerca avança cap a una solució lleugerament millor que l'actual i aquesta finalitza quan troba un òptim local respecte als moviments considerats. Aquesta és una limitació important d'aquest tipus de mètodes, ja que si el conjunt de moviments considerats no és prou ric, la cerca quedarà atrapada en un òptim local.

El component principal d'aquests mètodes és una funció heurística  $h(n)$  que valora el cost estimat del camí mínim del node o estat  $n$  a l'objectiu. Per tant, es compleix que si  $n^*$  és un node objectiu, aleshores

$$h(n^*) = 0 \quad (4.1)$$

En la definició de la funció heurística és on s'introduceix el coneixement específic de les característiques del problema en l'algorisme de cerca.

La qualitat d'una funció heurística es caracteritza segons el seu *factor de ramificació*: si el nombre de nodes generats per l'algorisme és  $N$  i la profunditat de la solució és  $d$ , aleshores  $b^*$  és el factor de ramificació que un arbre uniforme de profunditat  $d$  hauria de tenir per contenir  $N+1$  nodes:

$$N + 1 = 1 + b^* + (b^*)^2 + \dots + (b^*)^d \quad (4.2)$$

Una funció heurística ben dissenyada tindrà un factor de ramificació proper a la unitat, permetent resoldre problemes relativament grans amb un cost raonable.

D'altra banda, una funció heurística *dominant* sempre expandirà menys nodes i, per tant, serà més eficient respecte a les altres heurístiques definides en el problema. Una heurística  $h_2$  domina sobre una altra heurística  $h_1$  si:

$$h_2(n) \geq h_1(n) \quad (4.3)$$

per a qualsevol node  $n$ .

Atès que una funció heurística mesura la distància entre el node actual i l'objectiu, la majoria d'algorismes expandeixen els nodes amb el menor valor d'aquesta funció. Així, poden existir amb un valor comprès entre  $[h_1(n), h_2(n)]$  que seran expandits per l'heurística  $h_1(n)$ , però no per  $h_2$ , garantint així que l'heurística dominant expandirà un nombre inferior de nodes en la cerca de la solució.

## 4.2 Algorismes *Best-First*

La majoria d'algorismes heurístics estan basats en una cerca *primer el millor* (*Best-First*) o de *descens esglaonat* (*Steepest Descent*) (Russell and Norvig 2003). Aquests algorismes es caracteritzen perquè els nodes escollits per ser expandits són aquells que tenen el valor menor de la funció d'avaluació definida en el problema.

Així, cada node o estat  $n$  té associat un conjunt de nodes veïns accessibles des de  $n$  mitjançant un únic moviment. En cada iteració, la cerca avança cap a una solució lleugerament millor, escollint entre els nodes veïns aquell que tingui un valor mínim de la funció objectiu. Si no es troba cap node veí que millori el resultat de la funció d'avaluació, l'algorisme s'atura i retorna  $n$  com a solució.

El mètode d'exploració dels algorismes de cerca *primer el millor* és molt similar als algorismes de cerca en profunditat, amb la diferència que els primers poden tornar enrere si un determinat camí no conduceix a una solució del problema.

Un grup important d'algorismes de cerca *primer el millor* són aquells on l'heurística constitueix la funció d'avaluació:

$$f(n) \equiv h(n) \quad (4.4)$$

La complexitat d'aquests algorismes és  $O(b^m)$ , on  $b$  és el factor de ramificació i  $m$  és la màxima profunditat de l'espai de cerca. Amb una funció heurística ben definida, però, es pot reduir la complexitat considerablement.

Encara que aquests mètodes poden solucionar alguns problemes de combinatòria de forma eficient començant des d'un estat inicial arbitrari, en la majoria de casos l'algorisme s'atura en una solució no òptima que correspon a una solució local relativa als nodes veïns. A més, no són algorismes complets, ja que poden quedar atrapats en un camí infinit sense trobar una solució.

### 4.2.1 Algorisme A\*

L'algorisme A\* constitueix el mètode de cerca *primer el millor* més conegut i utilitzat. A més, entre els algorismes òptims de cerca, A\* és *òptimament eficient* per a qualsevol funció heurística donada, és a dir, cap altre algorisme òptim garanteix l'expansió de menys nodes que A\* (Russell and Norvig 2003).

Aquest algorisme evalua els nodes a partir de la combinació del cost d'assolir aquest node  $g(n)$  i el cost d'anar des del node a l'objectiu  $h(n)$ :

$$f(n) \equiv g(n) + h(n) \quad (4.5)$$

Com que  $g(n)$  proporciona el cost del camí per assolir  $n$  des de l'estat inicial i  $h(n)$  representa el cost estimat del camí mínim des de  $n$  a l'objectiu,  $f(n)$  és una mesura del cost estimat de la millor solució a través del node  $n$ . Així, si l'objectiu és trobar la solució amb cost mínim, una bona estratègia consisteix en expandir el node amb el valor de  $f$  més baix. Addicionalment, si la funció heurística compleix certes condicions, la cerca A\* serà òptima i completa.

A\* és òptim si  $h(n)$  és una heurística *admissible*, és a dir, si  $h(n)$  mai sobreestima el cost d'assolir l'objectiu. Com que  $g(n)$  és el cost exacte d'assolir  $n$  partint de l'estat inicial, la conseqüència immediata és que  $f(n)$  mai sobreestimarà el cost real de la solució a través de  $n$ . En cerques sobre arbres, el criteri d'admissibilitat de la funció heurística garanteix que la solució trobada per l'algorisme A\* és òptima. Si es considera que el node  $S$  és un subòptim, en tractar-se d'un node objectiu, és obvi que

$$h(S) = 0 \quad (4.6)$$

Si  $C^*$  és el cost de la solució òptima, fent ús de la condició anterior es dedueix que

$$f(S) = g(S) + h(S) = g(S) > C^* \quad (4.7)$$

Considerant que  $n$  es troba en el camí òptim i  $h(n)$  és una heurística admissible, es compleix que

$$f(n) = g(n) + h(n) \leq C^* \quad (4.8)$$

De les dues condicions anteriors, es dedueix que

$$f(n) \leq C^* < f(S) \quad (4.9)$$

Per tant, si  $h(n)$  és una heurística admissible, el node  $S$  mai serà expandit i A\* retornarà una solució òptima.

En cerques sobre grafs, el criteri d'admissibilitat de la funció heurística no assegura l'optimalitat, ja que es pot descartar el camí òptim en un estat repetit si aquest no és el primer en ser generat. Aquesta limitació es pot evitar estenent l'algorisme de manera que descarti el camí de major cost de dos camins qualssevol que accedeixin al mateix node. Una segona solució consisteix en assegurar que el camí òptim a qualsevol estat repetit és sempre el primer en ser explorat. Per aconseguir-ho, cal imposar que  $h(n)$  sigui *consistent* (o *monòtona*): per a cada node  $n$  i fills  $n'$  de  $n$  generats per un moviment  $a$ , el cost estimat d'assolir l'objectiu des de  $n$  no és més gran que el cost d'arribar a  $n'$  des de  $n$  més el cost estimat d'assolir l'objectiu des de  $n'$ :

$$h(n) \leq c(n, a, n') + h(n') \quad (4.10)$$

La conseqüència més important d'aquest criteri és que, si la funció heurística és consistent, l'algorisme A\* és òptim. A més, es pot demostrar que tota heurística consistent és també admissible. Així, el criteri de consistència és aplicable tant en la cerca en arbres com en la cerca sobre grafs, assegurant l'optimalitat de la solució trobada.

Una altra conseqüència important és que, si  $h(n)$  és consistent, els valors de  $f(n)$  al llarg d'un camí són no decreixents. La demostració es pot deduir a partir de la pròpia definició del criteri de consistència. Es considera que  $n'$  és un fill de  $n$ , complint aleshores que

$$g(n') = g(n) + c(n, a, n') \quad (4.11)$$

Aplicant la condició anterior i la desigualtat triangular expressada en l'equació (4.10), es demostra que

$$\begin{aligned} f(n') &= g(n') + h(n') \\ &= g(n) + c(n, a, n') + h(n') \\ &\geq g(n) + h(n) = f(n) \end{aligned} \quad (4.12)$$

d'on es dedueix que

$$f(n') \geq f(n) \quad (4.13)$$

Aquesta característica assegura que la seqüència de nodes expandits per A\* estan en ordre no decreixent de  $f(n)$ . D'aquí es dedueix que el primer node objectiu seleccionat és una solució òptima, ja que tots els nodes posteriors tindran, com a mínim, el mateix cost.

Generalment, la construcció d'heurístiques admissibles es realitza mitjançant la relaxació d'algunes restriccions del problema (Russell and Norvig 2003). El cost d'una solució òptima en un problema relaxat és una heurística admissible pel problema original. L'heurística és admissible perquè la solució òptima en el problema original és, per definició, una solució en el problema relaxat i el seu cost, per tant, ha de ser superior o igual al de la solució òptima del problema relaxat. A més, l'heurística obtinguda correspon al cost exacte pel problema relaxat, complint la desigualtat triangular i sent, per tant, consistent.

Per a un problema donat, es poden definir diverses heurístiques que compleixin els criteris d'admissibilitat i consistència, afectant a l'eficiència de l'algorisme i sense que cap d'elles sigui clarament dominant. Una estratègia habitual en la construcció d'heurístiques admissibles consisteix en definir la funció heurística del problema com:

$$h(n) = \max\{h_1(n), h_2(n), \dots, h_m(n)\} \quad (4.14)$$

Aquesta heurística composta serà més exacta sobre el node  $n$ , dominant sobre totes les heurístiques components. D'altra banda, és obvi que si  $h_1(n), \dots, h_m(n)$  són admissibles i consistentes,  $h(n)$  també ho serà.

Malgrat que l'algorisme A\* és complet, òptim i òptimament eficient, no és aplicable en tots els problemes de cerca en arbre i sobre grafs. La dificultat radica en què, per a la majoria de problemes, el nombre de nodes o estats a explorar creix exponencialment a mesura que l'algorisme es troba més proper a la solució. Es pot demostrar que aquest creixement exponencial es produirà a menys que l'error en la funció heurística creixi més lentament que el logaritme del cost del camí real (Russell and Norvig 2003):

$$| h(n) - h^*(n) | \leq O(\log h^*(n)) \quad (4.15)$$

on  $h^*(n)$  és el cost real d'assolir l'objectiu des de  $n$ .

En la majoria d'heurístiques, però, l'error és com a mínim proporcional al cost del camí, produint un creixement exponencial del nombre de nodes. Per aquesta raó, s'han dissenyat variants de l'algorisme A\* que troben subòptims en un temps computacionalment raonable o s'admet la utilització d'heurístiques més exactes, però que no són estrictament admissibles.

Tot i així, la definició de bones heurístiques aplicades sobre l'algorisme A\* proporciona molts avantatges, en termes de temps i cost computacional, respecte a la utilització de mètodes de cerca no informada.

### 4.3 Generació de l'estructura de *clusters*

La classificació de la informació geogràfica disponible i la generació de l'estructura de *clusters* es realitza mitjançant l'aplicació de l'algorisme A\* descrit en la secció anterior.

En el cas del problema de coordinació dels serveis d'emergència en un accident de trànsit, on la localització geogràfica associada a un accident no es coneix durant l'etapa de preprocés, no es pot estimar la distància i el temps de viatge des d'una determinada base al lloc de l'accident. D'aquesta forma, cada node geogràfic contingut en el mòdul GIS ha de ser considerat com un node potencial on es pot produir un accident, de manera que no es pot ponderar cap direcció de cerca durant la generació de l'estructura de *clusters*. Així, l'estat objectiu d'aquest plantejament no correspon a trobar un únic camí mínim entre dos nodes, sinó que consisteix en trobar una representació en forma d'arbre de camins mínims a partir de la representació completa de les dades continguda en el *Sistema d'Informació*. Per aquesta raó, cal explorar tot el graf per trobar

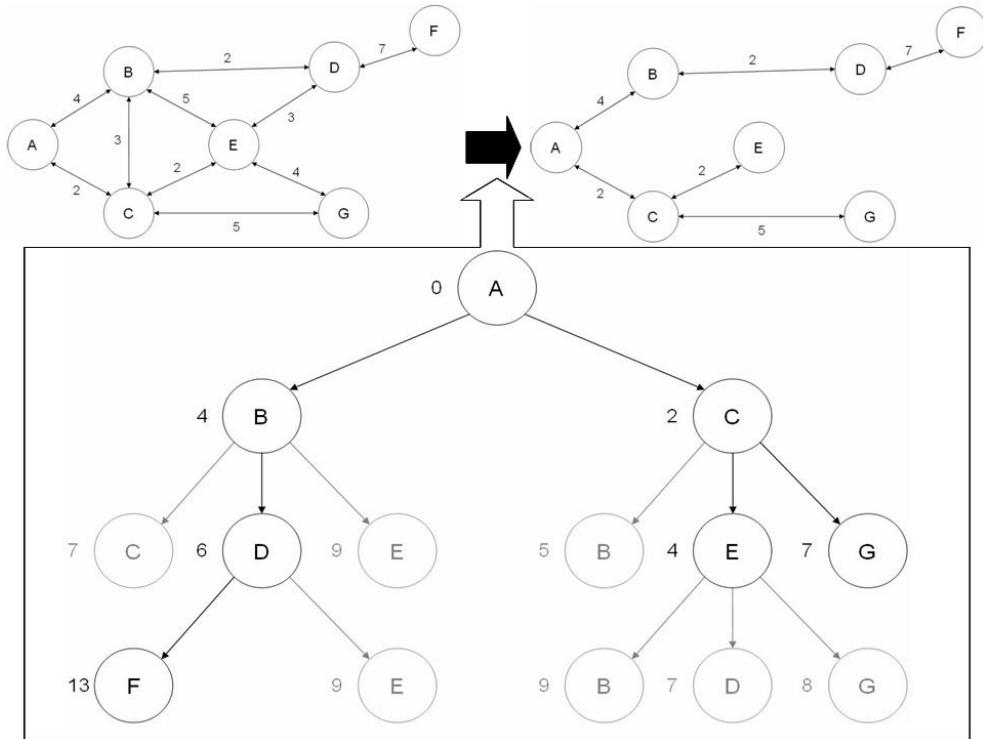


Figura 4.1: Esquema de funcionament de l'algorisme A\* durant la generació d'un graf de camins mínims a partir d'un graf complet. Els nodes difuminats corresponen a aquells que no seran explorats per l'algorisme.

trobar aquells arcs que fan mínims els desplaçaments entre qualssevol nodes. Amb aquesta finalitat, s'incorpora a l'algorisme A\* una funció heurística de cost uniforme nul:

$$h(n) = 0 \quad (4.16)$$

Seguint aquesta estratègia, cada camí és explorat utilitzant únicament el cost acumulat de desplaçament, en funció de la distància o del temps emprat, fins que les restriccions temporals imposades deixen de complir-se, delimitant així la frontera dels *clusters* generats.

La funció de cost uniforme nul no sobreestima en cap cas el cost real de

desplaçament entre dos nodes diferents, complint així amb el criteri d'admissibilitat. Addicionalment, la funció heurística de cost uniforme nul és consistent, ja que el valor de la funció d'avaluació s'incrementa monòtonament durant la cerca, complint amb la desigualtat triangular (4.10). Aquestes propietats permeten assegurar que no es descartarà cap solució òptima durant el procés de cerca i garanteixen l'optimalitat de tots els camins inclosos en un *cluster*, és a dir, el graf resultant de l'aplicació del mètode correspon al graf reduït de camins mínims dins dels marges temporals fixats pel problema i que delimiten la frontera dels *clusters*.

Per les característiques de l'algorisme emprat, els nodes explorats en cada iteració són aquells que tenen un cost associat mínim, de manera que és possible garantir que el camí des de la base fins a qualsevol node contingut en l'estructura del seu *cluster* corresponent és el camí de menor cost possible. Tenint en compte que qualsevol camí subòptim a un node concret té un cost associat superior al del camí òptim, les propietats d'admissibilitat i consistència de la funció heurística emprada permeten assegurar que el camí subòptim no serà explorat en cap cas i que la solució trobada serà el camí òptim. La figura 4.1 mostra el funcionament de l'algorisme A\* amb la funció heurística seleccionada per a un cas teòric senzill.

Així, durant el preprocés de la informació geogràfica i la generació de l'estructura de *clusters* es duu a terme una tasca de reordenació dels nodes dins del propi *cluster*, determinant les rutes òptimes i generant una configuració en forma d'arbre de camins mínims. Aquests segueixen una configuració radial, ja que contenen la informació referent a la distància o el temps corresponent als desplaçaments des de la base a tots els possibles nodes geogràfics inclosos dins de l'estructura del *cluster*. D'aquesta manera, quan es rep una notificació referent a un nou accident, es coneix una aproximació de la ruta mínima des de la base a l'escenari de l'accident, aconseguint una important reducció en el temps necessari per planificar les rutes i resoldre el problema durant la finestra temporal d'intervenció.

Aquesta etapa de preprocés proporciona una estructura constituïda per un conjunt de *clusters* separats, com es pot observar en la figura 4.2, on la informació geogràfica ha estat classificada i reordenada seguint una configuració de grafs radials de camins mínims. Amb aquest tractament s'aconsegueix disminuir el cost computacional necessari per donar una primera solució al problema, ja que els càlculs es realitzen sobre un graf de dimensions reduïdes i no sobre

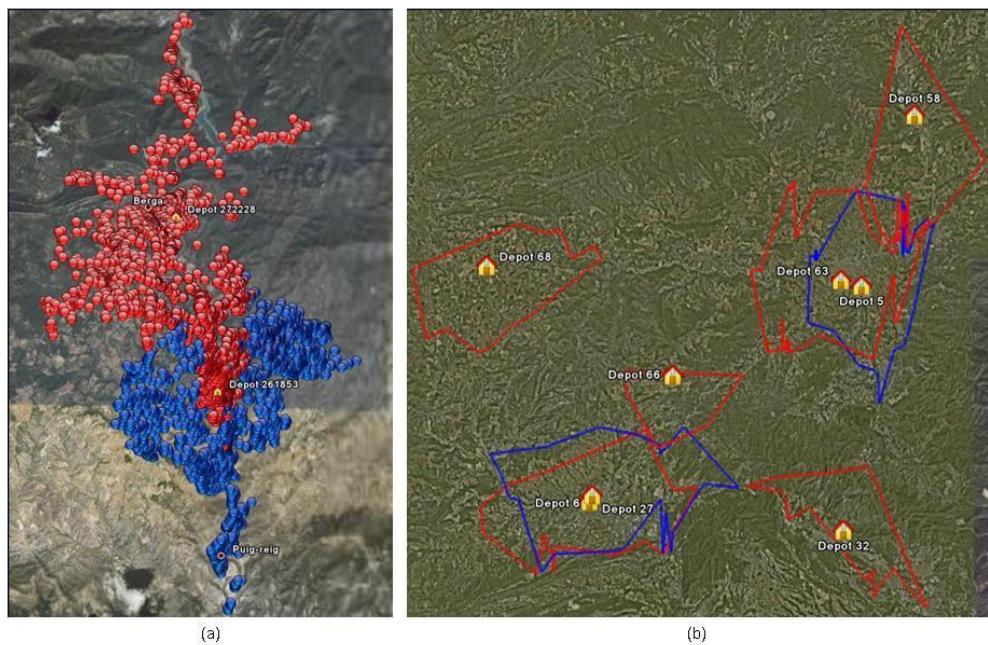


Figura 4.2: Representació sobre el mòdul de visualització de l'estructura de *clusters* generada durant l'etapa de preprocés. (a) Representació de tots els nodes que integren dos *clusters* de diferents serveis. (b) Representació de la frontera de diferents *clusters* corresponents a dos tipus de serveis.

la totalitat de les dades disponibles. D'altra banda, la configuració generada no inclou informació referent a rutes punt a punt dins de cada *cluster* o sobre les rutes de retorn entre el lloc de l'accident i la corresponent base. Tanmateix, la planificació d'aquestes rutes es pot realitzar després de l'assignació dels recursos, quan ja s'ha donat una primera resposta a les necessitats pròpies de l'accident dins de la finestra temporal crítica inicial. En aquests casos, cal introduir una funció heurística diferent per respondre a les característiques de les rutes cercades, així com també caldrà realitzar una planificació acurada que compleixi amb els protocols propis de cada tipus de servei.



## Capítol 5

# Metodologia d'assignació dels serveis

La metodologia emprada durant el procés de resolució del problema d'assignació de recursos es basa en una aproximació en dues etapes: una primera, on es realitza el càlcul de les rutes necessàries, utilitzant la informació obtinguda amb la generació de l'estructura de *clusters*; una segona fase, on els recursos són assignats considerant la satisfacció de les restriccions imposades i intentant minimitzar el temps de resposta dels serveis, fent ús de les dades sobre les possibles rutes obtingudes en la primera etapa del procés.

El fet que els serveis mèdics i de bombers hagin de retornar a la seva base d'origen abans de ser assignats a un altre accident simplifica la planificació de les rutes, ja que només hauran de ser calculades entre dos o tres punts, depenent si es requereix hospitalització. D'altra banda, les unitats de policia poden realitzar diferents accions en diversos accidents abans de retornar a la seva base d'origen, malgrat que no poden ser assignats a una nova destinació abans que finalitzi la seva intervenció en l'escenari de l'accident. Així, un vehicle de policia retornant a la seva base després de dur a terme una actuació pot ser interpretat com una nova base amb un únic recurs durant el procés d'assignació de vehicles en temps d'execució.

L'objectiu de l'etapa d'assignació de recursos consisteix en distribuir les unitats disponibles en funció de les restriccions implícites del problema, que pot ser inclòs en la categoria dels problemes de satisfacció de restriccions (*Constraints Satisfaction Problem - CSP*) (Marriott and Stuckey 1998). En el problema de

satisfacció de restriccions plantejat es combinen dos elements: el model, on es troben definides les variables de decisió, les restriccions del problema i la funció objectiu; l'algorisme de cerca de la solució que permet seleccionar un valor en el domini de cada variable restringida, de manera que se satisfacin totes les restriccions del problema. Amb el propòsit de resoldre el problema de forma eficient, s'utilitzen les tècniques de resolució de problemes CSP incloses en el paquet comercial *ILOG*.

## 5.1 Càlcul de rutes

L'estrucció de dades generada durant l'etapa de preprocés proporciona la informació relativa a totes les rutes òptimes entre les bases i tots els nodes inclosos en els corresponents *clusters*. D'aquesta forma, tots els nodes classificats en un *cluster* determinat són fàcilment localitzables i el camí mínim d'accés pot ser obtingut ràpidament a partir de l'arbre de camins mínims corresponent. El procés de generació dels *clusters* permet assegurar que aquestes rutes minimitzen la distància o el temps de desplaçament, de manera que es pot conèixer la ruta òptima des d'una base al lloc de l'accident des de l'instant en què aquest succeeix.

Aquesta classificació de la informació geogràfica proporciona, al seu torn, un mecanisme per obtenir aquelles possibles bases que poden donar resposta a les necessitats de l'accident, en funció del temps d'accés. Atès que els nodes associats a un *cluster* compleixen les restriccions temporals imposades i es pot assegurar que la ruta des de la base corresponent és aquella que minimitza el temps d'accés, els recursos localitzats en aquesta base podran ser assignats garantint el compliment de les restriccions temporals del problema.

En algunes ocasions, especialment en àrees urbanes amb una configuraçió molt densa de la xarxa viària, els mateixos nodes poden formar part de diferents *clusters* independents. Així, un accident que tingui lloc en alguna d'aquestes zones és accessible des de diferents bases, mantenint totes les rutes en la finestra temporal crítica. En aquesta situació, el sistema retorna una llista amb les possibles bases, ordenades en funció del temps d'accés, proporcionant les diferents opcions disponibles amb l'objectiu de poder trobar la millor solució possible per respondre a les necessitats de l'accident.

La localització de l'accident o les pertorbacions del sistema poden provocar, en determinades situacions, que no sigui possible trobar una ruta que satisfaci-

les restriccions temporals imposades. Aleshores, aquestes constrictions han de ser relaxades i la minimització del temps de desplaçament esdevé l'objectiu del problema d'optimització de rutes presentat. Amb aquest propòsit, es fa necessari el càlcul de diverses rutes amb l'objectiu de proporcionar les diferents opcions disponibles per respondre a les necessitats de l'accident.

En primer lloc, es determinen les bases de cada servei més properes geogràficament a la localització de l'accident per obtenir un conjunt de *clusters* candidats. Per a cada *cluster* seleccionat, es duu a terme un filtrat dels seus nodes fronterers en funció de la seva distància al lloc de l'accident, escollint aquells que la fan mínima. D'aquesta manera, s'aconsegueix reduir el nombre de rutes que cal avaluar per a cada base. Aplicant l'algorisme A\* amb una funció heurística apropiada es poden determinar les rutes buscades mentre es manté garantida la seva optimalitat i s'aconsegueix una eficiència computacional raonable. Utilitzant com a funció heurística el temps de desplaçament calculat a partir de la velocitat mitjana i la distància geogràfica entre el node avaluat i el node objectiu, corresponent a la localització de l'accident, es compleixen els criteris d'admissibilitat i consistència, de forma que les rutes retornades per l'algorisme seran òptimes i s'obtindran mitjançant l'expansió del menor nombre de nodes possible.

Malauradament, la variabilitat de les característiques intrínseqües dels arcs presents en les dades geogràfiques dificulta considerablement la definició d'una heurística amb aquestes característiques, de manera que en el disseny del sistema s'ha ponderat l'eficiència de càlcul per sobre de la optimalitat del procés. Per aquesta raó, la velocitat mitjana emprada en la definició de la funció heurística assegura una velocitat de convergència elevada i, en conseqüència, un temps computacional de resposta raonable, sent al mateix temps suficientment baixa com per garantir l'optimalitat de la ruta trobada en la majoria d'ocasions, ja que no sobreestimarà el temps real d'accés al lloc de l'accident. Addicionalment, la velocitat mitjana escollida proporciona una funció heurística dominant respecte altres valors més elevats, assegurant així un nombre inferior de nodes explorats durant la cerca.

D'altra banda, el criteri seguit en la selecció dels nodes de frontera impedeix que es pugui garantir l'optimalitat de la ruta trobada, independentment de la funció heurística emprada. Tanmateix, s'ha escollit aquest procediment amb l'objectiu de minimitzar el temps de resposta, ja que el càlcul de la ruta completa des de la base a la localització de l'accident implica una penalització

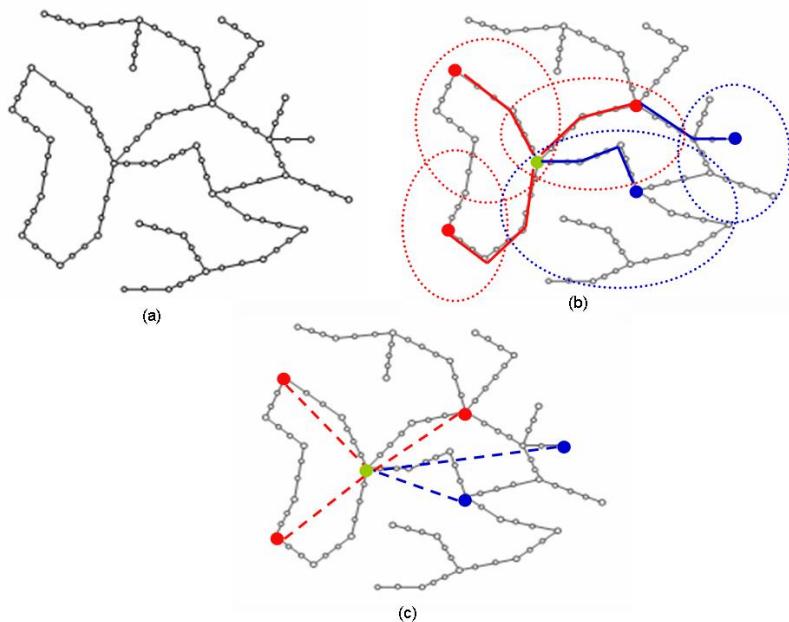


Figura 5.1: Etapes del tractament de la informació geogràfica: (a) la base de dades cartogràfica proporciona una representació completa de la xarxa viària en forma de graf; (b) la generació de l'estructura de *clusters* i el posterior càlcul de rutes permet obtenir un graf radial de camins mínims amb els detalls de cada ruta calculada; (c) l'optimitzador treballa sobre una representació simplificada del graf radial, on només s'especifiquen les localitzacions dels nodes d'interès i el temps total de la ruta corresponent.

considerable en temps de càlcul. En tots els casos, però, es pot garantir l'optimalitat parcial de les rutes proporcionades mitjançant aquest mètode, ja que el camí entre la base i el node fronterer compleix amb aquesta característica. Malgrat aquestes consideracions, en la majoria de casos pràctics s'ha pogut corroborar que la solució retornada és l'òptima o l'immediata subòptima.

Les característiques pròpies de les unitats dels serveis policials permeten que aquestes puguin realitzar diferents intervencions en diversos accidents abans que retornin a la corresponent base. És a dir, un recurs policial que es trobi a prop de la localització d'un accident quan aquest es produeix pot ser assignat a aquest amb l'objectiu de reduir el temps de resposta.

Si el node on es produueix l'accident pertany a un *cluster*, es calculen les rutes corresponents des de les posicions de totes les unitats policials situades dins dels límits del *cluster*, per ser comparades posteriorment amb la ruta obtinguda des de la base fins al lloc de l'accident. D'aquesta manera, es poden proporcionar diverses alternatives dins d'un mateix *cluster* que permeten cobrir les necessitats de l'accident amb l'assignació de diferents recursos, encara que aquests no es trobin en la base en el moment que succeeix l'accident. Novament, en aquest procés s'utilitza l'algorisme A\* amb una funció heurística consistent en el temps de desplaçament calculat a partir de la velocitat mitjana i la distància geogràfica entre la posició dels vehicles i de l'accident.

D'altra banda, quan un accident es produueix fora dels límits de qualsevol *cluster*, les unitats policials situades en algun node dels *clusters* més propers o en un node exterior poden ser utilitzades per calcular diferents opcions de ruta seguint la mateixa estratègia d'aplicació de l'algorisme A\*. Aquest plantejament permet afegir en tots els casos diferents opcions de ruta a aquelles proporcionades per l'estructura de *clusters*, corresponents als desplaçaments entre les bases i el lloc de l'accident, sent escollida aquella que permeti minimitzar el temps de resposta.

Durant les etapes posteriors a l'assignació de recursos a un accident es pot realitzar el càlcul de diverses rutes: els serveis mèdics han de determinar si cal hospitalitzar a les víctimes i, en aquest cas, a quin hospital han de ser traslladades; tots els recursos, exceptuant els serveis policials, han de retornar a les respectives bases abans de ser assignats a cap altre accident. Així, sorgeix la necessitat de calcular diferents rutes punt a punt, amb origen i destinació coneguts, durant el període d'intervenció. Com en els càlculs de camins mínims realitzats prèviament, es pot aplicar l'algorisme A\* amb una funció heurística que avalui el temps de desplaçament, assegurant la seva convergència cap a una solució factible en un temps de còmput raonable.

Atès que la localització dels diferents hospitals és coneuguda a priori, es pot realitzar el càlcul de les rutes de retorn a totes les bases en l'etapa de preprocés, de manera que es pugui reduir la càrrega d'operacions del sistema en temps d'execució i aquestes puguin ser assignades de forma directa i automàtica. D'altra banda, la determinació de les diferents rutes en temps d'execució permet considerar diversos factors, com la situació del trànsit en les zones adjacents a l'accident o les possibles perturbacions dels serveis. Tanmateix, l'estratègia de càlcul durant l'etapa de preprocés proporciona una ruta estàtica que pot ser



Figura 5.2: Exemple de visualització de les diferents alternatives proporcionades durant l'etapa de planificació de rutes. Es pot comprovar com un accident que es produeix en una zona urbana disposa de més opcions per a ser atès.

utilitzada com a primera aproximació, definint una possible funció heurística més acurada que el temps de desplaçament per a la determinació de rutes en temps d'execució, però penalitzant amb un temps de càlcul més elevat degut a la complexitat de les avaluacions que cal realitzar en cada iteració. A més, aquest càlcul es realitza fora de la finestra temporal crítica de les etapes inicials de la intervenció, raó per la qual s'ha desestimat aquesta opció en favor del càlcul dinàmic de les rutes.

Finalment, aquest sistema de planificació de rutes proporciona una representació simplificada de les dades en forma de graf radial de camins mínims, sobre la que treballa l'optimitzador per a realitzar l'assignació de recursos. Aquesta únicament conté la informació corresponent als nodes d'origen i destinació de les rutes, així com el cost temporal total associat. La figura 5.1 mostra un exemple simplificat del procés de tractament complet que es realitza sobre les dades geogràfiques disponibles.

Un cop els recursos han estat assignats, les rutes mínimes calculades durant la fase de planificació poden ser fàcilment reconstruïdes per a ser usades pel simulador i posteriorment visualitzades mitjançant les eines corresponents, com es mostra en la figura 5.2.

## 5.2 Assignació de recursos

L'objectiu de l'etapa d'assignació de recursos consisteix en distribuir les unitats de cada servei en funció de les restriccions imposades en el problema, relacionades amb els recursos disponibles i, especialment, amb les finestres temporals implícites. Aquestes últimes permeten relacionar el procés de càlcul de rutes amb la resolució del problema i l'assignació de recursos, ja que aquesta es realitza sobre la representació simplificada obtinguda amb el càlcul dels camins mínims realitzat en l'etapa anterior.

La funció objectiu del model de restriccions plantejat consisteix en minimitzar únicament el temps de desplaçament des de la base al lloc de l'accident. En aquest cas, no s'imposa la reducció del cost econòmic, del desplaçament en termes de distància o del nombre d'unitats emprades, ja que s'ha de respondre a les necessitats de l'accident avaluat i els recursos atendran únicament un accident abans de retornar a la seva base d'origen. El nombre i el tipus d'unitats destinades a un accident dependrà només de les seves característiques: el nombre de vehicles implicats, el nombre de víctimes, la seva gravetat i de la presència de foc o de víctimes atrapades.

La restricció més important del problema abordat és aquella que delimita el temps màxim de resposta, un factor que influeix amb especial rellevància sobre la gravetat de l'estat de les víctimes i la seva posterior recuperació. Generalment, les unitats mèdiques han d'arribar a l'escenari de l'accident en els deu minuts immediatament posteriors a què aquest tingui lloc. Per aquesta raó, l'estructura de *clusters* ha estat generada durant l'etapa de preprocés d'acord amb aquesta restricció temporal, de forma que si l'accident es produeix dins dels límits d'un *cluster* determinat es pot garantir un temps de resposta a l'accident que compleixi amb aquesta imposició. Addicionalment, es coneixerà amb anterioritat la ruta mínima òptima entre la base i l'escenari de l'accident. Tanmateix, en determinades ocasions, no és possible complir amb aquesta restricció, especialment si l'accident es produeix en un àrea aïllada o amb poca cobertura per part d'algún servei. En aquest cas, la restricció que imposa el temps màxim de resposta ha de ser relaxada, resolent el problema d'optimització resultant on únicament es troba definida la funció objectiu, fent ús de les tècniques de càlcul adients (veure secció 5.1).

Tant la minimització de la funció objectiu, corresponent al temps de resposta, com el compliment de les restriccions temporals esmentades només són

considerades durant les etapes de preprocés i de càcul de rutes. Així, l'aproximació emprada permet dissociar el problema en els seus dos components essencials: per una banda, s'aborda el problema d'optimització resultant d'aïllar la funció objectiu i les restriccions temporals de la formulació del problema i, per una altra, es resol el problema d'assignació de recursos resultant, on les variables de decisió únicament fan referència als vehicles seleccionats i a la seva base d'origen, quedant reduït a un problema de satisfacció de restriccions. Tanmateix, ambdós processos estan íntimament relacionats i no poden tractar-se de forma independent, ja que en determinades ocasions no serà possible atendre un accident amb els recursos disponibles en les bases proposades en el procés de minimització, sorgint la necessitat de recalcular les possibles rutes ampliant el ventall d'alternatives sugerides.

En el model de satisfacció de restriccions resultant, només apareixen aquelles restriccions que fan referència al nombre de recursos disponibles i les pròpies de la formulació del problema VRP plantejat (Dondo and Cerdá 2007). Per exemple, cada vehicle és assignat a una única base, a on ha de retornar després de finalitzar la seva intervenció. A més, cada accident ha de ser atès per, com a mínim, una unitat policial. En canvi, els recursos mèdics i de bombers necessaris, així com les unitats policials addicionals, són assignades en funció del valor de les variables pròpies de cada accident.

Com a restricció addicional, s'imposa que no tots els recursos corresponents a una base concreta puguin ser assignats a un únic accident. Amb aquesta restricció s'aconsegueix que cap àrea pertanyent a un *cluster* resti sense cobertura, permetent respondre a diversos accidents que tinguin lloc en un període curt de temps i amb localitzacions properes, així com a altres tipus d'intervencions pròpies de cada servei. En el cas dels serveis mèdics i de bombers, aquesta restricció implica que cap de les seves bases pot quedar desproveïda de vehicles, ja que les unitats corresponents a aquests serveis no poden ser assignades a un altre accident abans de retornar a la corresponent base per realitzar les tasques de manteniment i de substitució de material. Una base sense recursos disponibles podria provocar un increment considerable del temps de resposta inclús en el cas d'un accident que es produeixi dins dels límits del propi *cluster*. D'altra banda, aquesta restricció no s'aplica a les unitats corresponents als serveis policials, atès que aquestes poden realitzar diverses intervencions en accidents diferents sense haver de retornar a la base.

Durant l'etapa d'assignació de recursos, la informació obtinguda en les dues

etapes anteriors, la generació de l'estructura de *clusters* i el càlcul de rutes, s'utilitza amb l'objectiu de reduir el domini de les variables de decisió i, en conseqüència, l'espai de cerca. Així, només serà necessari avaluar aquells valors de les variables de decisió que corresponguin a les diferents alternatives obtenudes en les dues etapes anteriors, és a dir, només caldrà considerar aquelles bases que permeten minimitzar el temps de resposta i els respectius recursos ubicats en elles. L'algorisme de cerca selecciona un valor del domini reduït de cada una de les variables restringides i comprova si es compleixen totes les restriccions del problema, proporcionant una primera solució. La satisfacció de totes les constriccions imposades implica que els recursos localitzats en les bases seleccionades poden respondre eficientment a l'accident avaluat.

Amb l'estrategia plantejada, aquest procés d'assignació implica un cost computacional mínim, ja sigui perquè la localització de l'accident pertany a un o més *clusters* específics o perquè es pot calcular de forma eficient la ruta mínima entre el lloc de l'accident i la frontera del *cluster*. En el primer cas, la cerca de la solució del problema de satisfacció de restriccions resultant es limita a l'exploració, únicament, dels valors de les variables de decisió corresponents a les respectives bases, mentre que en el segon es redueix l'espai de cerca als *clusters* més propers. Tanmateix, en ambdues situacions, el domini de les variables de decisió es veu considerablement reduït, simplificant i guiant la tasca d'exploració de l'algorisme emprat per resoldre el problema de satisfacció de restriccions mentre que, en la majoria de casos, l'optimalitat de la solució global roman garantida degut a l'estrategia emprada en el càlcul de rutes.

Així, la descomposició del problema general realitzada amb l'apropament adoptat permet abordar separadament els dos components principals del problema: la minimització del temps de resposta i l'assignació dels recursos que millor responen a les necessitats d'un accident determinat.



## Capítol 6

# Aplicació i resultats

La implementació del sistema de suport a la presa de decisions en el problema de coordinació de serveis d'emergència en una accident de trànsit requereix l'e-laboració d'un escenari marc on dur a terme les tasques de validació i valoració de l'eficiència. Els objectius del sistema, així com les seves característiques particulars, requereixen que el volum de dades emprat per a la realització dels càlculs sigui realista. Per aquesta raó, s'ha optat per definir un escenari de proves on es trobin incloses el major nombre possible de dades accessibles, tant geogràfiques com referents a les diferents flotes que hi participen. D'altra banda, s'ha intentat dotar del major grau d'automatització possible la generació del marc d'experimentació, amb l'objectiu de facilitar la definició d'escenaris diferents on realitzar les proves de validació.

Atès que les dades cartogràfiques disponibles corresponen a la xarxa viària de la província de Barcelona, l'escenari definit es limita únicament a aquesta regió geogràfica. En funció del disseny realitzat de la base de dades (veure apèndix B), es pot comprovar que aquest volum d'informació, estructurat segons una representació en forma d'arcs i nodes, està inclòs en un base de dades geogràfica estàtica, aliena a les característiques pròpies del problema. El filtrat realitzat sobre les dades cartogràfiques originals proporciona una estructura composta per 281.257 nodes i 351.326 arcs.

## 6.1 Marc experimental

Amb l'objectiu de disposar d'un entorn realista on realitzar els càlculs i validar l'aplicació, s'han generat els valors presents inicialment en la base de dades a partir de la informació oficial obtinguda sobre les bases de la Divisió de Trànsit dels Mossos d'Esquadra (Departament d'Interior 2007a) i dels Bombers de la Generalitat de Catalunya (Departament d'Interior 2007b). Per contra, no ha estat possible obtenir les dades referents a la ubicació de les bases del Servei d'Emergències Mèdiques. D'altra banda, s'ha inclòs la informació corresponents al servei de Bombers de l'Ajuntament de Barcelona (Barcelona 2007), donada la importància de la seva regió urbana i la densitat de la seva xarxa viària, corresponent a un percentatge molt important de les dades geogràfiques disponibles. A efectes pràctics, només es considerarà la ubicació de les bases per generar l'estruatura de *clusters* durant l'etapa de preprocés, sense tenir en compte altres paràmetres característics com el tipus de servei a què pertanyen o el nombre de vehicles ubicats en elles.

En primera instància, s'han contemplat les 9 bases corresponents a la Divisió de Trànsit dels Mossos d'Esquadra per definir les ubicacions de les bases pròpies dels serveis policials. Malgrat que gran part dels accidents de trànsit produïts en el territori estudiat són atesos per les dotacions municipals de policia, la distribució de les bases de la Divisió de Trànsit proporciona una idea orientativa de la cobertura policial en la província de Barcelona. Tanmateix, les característiques dels serveis policials permeten l'assignació d'unitats que no es troben localitzades en les respectives bases en el moment que es produeix l'accident, de forma que l'elecció del nombre de bases i la seva ubicació no és un factor crític com succeeix en els altres serveis.

D'altra banda, s'ha inclòs en les dades de l'escenari plantejat la informació referent a 60 bases del servei de bombers, 54 de les quals pertanyen al cos de Bombers de la Generalitat i 6 al servei de Bombers de Barcelona. El nombre de bases presents, així com la seva distribució, permet observar que la província de Barcelona disposa d'una cobertura homogènia d'aquest servei en tot el seu territori.

La incorporació de la informació referent a les bases de tots els serveis a la base de dades emprada ha estat automatitzada, amb l'objectiu de poder definir nous escenaris amb un cost mínim. L'aplicació realitzada transforma la informació continguda en un fitxer amb extensió pròpia de l'aplicació *Google Earth* (Google 2007) en un conjunt de dades estructurat en funció de les

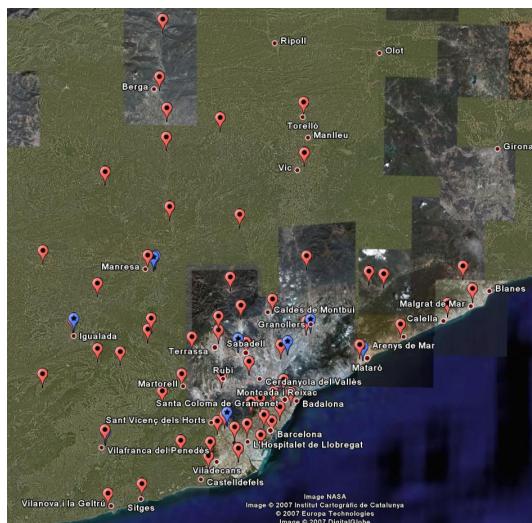


Figura 6.1: Distribució de les bases de la Divisió de Trànsit dels Mossos d'Esquadra (en blau) i dels cossos de Bombers de la Generalitat i de Barcelona (en vermell).

característiques de la base de dades. Així, es permet definir gràficament sobre imatges de satèl·lit la ubicació de les bases i el tipus de servei a què pertanyen, independentment del format emprat en la base de dades per a la representació de les dades geogràfiques. La figura 6.1 mostra la distribució de les bases utilitzades en la definició de l'escenari plantejat.

Malauradament, només s'ha pogut accedir a la informació referent a la flota del cos de Bombers de Barcelona, de forma que no ha estat possible determinar el nombre de vehicles ubicats en cada base. Així, aquest paràmetre ha estat assignat seguint una distribució aleatòria entre 1 i 20, valor que respon a la distribució de vehicles per base presents en els Bombers de Barcelona. Tanmateix, aquests valors són fàcilment ajustables en funció de la informació coneguda i, fins i tot, substituïts per les dades reals de cada flota amb un cost mínim.

Relacionat amb el paràmetre anterior, s'han generat els registres corresponents als vehicles ubicats en cada una de les bases, complimentant prèviament el tipus de serveis i el tipus de vehicle en les taules corresponents.

En la definició dels tipus de serveis, només s'han inclòs les descripcions cor-

<b>Policia</b>	<b>Bombers</b>	<b>Serveis Mèdics</b>
Cotxe patrulla ~ 7/8	Camió ~ 1/2	Ambulància ~ 2/3
Unitat atestats ~ 1/8	Ambulància ~ 1/4	UCI mòbil ~ 1/3
	Intervenció ràpida ~ 1/4	

Taula 6.1: Proporcions de tipus de vehicles presents en cada base en funció del tipus de servei a què pertany.

responents als serveis policial i de bombers, però la implementació per automatisar el procés és fàcilment modificable per incloure tants serveis addicionals com requereixi l'escenari definit. D'altra banda, s'ha utilitzat la informació generada en la definició de les bases per actualitzar el paràmetre que conté el nombre de bases pròpies del servei. Aquesta definició permet evitar possibles incongruències en les dades presents en el sistema, així com l'actualització de les dades dels tipus de serveis a partir del processament dels fitxers amb la ubicació de les bases.

Igualment, el manteniment de la informació referent als tipus de vehicles considerats s'actualitza de forma automàtica en funció dels tipus de serveis presents en la definició, amb l'objectiu d'evitar incongruències en la definició del marc de treball. En l'escenari generat, s'han definit dos tipus de vehicle (patrulla i atestats) corresponents al servei policial dels Mossos d'Esquadra, tres (camió, ambulància i intervenció ràpida) pel cos de Bombers i dos (ambulància bàsica i UCI mòbil) pel Servei d'Emergències Mèdiques. La distribució dels vehicles segons la base i el tipus de vehicle ha estat realitzada de forma orientativa, sense basar-se en dades estadístiques, seguint les proporcions indicades en la taula 6.1.

Fent ús dels paràmetres anteriors i de les relacions definides entre les taules de la base de dades, s'han generat de manera automàtica els valors referents a la flota de vehicles presents en el sistema. Per a cada base, s'han obtingut els possibles tipus de vehicles segons el servei a què pertany i, seguidament, s'han assignat les dades pròpies de cada vehicle: identificador del vehicle, identificador del servei, node on es troba ubicat, tipus de vehicle, identificador de l'accident al qual ha estat assignat, identificador de la base, identificador de la ruta pròpia del vehicle i el seu estat. Tractant-se d'una situació inicial, el node on s'ubica el vehicle correspon a la localització de la seva base, mentre que els identificadors de l'accident i de la ruta són nuls i el seu estat correspon

Servei	Bases	Vehicles	Vehicles/Base	Tipus
Policia	9	107	11.8889	2
Bombers	60	581	9.6833	3
Serveis Mèdics	0	0	0	2
<b>Totals</b>	<b>69</b>	<b>688</b>	<b>9.97</b>	<b>7</b>

Taula 6.2: Resum de les característiques de l'escenari generat com a marc de treball.

a l'identificador d'unitat lliure.

Amb aquest criteri, ha estat possible generar una flota de 688 vehicles, corresponents a 107 vehicles de la Divisió de Trànsit dels Mossos d'Esquadra i 581 unitats dels cossos de Bombers de la Generalitat i de Bombers de Barcelona. No s'han inclòs unitats del Servei d'Emergències Mèdiques, atès que no ha estat possible accedir a informació referent al servei. Tanmateix, la seva inclusió no modificaria el funcionament del sistema ni el seu rendiment durant l'etapa de preprocés o en la planificació de rutes, mantenint invariants els resultats obtinguts.

La taula 6.2 proporciona un resum de les característiques principals de l'escenari generat per a la realització de proves i la validació del sistema implementat.

## 6.2 Resultats

Partint del marc experimental descrit anteriorment, s'han realitzat un conjunt de proves per validar i comprovar l'eficiència del sistema dissenyat. Es pot afirmar que els resultats obtinguts i la seva interpretació són invariants respecte al servei considerat, ja que s'han estudiat de forma independent. Així, la inclusió dels serveis mèdics en l'escenari plantejat no modificaria les conclusions a les quals s'ha arribat respecte el funcionament del sistema durant les tasques de tractament de la informació geogràfica i la planificació de les rutes. D'altra banda, les variacions que aquest servei introduiria en l'etapa d'assignació de recursos també són menyspreables, ja que el procés de resolució del problema plantejat és idèntic en tots els serveis.

Durant la generació de l'estructura de *clusters*, els nodes continguts en

la base de dades cartogràfica són classificats i reordenats, sent assignats en funció del temps de desplaçament des de la base corresponent, amb un horitzó temporal de 8 minuts. Amb aquest procés, es classifiquen 148.538 nodes dels 281.257 presents en la base de dades, suposant així una reordenació del 52.8% de les dades disponibles. Igualment, dels 351.326 arcs disponibles s'inclouen 159.153 en l'estructura de *clusters* generada, corresponent a un 45.3% de les dades totals disponibles. Aquests resultats permeten afirmar que, en un mínim del 52.8% dels casos, la solució trobada serà òptima i la ruta mínima serà coneguda prèviament a que l'accident es produexi, reduint així el temps de resposta.

Amb l'objectiu de comprovar l'eficiència de l'aplicació implementada, s'ha realitzat una comparativa amb el paquet comercial de càlcul de camins mínims *NGRoute* (Geografics 2004) en les dues situacions possibles en el sistema: un accident produït en un node classificat dins de l'estructura de, com a mínim, un *cluster* i un accident succeït en una àrea externa a tots els *clusters*. En tots els casos, el paquet comercial s'utilitza per trobar una solució exacta, sent necessària la generació d'una ruta per a cada una de les bases del servei estudiat, escollint després aquella que fa mínim el temps de desplaçament. Atès que aquest càlcul incrementa notablement el temps total de càlcul, s'ha optat per utilitzar el temps mig de càlcul per ruta per a la realització de la comparativa. D'altra banda, *NGRoute* utilitza una funció heurística per reduir el temps de càlcul, obtenint un rendiment inferior i una pitjor solució que la funció heurística plantejada en el disseny del sistema (veure secció 5.1).

La primera situació, on l'accident té lloc en un node conegut i classificat en l'estructura de *clusters* generada, és la que presenta un millor rendiment del sistema. En aquest cas, la ruta és calculada durant l'etapa de preprocés, sent necessari únicament recuperar les respectives dades en temps d'execució. Amb aquest procediment, s'aconsegueix reduir el temps de càlcul en un 95% respecte el càlcul realitzat amb el paquet comercial *NGRoute*, aconseguint una millor solució. Aquest fet es justifica considerant que la funció heurística emprada en la generació de l'estructura de *clusters* correspon a una funció uniforme de cost nul, la qual permetrà obtenir la solució òptima però amb un cost computacional més elevat que el necessari per realitzar el càlcul amb la funció definida en el paquet comercial. Tanmateix, el fet que el càlcul de les rutes mínimies incloses en l'estructura de *clusters* es realitzi durant l'etapa de preprocés permet acceptar aquesta penalització a canvi de mantenir garantida l'optimalitat de la solució trobada. D'altra banda, el temps de càlcul mig

per ruta roman inferior a 0.5 segons, proporcionant un temps de resposta molt baix dins de la finestra temporal crítica d'intervenció. La taula 6.3 mostra els resultats obtinguts per a cada sistema en la seva aplicació sobre diferents exemples on l'accident es produueix en un node inclòs en l'estructura de *clusters*.

El segon cas d'estudi plantejat, en què l'accident té lloc en una zona externa a tots els *clusters*, presenta igualment una millora de rendiment important respecte a la llibreria *NGRoute*. En aquesta situació, el sistema proporciona tres possibles rutes, corresponents als tres *clusters* més propers geogràficament a la localització de l'accident. Aquesta estratègia, conjuntament amb la funció heurística emprada, permet millorar el temps de resposta i la qualitat de les rutes obtingudes amb el paquet comercial emprat en la comparativa. Així, s'aconsegueix una reducció mitjana del temps de càlcul propera al 57%, amb un temps de resposta variable en funció de la localització de l'accident i la seva distància respecte a la localització de les bases. La taula 6.4 presenta els resultats obtinguts per a cada sistema i servei en la seva aplicació sobre diferents exemples on l'accident té lloc en una àrea externa a l'estructura de *clusters*.

Cal destacar que els resultats trobats són similars en totes les situacions plantejades, especialment en els exemples combinats on un accident té lloc dins de l'estructura d'un *cluster* corresponent a un servei, però en una zona externa a tots els *clusters* dels altres. El tractament independent de cada servei que s'ha adoptat en el disseny del sistema permet mantenir gairebé constant el seu rendiment, sense que la localització de l'accident influeixi activament en la seva eficiència.

Una observació important que es pot extreure dels resultats presentats en les taules 6.3 i 6.4 consisteix en el fet que l'estratègia seguida és capaç de reduir no només el temps de càlcul de rutes, sinó el temps de resposta global del sistema. Així, la comparativa del temps total de còmput per cada un dels sistemes evaluats permet apreciar que es produueix una reducció d'un ordre de magnitud, d'uns quants minuts a segons o menys d'un segon, fent viable abordar un problema que, d'altra manera, requeriria un temps de càlcul superior a les finestres temporals imposades per proporcionar una solució. A més, inclús en situacions particulars amb una important càrrega de treball del sistema, l'estratègia plantejada proporciona una solució òptima o subòptima sense que s'apreciï un increment del cost computacional requerit per resoldre cada una de les situacions evaluades.

El model plantejat durant l'assignació de recursos és una adaptació de la definició del problema VRP, permetent així la utilització del paquet comercial *ILOG* i de la seva llibreria *Dispatcher* (ILOG 2001). L'eficiència d'aquest sistema permet resoldre una instància del problema VRP en temps inferiors a un segon, de manera que no esdevé un element crític del procés d'optimització.

Com a conclusió, es pot afirmar que l'estratègia plantejada en el disseny del sistema de suport a la presa de decisions en la coordinació de serveis d'emergència en un accident de trànsit permet obtenir una primera resposta al problema en un temps raonable, consumint pocs segons durant la finestra temporal crítica. D'altra banda, s'ha pogut comprovar que, en la majoria de casos, les funcions heurístiques emprades en les fases de preprocés i de planificació de rutes proporcionen una millor solució en un temps inferior respecte al paquet comercial *NGRoute* aplicat sobre el mateix escenari. Addicionalment, l'apropament adoptat proporciona una llista ordenada de les possibles alternatives de resolució del problema, aconseguint una millora del rendiment durant el procés d'assignació de recursos.

Servei de policia					
Sistema suport			<i>NGRoute</i>		
t (s)	Rutes	t (s) / Ruta	t (s)	Bases	t (s) / Ruta
0.297	1	0.297	83.578	9	9.286
0.484	1	0.484	65.938	9	7.326
0.687	1	0.687	70.016	9	7.780
<b>0.489</b>	-	<b>0.489</b>	<b>73.177</b>	-	<b>8.131</b>

Servei de bombers					
Sistema suport			<i>NGRoute</i>		
t (s)	Rutes	t (s) / Ruta	t (s)	Bases	t (s) / Ruta
0.516	1	0.516	587.734	60	9.796
0.329	1	0.329	586.171	60	9.770
0.25	1	0.25	669.859	60	11.164
0.375	1	0.375	469.609	60	7.827
6.469	10	0.6469	454.578	60	7.576
<b>1.588</b>	-	<b>0.423</b>	<b>553.590</b>	-	<b>9.227</b>

Taula 6.3: Resultats obtinguts per l'aplicació dissenyada i el paquet comercial *NGRoute* en la seva aplicació sobre alguns exemples on l'accident es produeix dins de l'estructura de *clusters*.

Servei de policia						
Sistema suport			<i>NGRoute</i>			
t (s)	Rutes	t (s) / Ruta	t (s)	Bases	t (s) / Ruta	
32.218	3	10.739	95.438	9	10.604	
4.562	3	1.521	62.641	9	6.960	
8.656	3	2.885	91.062	9	10.118	
5.032	3	1.677	86.828	9	9.648	
30.906	3	10.302	113.343	9	12.594	
<b>16.275</b>	-	<b>5.425</b>	<b>89.862</b>	-	<b>9.985</b>	

Servei de bombers						
Sistema suport			<i>NGRoute</i>			
t (s)	Rutes	t (s) / Ruta	t (s)	Bases	t (s) / Ruta	
21.5	3	7.167	661.359	60	11.023	
6.328	3	2.109	455.094	60	7.585	
5.516	3	1.839	697.328	60	11.622	
<b>11.115</b>	-	<b>3.705</b>	<b>604.594</b>	-	<b>10.077</b>	

Taula 6.4: Resultats obtinguts per l'aplicació dissenyada i el paquet comercial *NGRoute* en la seva aplicació sobre alguns exemples on l'accident es produeix fora de l'estructura de *clusters*.

## Capítol 7

# Conclusions i línies de futur

En el present treball, s'ha demostrat que l'estrategia plantejada en el disseny del sistema de suport a la presa de decisions en la coordinació de serveis d'emergència en un accident de trànsit constitueix una aproximació efectiva al problema, sent capaç de proporcionar una primera resposta en un temps admissible, donades les restriccions temporals del problema tractat.

Les característiques del problema, classificat dins de la categoria dels problemes VRP multi-depot amb flotes heterogènies i amb finestres temporals d'actuació molt restrictives, permeten estendre el tractament plantejat a altres instàncies de la mateixa categoria. Així, la mateixa estrategia de tractament de la informació geogràfica i de resolució del problema pot ser aplicada a altres problemes habituals en logística, amb una definició similar: distribució de mercaderies sense recollida prèvia, assistència en carretera, subministrament de combustible a particulars i, en general, qualsevol problema amb múltiples bases de localització fixa susceptible de ser reduït a un conjunt de problemes amb un nombre menor de bases, en funció de la seva cobertura geogràfica.

La plataforma sobre la que s'ha implementat el sistema es fonamenta sobre una arquitectura distribuïda basada en CORBA, amb l'objectiu de simplificar la comunicació i la coordinació entre els diferents mòduls que la componen. Igualment, aquesta arquitectura proporciona una gran versatilitat, ja que permet la parametrització, substitució o inclusió de nous mòduls per satisfer les necessitats pròpies de cada un dels problemes VRP tractats. Cal destacar la importància del *Sistema d'Informació*, on es troba continguda tota la informació geogràfica i les dades corresponents al problema abordat, així com el

mòdul d'optimització, que conté tota la lògica de tractament emprada en el plantejament suggerit.

El desenvolupament d'aquesta plataforma basada en CORBA ha permès i permetrà reduir el temps destinat a la implementació dels diferents mòduls que la componen, ja que el disseny i la codificació de cada un d'ells pot realitzar-se de forma independent i adaptant-se a les necessitats del problema logístic abordat. A més, tots els mòduls han pogut integrar-se ràpidament gràcies a l'arquitectura emprada i a la centralització de les dades en el *Sistema d'Informació*, plantejament que ha permès separar la gestió de la informació del flux d'execució. D'altra banda, la gestió de les comunicacions realitzada per la plataforma proporciona una millora considerable en el rendiment i l'eficiència del sistema desenvolupat respecte a altres sistemes utilitzats amb anterioritat, basats en els protocols TCP/IP.

El tractament de la informació geogràfica i la generació de l'estruatura de *clusters* ha demostrat ser una aproximació efectiva per resoldre el problema plantejat en un escenari realista. Malgrat que el valor de les variables del problema són desconegudes durant aquest procés, sent conegeudes només a partir de l'instant en què té lloc l'accident, aquesta estratègia de preprocessament de les dades geogràfiques ha permès reduir el temps de càlcul durant l'etapa de planificació de les rutes, dins de la finestra temporal crítica. A més, la utilització d'un algorisme de cerca eficient amb una funció heurística ben definida assegura que totes les rutes contingudes dins de l'estruatura de cada *cluster* corresponen al camí mínim entre els dos nodes que uneixen, garantint així la seva optimalitat.

La classificació i reordenació prèvia de les dades geogràfiques estàtiques proporciona un mètode per simplificar el problema VRP multi-depot plantejat en un conjunt de problemes VRP amb un nombre de bases inferior o amb una única base, els quals requereixen menys recursos de càlcul per ser resolts. D'altra banda, aquest apropament provoca que els dominis de les variables de decisió es vegin considerablement reduïts, millorant el temps de resposta dels algorismes en la cerca de la solució óptima, durant l'etapa d'assignació de recursos dels serveis d'emergència. Malgrat aquesta classificació, aquest tractament proporciona la flexibilitat suficient per respondre a les diferents situacions que poden aparèixer naturalment en la resolució de problemes d'aquest tipus en un escenari realista, ja que aquest plantejament es fa servir únicament com a punt de partida en el càlcul de les rutes óptimes entre les bases seleccionades.

i el lloc de l'accident.

Així, durant l'etapa de planificació de rutes s'utilitza l'estructura generada en l'etapa de preprocés per millorar el rendiment del sistema durant el càlcul dels camins mínims entre les corresponents bases i l'escenari de l'accident. En funció de la localització d'aquest, les dades contingudes en l'estructura de *clusters* generada s'utilitza per retornar la ruta òptima o quasi-òptima entre els dos punts d'interès: òptima en el cas en què l'accident es produeix dins de les fronteres d'algún *cluster* i quasi-òptima en cas contrari. En la primera situació, l'aproximació realitzada durant el tractament de la informació geogràfica permet garantir l'optimalitat del resultat trobat, mentre que en el segon cas es fa necessària l'adopció d'un plantejament diferent amb l'objectiu de reduir el temps de càlcul, malgrat no poder garantir que la solució trobada sigui òptima. Amb aquesta finalitat, s'ha introduït en l'algorisme de cerca una funció heurística dominant que proporcioni una bona velocitat de convergència, millorant l'eficiència en la cerca. La parametrització de dita funció heurística ha estat realitzada seguint els valors presents en les dades geogràfiques disponibles, de manera que en la majoria de casos el camí retornat sigui òptim. Malauradament, la variabilitat dels valors continguts en la informació geogràfica avaluada impedeixen definir una funció heurística acurada que garanteixi l'optimalitat de la solució amb una velocitat de convergència adequada a les necessitats del problema. Introduint la definició d'una família de funcions, de forma que en cada cas s'escollís la funció heurística dominant, es podria millorar l'eficiència de l'algorisme i garantir l'optimalitat de la solució trobada, penalitzant en el nombre d'avaluacions per iteració que caldria realitzar i, per tant, augmentant el cost computacional. Tanmateix, la comparativa realitzada amb un paquet comercial de càlcul de rutes demostra que el plantejament adoptat proporciona una millor solució que aquest, en molts casos la solució òptima, amb una millora crítica del temps de càlcul necessari, permetent abordar un problema que, d'altra manera, seria inviable amb les restriccions temporals presents.

Al seu torn, la classificació i estructuració en *clusters* de la informació geogràfica disponible presenta algunes limitacions, atès que el procés es realitza fent servir valors nominals estàtics per a la distància i el temps de desplaçament entre diferents nodes. Aquest fet impedeix tenir en compte les variacions en l'estat de la xarxa viària després que es produeixi un accident, de forma que les rutes calculades durant l'etapa de preprocés poden deixar de ser òptimes en la nova situació. El disseny de la plataforma de desenvolupament propor-

ciona mecanismes per a la incorporació de mòduls de simulació de l'estat del trànsit, ja sigui basats en models contínus (Gazis 2002) o en aproximacions multi-agent (Dia 2002), que emulessin un escenari real, permetent que la planificació de rutes en temps d'execució es realitzés sobre les dades actualitzades que incorporen les pertorbacions. Igualment, en un escenari real, la modularitat de la plataforma permetria introduir les dades provinents de la localització proporcionada pels dispositius GPS de cada vehicle, de manera que es podria obtenir una imatge de l'estat real del sistema a partir de la informació rebuda. Amb aquestes dades actualitzades, seria factible realitzar les tasques de replanificació de rutes i de reassignació de recursos, si les necessitats del problema així ho requereixen. Tanmateix, en ambdues situacions, on s'introdueixen pertorbacions sobre els valors nominals presents en les dades cartogràfiques, es fa necessària l'adopció d'una estratègia de resolució diferent, plantejant una possible línia de treball futur.

En quant a l'assignació de recursos de cada servei, el tractament de la informació geogràfica presentat proporciona una metodologia que permet reduir el domini de les variables de decisió del problema, la resolució del qual és abordada des de la perspectiva de les tècniques CP. El plantejament adoptat durant la planificació de rutes subministra a l'eina emprada per a la resolució del problema una simplificació del problema en forma de graf radial, on només es consideren els nodes d'interès corresponents a les bases, els vehicles de policia propers i l'accident. Així, es proporcionen diferents alternatives que permeten minimitzar el temps de resposta dels serveis d'emergència, de manera que pugui ser escollida aquella amb què s'obtingui una millor distribució dels recursos disponibles, complint amb les restriccions pròpies del problema plantejat.

Amb el propòsit de resoldre el problema de forma eficient, s'utilitzen les tècniques de resolució de problemes CSP incloses en el paquet comercial *ILOG*. Aquest fet permet abordar el problema des d'un model general, adaptat a les necessitats particulars de cada accident plantejat. Malgrat l'eficàcia d'aquesta aproximació, sorgeixen algunes limitacions produïdes per les característiques de l'escenari estudiat, plantejant possibles millors respecte a l'eficiència i robustesa del sistema.

Per una banda, les fortes restriccions temporals implícites en el problema obliguen a adoptar una estratègia de resolució on la minimització del temps de resposta del sistema sigui prioritària. Per aquesta raó, en l'aproximació

emprada no es contempla la incorporació dels valors actualitzats de les variables de l'accident avaluat durant el procés de resolució, sinó que únicament es resol una instància estàtica del problema per donar una primera resposta en un temps mínim. Atès que en una situació real el flux d'informació provenint de l'escenari de l'accident és continu i amb un ampli marge d'incertesa, aquest fet representa una limitació del disseny del sistema, ja que les solucions trobades abans de l'actualització de les variables hauran de ser descartades. Tanmateix, aquestes poden ser utilitzades com a solució inicial per l'algorisme de cerca, aconseguint una reducció del temps de càlcul necessari per a la resolució del problema. D'altra banda, es podria considerar avaluat el valor de cada variable de decisió del problema en cada iteració, de manera que la incorporació de les possibles actualitzacions fos immediata durant l'execució de l'algorisme. Malgrat les consideracions anteriors, aquesta limitació no afecta críticament el rendiment del sistema, atesa la diferència en ordres de magnitud temporals entre els dos processos.

D'altra banda, en determinades ocasions poden sorgir conflictes en l'assignació de recursos si es produeixen dos o més accidents simultàniament en una regió geogràfica limitada, ja que el sistema no contempla aquest tipus de concorrència. En aquesta situació, el mateix recurs pot ser assignat a dos o més accidents diferents, formant part de la millor solució trobada per a cada un dels accidents resolts aïlladament. La resolució seqüencial dels diferents problemes plantejats podria provocar la pèrdua de la solució óptima o subòptima global, de manera que es fa necessària la introducció d'una altra metodologia que permeti resoldre aquest tipus de conflictes, garantint una distribució idònia dels recursos disponibles. En el disseny plantejat en el present treball, no s'han avaluat mecanismes per resoldre aquesta limitació, deixant oberta una interessant línia de treball futur, ja que cal contemplar tant la millora del procés de resolució com de la gestió de la concorrència de les dades del problema en un entorn de càlcul distribuït.



# Bibliografia

- Al-Ghamdi, A.S. (2002). Emergency medical service rescue times in riyadh. *Accident Analysis and Prevention* **34**, 499–505.
- Altinkemer, K. and B. Gavish (1991). Parallel savings based heuristic for the delivery problem. *Operations Research* **39**, 456–469.
- Anily, S., J. Branel and A. Hertz (1999). A 5/3-approximation algorithm for the clustered travelling salesman tour and path problems. *Operations Research Letters* **24**, 29–35.
- Barcelona, Bombers (2007). Parcs de bombers. Recurs on-line. Ajuntament de Barcelona.
- Bektas, T. (2006). The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solutions procedures. *The International Journal of Management Science*.
- Breedam, Van (1994). An analysis of the behavior of heuristics for the vehicle routing problem for a selection of problems with vehicle-related, customer-related and time-related constraints. PhD thesis. University of Antwerp.
- Bullnheimer, B., R.F. Hartl and C. Strauss (1997). Applying the ant system to the vehicle routing problem. In: *2nd. International Conference on Metaheuristics*. Sophia-Antipolis, France.
- Clarke, G. and J. Wright (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations Research* **12**(4), 568–581.
- Departament d'Interior, Relacions Institucionals i Participació (2007a). Cos de mossos d'esquadra - trànsit. Recurs on-line. Generalitat de Catalunya.

- Departament d'Interior, Relacions Institucionals i Participació (2007b). Parcs de bombers - divisió operativa. Recurs on-line. Generalitat de Catalunya.
- Desrochers, M. and T.W. Verhoog (1989). *A matching based savings algorithm for the vehicle routing problem*. Vol. 4 of *Les Cahiers du GERAD*. École des Hautes Études Commerciales de Montréal. Montreal.
- Dia, H. (2002). An agent-based approach to modelling driver route choice behaviour under the influence of real-time information. *Transportation Research Part C* **10**, 331–349.
- Dondo, R. and J. Cerdá (2007). A cluster-based optimization approach for the multi-depot heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows. *European Journal of Operational Research* **176**, 1478–1507.
- Dueck, G. (1993). New optimization heuristics: the great deluge algorithm and the record-to-record travel. *Journal of Computational Physics* **104**, 86–92.
- Dueck, G. and T. Scheurer (1990). Threshold accepting: a general purpose optimization algorithm. *Journal of Computational Physics* **90**, 161–175.
- Edgar, T.F., D.M. Himmelblau and L.S. Landon (2000). *Optimization of Chemical Processes*. 2nd ed.. McGraw-Hill.
- Fisher, M.L. (1994). Optimal solution of vehicle routing problems using minimum k-trees. *Operations Research* **42**, 626–642.
- Fisher, M.L. and R. Jaikumar (1981). A generalized assignment heuristic for vehicle routing. *Networks* **11**, 109–124.
- Frey, H. and D. Görgen (2005). Planar graph routing on geographical clusters. *Ad Hoc Networks* **3**, 560–574.
- Gambardella, L.M., E. Talliard and G. Agazzi (1999). *New Ideas in Optimization*. Chap. MACS - VRPTW: a multiple ant colony system for vehicle routing problems with time windows. McGraw-Hill.
- Gazis, D.C. (2002). *Traffic Theory*. Kluwer Academic. Boston.
- Geografics, Nexus (2004). *NGRouteNet: Manual Técnico*.

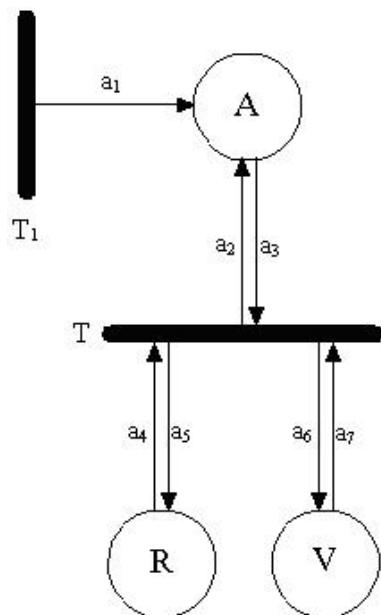
- Gillet, B.E. and L.R. Miller (1974). A heuristic algorithm for the vehicle dispatch problem. *Operations Research* **22**, 340–349.
- Glover, F. (1986). Future paths for integer programming and links to artificial intelligence. *Computers and Operations Research* **13**, 533–549.
- Glover, F. and G.A. Kochenberger (2003). *Handbook of Metaheuristics*. Kluwer Academic Publishers. Boston.
- Goldberg, D. (1989). *Genetic Algorithms in search, optimization and machine learning*. Addison Wesley Publishing Company Inc.. New York.
- Google (2007). Google earth. <http://earth.google.es>.
- Guimaraans, D. (2005). Sistema gestor de flotes sobre una plataforma corba. implementació d'un gestor de bases de dades. Technical report. LogiSim - Centro para el Análisis y Mejora de Procesos de Fabricación, Logísticos y de Servicios mediante Simulación.
- ILOG (2001). *ILOG Dispatcher 3.2: User's Manual*.
- Jensen, K. (1997). *Coloured Petri Nets: Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use*. Vol. 1,2,3. Springer-Verlag. Berlín.
- Kinderwater, G.A.P. and M.W.P. Savelsbergh (1997). *Local search in combinatorial optimization*. Chap. Vehicle routing: handling edge exchanges. Wiley. Chichester.
- Laporte, G., M. Gendreau, J.Y. Potvin and F. Semet (2000). Classical and modern heuristics for the vehicle routing problem. *International Transactions in Operational Research* **7**, 285–300.
- Marriott, K. and P. Stuckey (1998). *Programming with Constraints: an introduction*. MIT Press. Boston.
- OMG, Object Management Group (2004). *Common Object Request Broker Architecture: Core Specification*.
- Puig, V., A. Guasch, M.A. Piera and J. Figueras (2003). Routing vehicle problems, algorithms and systems: a state of the art. Technical report. LogiSim - Centro para el Análisis y Mejora de Procesos de Fabricación, Logísticos y de Servicios mediante Simulación.

- Ramos, J.J., M.A. Piera, A. Guasch and J. Figueras (2005). A simulation based environment for designing real-time decision tools in the trucking industry. In: *Proceedings of International Mediterranean Modelling Multiconference*. Marseille (France).
- Russell, S. and P. Norvig (2003). *Artificial Intelligence: a Modern Approach*. 2nd ed.. Prentice Hall.
- Ryan, D.M., C. Hjorring and F. Glover (1993). Extensions of the petal method for vehicle routing. *Journal of the Operational Research Society* **44**, 289–296.
- Shaw, B. (1998). Using constraint programming and local search methods to solve vehicle routing problems. In: *Proceedings of the Fourth International Conference on Principles and Practice of Constraint Programming (CP'98)* (M. Maher and J.F. Puget, (Eds.). Springer-Verlag. pp. 417–431.
- Talliard, E.D. (1993). Parallel iterative search methods for vehicle routing problems. *Networks* **23**, 661–673.
- Thompson, P.M. and H.N. Psaraftis (1993). Cyclic transfer algorithms for the multivehicle routing and scheduling problems. *Operations Research* **41**, 935–946.
- Toth, P. and D. Vigo (2002). *The Vehicle Routing Problem*. Society for Industrial and Applied Mathematics. Philadelphia.
- Trànsit, Servei Català (2005). Anuari estadístic d'accidents a catalunya 2005. Technical report. Departament d'Interior - Generalitat de Catalunya.
- Urbano, J., J.D. Cortés, J.Busto and J.Lafuente (1998). Coordinación de los servicios de emergencia en accidentes de tráfico. experiencia en alcorcón. *Emergencias*.

## Apèndix A

### Model de simulació

El model de simulació definit, basat en el formalisme de Xarxes de Petri Acolorides, es mostra a continuació. Seguidament, es troben les taules amb les especificacions corresponents als nodes lloc, les transicions, els colors definits i les expressions d'arc.



Lloc	Descripció	Color
A	Informació accidents	Accidents
V	Informació vehicles	Vehicles
R	Informació rutes	Rutes

Taula A.1: Nodes lloc

Transició	Descripció
$T_1$	Generació d'un nou accident de trànsit
$T_2$	Arribada d'informació des de l'escenari de l'accident
$T_3$	Assignació de recursos a un accident
$T_4$	Operació de moviment dels vehicles
$T_5$	Intervenció en el lloc de l'accident / Hospitalització

Taula A.2: Transicions

Atribut	Definició	Descripció
a_id	int	Identificador de l'accident
a_nodac	int	Identificador del node on té lloc l'accident
a_nochos	int	Identificador del node on les víctimes han de ser transportades
a_tin	int	Temps en què s'ha produït l'accident
a_tmax	int	Temps màxim en què s'ha d'atendre l'accident
a_numvic	int	Nombre de víctimes
a_numtrap	int	Nombre de víctimes atrapades
a_fire	int 0..1	Requeriment del servei de bombers 0:no requerit, 1:requerit
a_state	int 1..4	Estat de l'accident 1:pendent, 2:assignat, 3:en procés, 4:finalitzat

Taula A.3: Descripció del color Accident

Atribut	Definició	Descripció
r_id	int	Identificador de la ruta
r_nodin	int	Identificador del node origen
r_nodfi	int	Identificador del node destí
r_dist	int	Distància de l'arc de la ruta
r_time	int	Temps de l'arc de la ruta

Taula A.4: Descripció del color Rutes

Atribut	Definició	Descripció
v_id	int	Identificador del vehicle
v_type	int 1..3	Servei a què pertany el vehicle 1:Policia, 2:Mèdic, 3:Bombers
v_subtype	int	Subtipus de vehicle (ambulància bàsica, camió, etc)
v_state	int 1..3	Estat del vehicle 1:lliure, 2:en servei, 3:retornant
v_idac	int	Identificador de l'accident on està assignat el vehicle
v_dep	int	Identificador de la base del vehicle
v_nodact	int	Identificador del node on està ubicat el vehicle

Taula A.5: Descripció del color Vehicle

Arc	Expressió
a1	$l'(a\_id, a\_nodac, a\_nodhos, a\_tin, a\_tmax, a\_numvic, a\_numtrap, a\_fire, a\_state)$
a2	$l'(a\_id, a\_nodac, a\_nodhos, a\_tin, a\_tmax, a\_numvic, a\_numtrap, a\_fire, a\_state)$
a3	$l'(a\_id, a\_nodac, a\_nodhos, a\_tin, a\_tmax, a\_numvic, a\_numtrap, a\_fire, a\_state)$
a4	$l'(r\_id, r\_nodin, r\_nodfi, r\_dist, r\_time)$
a5	$l'(r\_id, r\_nodin, r\_nodfi, r\_dist, r\_time)$
a6	$l'(v\_id, v\_type, v\_subtype, v\_state, v\_idac, v\_dep, v\_nodact)$
a7	$l'(v\_id, v\_type, v\_subtype, v\_state, v\_idac, v\_dep, v\_nodact)$
Guarda T	$[a\_id = v\_idac] \&\&$ $\{[v\_dep = r\_nodin] \&\& [a\_nodac = r\_nodfi]\}   $ $\{[a\_nodac = r\_nodin] \&\& [a\_nodhos = r\_nodfi]\}   $ $\{[a\_nodhos = r\_nodin] \&\& [v\_dep = r\_nodfi]\}   $ $\{[v\_type = 1] \&\& [v\_nodact = r\_nodin] \&\& [a\_nodac = r\_nodfi]\}$

Taula A.6: Expressions d'arc i guardes



## Apèndix B

# Disseny de la base de dades

### Taules amb informació geogràfica

Les taules *Nodos* i *ArcGIS* corresponen a les taules pròpies de la base de dades estàtica amb informació geogràfica. Aquesta base de dades és comuna a tots els projectes que facin ús del sistema i ja està prèviament definida.

#### Taula Clusters

Aquesta taula conté la informació corresponent als *clusters* calculats durant l'etapa de preprocés, assignats a cada una de les bases existents.

Camp	Tipus	Descripció
<i>idCluster</i>	Enter	Identificador del cluster
<i>idNode</i>	Enter	Identificador del node actual
<i>idNodePare</i>	Enter	Identificador del node pare, des d'on s'arriba al node actual
<i>idArc</i>	Enter	Identificador de l'arc que uneix el node pare i el node actual
<i>CostFromDepot</i>	Decimal	Temps acumulat des de la base fins el node actual
<i>NivellNode</i>	Enter	Número de nodes entre la base i el node actual (nivells de l'arbre)
<i>Tipus</i>	Enter	Tipus de node (0: sense explorar / 1: explorat amb fills / 2: final)

### Taula Accidents

Aquesta taula conté la informació corresponent als accidents avaluats en el sistema. La inserció de dades es realitza des del mòdul de simulació.

Camp	Tipus	Descripció
<i>idAccident</i>	Enter	Identificador de l'accident
<i>idNodeAccident</i>	Enter	Identificador del node on s'ha produït l'accident
<i>Temps</i>	Decimal	Temps en què es produeix l'accident
<i>TempsMaxim</i>	Decimal	Temps màxim en què cal arribar a l'accident
<i>numVehicles</i>	Enter	Nombre de vehicles implicats en l'accident
<i>numVictimes</i>	Enter	Nombre de víctimes
<i>numAtrapats</i>	Enter	Nombre de víctimes atrapades
<i>Foc</i>	Enter	Foc/Requeriment dels bombers (0: no / 1: sí)
<i>Estat</i>	Enter	Estat de l'accident (1: pendent / 2: assignat / 3: en procés / 4: finalitzat)

### Taula Victimes

Aquesta taula conté la informació corresponent a totes les víctimes dels diferents accidents emprades en la fase d'assignació de recursos.

Camp	Tipus	Descripció
<i>idVictima</i>	Enter	Identificador de la víctima
<i>idAccident</i>	Enter	Identificador de l'accident on s'ha produït la víctima
<i>idNodeHospital</i>	Enter	Identificador del node on es troba l'hospital (0 si no cal trasllat)
<i>EstatVictima</i>	Enter	Gravetat de la víctima (1: lleu / 2: greu / 3: mort)
<i>EstatAtencio</i>	Enter	Estat de l'atenció a la víctima (1: espera / 2: en curs / 3: finalitzada)

### Taula Vehicles

Aquesta taula conté la informació corresponent als vehicles disponibles en la flota de cada un dels serveis. Aquesta informació serà utilitzada, principalment, durant la fase d'assignació de recursos.

Camp	Tipus	Descripció
<i>idVehicle</i>	Enter	Identificador del vehicle
<i>idServei</i>	Enter	Identificador del servei al que pertany el vehicle
<i>idNode</i>	Enter	Identificador del node on es troba el vehicle
<i>idTipus</i>	Enter	Identificador del tipus de vehicle
<i>idAccident</i>	Enter	Identificador de l'accident on s'ha assignat el vehicle
<i>idDepot</i>	Enter	Identificador de la base pròpria del vehicle
<i>idRuta</i>	Enter	Identificador de la ruta assignada al vehicle
<i>Estat</i>	Enter	Estat del vehicle (1: lliure / 2: en servei / 3: tornant a la base)

### Taula Tipus\_Vehicle

Aquesta taula conté la informació corresponent als diferents tipus i subtipus de vehicles propis de cada servei.

Camp	Tipus	Descripció
<i>idTipus</i>	Enter	Identificador del tipus de vehicle
<i>idServei</i>	Enter	Identificador del servei al qual pertany el tipus de vehicle
<i>Descripcio</i>	Text	Descripció del tipus de vehicle

### Taula Serveis

Aquesta taula conté la informació corresponent als diferents serveis presents en el sistema.

Camp	Tipus	Descripció
<i>idServei</i>	Enter	Identificador del servei
<i>Descripcio</i>	Text	Descripció del servei / Tipus
<i>Bases</i>	Enter	Nom de bases pròpies de cada servei

### Taula Bases

Aquesta taula conté la informació corresponent a les bases existents en el sistema. En primera instància, s'ha definit un escenari de prova on aquesta taula ha estat alimentada amb dades reals de les bases de cada servei.

Camp	Tipus	Descripció
<i>idDepot</i>	Enter	Identificador de la base
<i>idNode</i>	Enter	Identificador del node on es troba situada la base
<i>idServei</i>	Enter	Identificador del servei al que pertany la base
<i>Vehicles</i>	Enter	Nombre de vehicles ubicats en la base

### Taula Rutes

Aquesta taula conté la informació corresponent a l'assignació de les rutes calculades pels diferents vehicles, obtinguda a partir de les dades provinents dels *clusters* definits en l'etapa de preprocés.

Camp	Tipus	Descripció
<i>idRuta</i>	Enter	Identificador de la ruta
<i>idVehicle</i>	Enter	Identificador del vehicle que segueix la ruta
<i>idAccident</i>	Enter	Identificador de l'accident corresponent a la ruta
<i>TempsRuta</i>	Decimal	Temps total de viatge entre l'origen i el destí de la ruta

### Taula Rutes\_ArcGIS

Aquesta taula conté la informació detallada de cada ruta, amb la seqüència d'arcs GIS que la componen, amb l'objectiu de permetre la simulació del moviment dels vehicles.

Camp	Tipus	Descripció
<i>idRuta</i>	Enter	Identificador de la ruta
<i>Sequencia</i>	Enter	Posició de l'arc en la seqüència de la ruta
<i>RID</i>	Enter	Identificador de l'arc GIS de la secció de ruta

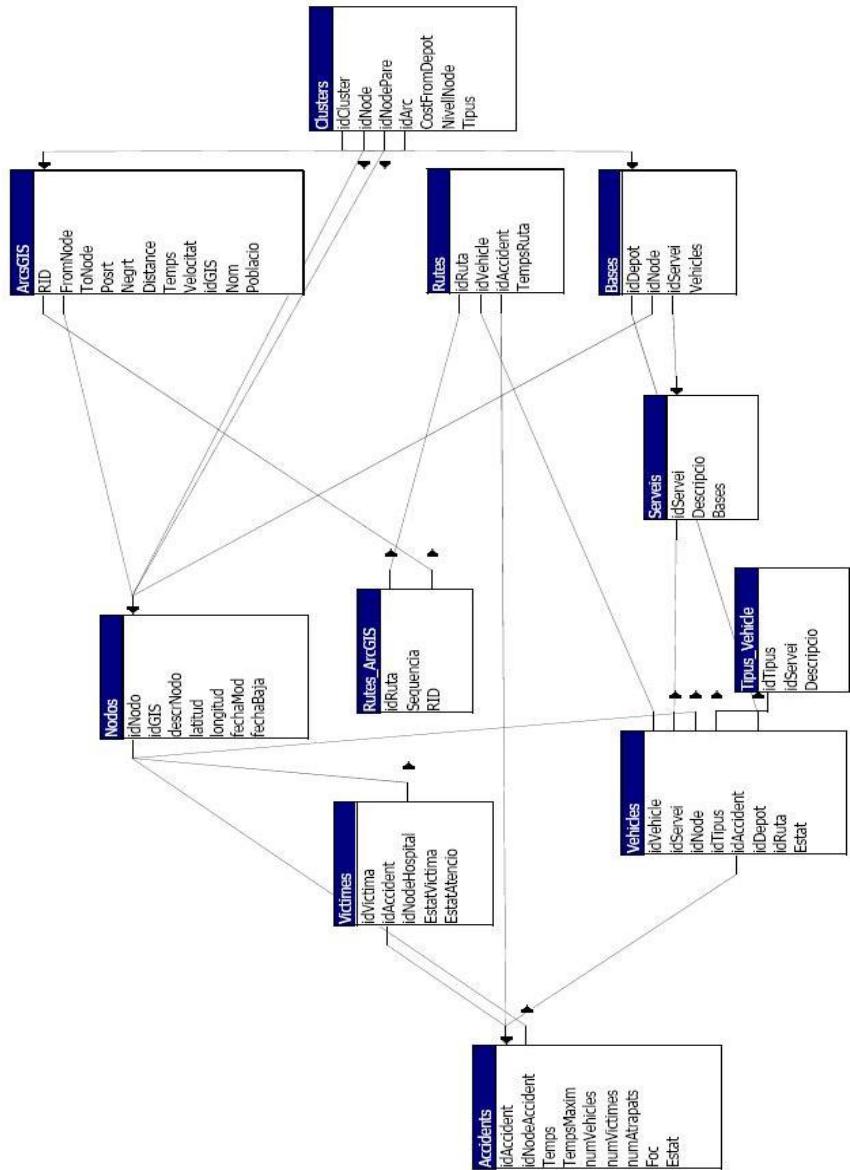


Figura B.1: Diagrama de relacions de la base de dades inclosa en el *Sistema d'Informació*.



## Apèndix C

### Articles publicats

Durant la realització de la tesina s'han realitzat les publicacions que es troben a continuació.

<b>Summer Computer Simulation Conference,</b> Calgary (Canadà) - Juliol 2006	81
<b>International Mediterranean Modelling Multiconference,</b> Barcelona (Espanya) - Octubre 2006	87
<b>Simpósio en Modelado y Simulación de Sistemas Dinámicos (Congreso Español de Informática),</b> Saragossa (Espanya) - Setembre 2007	93
<b>International Mediterranean Modelling Multiconference,</b> Gènova (Itàlia) - Octubre 2007	101



## A simulation based decision tool to coordinate emergency services in a road accident

D. Guimaran<sup>§</sup>, J.J. Ramos<sup>§</sup>, M.A.Piera<sup>§</sup>, A.Guasch<sup>†</sup>

<sup>§</sup> Department of Telecommunication and System Engineering - LogiSim  
Universitat Autònoma de Barcelona, 08193 Bellaterra, Spain

Daniel.Guimarans@uab.es, JuanJose.Ramos@uab.es, MiquelAngel.Piera@uab.es

<sup>†</sup> Department of System Engineering and Automatic Control - LogiSim  
Universitat Politècnica de Catalunya, 08028 Barcelona, Spain

Toni.Guasch@upc.es

### Abstract

The coordination of emergency services in road accidents is essential to ensure a quick intervention in critical situations. The number and kind of resources assigned must be determined dynamically, as not all the accident variables are known when an alert is received. In addition, some decisions can only be taken at the accident scene and may affect emergency service's distribution.

This paper presents the model and the laboratory environment that is being developed for the design of real-time decision tools for the coordination of emergency services. Furthermore, it describes the major characteristics of an optimization algorithm proposed to tackle the emergency services coordination problem. This algorithm combines heuristic methods and Constraint Satisfaction Problem techniques in a two interactive phases procedure.

### 1 Introduction

The coordination of the three major emergency services, i.e. Police Service, Medical Service and Fire Service, is a key issue to ensure an effective intervention in road accidents. Thus, correct management of the three heterogeneous fleets is necessary to distribute units according to dynamically changing real needs.

Such a coordination is highly complex, since not all the information relative to accident variables

is known from the very beginning and the available information usually contains uncertainty. Furthermore, although some collaboration protocols are defined they only regulate services interaction at the accident scene, but they not include general norms about resources' assignation [1]. Centralized communication, coordination and decision tasks would improve rescue services response, reducing rescue time and optimizing the available resources.

Time restrictions are naturally imposed since reaction time is primordial to save possible accident victims. Road network configuration and depots (fleet bases) distribution are important issues that determine the emergency fleets' capability to respond a concrete situation. These variables are specially relevant in rural communities, where some studies have demonstrated the inefficiency of current emergency services [2].

This paper presents a distributed environment which is being developed to assist in the design and validation of real-time decision tools. The main aim of this environment is to provide a detailed representation of real systems, so optimization algorithm can be developed and tested tackling realistic situations. Next section introduces the basic operative protocols and phases that make up an emergency intervention. The following section describes the software architecture where the simulation environment provides the information of accidents and fleet state. Section 4 introduces the system model based on Coloured Petri Nets formalism which will

be used to simulate different problem approaches. Finally, section 5 describes basic characteristics of the proposed optimization algorithm to tackle the problem.

## 2 Operative Protocols

The complexity of tasks carried out in a road accident requires the intervention of multidisciplinary rescue services. The number and kind of resources which are mobilized in a particular situation depends on the accident variables such as the number of involved vehicles, traffic ratio on the road and time when the accident takes place or whether there are injured victims or not. Furthermore, resources are dynamically assigned since information flow is continuous from the moment the accident occurs until services finish their action.

Each rescue service can divide its intervention into four major phases [3]:

1. From call receipt to scene arrival.
2. From scene arrival to scene departure.
3. From scene departure to hospital arrival and registration.
4. From departure back to the station to the arrival at the station.

In the first stage, a call is received and all the available information is collected to determine which resources to mobilize. A minimum of a police unit is sent, since its primary task is to control traffic at the accident scene permitting an easy access to other rescue services. Number and kind of medical units (basic ambulance, ICU ambulance, etc) assigned depend on the number of injured victims, while Fire units are only mobilized in case of trapped victims.

In the next phase, rescue services arrive at the accident location and check accurately known and unknown information, transmitting their evaluation to the respective stations. If resources assigned to the accident are not enough, it will be necessary to reallocate new units. Victims' attention is the most complex part of the process [4], since many situations can be derived from a road accident and a well coordinated intervention is essential. In case

that hospitalization is necessary, hospital destination is decided at this phase taking into account the seriousness of injuries and travel distance.

In the third stage, transport and registration at the selected hospital is performed. Hospitalization depends on injuries' seriousness, so not all accident victims will require it. Most of cases where hospitalization need is determined, only Medical and Police services will take part in the transport. In this stage, the patient should be registered at the hospital and seen by a physician, so the ambulance rescue unit must wait until the physician's diagnosis has been made and the patient is fully admitted. If the diagnosis requires treatment for the victim at any other hospital, the medical unit is responsible for transporting the patient.

In last phase, assigned units return back to the depot from the hospital or the accident scene. Different actions are done at the station after an intervention, including cleaning tasks, used material replacement and communication of fully operative state to the communications centre.

## 3 Distributed Platform Architecture

Because the project has a multidisciplinary approach, the computer program architecture designed to tackle the problem integrates different technologies, i.e. different software, programming languages and operative systems. Figure 1 illustrates the system architecture. The system involves four main modules: the Information System, the Fleet Simulator, the Decision Making Tools and the Visualization Tools.

The system has been designed as a distributed application based on CORBA [5] to simplify the coordination and communications between modules. The complete modularity of this architecture also permits to replace modules answering to simulation needs or case studies [6].

The *Geographical Information System (GIS)* module manages all the static and dynamical data in the system. The static data is composed by the geographical data, provided by a cartographic database, and the filtered geographical data, which is extracted from the former and generates a representation of the roads and streets network accord-

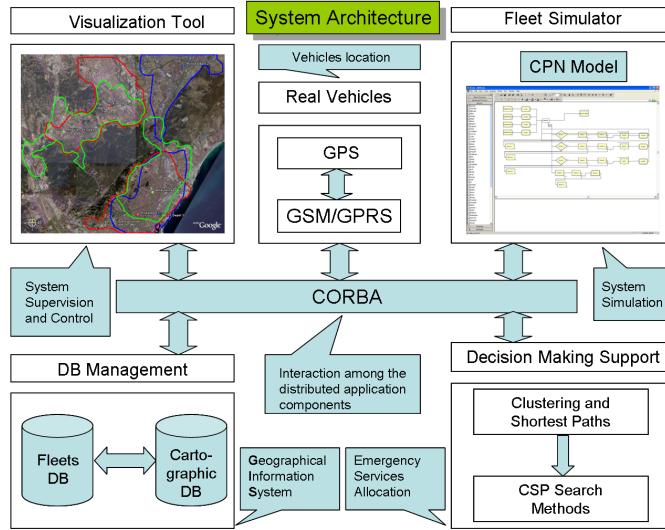


Figure 1: System architecture

ing to the need of the optimization module. The dynamical data is composed by the fleet structure information (vehicle characteristics, state of vehicles, etc), the georeferenced position of each vehicle and the georeferenced position of the road accidents, as well as the accident characteristics (vehicles involved, number of injured victims, time window constraints, etc).

The *Visualization* module is a graphic application where the vehicle movements and the configured routes are represented on the map. Vehicle positions are generated and registered at the database by the *Fleet Simulator* module, though a real vehicle positioning system could be easily integrated in the platform [7].

The *Decision Making Support* module has to find a solution for the problem, which falls into the VRP category. Near all the solution techniques for this problem are heuristics and metaheuristics because no exact algorithm can be guaranteed to find optimal solutions within reasonable computing time due to the NP-Hardness of the problem [11].

#### 4 Emergency Services Model

The problem can be interpreted as a Vehicle Routing Problem (VRP) [8] with some additional constraints. First hand, a multi-depot consideration should be tackled since every rescue service owns different bases scattered along the territory. Moreover, several kinds of vehicles are located at each depot, constituting a heterogeneous fleet. On the other hand, rescue service time is usually tightly restricted since a quick actuation is required on road accidents. Traffic ratio on the road, seriously injured victims or the number of vehicles involved in the accident are some of the variables that determine the tightness of the time window restriction applied to a specific accident.

The routing problem to be solved is different for each rescue service though all represent a variation of a pickup/delivery problem. The Fire Service action could be interpreted as a single pickup/delivery service between two fixed nodes: vehicle's depot and the place where the accident has occurred. Medical and Police Services action presents more complexity since the delivery node is dynamically

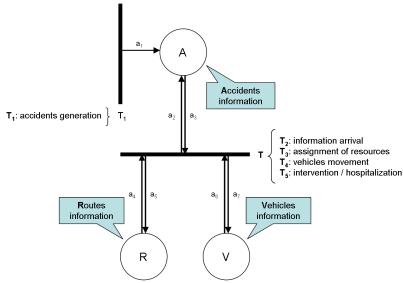


Figure 2: CPN Model

assigned taking into account accident variables, including the option that no delivery is needed. Thus, the complete route can only be decided once the service at the accident node has started, so the routing planning expended time becomes critical.

The fact that Medical and Fire Services must return to their origin depots before attending another accident simplifies the routing problem, so two-nodes or at most three-nodes routes should be calculated. On the other side, Police Service can perform different actions in several accidents before returning to their origin depot, although a new destination cannot be assigned until their service at the accident scene has ended. In this special case, a police vehicle returning to its base can be interpreted as a new depot with a single vehicle in order to reallocate services on runtime simulation.

The state of the system is determined by the fleet state (state and position of every vehicle), the routes planned and accidents state. Thus, two parts can be distinguished in the system dynamics represented by the model: the generation of the accidents and the simulation of different rescue services movements and actions. The CPN [9] model is shown in Figure 2.

Road accidents are generated according to a stochastic model along the simulation. In order to represent a real-time system, the information related to a specific token created when transition  $T_1$  is fired should not be uniform. Thus, some attributes will remain unknown until the firing of another transition update them. These updates will represent the stochastic information arrival ( $T_2$ ) or the perception of rescue services during their action

performing at the accident scene ( $T_5$ ).

Attending an accident basically consists of deciding which resources are assigned, taking into account all the known information and, so that, on which route the travel time will be reduced ( $T_3$ ). The allocation task is performed using the fleet variables, including available units type and state, but not considering vehicles crew assignment.

The fleet movements are determined by transition  $T_4$ . When  $T_4$  is fired the fleet state is changed and different actions begin as the vehicles arrive to the accident, hospital or depot points ( $T_5$ ).

## 5 Decision Making Tool

A two phases approach is suggested to tackle the emergency services coordination problem. The objective is to assign resources to accidents according to the implicit restrictions of the problem, which falls into the Constraints Satisfaction Problem (CSP) category. These constraints define that the maximum fixed response time may not be violated by the problem solution and no area must rest uncovered, affecting resources' allocation. Therefore, all resources of a particular depot may not be assigned to a single accident, since the second restriction would not be satisfied.

### 5.1 Clustering process

In order to reduce the computation time at the solution stage, GIS information is preprocessed by classifying the GIS nodes according to distance and traveling time from the different depots. Thus, each node is only reachable by a vehicle whose base is located at the depot which minimizes distance and traveling time, creating a cluster-based structure, as shown in Figure 3.

The goal of this geographic data rearrangement is to reduce the multi-depot VRP problem to a set of single-depot problems, where only one for each service has to be solved when an accident takes place. Therefore, variables' domains are reduced, improving the response time of the optimal solution search algorithm.

At this phase, common heuristic A\* procedure [10] is used to classify the geographic information into separated clusters. Moreover, a shortest path



Figure 3: Accident simulation

determination task is performed, so nodes are re-ordered into the cluster structure. Thus, when an accident notification is received, a shortest path approach from the depot to the accident scene is known, achieving an important calculation reduction.

An uniform cost heuristic function is introduced in the clustering algorithm. The reason is that every single node is a potential accident node, so no particular direction may be pondered during the search. Each path is explored until the time service restrictions are not fulfilled, delimiting thus the cluster edge.

The uniform cost heuristic never overestimates the real cost of getting from one node to another. This property guarantees the optimality of all paths included in a cluster and ensure that no optimal solution may be discarded during the search [10].

As the algorithm always explores nodes with minimum associated cost at each iteration, it is possible to guarantee that the corresponding determined path from the depot to any node in the cluster is minimum. Since any suboptimal path to a particular node has a larger cost than the optimal one, it can be demonstrated that the suboptimal path will never be explored and the optimal solution will be returned.

## 5.2 Emergency services allocation

In solution's search stage, emergency resources are assigned when an accident occurs. Constraint Satisfaction Problem (CSP) techniques are used to find a feasible solution. System constraints are related to the available resources and specially to time windows.

The information obtained at clustering stage is used to reduce the solution search space. Furthermore, an accident may be associated to a particular depot with a minimal computational cost, since either the accident location belongs to a specific cluster or the distance from the accident node to close clusters' edge may be easily calculated. Thus, the solution search is simplified to explore only nearby clusters, reducing the search space.

In some cases (e.g. accident occurred in an isolated area, traffic jam, etc.), a solution fulfilling all the imposed constraints may not be reached. Thus, time constraints may be relaxed or weighted and minimizing the response time becomes an objective of the arising optimization problem. The main aim is to allocate resources satisfying all the imposed constraints except the response time restriction, which turns into an objective function.

The information available during solution's calculation is dynamically changing, since not all accident variables are known until the first unit arrives to the accident scene. Furthermore, the information may arrive from different sources, containing a large uncertainty. Therefore, the solver is forced to check resources' availability and problem's time constraints in a continuous process during the intervention. Moreover, roads state may change from the moment the accident takes place to service end, so shortest paths calculated at clustering stage may become non optimal. This situation may be determined using vehicles' GPS information, since their geographical position and movements are well-known. Thus, the corresponding route to the accident scene must be recalculated and, in some cases, resources should be reallocated. On the other hand, cluster's shortest paths information may be used in an heuristic approach to calculate the new route, reducing search's complexity. So, clusters can not be defined as rigid structures, but nodes included in foreign clusters may be reachable by vehicles belonging to a particular depot in order to find a feasible solution.

## 6 Conclusions

The paper presents a CORBA distributed environment which is being developed to assist in the design and validation of real-time decision tools in emergency services field. A fleet simulator is used to test the decision tools designed to tackle the problem.

These tools are based on a two phases algorithm, introduced in the present work: a preprocessing work where the search space is reduced, transforming a  $n$ -depot problem into  $n$  single-depot problems, and a second stage where individual single-depot problems are solved using Constraint Programming techniques. This approach allows to reduce calculation during the execution, since the clustering task is performed in a preprocessing stage. In the second phase, emergency resources are assigned and the corresponding routes are calculated considering the shortest path structures generated in the first stage.

## Acknowledgements

This work has been supported by the Department of Universities, Research and Information Society of the Catalonia Autonomous Government, Ministerio de Fomento and by the Spanish Ministry of Science and Technology (projects DPI2004-08056-C03-01 and DPI2004-08056-C03-02).

## References

- [1] SAMUR (Servicio de Asistencia Municipal de Urgencia y Rescate) - Ayuntamiento de Madrid, [http://www.munimadrid.es/Principal/ayuntamiento/ServMuni/seguridad/samurweb/menu\\_superior/procedimientos/Operativo.pdf](http://www.munimadrid.es/Principal/ayuntamiento/ServMuni/seguridad/samurweb/menu_superior/procedimientos/Operativo.pdf), Procedimientos Operativos
- [2] T.Young, J.C.Torner, K.C.Sihler, A.R.Hansen, C.Peek-Asa, C.Zwerling, *Factors associated with mode of transport to acute care hospitals in rural communities*, The Journal of Emergency Medicine, 24#2:189-198, 2003
- [3] A.S.Al-Ghamdi, *Emergency medical service rescue times in Riyadh*, Accident Analysis and Prevention 34: 499-505, 2002
- [4] J.Urbano, J.D.Cortés, J.Busto, J.Lafuente, J.C.López, *Coordinación de los servicios de emergencia en accidentes de tráfico. Experiencia en Alcorcón*, Emergencias, vol. 10, #1, 1998
- [5] Object Management Group, Inc., *Common Object Request Broker Architecture: Core Specification*, OMG, Inc., 2004
- [6] J.J.Ramos, M.A.Piera, A.Guasch, J.Figueras, *A simulation based environment for designing real-time decision tools in the trucking industry*
- [7] G.Derekenaris, J.Garofalakis, C.Makris, J.Prentzas, S.Sioutas, A.Tsakalidis, *Integrating GIS, GPS and GSM technologies for the effective management of ambulances*, Computers Environment and Urban Systems, 25:267-278, 2001
- [8] The VRP Web, <http://neo.lcc.uma.es/radi-aeb/WebVRP/>, 2005
- [9] K.Jensen, *Coloured Petri Nets: Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use*, vol. 1, 2, 3, Springer-Verlag, 1997
- [10] S.Russell, P.Norvig, *Artificial Intelligence: a Modern Approach*, 2nd. edition, Prentice Hall, 2003
- [11] T.Bektas, *The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solutions procedures*, Omega (The International Journal of Management Science), 34:209-219, 2006
- [12] G.Nagy, S.Salhi, *Heuristic algorithms for single and multiple depot Vehicle Routing Problems with pickups and deliveries*, European Journal of Operational Research, 162:126-141, 2005
- [13] R.Dondo, J.Cerdá, *A cluster-based optimization approach for the multi-depot heterogeneous fleet Vehicle Routing Problem with time windows*, European Journal of Operational Research, 2006

## A TECHNOLOGICAL PLATFORM FOR DESIGNING REAL-TIME DECISION TOOLS IN TRANSPORTATION LOGISTICS

J.J. Ramos D. Guimarsans M.A. Piera  
Department of Telecommunication and System  
Engineering - Logisim  
Universitat Autònoma de Barcelona  
08193 Bellaterra, Spain  
JuanJose.Ramos@uab.es, Daniel.Guimarsans@uab.es

A. Guasch  
Dpt. of System Engineering and Automatic Control  
- Logisim  
Universitat Politècnica de Catalunya  
08028 Barcelona, Spain  
MiquelAngel.Piera@uab.es, Toni.Guasch@upc.es

### KEYWORDS

Logistics, transportation, decision support tools,  
simulation, distributed computing.

### ABSTRACT

During the last years, the transportation industry has been involved in important new challenges to cope the changes in production and logistical systems. Just-In-Time procurement and quick and efficient consumer response are some of the reasons why the transportation industry has recognized the need to incorporate new information technologies such as Global Positioning System (GPS), Electronic Data Interchange (EDI) and Internet. These technologies can enhance the capabilities to optimize the transport operations since they provide the necessary information required to perform real-time decision making. This paper presents the laboratory environment that is being developed for the design of real-time decision tools for the transportation industry.

### INTRODUCTION

In a context of competitive and ever more global industrial production and in an economy oriented to services, the availability of transport units that can respond efficiently will be a very important factor for the competitiveness of the industrial and service companies. The transport logistics is a typical example of a highly complex and time-critical business environment. A high number of organizational units have to achieve an optimal allocation of resources, while coping with dynamically changing requests, conditions and constraints. This class of logistics problem is usually known as the vehicle routing problem (VRP). A key issue in VRP is the cost-efficient management of vehicle fleet providing the transport operations. The interest is to minimize the cost expressed as a combination of distance, time and/or money.

The transport of goods in metropolitan areas deserves special attention due to the high number of inefficiencies currently present. The consequence of these inefficiencies is serious in terms of its contribution to the increasing congestion in metropolitan areas. The congestion has become an important concern to policymakers in recent years (Wachs 2002). Not only are commuters stuck in traffic for longer periods of time

at rush hour, but traffic congestion is seen as a contributor to declining air quality. Transport optimization in metropolitan areas have the potential of reducing the transports costs (Papows 2001), reduce traffic congestion and increase the reliability of this service. Emergency fleet management is an example where the service time becomes a major challenge. The coordination of the three main emergency services, i.e. Police Service, Medical Service and Fire Service, is a key issue to ensure an effective intervention in road accidents or medical emergencies.

The high complexity of VRP is thus a prime target for optimization technologies. Real-Time Decision Tools for the VRP must combine GPS information, GIS technology, on-line electronic data interchange, Web-servers and efficient optimization algorithms in order to cope with the current needs. These new technologies open the door to the design of planning systems able to make this information profitable. This paper presents a technological platform which integrates these new technologies to support the design of real-time decision tools in transportation logistics. This platform has a distributed computing architecture in order to deal with the different problems falling in the VRP category. The decision tools should react in real-time in metropolitan areas where the duration of the trips are relatively short and every new transport operation should be served in very short time periods. The paper presents a two-phases approach to face real-world applications: the preprocessing phase where the geographical information is arranged according to the VRP problem to be solved; the optimization phase where resources are allocated and optimal routes are defined. Testing and improving those complex systems in a real environment is inefficient and expensive. The presented platform integrates a fleet simulation model which is able to represent the fleet transportation problems at different levels of complexity. Next section introduces the software architecture where the simulation environment provides the information of a transportation fleet. The following sections will describe the system model and the tools which process the geographical information required by the decision making tools, describing the basic characteristics of the optimization algorithms which are proposed to deal with the VRP problems. Some conclusions are pointed out at the final section.

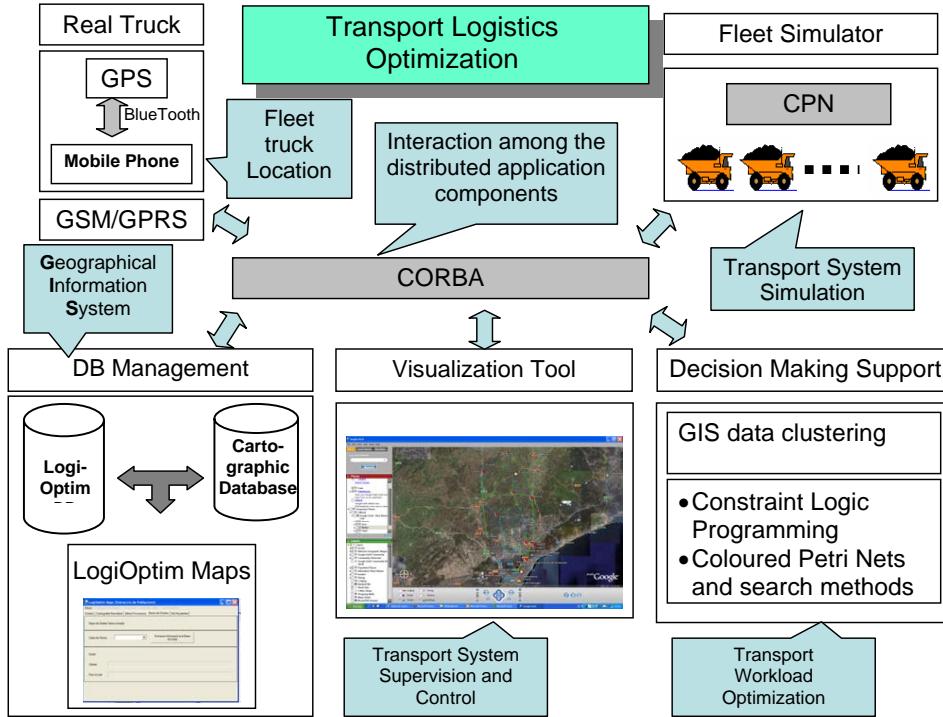


Figure 1: System Architecture

#### DISTRIBUTED PLATFORM ARCHITECTURE

Because the project has a multidisciplinary approach the computer program architecture integrates different technologies, i.e. different software, programming languages and operative systems. Figure 1 illustrates the system architecture. The system involves five main modules: the Geographical Information System, the Fleet Simulator, the Decision Making Tools, the Visualization Tools and the vehicle localization system. The system has been designed as a distributed application based on CORBA (OMG 2004) to simplify the coordination and communications between the application modules. The complete modularity of this architecture also permits to replace modules answering to the simulation needs or to the fleet management case studies such as, for instance, freight transportation in metropolitan areas (Busquets et Al. 2005) or the emergency services management in road accident (Guimaran et Al. 2006).

The Geographical Information System (GIS) module manages all the static and dynamical data in the system. The static data is composed by the geographical data,

provided by a cartographic database, and the filtered geographical data, which is extracted from the former and generates a representation of the roads and streets network according to the need of the decision making module. The dynamical data is composed by the fleet structure information (vehicle characteristics, state of vehicles, etc), the georeferenced position of each vehicle and the georeferenced position of the transport operations, as well as their characteristics, which depend on the VRP being solved. For instance, weight, dimensions and transport time windows constraints in freight transportation or the vehicles involved and number of injured victims in the emergency service management.

The Visualization module is a graphic application where the vehicle movements and the configured routes are represented on the map. Vehicle positions are generated and registered at the database by the Fleet Simulator module during the development stage and by the real vehicle positioning system, based on GPS and mobile communications, at the real operation case.

The Decision Making Support module has to find a solution for the problem, which falls into the VRP category (Bektaş 2006). Near all the solution techniques for this problem are heuristics and metaheuristics

because no exact algorithm can be guaranteed to find optimal solutions within reasonable computing time due to the NP-Hardness of the problem. More details on this module will be given

### TRANSPORT FLEET MODEL

In this section, the basic characteristics of the transport system model are described. This model will be used to develop and test the optimization routines in order to evaluate the decision making performance. The simulation model has two main functionalities: generation of the work load (transportation orders) for the transport system and the simulation of the goods delivery routes assigned by the transportation optimization module.

The transport system model should be easily adaptable to the different applications of the vehicle routing problem (e.g. freight transportation or emergency service management). Hence, model development has not been guided by a particular routing problem configuration, which means that the model reflects the system structure (e.g. transportation resources, vehicle capacities, number of depots or transport network characteristics) in such a way that the model can be parameterized to suit with the VRP problem. Therefore, the use of a modelling methodology able to represent in a clear way both the system structure and its dynamic behaviour becomes advisable. Coloured Petri Nets (CPN) have proven to be successful tools for modelling the characteristics for any type of discrete event oriented system. The CPN formalism shows several advantages such as the conciseness of embodying the static structure and the dynamics, the availability of the mathematical analysis techniques as well as its graphical nature (Jensen 1997, Silva and Valette 1989, Zimmerman et al. 1996).

The state of the transport system is determined by the fleet state (load and position of every vehicle), the transportation orders and the routes configured by the optimization module. Vehicles, transportation orders and routes are represented by the CPN tokens. Colour sets are used to characterize the different VRP problems to be faced:

- Vehicles: the colours represent both their static attributes (e.g. weight and volume capacity, costs or maximum velocity) and dynamic attributes (e.g. current load and state, current GPS position, current velocity or assigned route).
- Transportation orders: the colours represent the load characteristics, origin and destination as well as delivery constraints such as the delivery time window.
- Routes: they are characterized by the number of destination points where goods should be loaded or unloaded. The routes are configured by the optimization module.

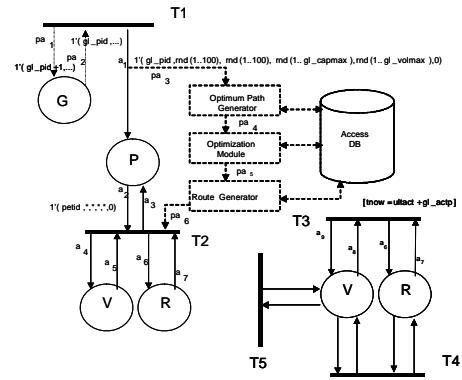


Figure 2: CPN model of the transport order generation, vehicle routing assignments and fleet movements

The CPN model is shown in Figure 2 and Table 1 outlines the place and transition descriptions. Transportation orders are generated according to a stochastic model at initial time, although new orders may arrive at any time afterwards (transition T1 is fired). Two parts are distinguished in the system dynamics represented by the model: the generation of the transportation orders and the simulation of the fleet movements across the road/street network.

Table 1: Description of Places and Transitions

Place	Description	Transition	Description
G	Generation of the transportation orders	T1	Arrival of new transportation order
P	Transportation order state.	T2	Assignment of a new transportation order to a vehicle.
V	It indicates the state of vehicles.	T3	Its firing updates the position of the fleet vehicles and its implications over the followed routes.
R	It represents the routes configured by the optimization module.	T4	Load/unload operation
		T5	Incidence event

Processing a transportation order basically consists of deciding which vehicle is assigned and, so that, on which route the order is delivered. These decisions are made by the application module which is described in the next section. The fleet movements are determined by transition T3. When T3 is fired the fleet state is changed and the transportation orders are served as the vehicles arrive to the load/unload points (transition T4). Different types of incidences can be simulated by firing transition T5 (e.g. vehicle breakdown or loose of the vehicle GPS location). All the information generated by the simulator is stored at the GIS module (see Figure 1) since all the system data is shared by the application modules by accessing to the data bases. The Arena simulation tool (Kelton 1998) has been used in this project to build the simulator.

#### DECISION MAKING TOOL

The objective of the VRP is to deliver a set of customers with known demands on minimum-cost vehicle routes, frequently, originating and terminating at a depot. The VRP problem falls into the category of NP complete problems. A two phases approach is suggested to make decisions according to the optimization criteria. The first phase pre-processes the GIS data in order to reduce the significant computing burden when shortest paths have to be calculated in order to find optimal routes. GIS data is clustered according to the needs of the VRP to be solved (single or multiple depot, homogeneous or heterogeneous fleet, routes with single or multiple visits, etc) while keeping exact information about travel time and costs between the pick-up/delivery points. The second phase solves the VRP problem with the geographical information provided at the first phase.

#### GIS data clustering process

The geographical information contained at the cartographical databases is needed to compute realistic travel time and costs. However, the huge amount of data provided by these databases would make the VRP intractable in a real-world case due to the computation time. For example, computing the shortest path between two points at the Barcelona metropolitan area (e.g. Barcelona city and surroundings have  $3 \times 10^5$  geographical nodes and edges) takes one second in a standard personal computer using a special purpose software available in the market. A workload of 100 pick-up and delivery operation will require the computation of 10.000 shortest paths between origin and destination points.

The application *Shortest Path Generator* (SPG) has been developed to prepare the proper geographical information for the optimization problem. A simplification of the information provided by the GIS is obtained by SPG representing the minimum cost paths among the relevant geographical nodes. These nodes

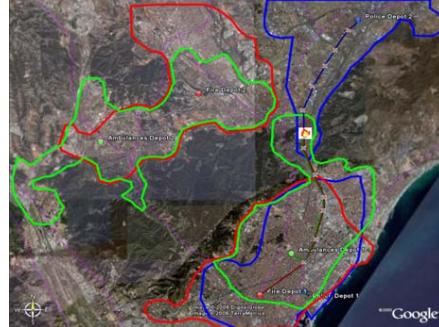


Figure 3: GIS data clustering for the emergency service management

represent either geographical points relative to the transportation orders, either vehicle current positions or relevant geographical points such as road junctions.

SPG generates two types of GIS data representation: a graph of shortest paths (used by the optimization module based on constraint programming) and the minimum distance matrix (used by the optimization module based on CPN and coverability tree evaluation). The reduced GIS representation depends on the VRP to be solved.

The emergency service management (Guimaraes et Al. 2006) is seen as a multi-depot VRP with heterogeneous fleet. In order to reduce the computation time at the optimization phase, GIS information is preprocessed by classifying the GIS nodes according to distance and travelling time from the different depots. Thus, each node is only reachable by a vehicle whose base is located at the depot which minimizes distance and travelling time, creating a cluster-based structure, as shown in Figure 3. The goal of this geographic data rearrangement is to reduce the multi-depot VRP problem to a set of single-depot problems, where only one for each service has to be solved when an accident takes place. Therefore, variables' domains are reduced, improving the response time of the optimal solution search algorithm. To perform this pre-process, a common heuristic A\* procedure is used to classify the geographic information into separated clusters. Moreover, a shortest path determination task is performed, so nodes are reordered into the cluster structure. Thus, when an accident notification is received, a shortest path approach from the depot to the accident scene is known, achieving an important calculation reduction. An uniform cost heuristic function is introduced in the clustering algorithm. The reason is that every single node is a potential accident node, so no particular direction may be pondered during the search. Each path is explored until the time service restrictions are not fulfilled, delimiting thus the cluster

edge. The uniform cost heuristic never overestimates the real cost of getting from one node to another. This property guarantees the optimality of all paths included in a cluster and ensure that no optimal solution may be discarded during the search (Russell et Al. 2003). As the algorithm always explores nodes with minimum associated cost at each iteration, it is possible to guarantee that the corresponding determined path from the depot to any node in the cluster is minimum. Since any suboptimal path to a particular node has a larger cost than the optimal one, it can be demonstrated that the suboptimal path will never be explored and the optimal solution will be returned.

For the freight transportation in metropolitan areas such an efficient GIS representation to determine the shortest path graph can not be achieved. In this case, the pick-up and delivery customer locations are not known in advance so the GIS information must provide the means to compute every possible shortest path among every customer. A layered GIS graph structure has been built for this purpose by considering that many shortest paths will use the same main roads connecting the origin and destination points. The number of layered graphs is determined by the road network at the working geographical area. Firstly, main cities and surroundings connected by highways are detected. Then, city's nodes and edges are recursively clustered in districts, malls, residential suburbs according to the main connecting roads and avenues. The number of possible shortest path between customers to be computed is significantly reduced with this layered GIS data clustering. For example, only 200 shortest paths (instead of the 10.000 required with GIS data flat representation) have to be computed if 100 pick-up operations in City A (100 from pick-up locations to the highway entry point) have to be delivered at City B (100 from the highway exit point to the delivery locations). Furthermore, the shortest path computation time is significantly reduced since the number of nodes/edges at the graph where they are computed is also lower. The Ant Colony approach (Dorigo et Al. 2003) is being used to obtain this layered representation of the GIS data. One interesting application of this information structure being explored is its application in the cluster-first/route-second heuristic approach to solve the VRP problem at the optimization phase (Dondo et Al. 2005).

#### **Transport resource allocation**

The optimization problem formulation varies depending on the VRP being faced. At freight transportation, the objective function will include the number of trucks needed to perform the requested transport operations and the constraints are the working hours, the resting periods and the delivery time windows among others. Two different approaches have been adopted to solve this discrete optimization problem, where the objective function is to minimize the transportation cost. The first

approach is based on Constraint Programming (Marriott and Stuckey 1998). Two elements are combined in the constraint satisfaction problem: the model where the decision variables, the problem constraints and the objective function are defined; the solution search algorithm which selects a value in the domain of each constrained variable, so that all the constraints are satisfied. In order to solve this problem a commercial solver based on constraint satisfaction technology is used. The second approach combines simulation and search techniques. The transport system is modelled with Coloured Petri Nets (Jensen 1997) and its coverability tree is used to evaluate the reachable states from a given initial state. However, the coverability tree of a logistic system can grow exponentially with respect to the number of events that could be fired in parallel. Heuristic techniques are used to reduce the search space and to drive the system into a desired final state (Narciso et al. 2003).

In the emergency service management, the objective is to assign resources to accidents according to the implicit restrictions of the problem, which falls into the Constraints Satisfaction Problem (CSP) category. These constraints define that the maximum fixed response time may not be violated by the problem solution and no area must rest uncovered, affecting resources' allocation. Therefore, all resources of a particular depot may not be assigned to a single accident, since the second restriction would not be satisfied. Constraint Satisfaction Problem (CSP) techniques are used to find a feasible solution. System constraints are related to the available resources and specially to time windows. The information obtained at clustering stage is used to reduce the solution search space. Furthermore, an accident may be associated to a particular depot with a minimal computational cost, since either the accident location belongs to a specific cluster or the distance from the accident node to close clusters' edge may be easily calculated. Thus, the solution search is simplified to explore only nearby clusters, reducing the search space. In some cases (e.g. accident occurred in an isolated area, traffic jam, etc.), a solution fulfilling all the imposed constraints may not be reached. Thus, time constraints may be relaxed or weighted and minimizing the response time becomes an objective of the arising optimization problem. The main aim is to allocate resources satisfying all the imposed constraints except the response time restriction, which turns into an objective function.

In both classes of the outlined VRP problems, the information available during the transport system operation is dynamically changing. For example, not all accident variables are known until the first emergency unit arrives to the accident scene. Furthermore, the information may arrive from different sources, containing a large uncertainty. In the case of freight, new transport operations are continuously arriving, so

the decision making tool must perform the proper route rescheduling. Moreover, roads state may change during operation from the moment a route is configured to its service ends, so shortest paths calculated at clustering stage may become non optimal. This situation may be determined using vehicles' GPS information, since their geographical position and movements are well-known. Thus, the corresponding route must be recalculated and, in some cases, resources should be reallocated. All this situations can be represented by the simulation model so the decision making tool can be properly designed and validated without the costs associated to the experimentation with the real-world transport system.

## CONCLUSIONS

The paper presents a CORBA distributed environment which has been developed to assist in the design and validation of real-time decision tools in transportation logistics problems. Because of its modular and distributed structure, this technological platform can be easily adapted to deal with different VRP problems by introducing and/or replacing the different application modules. A fleet simulator is used to test the decision tools designed to tackle VRP optimization problems. The simulation model can be easily adapted to face different VRP problems. The decision making tools are based on a two phases approach. First phase is a preprocessing work where the geographical information is analyzed and clustered to best fit the needs of the optimization approach used to solve the VRP problem. The computation time of the minimum cost paths between the transport operation location is reduced. Furthermore, the GIS data clustering can be also used to reduce the search space of feasible solutions at the optimization phase. In the second phase, transportation resources are allocated and the corresponding routes are calculated considering the shortest path structures obtained at the first phase. We relay on two approaches for modelling and solving the VRP: Constraint Programming and techniques where simulation and search are combined.

## ACKNOWLEDGMENTS

This work has been supported by the Department of Universities, Research and Information Society of the Catalonia Autonomous Government, by the Ministerio de Fomento and by the Spanish Ministry of Science and Technology (projects DPI2004-08056-C03-01 and DPI2004-08056-C03-02).

## REFERENCES

- Bektaş, T. (2006), The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solutions procedures, *Omega (The International Journal of Management Science)*, 34:209-219.
- Busquets, S., Vilalta, L., Piera, M.A., Guasch, T. and Narciso, M. (2005). "Specification of Metaheuristics in Colored Petri Nets Models to Tackle the Vehicle Routing Problem". in Proceedings of the International Mediterranean Modeling Multiconference, 2005. Marsella.
- Dondo, R., Cerdá, J. 2005. "A cluster-based optimization approach for the multi-depot heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows". *European Journal of Operational Research*. Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com). Elsevier B.V.
- Dorigo, M., Stützle, T. 2003. "The Ant Colony Optimization Metaheuristics: Algorithms, Application and Advances". Ed. Glover F., G.A. Kochenberger. *Handbook of Metaheuristics*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- Guimaraens, D., Ramos, JJ., Piera, M.A. and T. Guasch (2006). "A simulation based decision tool to coordinate emergency services in a road accident". *Summer Computer Simulation Conference*,. Calgary, Canada.
- Jensen, K. 1997 *Coloured Petri Nets: Basics Concepts, Analysis Methods and Practical Use*, vol. 1,2,3, Springer-Verlag, Berlin.
- Kelton, W.S., Sadowski, R.P. and Sadowski, D.A. 1998 "Simulation With Arena". McGraw-Hill.
- Marriott, K. and Stuckey, P. "Programming with Constraints: An Introduction". The MIT Press. 1998.
- Narciso, M.E., Piera, M.E. and Guasch, A. (2003). A Knowledge Representation Approach Suitable to Support Heuristic Search Methods. *Frontiers in Artificial Intelligence and Applications: Artificial Intelligence Research and Development*, 100:397-408, IOS Press.
- Nexus Geographics. 2004 "NGRouteNet: Manual Técnico".
- OMG, Inc. 2004. Object Management Group, Inc., Common Object Request Broker Architecture: Core Specification,
- Papows, J. 2001. "Route Optimization as Energy Policy". *Transport Topics*, June.
- Roy, J. 2001. "Recent Trends in Logistics and the Need for Real-Time Decision Tools in the Trucking Industry." 34<sup>th</sup> Annual Hawaii International Conference in System Sciences.
- Russell, S., Norvig P. (2003). *Artificial Intelligence: a Modern Approach*, 2nd. edition, Prentice Hall.
- Silva, M. and Valette, R. 1989 "Petri Nets and Flexible Manufacturing", Lecture Notes in Computer Science, vol. 424, Advances in Petri Nets.
- Wachs, M. 2002. "Fighting traffic congestion with information technology". *Issues in Science and Technology*.
- Zimmermann, A., Dalkowski, K. and Hommel, G. 1996 "A Case Study In Modeling And Performance Evaluation Of Manufacturing Systems Using Colored Petri Nets", in Proceedings of the 8th European Simulation Symposium (ESS '96), pp. 282-286.

## **Un entorno de simulación para el diseño de herramientas de toma de decisiones en logística de transporte**

D. Guimarans, J. J. Ramos, M. À. Piera

Dept. de Telecomunicaciones e  
Ingeniería de Sistemas - LogiSim  
Universitat Autònoma de Barcelona  
08193 Bellaterra, Barcelona  
Daniel.Guimarans, JuanJose.Ramos,  
MiquelAngel.Piera@uab.cat

A. Guasch

Dept. de Ingeniería de Sistemas y  
Control Automático - LogiSim  
Universitat Politècnica de Catalunya  
08028 Barcelona  
Toni.Guasch@upc.cat

### **Resumen**

Durante los últimos años, la industria del transporte se ha visto obligada a adaptarse a las nuevas necesidades de los sistemas logísticos y de producción. El suministro *Just-In-Time* y una respuesta rápida y eficiente a las demandas de los clientes son algunas de las razones por las que la industria del transporte ha reconocido la necesidad de incorporar algunas de las nuevas tecnologías de la información y la comunicación, como los sistemas de posicionamiento global (GPS), el intercambio electrónico de información (EDI) o Internet. Estas tecnologías pueden mejorar la capacidad de optimizar las operaciones de transporte, ya que proporcionan la información necesaria requerida para la toma de decisiones en tiempo real. Este artículo presenta la plataforma que se está desarrollando con el objetivo de ayudar en el diseño de herramientas de toma de decisiones en tiempo real para la industria del transporte.

### **1. Introducción**

En un contexto cada vez más competitivo y globalizado de la producción industrial, basado en una economía orientada a los servicios, la posibilidad de disponer de sistemas de transporte capaces de responder eficientemente a la demanda será un factor primordial para la

competitividad de la industria y de las empresas de servicios. La logística del transporte es un ejemplo típico de entorno industrial altamente complejo donde la gestión del tiempo es crítica: se debe conseguir una asignación óptima de los recursos disponibles mientras se trabaja con peticiones, condiciones y restricciones que cambian dinámicamente y de forma continua. Usualmente, este tipo de problemas logísticos se conoce como *Problema de enruteamiento de vehículos* (*Vehicle Routing Problem - VRP*), donde el objetivo es la distribución eficiente de una flota de vehículos cubriendo todas las operaciones de transporte demandadas, a la vez que se reducen los costes totales, expresados como una combinación de distancia, tiempo y coste económico.

El transporte de mercancías en las áreas metropolitanas merece especial atención, debido al gran número de deficiencias que presenta hoy en día y su correspondiente contribución a la creciente congestión del tráfico en zonas urbanas. Dicha congestión se ha convertido en un preocupación creciente en los últimos años [14]: no sólo implica una mayor cantidad de tiempo invertido durante los desplazamientos en hora punta, sino que también contribuye a la degradación de la calidad del aire. La optimización del transporte en áreas metropolitanas permite reducir los correspondientes costes asociados [11], contribuyendo a su vez a la reducción de la congestión del tráfico y a un

incremento de la fiabilidad del servicio.

Así, la elevada complejidad del VRP supone un importante objetivo para los métodos de optimización [1]. Las herramientas de ayuda a la toma de decisiones en tiempo real deben combinar la información proporcionada por los sistemas GPS, las tecnologías GIS (*Geographic Information System*), el intercambio de información on-line y algoritmos eficientes de optimización para poder afrontar las necesidades particulares de cada problema. Estas nuevas tecnologías abren la puerta al diseño de sistemas de planificación capaces de manejar correctamente toda la información disponible. Este artículo presenta una plataforma tecnológica que integra dichas tecnologías como soporte para el diseño de herramientas de toma de decisiones en tiempo real en logística de transporte. Esta plataforma tiene una arquitectura de computación distribuida orientada a poder incorporar las características propias de los diferentes problemas incluidos en la categoría VRP. Las herramientas de decisión deben reaccionar en tiempo real, especialmente en áreas metropolitanas, donde la duración de las rutas es relativamente corta y cada nueva petición de servicio debe ser atendida en un período de tiempo muy restrictivo. Asimismo, el artículo presenta una aproximación en dos fases para afrontar posibles aplicaciones reales: una fase de preprocessamiento donde la información geográfica es tratada y reordenada según las necesidades del VRP a resolver; una fase de optimización donde se asignan los recursos disponibles y se definen las correspondientes rutas. Probar y mejorar un sistema complejo de estas características en un entorno real sería inefficiente y extremadamente caro. La plataforma presentada integra un sistema de simulación de flotas capaz de representar los problemas de transporte a diferentes niveles de complejidad. La siguiente sección introduce la arquitectura de la plataforma, donde el entorno de simulación proporciona la información de la flota de transporte. Las secciones siguientes describen el modelo del sistema y las herramientas que procesan la información geográfica requerida para la toma de decisiones, describiendo las características básicas de

los algoritmos de optimización propuestos para abordar los problemas VRP. Finalmente, se apuntan algunas conclusiones y líneas de trabajo futuras.

## 2. Arquitectura del entorno

El proyecto tiene una aproximación multidisciplinar, ya que la arquitectura integra diferentes tecnologías en cuanto a software, lenguajes de programación y sistemas operativos. La figura 1 ilustra la arquitectura del sistema. Este incluye cinco módulos principales: el *Sistema de Información Geográfica (GIS)*, el simulador de flotas, las herramientas de toma de decisiones, las aplicaciones de visualización y el sistema de localización de vehículos. El entorno ha sido diseñado como una plataforma distribuida basada en CORBA [10] para simplificar la coordinación y la comunicación entre los módulos de la aplicación. La completa modularidad de esta arquitectura también permite reemplazar módulos para responder a las necesidades de simulación o del caso de estudio de gestión de flotas: por ejemplo, el transporte de mercancías en áreas metropolitanas [2] o la gestión de los servicios de emergencia en accidentes de tráfico [5].

El Sistema de Información Geográfica gestiona toda la información estática y dinámica presente en la aplicación. La información estática está compuesta por los datos geográficos, proporcionados por una base de datos cartográfica, y la información geográfica filtrada, extraída de la anterior para generar una representación de la red de carreteras en función de las necesidades del módulo de toma de decisiones. La información dinámica está compuesta por los datos relativos a la estructura de la flota (características de los vehículos, base a la que pertenecen, estado de servicio, etc.), la posición geográfica de cada vehículo y la localización de las operaciones de transporte, así como sus características, que dependen del VRP que está siendo tratado. Por ejemplo, las restricciones de capacidad, dimensiones y de las ventanas temporales de servicio en el caso del transporte de mercancías o el número de vehículos implicados o de víctimas en la gestión

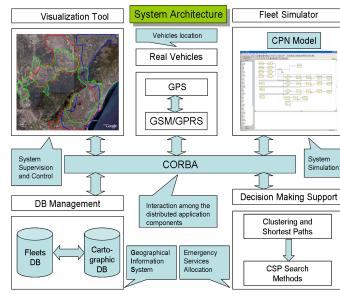


Figura 1: Arquitectura del entorno de simulación distribuido

de los servicios de emergencia.

El módulo de visualización está constituido por una aplicación gráfica donde se representan sobre un mapa los movimientos de los vehículos y las rutas configuradas. Las posiciones de los vehículos son generadas y registradas en la base de datos por el simulador de flotas durante las fases de diseño y desarrollo, mientras que su localización será proporcionada por los sistemas de posicionamiento global incorporados en los vehículos durante las operaciones en situaciones reales.

El objetivo del módulo de soporte a la toma de decisiones es la determinación de una solución factible para el problema tratado, que en todos los casos corresponde a una instancia particular del VRP. Incluidas en las técnicas de resolución se encuentran los procedimientos heurísticos y metaheurísticos, ya que ningún algoritmo exacto puede garantizar que se encuentre una solución óptima en un tiempo de cálculo razonable, debido al crecimiento exponencial de estados que presentan este tipo de problemas.

### 3. Modelo de la flota de transporte

El modelo de la flota de transporte se utiliza en la fase de desarrollo para probar la eficiencia de las rutinas de optimización diseñadas. Dicho modelo de simulación tiene dos funcio-

nes principales: la generación de las cargas de trabajo en forma de peticiones de transporte para el sistema y la simulación de las rutas asignadas por el módulo de optimización.

El modelo del sistema de transporte debe ser fácilmente adaptable a las diferentes variantes del problema de enruteado de vehículos, siendo claros ejemplos el transporte de mercancías y la gestión de los servicios de emergencia. Así, el desarrollo del modelo no ha sido guiado por una configuración particular de un problema de estas características. En su lugar, ha sido diseñado de manera que la estructura del modelo permita una parametrización adaptable en función del problema VRP que se desee tratar y sus características: recursos para el transporte, capacidad de los vehículos, número de bases existentes, particularidades de la red de transporte, etc.. De esta manera, se hace necesaria la utilización de una metodología de modelado que permita representar conjuntamente y de forma clara la estructura del sistema y su comportamiento dinámico. El formalismo de las Redes de Petri Coloreadas (*Coloured Petri Nets - CPN*) [6] ha demostrado ser una técnica de modelado muy útil para representar las características de cualquier tipo de sistema orientado a eventos discretos, ya que presenta algunas ventajas como la capacidad de concentrar y representar simultáneamente la estructura estática y el comportamiento dinámico del sistema [13], así como la disponibilidad de técnicas de análisis matemático para la validación de modelos [15]. Por otro lado, su naturaleza gráfica proporciona una representación intuitiva y fácilmente interpretable de la estructura del sistema y su comportamiento dinámico.

El modelo CPN del sistema se muestra en la figura 2. Las peticiones de transporte se generan en el instante inicial siguiendo un modelo estocástico, aunque pueden generarse nuevas peticiones durante la simulación. En la dinámica del sistema representado por este modelo se pueden distinguir claramente dos partes: la generación de las peticiones de transporte y la simulación de los movimientos de los vehículos de la flota en la red de carreteras.

El procesado de una petición de transporte

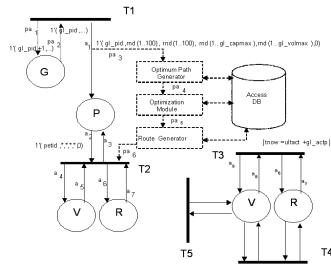


Figura 2: Modelo CPN del sistema de transporte donde se muestra su interacción con el módulo de información geográfica.

consiste, básicamente, en decidir que vehículo es asignado y, en consecuencia, en qué ruta debe ser incluida la petición. Estas decisiones son tomadas por el módulo de la aplicación descrito en la siguiente sección. Los movimientos de los vehículos de la flota corresponden a la transición T3. Cuando esta transición se dispara, el estado de la flota cambia y las peticiones de transporte son atendidas cuando los vehículos llegan a los puntos de carga/descarga (transición T4). Asimismo, el modelo permite la simulación de diferentes tipos de incidencias (averías de los vehículos, pérdidas de la señal de localización, etc.), representadas mediante el disparo de la transición T5. Toda la información generada por el simulador se almacena en el módulo GIS, ya que todos los datos del sistema son compartidos por los módulos de la aplicación mediante el acceso a las bases de datos correspondientes. Para la implementación del modelo de simulación se ha utilizado la aplicación comercial Arena [7].

#### 4. Módulo de toma de decisiones

El objetivo del VRP es servir a un conjunto de clientes con demandas conocidas utilizando aquellas rutas que provocan un coste mínimo, frecuentemente iniciadas y finalizadas en la misma base. Las instancias del VRP están

englobadas en la categoría de los problemas NP completos, con un crecimiento exponencial de estados a explorar en función del número de variables. Para su resolución, se sugiere una aproximación en dos fases en función de los criterios de optimización. En una primera fase, la información GIS se procesa con el objetivo de reducir significativamente la carga computacional en el cálculo de los caminos mínimos, necesario para la determinación de las rutas óptimas. Los datos proporcionados por el sistema GIS se clasifican en un conjunto de *clusters* dependientes del tipo de problema VRP que se desea resolver (una sola base o multi-depot, flotas homogéneas o heterogéneas, rutas con una única visita o múltiples visitas, etc.), mientras se mantiene de forma exacta toda la información referente a tiempos de viaje y costes entre los puntos de carga y descarga. En la segunda fase se resuelve el problema VRP con la información geográfica obtenida durante la primera fase.

##### 4.1. Preproceso de la información GIS

La información geográfica contenida en las bases de datos cartográficas es necesaria para calcular costes y tiempos de ruta realistas. Sin embargo, la ingente cantidad de información aportada por este tipo de bases de datos convierte en intratable cualquier instancia de un problema VRP en una situación real debido a la elevada cantidad de tiempo de cómputo requerida. Por ejemplo, el cálculo de una ruta mínima entre dos puntos situados en el área metropolitana de Barcelona (la ciudad de Barcelona y alrededores cuenta con  $3 \cdot 10^5$  nodos geográficos y sus correspondientes arcos de unión) necesita un segundo en un ordenador personal estándar usando una aplicación comercial específica. Una carga de trabajo equivalente a 100 peticiones de servicio de recogida y entrega requiere el cálculo de 10.000 rutas mínimas entre los puntos de origen y destino.

La aplicación de generación de caminos mínimos, incluida en el módulo de soporte a la toma de decisiones, se ha desarrollado con la finalidad de preparar la información geográfica en función del problema tratado. Esta aplicación proporciona una simplificación de la

información contenida en las bases de datos GIS, obteniendo una representación de los caminos de mínimo coste entre los nodos geográficos relevantes, determinados por las peticiones de transporte, las posiciones instantáneas de los vehículos y puntos relevantes de la red de carreteras.

La aplicación de generación de caminos mínimos genera dos tipos de representación de la información GIS: un grafo de caminos mínimos, utilizado por el módulo de optimización basado en satisfacción de restricciones, y la matriz de distancias mínimas, usada en el módulo de optimización basado en modelos CPN y la exploración del correspondiente árbol de cobertura. La representación escogida depende de la instancia del problema VRP que debe abordarse.

La gestión de los servicios de emergencia [5] corresponde un problema VRP considerado como multi-depot con una flota heterogénea y ventanas temporales de servicio muy restrictivas. Con el propósito de reducir el tiempo de cómputo en la fase de optimización, la información GIS es procesada clasificando los nodos en función de la distancia y el tiempo de desplazamiento en regiones localizadas alrededor de las diferentes bases, como se muestra en la figura 3. Así, un nodo sólo es accesible por los vehículos propios de aquellas bases que minimizan el tiempo y la distancia empleados para desplazarse entre los dos puntos, creando una estructura de *clusters*. El objetivo de esta reordenación de los datos geográficos es reducir un problema VRP multi-depot a un conjunto de problemas VRP con una única base, de manera que cuando se produce un accidente sólo sea necesario resolver una de estas instancias para cada servicio de emergencia. De esta forma, los dominios de las variables de decisión quedan reducidos, mejorando el tiempo de respuesta de los algoritmos de búsqueda empleados para hallar la solución óptima. Además, junto con la reordenación de la información geográfica se lleva a cabo una tarea de cálculo de caminos mínimos dentro de cada *cluster*. Así, cuando se recibe la notificación de un accidente, se conoce una aproximación del camino mínimo entre la base y el nodo donde

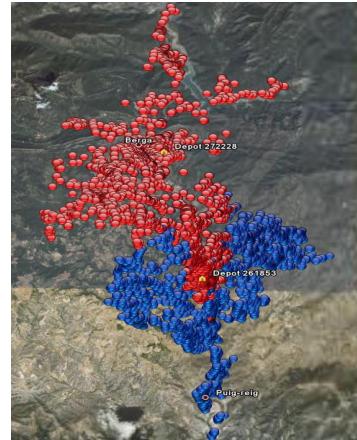


Figura 3: Ejemplo de dos clusters en una zona rural. Se puede apreciar la distribución de los nodos seleccionados alrededor de las respectivas bases.

se ha producido el siniestro, consiguiendo una importante reducción del tiempo de cómputo.

Para el proceso de los datos geográficos y su clasificación en dicha estructura de *clusters*, se emplea un procedimiento de búsqueda común A\* basado en el empleo de funciones heurísticas que mejoran su eficiencia. En este caso, se emplea una función heurística de coste uniforme, con valor nulo, ya que un accidente se puede producir en cualquier nodo presente en la red y, por tanto, no puede ponderarse ninguna dirección de búsqueda concreta durante la clasificación de los nodos. Cada camino originado en la base es explorado hasta que las restricciones temporales del servicio no se cumplen, quedando así delimitada la frontera del *cluster*. Una característica de la función heurística de coste uniforme radica en el hecho que no sobreestima nunca el coste real del camino entre dos nodos. Igualmente, se trata de una función decreciente y, por tanto, los costes acumulados a lo largo de la exploración siempre aumentarán a medida que avance la búsqueda. Estas dos propiedades garantizan que todos los ca-

minos incluidos en la estructura de un *cluster* son óptimos y que ningún camino óptimo será descartado durante el proceso [12]. Asimismo, el algoritmo siempre explora aquellos nodos con un valor menor del coste acumulado en cada iteración, hecho que permite garantizar que el camino entre la base y cualquier nodo del correspondiente *cluster* es mínimo. Debido a que cualquier camino subóptimo a un nodo concreto tiene un coste mayor que la ruta óptima, se puede demostrar que cualquier camino subóptimo no se explorará nunca y que la solución devuelta será óptima.

Para el problema de transporte de mercancías en áreas metropolitanas es difícil encontrar una clasificación adecuada de la información GIS tan eficiente como en el problema anterior. En este caso, la localización de las peticiones de recogida y entrega no se conocen previamente, así que la información geográfica disponible debe aportar los rudimentos de cálculo del camino mínimo entre dos visitas cualesquiera. Como solución, se plantea una estructura de capas formada por grafos definidos a partir del hecho que la mayoría de rutas entre dos puntos se realiza por vías de comunicación principales. El número de capas queda determinado en función de la configuración de la red de carreteras del área tratada. En primera instancia, se detectan los núcleos principales de población y se determinan las principales vías de unión entre ellos. Seguidamente, los nodos y arcos correspondientes a dichos núcleos se clasifican recursivamente en estructuras de menor tamaño (distritos, barrios, etc.) siguiendo las conexiones principales entre ellas. De esta manera, el número de posibles caminos mínimos que deben ser calculados ante la llegada de una petición se ve reducida de forma significativa. Por ejemplo, únicamente se deberán calcular 200 caminos mínimos en un caso con 100 peticiones de recogida en una ciudad y entrega en otra ciudad, en lugar de las 10.000 rutas que deberían calcularse utilizando la información GIS que no ha sido procesada. Este hecho se debe a que sólo se tienen en cuenta las 100 rutas entre el punto de entrada o salida de las ciudades y los nodos donde se localizan las diferentes visitas. Igualmente, el tiempo em-

pleado en el cómputo de los caminos mínimos se reduce sustancialmente, ya que el número de nodos y arcos presentes en el grafo es menor. Para obtener la representación de los datos GIS en forma de estructura de capas se utiliza una aproximación basada en una metaheurística de colonia de hormigas (*Ant Colony - ACO*) [4]. Una aplicación interesante de esta estructuración de la información corresponde a las estrategias *cluster-first/route-second* para solucionar los problemas VRP en la fase de optimización [3].

#### 4.2. Asignación de recursos

La formulación del problema de optimización difiere dependiendo del tipo de VRP que se aborde. En el transporte de mercancías, la función objetivo incluirá el número de camiones que se necesitan para satisfacer todas las peticiones existentes, mientras que las restricciones reflejarán los horarios de trabajo, de descanso y las ventanas temporales de entrega, entre otros. Se han adoptado dos aproximaciones diferentes para resolver el problema de optimización discreta presentado, donde el objetivo es reducir los costes de transporte. La primera estrategia está basada en métodos de programación de restricciones [8], en la que se combinan dos elementos: el modelo, donde se definen las variables de decisión, las restricciones del problema y la función objetivo; el algoritmo de búsqueda utilizado para su resolución, que selecciona un valor en el dominio de cada variable restringida, de manera que se cumplan todas las restricciones. La segunda aproximación consiste en una combinación de técnicas de simulación y de búsqueda. El modelo de transporte se representa mediante el formalismo CPN y se utiliza el árbol de cobertura que de él se deriva para evaluar los estados factibles que se obtienen a partir de un estado inicial dado. Sin embargo, el árbol de cobertura de un sistema logístico puede crecer exponencialmente en función del número de eventos que se pueden disparar en paralelo. Por esta razón, se aplican técnicas basadas en heurísticas para reducir el espacio de búsqueda y conducir al sistema hacia el estado final deseado [9].

En la gestión de servicios de emergencia, el objetivo consiste en asignar de forma adecuada los recursos disponibles a los accidentes existentes, de acuerdo con las restricciones implícitas del problema, englobado en la categoría de problemas de satisfacción de restricciones (*Constraints Satisfaction Problem - CSP*). Estas restricciones determinan que el tiempo máximo de respuesta no debe ser superado por la solución dada e impiden que queden regiones desprovistas de recursos. En consecuencia, no se pueden asignar todos los recursos disponibles en una base a un único accidente, ya que no se cumpliría la segunda condición. Para resolver un problema de estas características se utilizan técnicas CSP, donde se utiliza la información obtenida durante el procesado de los datos geográficos para reducir el dominio de las variables de decisión. Por otro lado, un accidente puede ser directamente asignado a una base determinada con un coste computacional mínimo, ya que el nodo donde se ha producido pertenece a un *cluster* concreto o, en todo caso, se puede calcular el camino mínimo entre el accidente y la frontera del *cluster* más cercano. Así, la búsqueda de la solución se reduce a explorar los *clusters* más cercanos al punto donde se ha producido el accidente, reduciendo el espacio de búsqueda y el coste computacional. Sin embargo, eventualmente no es posible hallar una solución que satisfaga las condiciones temporales impuestas (accidentes ocurridos en zonas rurales, tráfico colapsado, etc.). En este caso, las restricciones temporales pueden ser relajadas o ponderadas, mientras se mantiene como objetivo la minimización del tiempo de respuesta. De esta forma, el objetivo consiste en asignar los recursos de manera que se satisfagan todas las condiciones impuestas excepto la ventana temporal de respuesta, que queda asimilada en la minimización de la función objetivo.

En ambos casos de estudio, la información disponible durante las operaciones de los sistemas de transporte cambia dinámicamente. Asimismo, la información disponible llega de forma continua desde diferentes fuentes, conteniendo un importante factor de incertidumbre. Por otro lado, la situación del tráfico puede

cambiar durante el transcurso de las operaciones de transporte, desde el momento en que la ruta es asignada hasta que finaliza el servicio, de manera que las rutas calculadas pueden perder su condición de optimidad. Este tipo de situaciones podrían ser detectadas utilizando la información recibida desde los dispositivos GPS de los vehículos, ya que permiten determinar su posición y los movimientos realizados. Así, las correspondientes rutas deben ser nuevamente calculadas y, en algunas ocasiones, los vehículos tendrán que ser reasignados. Todas estas situaciones pueden ser representadas mediante el módulo de simulación, de forma que las herramientas de soporte a la toma de decisiones pueden ser diseñadas de forma apropiada y validadas sin los costes asociados a la experimentación en un sistema de transporte real.

## 5. Conclusiones

Este artículo presenta una plataforma distribuida basada en CORBA desarrollada para el diseño, implementación y validación de herramientas de soporte a la toma de decisiones en problemas de logística y transporte. Debido a su modularidad y su estructura distribuida, esta plataforma puede ser fácilmente adaptada para afrontar diferentes instancias de problemas VRP, mediante la introducción o sustitución de los diferentes módulos que la componen. En el proceso de validación se utiliza un simulador de flotas para determinar la eficiencia de las herramientas diseñadas. Dicho simulador está basado en un modelo que puede ser parametrizado en función del problema VRP que se desea abordar.

Las herramientas de soporte a la toma de decisiones están basadas en una aproximación que consta de dos fases. En la primera de ellas, los datos geográficos son procesados, mediante su análisis y clasificación en una estructura acorde con las necesidades del problema VRP objeto de estudio. A su vez, con este proceso se reduce el tiempo que será necesario para calcular los caminos mínimos entre las localizaciones correspondientes a las diferentes peticiones de transporte. Igualmente, esta reorde-

nación de la información geográfica puede ser utilizada para reducir el dominio de las variables de decisión, delimitando así el espacio de búsqueda en la resolución del problema. En la segunda fase, los recursos son asignados y se calculan las correspondientes rutas, considerando las estructuras de caminos mínimos obtenidas durante el preprocess. Actualmente, se está trabajando en dos aproximaciones diferentes para modelar y resolver las diferentes instancias del problema VRP: programación con restricciones y la combinación de técnicas de simulación y búsqueda.

#### Agradecimientos

Este trabajo ha sido realizado gracias al apoyo del Departament d'Universitats, Recerca i Societat de la Informació de la Generalitat de Catalunya, del Ministerio de Fomento y del Ministerio de Ciencia y Tecnología (proyectos DPI2004-08056-C03-01 y DPI2004-08056-C03-02).

#### Referencias

- [1] Bektas, T., *The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solutions procedures*, The International Journal of Management Science, 34, 2006.
- [2] Busquets, S., Vilalta, L., Piera, M.A., Guasch, A. and Narciso, M., *Specification of metaheuristics in Colored Petri Nets models to tackle the Vehicle Routing Problem*, International Mediterranean Modeling Multiconference, Marsella (Francia), 2006.
- [3] Dondo, R. and Cerdá, J., *A cluster-based optimization approach for the multi-depot heterogeneous fleet vehicle routing problem with time windows*, European Journal of Operational Research, 176, 2007.
- [4] Dorigo, M. and Stützle, T., *The Ant Colony optimization metaheuristics: algorithms, application and advances*, Ed. Glover, F. and Kochenberger, G.A., *Handbook of Metaheuristics*, Kluwer Academic Publishers, Boston, 2003.
- [5] Guimaraes, D., Ramos, J.J., Piera, M.A. and Guasch, A., *A simulation based decision tool to coordinate emergency services in a road accident*, Summer Computer Simulation Conference, Calgary (Canadá), 2006.
- [6] Jensen, K., *Coloured Petri Nets: Basic Concepts, Analysis Methods and Practical Use*, vol. 1,2,3, Springer-Verlag, Berlín, 1997.
- [7] Kelton, W.S., Sadowski, R.P. and Sadowski, D.A., *Simulation with Arena*, McGraw-Hill, 1998.
- [8] Marriott, K. and Stuckey, P., *Programming with constraints: an introduction*, MIT Press, 1998.
- [9] Narciso, M.E., Piera, M.A. and Guasch, A., *A knowledge representation approach suitable to support heuristic search methods frontiers in Artificial Intelligence and applications*, Artificial Intelligence Research and Development, 100, 2003.
- [10] OMG, Inc., *Common Object Request Broker Architecture: Core Specification*, 2004.
- [11] Papows, J., *Route optimization as energy policy*, Transport Topics, June 2001.
- [12] Russell, S. and Norvig, P., *Artificial Intelligence: a modern approach*, Prentice-Hall, 2003.
- [13] Silva, M. and Valette, R., *Petri Nets and flexible manufacturing*, Lecture Notes in Computer Science, vol. 424, Advances in Petri Nets, 1989.
- [14] Wachs, M., *Fighting traffic congestion with information technology*, Issues in Science and Technology, 2002.
- [15] Zimmerman, A., Dalkowski, K. and Hommel, G., *A case study in modeling and performance evaluation of manufacturing systems using Colored Petri Nets*, European Simulation Symposium, Génova (Italia), 1996.

## A TWO-STAGE APPROACH FOR THE EMERGENCY SERVICES COORDINATION PROBLEM IN A ROAD ACCIDENT

D. Guimaraens, J.J. Ramos  
Telecommunication and System Engineering Department – LogiSim,  
School of Engineering, ETSE,  
Universitat Autònoma de Barcelona,  
08193 Bellaterra, Barcelona, Spain.  
{Daniel.Guimaraens, JuanJose.Ramos}@uab.cat

### ABSTRACT

The coordination of emergency services in road accidents is essential to ensure a quick intervention in critical situations. The number and kind of resources assigned must be determined dynamically, as not all the accident variables are known when an alert is received. Moreover, vehicles and intervention units have to be assigned after the accident takes place. Thus, the decision making process has to be done within the intervention time window and response time becomes critical. This paper describes the major characteristics of a cluster first-route second optimization algorithm suggested to tackle the emergency services coordination problem in order to reduce their response time in critical situations. This algorithm combines heuristic methods and Constraint Satisfaction Problem techniques in a two-stage procedure: a first phase where the real geographic data is rearranged to ensure the time constraints fulfillment and a second one, which consists on available resources' allocation and optimal routes assignment.

### INTRODUCTION

The complexity of tasks carried out in a road accident requires the intervention of multidisciplinary rescue services, i.e. Police Service, Medical Service and Fire Service, and their coordination is a key issue to ensure an effective intervention. Therefore, correct management of these three heterogeneous fleets is necessary to distribute units and respond to dynamically changing real needs.

Such a coordination is highly complex, since not all the information relative to accident variables is known from the very beginning and the available information usually contains uncertainty. Furthermore, although some collaboration protocols are defined, they only regulate services interaction at the accident scene, but they not include general norms about resources' assignation (Samur, 2006). Centralized communication, coordination and decision tasks would improve rescue services response, reducing rescue time and optimizing the available resources.

Attending an accident basically consists of deciding which resources are assigned and from which depot they have to be selected, taking into account all the accessible information and that the objective is to reduce the route travel time. The allocation task is performed using the fleet variables, including available units type and state, but not considering vehicles crew assignment.

Time restrictions are naturally imposed due to the reaction time is primordial to save possible accident victims. Thus, the routes planning expended time becomes critical, since they have to be assigned within intervention's time window. Road network configuration and depots (fleet bases) distribution are also important issues that determine the emergency fleets' capability to respond a concrete situation.

The number and kind of mobilized resources in a particular situation depends on the accident variables, such as the number of involved vehicles, traffic ratio on the road and time when the accident takes place or whether there are injured victims or not. Furthermore, resources are dynamically assigned since information flow is continuous from the moment the accident occurs until services finish their action.

A simulation platform (Ramos et al., 2006) has been designed as a distributed application based on CORBA (OMG, 2004) to simplify the coordination and communications between modules. A *Geographical Information System (GIS)* module manages all the static and dynamic geographical data in the system, such as depots location and the road network configuration (Ramos et al., 2005), used to compute realistic travel time and costs. However, the huge amount of data provided by these databases would make the problem, which falls into the Vehicle Routing Problem (VRP) category (Bektaş, 2006), intractable in a real-world case due to the computation time.

Due to the NP-Hardness of the problem, no exact algorithm can be assured to find optimal solutions within reasonable computing time, so near all the solution techniques for this problem are heuristics (Laporte et al., 2000) and metaheuristics (Glover and Kochenberger, 2003). These methods has demonstrated being effective in the search of good solutions within acceptable calculation time, though

solution's global optimality may not be guaranteed in many cases.

This paper presents a cluster first-route second (Dondo and Cerdá, 2007) two-stage approach to tackle the emergency services coordination problem. In the first phase, introduced in the next section, the GIS data is pre-processed and clustered in order to reduce the significant computing burden when shortest paths have to be calculated in order to find optimal routes, while keeping exact information about travel time. The following section describes the second phase, where the different units are allocated and the geographical information provided at the first phase is used to determine the optimal routes. Finally, some approach's limitations are outlined in the last section.

#### CLUSTERING PRE-PROCESS

Clustering geographic data has demonstrated to be an effective strategy to tackle routing problems in logistics (Dondo and Cerdá, 2007), transportation (Anily et al., 1999) and network communications (Frey and Görzen, 2005) when all the information about visit points is known. Nonetheless, in the case of road accidents in a realistic scenario the information remains unknown during the clustering process, becoming available when the accident takes place. So, a different clustering strategy should be adopted in order to reduce the computation time at the solution stage.

The emergency service management may be seen as a multi-depot VRP with heterogeneous fleet (Guimaraes et al., 2006). The goal of the geographic data rearrangement is to reduce such a multi-depot VRP approach to a set of single-depot VRP problems, where only one for each emergency service has to be solved when an accident occurs. Therefore, variables' domains are reduced, improving the response time of the optimal solution search algorithm.

With this objective, GIS information is preprocessed by classifying the GIS nodes according to distance and traveling time from the different depots. Thus, each node is only reachable by a vehicle whose base is located at the depot which minimizes distance and traveling time, creating a cluster-based structure. At this phase, a common heuristic A\* procedure (Russell and Norvig, 2003) is used to classify the geographic information into separated clusters.

A\* procedure is optimally efficient, i.e. no other search algorithm guarantees the expansion of less nodes than A\* with an appropriate heuristic function. The algorithm evaluates nodes during the search combining the accumulated cost for reaching the node and the estimated distance from the node to the goal. Thus, A\* uses a cost estimation of the better solution through the evaluated node to decide the search direction. Since clustering stage's objective is to minimize distance and traveling time, the better strategy consists on expand nodes with minimal evaluation function value.

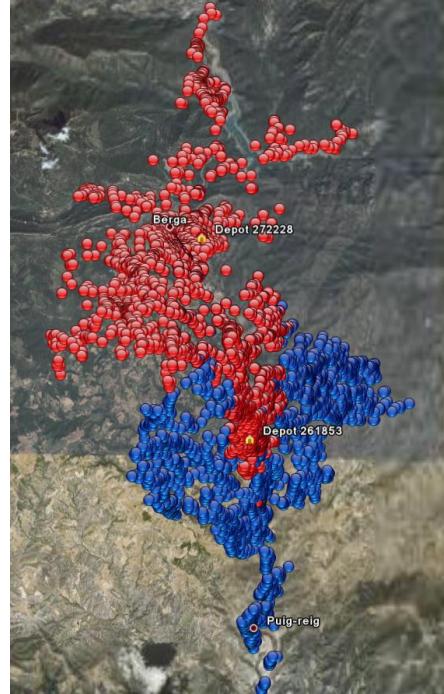


Figure 1: Example of clusters generated during pre-processing stage for two different emergency services in a rural area.

In the case of emergency services problem, where a goal node associated to an accident is not defined in the pre-processing stage, traveling distance and time estimations from a concrete depot to an accident may not be done. Therefore, every single node should be considered as a potential accident node, so no particular direction may be pondered during the search in the clustering process. For this reason, an uniform null cost heuristic function is introduced in the clustering algorithm. According to this strategy, each path is explored using only the traveling accumulated cost until the time service restrictions are not fulfilled, delimiting thus the cluster edge, as shown in Figure 1.

The uniform null cost heuristic never overestimates the real cost of getting from one node to another, being so an admissible heuristic. In addition, the uniform null cost heuristic function is consistent, since evaluation function's value monotonically increases during the search. These properties guarantee the optimality of all paths included in

a cluster and ensure that no optimal solution may be discarded during the search (Russell and Norvig, 2003).

As the algorithm always explores nodes with minimum associated cost at each iteration, it is possible to assure that the corresponding determined path from the depot to any node in the cluster is minimum. Since any suboptimal path to a particular node has a larger cost than the optimal one, it can be demonstrated that the suboptimal path will never be explored and the optimal solution will be returned. Thus, a shortest path determination task is performed during the process and nodes are reordered into the cluster structure. So, when an accident notification is received, a shortest path approach from the depot to the accident scene is known, achieving an important calculation reduction.

The clustering pre-process stage provides a set of separated cluster structures, where geographic data is rearranged according to shortest path graphs. Thus, solution's computation time is reduced since it should be calculated over a reduced graph instead of a complete one. These graphs follow a radial configuration, since they contain information about traveling distance and time from the corresponding cluster's depot to all possible geographical nodes included within the cluster. This characteristic allows to simplify routes planning from the selected depot to the accident scene, reducing thus the wasted calculation time within the intervention's time window. On the other hand, such a configuration does not include neither data concerning point to point movements inside clusters nor information about returning routes from the accident scene to the corresponding depot. However, this kind of routes scheduling may be done once resources are allocated and a first response to accident needs has been given within the intervention's critical time window. In this case, a different heuristic function should be used to take into account route's characteristics, as well as an appropriate planning to respond service's protocols.

#### EMERGENCY SERVICES ALLOCATION

##### Routes Planning

The fact that Medical and Fire Services must return to their origin depots before attending another accident simplifies the routing problem, so two-nodes or at most three-nodes routes should be calculated, as shown in Figure 2. On the other side, Police Service can perform different actions in several accidents before returning to their origin depot, although a new destination cannot be assigned until their service at the accident scene has ended. In this special case, a police vehicle returning to its base can be interpreted as a new depot with a single vehicle in order to reallocate services on runtime simulation.

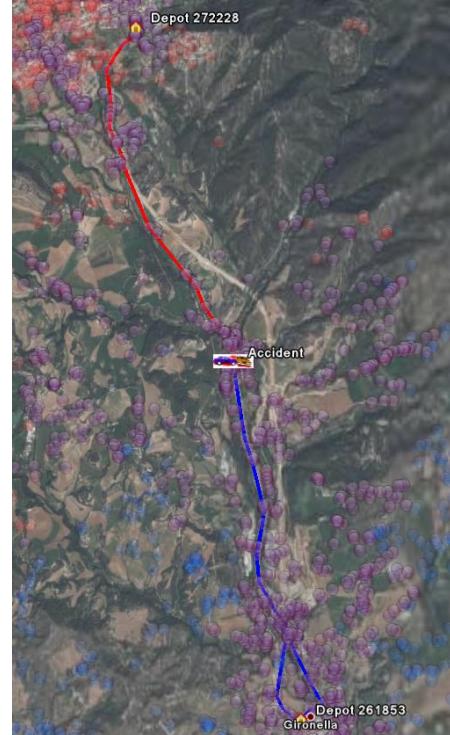


Figure 2: Example of calculated routes within two clusters located in a rural area. Nodes belonging to clusters are shaded.

The clustering process made in the first stage provides information about optimal routes between depots and all nodes included within the corresponding cluster. Therefore, all nodes classified in a particular cluster may be easily located and the minimal route may be obtained directly from the corresponding shortest path graph. Clusters' construction assure that these paths will minimize traveling time, so the optimal route to an accident may be known from the moment it takes place. Moreover, this geographic data classification provides a mechanism to assign depots from which resources are allocated, since nodes are associated to clusters corresponding to those depots which minimize travel time between the two points. In many cases, specially in urban areas with a dense road network configuration, same nodes are included in separated clusters. Thus, an accident occurred within these areas may be reachable from different depots while keeping fulfilled in-

tervention's time restrictions. Then, a depots list ordered according to travel time will be returned, providing several options to respond to a particular accident aiming to better fit all imposed restrictions. Simulation results confirms the efficiency of the applied strategy, achieving a 95% computation time reduction with regard to the solution obtained with a commercial package, while keeping guaranteed route's optimality. Moreover, average computation time per route remains lower than 0.5 seconds, providing a short response time within the critical time window.

In some cases (e.g. accident occurred in an isolated area, traffic jam, etc.), a solution fulfilling the imposed time constraints may not be reached. Thus, these constraints may be avoided and minimizing the response time becomes the objective of the relaxed optimization routing problem. For this purpose, several routes should be calculated in order to provide a list of different options to respond to accident's needs. First, geographically nearest depots to the accident node are determined to obtain a set of candidate clusters. Then, nodes belonging to each selected cluster edge are filtered to choose those whose distance to the accident scene is lower, aiming to reduce the number of routes that should be evaluated. Applying an A\* procedure with an appropriate heuristic function, routes are determined while keeping guaranteed their optimality and a reasonable computing efficiency. Using the geographic distance between the evaluated node and the accident point as an heuristic function, admissibility and consistency criterions are fulfilled, so routes returned by the algorithm will be minimal. Furthermore, they are obtained expanding only the essential nodes. As a result, a list of optimal routes ordered by travel time from several depots will be obtained, as in the previous case. Simulation tests have provided an average computation time reduction per route near to 55%, regarding to the commercial package performance.

Once vehicles belonging to different services are assigned to a particular accident, several routes should be calculated. Medical Service should determine whether hospitalization is required or not and to which hospital victims have to be transported. On the other hand, all resources except Police Service units should return to their respective depots before attending another accident. Therefore, different point to point routes have to be calculated during the intervention. As the origin and ending nodes are known, A\* algorithm may be applied using the geographic distance as an heuristic function. Notwithstanding, since hospitals' location is known in the clustering stage, returning routes to depots may be calculated in this phase. Thus, these routes would be assigned automatically, achieving a computation reduction in the solution stage. Nevertheless, runtime routes determination permits taking into account several factors, such as traffic situation or service perturbations. However, pre-processing strategy provides a static route that may be used as an heuristic function for

runtime routes calculation more accurate than geographic distance.

Police Service units can perform different interventions in several accidents before returning to their depot. Therefore, a Police resource located close to an accident node when it takes place may be assigned in order to reduce the response time. In the case of an accident node that belongs to a cluster, routes from different Police units located within the cluster edge to the accident node should be calculated and compared to those which come from the depot. Again, an A\* procedure with an heuristic function that consists on the geographic distance between two points is used to determine units' routes. So, resources capable of minimizing the travel time will be assigned although they were not in the depot at the moment the accident occurs. On the other side, when an accident takes place in a node not classified into any cluster, Police units located within nearest clusters may be used to calculate different possible routes using the same A\* strategy. Thus, these resources will add several route options to the paths set determined for each depot, being assigned the one that minimizes the response time.

#### **Constraints Model**

The problem can be interpreted as a Vehicle Routing Problem (Bektaş, 2006) with some additional constraints. First hand, a multi-depot consideration should be tackled since every rescue service owns different bases scattered along the territory. Moreover, several kinds of vehicles are located at each depot, constituting an heterogeneous fleet. Problem's characteristics also impose tightly restricted time windows, since a quick actuation is required on a road accident. Traffic ratio on the road, seriously injured victims or the number of vehicles involved in the accident are some of the variables that determine the tightness of the time window restriction applied to a specific accident.

The objective is to assign resources to accidents according to the implicit restrictions of the problem, which falls into the Constraints Satisfaction Problem (CSP) category. System constraints are related to the available resources and specially to time windows. For this purpose, CSP techniques (Marriott and Stuckey, 1998) are used to find a feasible solution. In order to solve this problem a commercial solver based on constraint satisfaction technology is used.

Two elements are combined in the constraint satisfaction problem: the model where the decision variables, the problem constraints and the objective function are defined; the solution search algorithm which selects a value in the domain of each constrained variable, so that all the constraints are satisfied.

The objective function of such a constrained problem is to minimize the travel time from the depot to the accident scene. In this case, reducing economic and distance

costs or units used to respond to a particular accident is not imposed, since resources may only attend one single accident before returning to their origin depot. The number and kind of resources send to an accident depends on the number of seriously injured victims, how many vehicles are involved and whether there is fire or not.

The main constraint reflects the maximum fixed response time, a relevant factor that influences on injuries seriousness. Usually, medical units should arrive to the accident scene within first ten minutes after the accident occurs (Al-Ghamdi, 2002). For this reason, clusters are generated in the pre-processing stage according to this time restriction, so a response time fulfilling the proposed pattern can be assured if the accident takes place within cluster's edge. Moreover, optimal shortest path from the depot to the crash scene will be known. Notwithstanding, if an accident takes place in an isolated area time restrictions may not be fulfilled. Therefore, maximum response time constraint may be avoided and the arising relaxed problem is solved aiming for minimizing the travel time.

On the other hand, all resources of a particular depot may not be assigned to a single accident. Therefore, no cluster's area may rest uncovered in order to respond to several accidents taking place in a brief period of time. In the case of Medical Service and Fire Service, this constraint also implies that their depots may not rest with no vehicles. The reason is that medical and fire units may not be assigned to another accident before returning to their origin depot to perform maintenance and replacement actions, so response time could be critically increased even though in accidents occurred within the cluster. On the other side, this constraint is not applied for the Police Service units, as they can perform several interventions in different accidents without returning to their depot.

Another constraints are imposed according to the VRP formulation (Dondo and Cerdá, 2007). For example, each vehicle is assigned to a single depot, to which it should return after an intervention. Furthermore, each accident should be served at least by one police unit. Necessary medical and fire units and additional police resources will be assigned taking into account accident's variables.

The information obtained at clustering stage is used to reduce the solution search space. Moreover, an accident may be associated to a particular depot with a minimal computational cost, since either the accident location belongs to a specific cluster or the distance from the accident node to close clusters' edge may be easily calculated. Thus, the solution search is simplified to explore only nearby clusters, reducing the search space while keeping guaranteed path's optimality.

The solution search algorithm selects a value in the reduced domain of each constrained variable and checks that all the constraints are satisfied. Restrictions fulfillment implies that resources located at the selected depots may respond efficiently to an accident minimizing the response

time. Nonetheless, in some cases such an optimal solution may not be reached, since vehicles can be assigned to different accidents and particular crash variables may not be satisfied by the available fleet in a selected depot. Then, selecting a different depot provides a suboptimal solution that permits constraints accomplishment except the response time restriction. Thus, this strategy gives an optimal or suboptimal solution while achieving an important computational cost reduction.

#### METHODOLOGY'S LIMITATIONS

The information flow is continuous from the moment the accident occurs until services finish their action. In addition, the information may arrive from different sources, containing a large uncertainty. Therefore, the available information during solution stage is dynamically changing, since not all accident variables are known until the first unit arrives to the accident scene. So, the solver is forced to check resources' availability and problem's time constraints in a continuous process during the intervention. For this reason, different resources may be reallocated several times for a particular accident according to the known needs.

On the other hand, roads state may change from the moment the accident takes place to service end, so shortest paths calculated at clustering stage may become non optimal. Platform's modularity allows to introduce different traffic modeling approaches, such as continuous traffic flow (Gazis, 2002) or multi-agent based systems (Dia, 2002), to simulate a realistic scenario. In a real situation, vehicles' GPS information could be used to determine traffic state, since their geographical position and movements are well-known. Thus, the corresponding route to the accident scene should be recalculated and, in some cases, resources may be reallocated. So, clusters can not be defined as rigid structures, but nodes included in foreign clusters may be reachable by vehicles belonging to a particular depot in order to find a feasible solution taking into account traffic situation.

Notwithstanding, cluster's shortest paths information may be used as an heuristic approach to calculate new routes, reducing search's complexity. Thus, paths included within a particular cluster may be determined according to nominal results obtained at the clustering process and the instantaneous roads state.

#### CONCLUSIONS

The suggested two-stage approach provides an effective strategy to tackle the emergency services coordination problem, seen as a multi-depot VRP with an heterogeneous fleet and tight time windows.

In the clustering pre-process stage, the search space is reduced transforming a multi-depot approach into a set of

single-depot problems. Moreover, this task determines a radial shortest path graph that ensures the optimality of any route calculated within a cluster's edge from a depot to the accident scene. In a second stage, individual single-depot problems are solved using CSP techniques and the information obtained at the clustering process. This approach allows to reduce computational burden and, in consequence, wasted time in the decision making phase, since an accident may be assigned directly to a particular depot.

On the other hand, the geographical data rearrangement done during the pre-processing stage provides an accurate heuristic approach that may be used in the solution phase for routes planning. This heuristic is specially relevant in those cases where time window constraints are not fulfilled.

Nonetheless, the proposed strategy has some limitations, since clusters are calculated at a pre-processing stage with nominal values for travel time between nodes and accident variables are dynamically changing during resources assignation. These limitations may be smoothed considering traffic perturbations in simulation runtime and using clusters data as an heuristic function for routes calculation, as well as permitting resources reallocation in the solution phase.

#### ACKNOWLEDGEMENTS

This work has been supported by the *Departament d'Universitats, Recerca i Societat de la Informació* of the *Generalitat de Catalunya*. It also has been possible thanks to the Ministerio de Fomento and *Ministerio de Ciencia y Tecnología* (projects DPI2004-08056-C03-01 and DPI2004-08056-C03-02).

#### REFERENCES

- SAMUR (Servicio de Asistencia Municipal de Urgencia y Rescate), 2006. *Procedimientos Operativos*, Ayuntamiento de Madrid.
- Ramos, J.J., D. Guimarsans, M.A. Piera and A. Guasch, 2006. A Technological Platform for Designing Real-Time Decision Tools in Transportation Logistics. Proceedings of International Mediterranean Modelling Multiconference, Barcelona (Spain).
- Object Management Group (OMG) Inc., 2004. Common Object Request Broker Architecture: Core Specification.
- Ramos, J.J., M.A. Piera, A. Guasch and J. Figueras, 2005. A Simulation Based Environment for Designing Real-Time Decision Tools in the Trucking Industry. Proceedings of International Mediterranean Modelling Multiconference, Marseille (France).
- Bektas, T., 2006. The Multiple Traveling Salesman Problem: an Overview of Formulation and Solutions Procedures. *The International Journal of Management Science*, 34, pp. 209 – 219.
- Laporte, G., M. Gendreau, J.Y. Potvin and F. Semet, 2000. Classical and Modern Heuristics for the Vehicle Routing Problem. *International Transactions in Operational Research*, 7, pp. 285 – 300.
- Glover, F. and G.A. Kochenberger, 2003. *Handbook of Metaheuristics*. Kluwer Academic Publishers, Boston (Massachusetts, USA).
- Dondo, R. and J. Cerdá, 2007. A Cluster-based Optimization Approach for the Multi-depot Heterogeneous Fleet Vehicle Routing Problem with Time Windows. *European Journal of Operational Research*, 176, pp. 1478 – 1507.
- Anily, S., J. Bramel and A. Hertz, 1999. A 5/3-approximation Algorithm for the Clustered Travelling Salesman Tour and Path Problems. *Operations Research Letters*, 24, pp. 29 – 35.
- Frey, H. and D. Görgen, 2005. Planar Graph Routing on Geographical Clusters. *Ad Hoc Networks*, 3, pp. 560 – 574.
- Guimarsans, D., J.J. Ramos, M.A. Piera and A. Guasch, 2006. A Simulation Based Decision Tool to Coordinate Emergency Services in a Road Accident. Proceedings of Summer Computer Simulation Conference, Calgary (Canada).
- Russell, S. and P. Norvig, 2003. *Artificial Intelligence: a Modern Approach*. 2<sup>nd</sup> edition. Prentice Hall, Englewood Cliffs (New Jersey, USA).
- Marriott, K. and P.J. Stuckey, 1998. *Programming with Constraints: an Introduction*. The Massachusetts Institute of Technology Press, Cambridge (Massachusetts, USA).
- Al-Ghamdi, A.S., 2002. Emergency Medical Service Rescue Times in Riyadh. *Accident Analysis and Prevention*, 34, pp. 499 – 505.
- Gazis, D.C., 2002. *Traffic Theory*. Kluwer Academic, Boston (Massachusetts, USA).
- Dia, H., 2002. An Agent-based Approach to Modelling Driver Route Choice Behaviour under the Influence of Real-Time Information. *Transportation Research Part C*, 10, pp. 331 – 349.

#### BIOGRAPHIES

**DANIEL GUIMARANS** is working as PhD Student for the Telecommunication and System Engineering Department at the Universitat Autònoma de Barcelona. His research interests are optimization and distributed simulation.

**JUAN JOSÉ RAMOS** is Associated Professor at the Telecommunication and System Engineering Department at the Universitat Autònoma de Barcelona. He coordinates the Research Group LogiSim ([www.logisim.es](http://www.logisim.es)).