Estudi de la viabilitat del desplegament d'un servei de Bus a Demanda

Miquel Barcelona, David Romero i Isabel Serra
Unitat de Transferència de Coneixement i Tecnologia del Centre de Recerca Matemàtica

La problemàtica d'oferir un servei de transport públic que sigui sostenible, optimitzi al màxim els recursos disponibles i, al mateix temps, ofereixi el millor servei possible als usuaris constitueix un problema certament complicat. Com us explicarem, té sentit cercar millora en la mobilitat a les ciutats des d'un punt de vista matemàtic. En particular, parlarem del model de Bus a Demanda (o DRT, Demand Responsive Transport, per la sigla en anglès), que funciona a partir de les sol·licituds de trajecte que envien els usuaris i que gestiona un sistema intel·ligent. El model DRT constitueix una de les opcions de transport susceptibles d'estudiar pel que fa a viabilitat: cal pensar en com trobar la manera i les opcions per implementar-lo, amb resultats a temps real eficients i satisfactoris. En aquest context, es va iniciar la col·laboració entre el Centre de Recerca Matemàtica (CRM) i l'empresa de Transports de Barcelona SA (TB).

TB va encarregar a la Unitat de Transferència de Coneixement i Tecnologia del CRM la tasca d'estudiar la viabilitat del model DRT en algunes zones de Barcelona amb la finalitat de determinar si era possible millorar la qualitat del servei de mobilitat. El projecte s'ha dut a terme amb la col·laboració dels equips següents. Per part de TB: Josep Mension, Judit Reviejo, Raul Millan, Luis Ramon Peláez; i per part del CRM: Lluís Alsedà, Miquel Barcelona, Jordi Baró, Irene González, Claudi Lleyda, David Romero i Isabel Serra.

El model Bus a Demanda

El model de Bus a Demanda està basat en les peticions de trajecte que fan els usuaris. Aquestes peticions es componen, essencialment, d'una parada origen i una parada destí, i es poden completar amb altres exigències en funció del grau de complexitat que es vulgui donar al sistema intel·ligent. Un cop es rep la sol·licitud, aquest sistema ha d'enviar una resposta a l'usuari per especificar-li si pot acceptar la demanda de servei o no, i en quines condicions. En aquest sentit, el sistema ha de ser capaç de trobar una solució al problema d'optimització que li suposa aquesta nova sol·licitud en estudi, en el sentit que ha de mantenir un equilibri entre minimitzar el temps de trajecte que fa el bus, satisfer les necessitats de la nova proposta i no incomplir cap dels compromisos adquirits amb els usuaris que ja estan fent ús del servei en aquell moment.

Donada la complexitat i les casuístiques que emmarquen aquest problema, el CRM va determinar que calia desenvolupar un laboratori de proves dotat d'aquesta eina intel·ligent que gestiona el servei DRT i estressar-lo en diferents escenaris per tal de garantir que la resposta en termes de viabilitat del servei seria segura, és a dir, que no se sobreestimarien ni la satisfacció ni l'eficiència. L'eina que s'exposa a continuació està formada pel que s'anomena motor de simulació, que, per una banda, s'alimenta de les dades històriques que emulen les sol·licituds dels usuaris de la zona i, per l'altra, simula el comportament d'un servei de bus en cada instant de temps, ja sigui en mode demanda o en mode convencional, d'acord amb diferents paràmetres. D'aquesta manera, es pretén obtenir un conjunt d'indicadors qualitatius i quantitatius que determini en quines circumstàncies aquest model és factible.

A continuació s'explica com s'han dut a terme les dues parts de desenvolupament del projecte des d'un punt de vista quantitatiu.

Generador d'escenaris d'ús de DRT

El principal tret característic dels escenaris on validar les qualitats d'un model de servei és l'ús per part dels usuaris. A la vegada, aquest model ve descrit principalment per un conjunt

d'esdeveniments o trajectes que requereixen ser satisfets per certs usuaris. Els anomenem sol·licituds de servei, i el repte d'aquesta etapa ha estat generar-los de tal manera que descriguin escenaris extrems que permetin garantir la satisfacció dels usuaris en temps real. En general, la informació de la qual es disposa ve donada per l'historial de validacions que s'han dut a terme i registrat amb els títols de transport. L'anàlisi descriptiva de les dades històriques proporcionen un gran volum d'informació, que ha estat considerada. No obstant això, la clau ha estat generar un conjunt d'informació que es desconeix, com pot ser la destinació dels usuaris.

En un cas pràctic, d'una línia de bus convencional, l'estudi inclou:

- Anàlisi exhaustiva dels horaris de la línia.
- Extracció de les distribucions temporals de les validacions durant un dia de servei.
- Obtenció de les distribucions temporals de les parades de pujada diàries.
- Càlcul de la distribució del temps de duració d'un trajecte entre qualsevol parell de parades de la línia.

Amb aquesta informació es generen les sol·licituds de servei. En aquest punt, a cada sol·licitud caldrà assignar-li una hora d'entrada, una de sortida i unes parades origen i final que cal escollir curosament. En primer lloc, l'hora d'entrada es determina a partir de les distribucions temporals de les validacions durant un dia; són més probables les hores en què més gent utilitza el servei. En segon lloc, i de manera semblant, la parada origen s'obté a partir de les distribucions de validacions de les parades; són més probables les parades que reben més validacions.

La determinació de la parada destí de cadascuna de les sol·licituds esdevé una tasca més complexa, ja que pot no disposar-se de la informació històrica. Per tal d'inferir en la parada de destí de la millor manera en termes d'assegurar màxima complexitat en l'escenari generat, es van considerar, des d'un punt de vista teòric, diferents models probabilístics per definir un destí, i es va optar pel model que en termes de probabilitat presentava més desordre o entropia.

D'aquesta manera es pot aconseguir caracteritzar el comportament dels usuaris d'un servei de transport particular en un escenari prou versàtil que garanteixi resultats pessimistes en els indicadors de satisfacció. Això és important per garantir que la validació del model DRT és factible.

Problemàtica del *routing* i l'optimització

La problemàtica del Bus a Demanda imposa directament determinar de quina manera es dona resposta a cadascuna de les sol·licituds simulades, contràriament al cas del bus convencional, en què la resposta és natural i ve determinada per la ruta predefinida que segueix el vehicle. L'acceptació o no de les demandes en aquesta modalitat de transport DRT està condicionada per certes restriccions que són imposades per la localització del bus, la seva capacitat, la topologia de la línia i la resta de serveis compromesos que haurà de complir en termes de temps de recollida i arribada ja assignats prèviament, entre d'altres. A la pràctica, aquest problema es pot pensar de manera anàloga a un *travelling salesman problem*, en el sentit que el bus ha de fer recollides i deixades a certes localitzacions específiques, però afegint-hi la dificultat d'estar restringit a complir les finestres temporals determinades pels compromisos adquirits. Per tant, el sistema que s'ha implementat és capaç de trobar la ruta que ha de ser òptima en termes d'eficiència i satisfacció: el sistema ha d'acceptar el màxim nombre de sol·licituds possibles per tal de dur a terme un servei el més satisfactori possible de cara a l'usuari.

Per proporcionar aquesta solució òptima, primer cal trobar les rutes més curtes entre cada parella de parades de la línia en estudi. Aquest és un problema independent al de la determinació de la ruta òptima, però necessari a l'hora de quantificar els temps de trajectes entre les diferents recollides i baixades d'usuaris. Per fer-ho, es prenen les dades de totes les rutes existents dels busos i es recombinen per generar els camins més curts per viatjar entre dues parades qualssevol de la línia considerada fent servir el conegut algoritme A^*. Aquesta rutina està inspirada en l'algoritme per trobar camins mínims en un graf anomenat Dijkstra, però

inclou una component heurística que permet millorar l'eficiència computacional i trobar el camí més curt entre dos vèrtexs qualsevol d'un graf. El fet que aquest algoritme sigui complet permet assegurar que el sistema obtindrà una llista dels camins més curts entre qualsevol parella de parades de la línia considerada.

Un cop tots els possibles temps de trajecte de cadascun dels trams d'una possible ruta s'han calculat, es pot procedir a especificar-ne la qualitat afegint-hi diferents factors. Caracteritzem la qualitat de les rutes a partir de la definició d'una funció d'utilitat $f(x)$, on la variable x es pot pensar com una successió de parades en les quals tenen lloc les diferents accions, com recollir i deixar viatgers. Cadascuna de les rutes tindrà uns temps de trajecte assignats que ens permetran obtenir també els temps d'espera de cadascun dels usuaris o el temps de retard, entre altres factors que afecten l'usuari del servei. A més, d'acord amb la llista de serveis pendents que han estat acceptats, també es poden establir mecanismes per quantificar la comoditat de l'usuari. Per tant, existeix una funció f que cal optimitzar i que depèn d'aquests paràmetres associats a cadascuna de les rutes x:

- temps de trajecte
- temps d'espera
- temps de retard
- comoditat de l'usuari

L'alta complexitat de les rutes i un estrès addicional del sistema fan necessari establir mecanismes per trobar la ruta x_{opt} tal que $f(x_{opt})$ sigui màxim en termes d'eficiència computacional. Es va optar per aplicar una rutina basada en els algoritmes genètics per dur a terme l'exploració de l'espai de cerca i que va permetre trobar la ruta $f(x_{opt})$ en cada cas en un temps raonable de càlcul.

Finalment, en funció d'un conjunt de variables que regulen l'exigència de l'usuari, se simula la resposta del client a la proposta de trajecte que li ofereix el sistema.

Solució: un motor de simulació

El conjunt de totes aquestes parts que interactuen entre si constitueixen el que s'anomena, i que ja s'ha mencionat anteriorment, motor de simulació. La interacció entre les diferents parts d'aquest conjunt es pot representar esquemàticament a la Figura. Cal notar que a aquest motor de simulació se li afegeix el que anomenem sistema expert, que s'encarrega de gestionar la comunicació entre cadascuna de les parts i aprendre com l'evolució del motor es pot traduir en indicadors de qualitat.

D'acord amb tot el que s'ha explicat fins ara, s'utilitza el motor de simulació per determinar la viabilitat d'un model de Bus a Demanda a la ciutat de Barcelona. En concret, es pren un conjunt de 24 línies. Tanmateix, el repte no consistia només a analitzar aquestes 24 zones geogràfiques per separat; també s'ha considerat com podien agregar-se entre si per obtenir millors resultats en termes de satisfacció i eficiència. Efectivament, la flexibilitat del model de transport DRT ens permet pensar en diferents combinacions de línies entre si. Com que el total de combinacions entre línies és un nombre massa elevat i parlem de milers d'agrupacions possibles, es van establir filtres: a mesura que es validaven o no per separat, es restringia la cerca a agregats. En el marc objectiu de proporcionar un disseny de les 24 línies de manera conjunta, es va arribar a un total de 272 agrupacions (entenem com una agrupació una línia senzilla), que es van combinar en dissenys per assolir un llistat dels més eficients i satisfactoris. Aquest llistat final de solucions ordenades de millors a pitjors que el CRM ha desenvolupat ha estat contrastat favorablement per l'equip de TB que ha acompanyat tot el projecte.

Cal remarcar que aquesta anàlisi s'ha dut a terme específicament per a la ciutat de Barcelona, però l'avantatge de l'estructura escollida per dur a terme aquest estudi permet extrapolar aquests resultats a qualsevol altra localització que ho requereixi.

Funcionament esquemàtic del motor de simulació