

ASSE I – RICERCA, INNOVAZIONE E SVILUPPO  
TECNOLOGICO del PO FESR 2014-2020- Azione 1B.1.2.1

# PROGETTO MOBAS 4.0

Mobilità sOstenibile in BASilicata 4.0

## Work Package 3

“Realizzazione di servizi a supporto  
della mobilità condivisa”

## Deliverable 3.1

“Report sulla progettazione  
dei servizi di bus a prenotazione”

Stato di avanzamento n. 1 dal 01/04/2022 al 01/08/2022

<b>Data</b>	<b>Redazione a cura di:</b>	<b>Persona di contatto per il progetto:</b>
19/12/2023	Consorzio TRAIN Altri partner: DIGIMAT, ENEA, LUXANT	Mario Zagaria COM SCPA E-mail: <a href="mailto:mario.zagaria@com-scpa.it">mario.zagaria@com-scpa.it</a> telefono: 0972 460130

<b>Servizi a supporto della mobilità</b>	<b>4</b>
<b>Progettazione di servizi di bus a prenotazione</b>	<b>6</b>
<b>Stato dell'arte sistemi di trasporto a chiamata</b>	<b>6</b>
Le caratteristiche di un sistema di trasporto a chiamata (DRT)	7
Le principali tipologie di DRT	8
Panoramica dei sistemi DRT in funzione nel mondo	10
Stato dell'arte degli approcci per la pianificazione di un sistema DRT	11
Last Mile Transportation System	12
Pickup and Delivery Problem with Time Windows	12
Demand Responsive Transit	13
<b>Caratteristiche generali del servizio</b>	<b>15</b>
Requisiti e assunzioni considerate per il servizio di trasporto a chiamata	16

## Servizi a supporto della mobilità

Il WP3 ha come obiettivo lo studio dell'IA (Intelligenza Artificiale) come strumento operativo in grado di favorire le condizioni per l'affermazione di una mobilità condivisa sostenibile nel territorio regionale, caratterizzato dalla forte presenza di aree a bassa densità abitativa come ad esempio le aree rurali. Il WP3 affronta la tematica della mobilità sostenibile condivisa e riguarda la realizzazione di una "piattaforma" che consentirà:

la navigazione autonoma a supporto dei sistemi di guida di veicoli di nuova generazione, in grado di interpretare la viabilità stradale attraverso sensori e complessi algoritmi di calcolo e di ricostruire dinamicamente le rotte all'interno di mappe di navigazione digitali;

di supportare il conducente ed i viaggiatori nel caso di mobilità condivisa, fornendo informazioni sul viaggio (durata, orari di arrivo e partenza) ma anche sui luoghi e le loro tipicità, utilizzando tecniche sofisticate di riconoscimento;

di elaborare i dati raccolti da una APP scaricabile gratuitamente dai principali store (Apple e Google per i sistemi operativi iOS e Android) che consentirà agli utenti di un bus di "avanzare" una prenotazione per il viaggio, in modo da determinare un percorso ottimizzato in ragione delle richieste ricevute entro il giorno precedente. Il percorso sarà poi trasmesso a tutti gli utenti prenotati e reso disponibile anche a tutti coloro che in quel particolare giorno volessero usufruire del servizio.

La piattaforma, evidenzierà anche il numero di posti disponibili in funzione del numero di prenotazioni ricevute, consentendo di dimensionare in modo opportuno il servizio di trasporto pubblico.

I servizi realizzati tramite la piattaforma saranno poi testati mediante un prototipo di bus elettrico progettato e realizzato nel WP5 per gli scopi del progetto

Il WP3 sviluppa metodi orientati a sistemi di navigazione autonoma a supporto dei sistemi di guida di veicoli senza conducente, non ancora disponibili commercialmente sul mercato, in grado di interpretare la viabilità stradale attraverso l'elaborazione dei dati acquisiti da sensori installati a bordo, che tramite complessi algoritmi di calcolo, permettono la ricostruzione di percorsi dei mezzi con cui determinare la pianificazione delle rotte di viaggio, calcolare percorsi e tempi di partenza e di arrivo.

Un tale sistema, se unito ad un sistema di guida autonoma, rappresenta gli elementi architettonici fondanti i sistemi di guida di vetture di futura generazione, i così detti "robo-taxi". Nell'accezione del progetto, tale "piattaforma" viene messa a disposizione degli strumenti di controllo di guida del conducente, a bordo del bus oggetto di sviluppo, su cui verranno effettuate le successive fasi di installazione e sperimentazione. Il WP prevede inoltre lo sviluppo di un'APP, scaricabile gratuitamente dai principali store, che consenta ai potenziali utenti di avanzare una prenotazione per uno spostamento programmato.

I dati vengono raccolti e scambiati con la piattaforma di navigazione che li elabora, creando un percorso ottimizzato del mezzo pubblico sulla base delle prenotazioni ricevute entro il giorno precedente.

Il percorso determinato è poi trasmesso a tutti gli utenti che hanno richiesto la prenotazione, comprensivo degli orari di arrivo e partenza nelle singole fermate prenotate e programmate ed è disponibile anche a tutti coloro che in quel particolare giorno volessero usufruire del servizio.

Il numero di fermate intermedie, connesso al numero di utenti complessivo, deve rispettare i parametri di tolleranza della qualità del servizio (come ad esempio la percentuale di ritardo aggiuntivo ammissibile) e deve essere compatibile con la capacità del mezzo.

Attraverso l'APP gli utenti interessati a prenotare una fermata intermedia, visualizzano il numero di posti disponibili in funzione del numero di prenotazioni effettuate.

Nel caso in cui il numero di posti disponibili a bordo del mezzo durante la sua navigazione non fossero più disponibili, tutte le ulteriori richieste di prenotazione non verranno prese in carico, questo al fine di dimensionare in modo opportuno il servizio di trasporto pubblico.

Il WP3 prevede inoltre lo sviluppo e l'integrazione di funzionalità di supporto informativo ai passeggeri a bordo del mezzo, sulla base del riconoscimento dinamico (image recognition con attivazione di contenuti di Realtà/Intelligenza Aumentata) della segnaletica presente sul percorso del mezzo, per segnalare ad esempio, la presenza di stazioni di ricarica elettrica nell'approssimarsi ai luoghi e l'eventuale stato di disponibilità, di parcheggi auto, parco bici elettriche, ecc.

Attività:

A.R.3.1 Progettazione di servizi di bus a prenotazione

A.R.3.2 Progetto di un sistema di supporto informativo di bordo per i passeggeri

A.R.3.3 Progettazione di un sistema a supporto del conducente del mezzo

Il presente documento rientra nel contesto delle attività A.R.3.1

## Progettazione di servizi di bus a prenotazione

Obiettivo specifico dell'azione A3.1 è quello di potenziare gli strumenti a supporto del sistema di Trasporto Pubblico Locale in aree a bassa concentrazione di domanda.

Tale azione prevede sia lo sviluppo di modelli, sia dell'infrastruttura di backend per la gestione delle richieste e servizi, sia del frontend rivolto ai cittadini.

Il progetto prevede infatti un dimostratore basato su una *App* che consenta agli utenti di prenotare fino a un giorno di anticipo un viaggio con il TPL. I dati saranno raccolti ed elaborati dalla piattaforma progettata e realizzata nell'ambito del WP, creando un percorso ottimizzato in ragione delle prenotazioni ricevute. Tale percorso è chiuso e pubblicato il giorno precedente a quello in cui verrà erogato. Il percorso determinato è trasmesso a tutti gli utenti che hanno effettuato la prenotazione ed è disponibile anche per tutti coloro che in quel particolare giorno volessero usufruire del servizio. L'*APP* comunicherà agli utenti anche il numero di posti disponibili in funzione del numero di prenotazioni effettuate, consentendo di dimensionare in modo opportuno il servizio di trasporto pubblico.

Il presente documento descrive lo stato dell'arte delle tecnologie disponibili e definisce le specifiche di massima per i modelli, il backend e il front end.

## Stato dell'arte sistemi di trasporto a chiamata

Il trasporto a chiamata (TC), o demand-responsive transport (DRT), è uno strumento flessibile per il potenziamento dell'accessibilità al servizio pubblico dei trasporti. Viene attualmente studiato ad esempio per zone periferiche o rurali o per gruppi di utenti particolari, come anziani o persone con disabilità che spesso trovano la loro domanda di trasporto parzialmente o completamente insoddisfatta e questo non permette loro di accedere a servizi, merci, attività e opportunità cui possono usufruire i residenti in aree urbane. L'opzione del DRT in questi casi permette di soddisfare le esigenze di tutti i gruppi di utenti in un modo efficiente e relativamente economico; l'obiettivo quindi è sociale. Fin dagli anni '60 il DRT è stato promosso come soluzione nei casi appena citati, ma solo recentemente con lo sviluppo di nuove tecnologie, come smartphone e GPS, la maggiore capacità di raccolta dati e i progressi nello studio di algoritmi per la pianificazione di un sistema di trasporto si sono aperte nuove possibilità di ricerca e attuazione per il DRT.

Il servizio di trasporto a chiamata è considerato un servizio ibrido che combina caratteristiche del servizio pubblico con rotte fisse e dei servizi completamente flessibili come i taxi. In molti casi lo sviluppo di un servizio flessibile in zone urbane e suburbane ha portato molti benefici, tra cui l'aumento dei passeggeri, un servizio più economico e integrato per le persone con disabilità, un maggiore uso delle linee di forza del servizio pubblico da parte di utenti con origine o destinazione in aree suburbane non servite da essi.

## Le caratteristiche di un sistema di trasporto a chiamata (DRT)

Il servizio di trasporto a chiamata è considerato un servizio intermedio tra servizio pubblico e taxi. Le caratteristiche principali di un DRT sono:

- flotta di veicoli di piccola dimensione;
- rotte flessibili nel tempo e nello spazio;
- piattaforma di prenotazione corsa.

Ognuna di queste peculiarità può avere diversi gradi di attuazione che permettono di plasmare il DRT alla richiesta degli utenti e all'area che si vuole servire.

Il DRT è pensato per zone con bassa densità di utenti che spesso coincidono con zone periferiche e collinari come nel caso genovese. L'uso di veicoli di piccola dimensione facilita l'accesso a tali aree geografiche ed è in linea con il ridotto numero di utenti. Inoltre, per servire utenti con necessità particolari nella flotta possono essere disponibili veicoli con strumentazione specifica e/o personale ausiliario specializzato, come nel caso di trasporto di persone con disabilità. La possibilità di scegliere il mezzo di trasporto e il personale che più si adatta alle prenotazioni dei passeggeri è un punto di forza del DRT che lo avvicina alle richieste del fruitore.

La caratteristica che permette di massimizzare il livello di servizio offerto all'utente è l'adattabilità delle rotte nel tempo e nello spazio. Ci sono vari gradi di flessibilità del servizio che portano a risultati diversi:

- possono essere fissate sia origine che destinazione collegate da un percorso fisso che viene effettuato solo su prenotazione o un percorso fisso che ammette piccole deviazioni per soddisfare ulteriori prenotazioni;
- può essere fissata solo la destinazione, ogni utente prenota la corsa specificando il proprio punto di partenza e il servizio unirà le richieste in un'unica rotta tracciata in base alle richieste;
- possono essere libere sia origine che destinazione.

Ognuna di queste possibilità può risultare la più adatta per situazioni specifiche; ad esempio, il percorso fisso a prenotazione può essere il collegamento più efficiente tra una frazione in cui può essere stabilito un unico punto di picking e l'accesso più vicino al servizio di trasporto pubblico tradizionale del centro urbano con cui l'utente può raggiungere la sua destinazione. Le rotte con destinazione fissa possono essere utili per il trasporto verso l'aeroporto o l'ospedale o in occasioni particolari in cui vari utenti devono raggiungere eventi o manifestazioni. Il caso di massima flessibilità in cui origine e destinazione sono libere può raccogliere tutti questi casi. Un'altra caratteristica importante permessa dallo sviluppo della tecnologia GPS e dall'aumento dell'accesso ad internet è la possibilità di modificare le rotte in tempo reale, anche nel pieno dell'attività: una rotta può accettare una nuova richiesta modificando il suo percorso.

Oltre al percorso, le rotte hanno anche orari flessibili. L'obiettivo è quello di minimizzare i tempi di attesa, andando a sostituire ad esempio linee fisse tradizionali che in zone rurali hanno poche corse con orari prefissati che non incontrano le richieste degli utenti.

Uno strumento fondamentale per la riuscita di un servizio di trasporto a chiamata è la piattaforma di prenotazione. Con l'avvento degli smartphone, la possibilità di creare un'applicazione che raccoglie le richieste degli utenti rende questo passaggio più semplice e usufruibile. Un aspetto fondamentale è la disponibilità di un'interfaccia chiara e accessibile anche da gruppi di utenti particolari come gli anziani. Il momento della prenotazione per questo servizio prevede solitamente tre passaggi:

- richiesta dell'utente in cui vengono specificate origine-destinazione e finestre temporali in cui può avvenire il picking e il delivering o, ad esempio, l'orario in cui si vuole arrivare a destinazione;
- analisi della richiesta da parte dell'algoritmo e proposta all'utente di una o più soluzioni;
- conferma dell'utente della rotta scelta.

Grazie allo strumento della prenotazione l'algoritmo riesce ad aggregare più richieste, sempre tenendo conto della qualità del servizio, in modo da ammortizzare i costi, mentre la flessibilità di rotte e orari permette di estendere il servizio a zone non coperte adeguatamente dal trasporto tradizionale.

### Le principali tipologie di DRT

In base alla flessibilità e alla complessità del sistema, il trasporto a chiamata si suddivide in diversi modelli di servizio che possiamo riassumere in:

- Linea fissa a prenotazione
- Linea fissa con deviazioni
- Modello "molti ad uno"
- Modello "molti a molti"

La **linea fissa a prenotazione** è utilizzata molto nelle aree rurali e spesso sostituisce il servizio tradizionale del bus. Queste aree sono difficili da servire in modo efficiente, poiché la domanda è molto bassa, le aree sono geograficamente dislocate per il servizio pubblico, la distanza da percorrere è ragionevolmente alta e la capacità del veicolo non sfruttata. Per tali motivi quindi l'utilizzo del DRT in questi casi permette una riduzione dei costi. In questo caso il sistema di trasporto a chiamata replica le caratteristiche del servizio di autobus che viene sostituito: ha un percorso fissato e zone di picking nell'area interessata anch'esse già fissate. La differenza maggiore è nella obbligatorietà della prenotazione in modo da poter adattare il servizio il più possibile alle finestre temporali richieste dall'utente e da evitare corse vuote quando non si ricevono prenotazioni.

La **linea fissa a prenotazione con deviazioni** permette di modificare il percorso della rotta raggiungendo richieste fuori dal percorso predefinito. Può essere utile per rotte a linea fissa che attraversano più di un centro abitato che deve essere collegato al centro urbano. In particolare, rientra in questo modello il servizio a chiamata che prevede la modifica della rotta in tempo reale in modo da accogliere nuove richieste compatibili con il percorso. In questi casi è fondamentale una comunicazione tra operatore e utente e un ricalcolo tempestivo della rotta, possibile con le nuove tecnologie; infatti, con il GPS si può conoscere il punto esatto nel percorso in cui si trova il veicolo e con l'accesso a internet tutte le comunicazioni tra utente-centro operativo e centro operativo-autista possono essere istantanee e complete.

In tutti i sistemi di trasporto a chiamata la prenotazione della corsa è fondamentale, ma questo può rendere il DRT poco accessibile da utenti non familiari al servizio, mentre la pianificazione fissata a priori del trasporto pubblico riesce a soddisfare anche questi passeggeri grazie a orari e fermate fissi. Un nuovo modello ibrido che possiamo far rientrare nelle linee fisse con deviazioni prevede due tipi di fermate: una parte fissa e una parte opzionale. Queste ultime vengono visitate dagli autobus solo quando ci sono delle prenotazioni. Potenziali passeggeri fanno la loro richiesta specificando l'origine e un orario massimo per l'arrivo, in questo modo rotta e orari cambiano a seconda delle richieste ricevute, ma le fermate obbligatorie forniscono una rete di sicurezza per i passeggeri senza prenotazione.

Nel modello **"molti ad uno"** c'è un'unica destinazione per tutti i passeggeri, ma diversi punti di origine e diversi orari. Ogni utente può prenotare la sua corsa specificando il punto di partenza e l'orario desiderato e nel momento di pianificazione della rotta vengono aggregate le richieste che possono essere servite da un unico veicolo. Questo modello può essere molto utile per il trasporto in aeroporto, in ospedale, in un grande centro commerciale. Per il trasporto in aeroporto, ad esempio, può essere molto utile in quanto sono spesso situati in zone periferiche non raggiunte dal servizio di trasporto urbano. In questo caso è fondamentale per il successo del servizio la puntualità dell'arrivo a destinazione. Per il trasporto in ospedale è molto utile la possibile presenza nella flotta di veicoli particolari per il trasporto di pazienti o persone con disabilità, inoltre conoscendo le richieste è possibile fornire un servizio mirato ponendo a bordo del veicolo personale specializzato. Un'altra tipologia di destinazione comune a molti utenti possono essere i centri commerciali che solitamente vengono posizionati in aree industriali e periferiche del centro urbano e non vengono serviti dalle linee tradizionali del servizio pubblico, oppure sono posizionati in zone rurali al centro di piccoli centri urbani con servizi di trasporto inesistenti o poco sviluppati. In questi casi è possibile che tale servizio sia fornito direttamente dal centro commerciale in questione.

Il modello **"molti a molti"** offre la massima flessibilità nello spazio e nel tempo, l'utente nel momento della prenotazione indica origine e destinazione specificando finestre temporali di partenza e di arrivo. Il momento di pianificazione delle rotte in base alle richieste è di fondamentale importanza per poter offrire un servizio efficiente. Le rotte con orari e zone simili vengono aggregate, questo porta ad un risparmio economico proponendo però agli utenti delle rotte competitive con altri servizi, ad esempio taxi, per tempo di percorrenza e costi. La pianificazione può avvenire dopo che sono state raccolte le richieste degli utenti o, basandosi su dati forniti da spostamenti e richieste precedenti, possono essere predefinite delle rotte che vengono richieste più spesso, partendo da queste per soddisfare la domanda dei passeggeri.

## Panoramica dei sistemi DRT in funzione nel mondo

Lo sviluppo dei primi DRT è avvenuto negli USA negli anni '60. Per affrontare l'aumento di zone a bassa densità di popolazione, che non disponevano delle stesse risorse finanziarie delle aree urbane, furono istituiti nel paese vari sistemi di trasporto a chiamata con flotte di bus. In quegli anni i ricercatori lavoravano sullo sviluppo di algoritmi "molti a molti" per poter offrire un servizio pubblico efficiente di trasporto "porta a porta": il più importante di questi studi fu CARS del Massachusetts Institute of Technology. Solo però negli anni '80 e '90 sono state sviluppate nuove tecnologie che hanno migliorato la comunicazione e la raccolta dei dati. Durante questo periodo negli USA la sostituzione di servizi tradizionali con taxi condivisi e autobus a chiamata è stata favorita da tagli ai fondi per il servizio pubblico. Negli anni 2000 internet ha permesso un grande risparmio di tempo e costi, andando a sostituire le inefficienti comunicazioni telefoniche.

Gli attuali servizi a chiamata nascono tutti negli ultimi dieci anni circa grazie all'avvento dello smartphone e l'accesso illimitato a internet. Le prime a riscoprire il DRT sono state le aziende private del trasporto che ne hanno incentivato i nuovi sviluppi. Si sono evolute nel servizio che offrono al cliente e hanno iniziato a usare le proprie piattaforme per unire diverse tratte nello stesso veicolo proponendo agli utenti un servizio più economico, ma ugualmente efficiente. Su questo si sono ispirati i nuovi servizi di trasporto a chiamata. Alcuni esempi recenti di DRT emersi tra il 2012 e il 2016 sono *Via*, *Brengflex*, *Bridj*. Tutti offrono corse condivise che sono un ibrido tra taxi e trasporto pubblico. Attualmente sia gli operatori pubblici che privati stanno prendendo parte allo sviluppo del DRT, in particolare preferendo un modello "fermata a fermata" invece di "porta a porta": gli utenti scelgono origine e destinazione tra fermate esistenti e non liberamente. In generale però il modello operativo e di business varia considerevolmente tra aziende e/o città. Diamo ora la descrizione di alcune recenti esperienze di DRT.

Nell'aprile 2013 fu avviato un progetto pilota di servizio a chiamata, *Kutsuplus*, nella regione metropolitana di Helsinki. Il servizio era effettuato da van a 8 posti, i passeggeri potevano prenotare la corsa fino a 30 minuti prima della partenza e scegliere origine e destinazione tra la lista di fermate predefinite. Il costo era calcolato in proporzione alla lunghezza della tratta e al numero di passeggeri con cui si condivideva la corsa. Il servizio non era supportato da un'applicazione per smartphone, ma si poteva accedere al portale di prenotazione solo tramite internet, fatto questo che influì drasticamente sul livello di utenza. Per poter sviluppare il progetto e incrementare i risultati economici il sistema avrebbe dovuto essere ridimensionato, ma ciò non fu possibile visti i vincoli finanziari delle amministrazioni comunali, e il progetto si chiuse alla fine del 2015.

L'azienda *Via* ha lanciato il suo primo DRT a New York nel settembre 2013, operativo nelle ore di punta a tariffa piatta. Il modello scelto è "fermata a fermata": gli utenti che richiedono il servizio devono raggiungere una fermata virtuale a pochi isolati dalla propria posizione e da lì possono raggiungere ogni altra fermata. Si può accedere al sistema di prenotazione anche grazie a una specifica applicazione per smartphone. La compagnia ha esteso il DRT in Europa, Asia ed Australia e questo ha evidenziato la flessibilità di questo modello per essere applicato a mercati e zone diverse.

*Bridj* è stata una delle prime aziende che ha lanciato il DRT, in particolare a Boston con delle rotte fisse a prenotazione senza fermate intermedie. Le rotte iniziali erano state stabilite secondo le

preferenze espresse dai passeggeri nel periodo di prova, dalle informazioni governative e dai social media. Dopo i primi mesi però furono effettuate importanti modifiche: la tariffa divenne piatta e non più dipendente dalla lunghezza della tratta, i bus furono sostituiti da minibus con 14 posti e venne rilasciata un'applicazione per poter prenotare le corse e tracciare i veicoli. Negli anni la *Bridj* ha avviato altri DRT negli USA fino al 2017 quando è stata comprata dal servizio di trasporto australiano. In questo nuovo contesto il sistema è usato come raccordo con le stazioni dei treni in aree non servite e con tariffa piatta. Rientra tra i modelli "fermata a fermata" e i primi risultati riportano un aumento dei passeggeri, che potrebbe essere dovuto alla miglior esperienza di viaggio e al risparmio di tempo che compensa il maggior costo.

Nei Paesi Bassi è stato introdotto il servizio di trasporto a chiamata da *Brengflex* nel 2016, dove la prima area servita è stata una regione di 200 mila abitanti. Il DRT offerto è un modello "fermata a fermata" che collega 255 fermate e ha sostituito due linee di autobus tradizionali andando ad aumentare il costo della corsa per gli utenti, ma diminuendo sensibilmente i tempi di viaggio. Dopo questa prima esperienza il DRT è stato introdotto in molte altre città e aree dei Paesi Bassi, compresa Amsterdam, e si è sviluppato sia tramite privati che enti pubblici.

Anche in Italia a metà degli anni '90 sono stati introdotti servizi di trasporto a chiamata più evoluti, grazie ai nuovi sviluppi di tecnologie informatiche e di telecomunicazione. Attualmente ci sono servizi DRT in zone urbane, suburbane e rurali. Questi servizi sono offerti sia da enti pubblici che da aziende di trasporto privato e comprendono servizi di raccordo con linee di forza del trasporto pubblico o servizi di trasporto per gruppi particolari di utenti. Il servizio di trasporto a chiamata è operato in grandi città come Roma, Milano, Genova e Firenze, ma è anche sviluppato in città di minor dimensione come Alessandria, Livorno, Empoli, Parma.

### Stato dell'arte degli approcci per la pianificazione di un sistema DRT

Il sistema di trasporto a chiamata rientra in uno dei problemi di ottimizzazione più studiati nel mondo della ricerca operativa, il Vehicle Routing Problem (VRP) (Toth e Vigo, 2002), in cui l'obiettivo è trovare le rotte ottime per una flotta di veicoli che deve visitare un insieme di posizioni. Il VRP venne trattato per la prima volta nel 1959 in un articolo di George Dantzig nella sua versione più famosa come problema del commesso viaggiatore (Traveling Salesman Problem, TSP). Il VRP è un problema di tipo NP-hard, ossia per esso non sono disponibili algoritmi computazionalmente efficienti per determinare con sicurezza la soluzione ottimale. Dal punto di vista pratico questo significa che è possibile determinare la soluzione ottima in tempi di calcolo accettabili attraverso approcci esatti, quali ad esempio la programmazione matematica, solo nel caso di istanze di piccola dimensione. Per questo motivo i risolutori commerciali utilizzati per determinare soluzioni per questa classe di problemi si basano su algoritmi euristici che riescono a determinare in tempi contenuti soluzioni sub ottime di buona qualità anche per istanze con dimensioni quali quelle richieste dalle aziende di trasporto reali.

Esistono molte variazioni e specializzazioni del VRP e tra esse si annovera anche il DRT. Possiamo considerare il servizio di trasporto a chiamata una generalizzazione del Vehicle Routing Problem with Pickup and Delivery (VRPPD) e del Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW): nella prima variante un certo numero di merci o persone deve essere trasportato da una posizione di carico (pickup) a una posizione di scarico (delivery) e, come nel nostro caso, le

posizioni possono essere contemporaneamente di carico e scarico. Nella seconda variante tutte le posizioni hanno una finestra di tempo in cui devono essere raggiunte; ad esempio, nel DRT i passeggeri forniscono una finestra temporale per la partenza della loro tratta e una finestra temporale di arrivo.

Il problema di ottimizzazione che risolve il sistema di trasporto a chiamata in letteratura è indicato con diversi nomi, tra cui Dial-a-Ride Problem (DARP), Demand-Responsive Transit, Flexible Transport Services. Nella versione più generica il servizio è fornito da una flotta formata da veicoli tutti uguali che hanno come base lo stesso deposito, l'obiettivo è pianificare un insieme di rotte a costo minimo in grado di soddisfare più richieste possibili rispettando certi vincoli.

Per problemi più specifici vengono poi definiti altri nomi, come ad esempio il Last Mile Transportation System (LMTS) che indica la pianificazione del trasporto di merci o persone tra un transportation hub e la destinazione finale. Rientra in questo caso il servizio di trasporto descritto precedentemente che collega i passeggeri alle linee di forza del trasporto pubblico.

Molti ricercatori hanno provato a risolvere il DRT usando vari metodi, ma essendo un problema NP-hard pochi studi usano un approccio esatto e molte ricerche si stanno concentrando su algoritmi metaeuristici. Gli approcci per risolvere questo problema includono algoritmi genetici, simulated annealing, tabu search, ant colony optimization, algoritmi di ricerca locale iterativa e di adaptive large neighborhood search.

#### *Last Mile Transportation System*

Il servizio di raccordo delle zone bassamente popolate con il servizio pubblico è stato oggetto di molte ricerche. Nella prima parte di questi studi molti ricercatori provarono a sviluppare questo problema minimizzando il costo dei passeggeri e il costo operativo considerando diverse variabili decisionali, tra le quali la frequenza dei bus, dei treni e la capacità degli autobus. Negli ultimi anni si sono invece concentrati sullo sviluppo di modelli più realistici inserendo ad esempio il tempo di attesa dei passeggeri alle fermate e la durata del trasporto (Dou X., 2017).

#### *Pickup and Delivery Problem with Time Windows*

Il Pickup and Delivery Problem with Time Windows (PDPTW) è la versione generalizzata del Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW) che cerca la rotta ottimale rispettando vincoli di capacità e di finestre temporali. La funzione obiettivo del PDPTW è di minimizzare il costo di trasporto servendo tutte le domande. All'inizio degli studi di questo problema (Dumas Y., 1991) propose un approccio branch-and-price per trovare la soluzione esatta dell'algoritmo, ma aggiungendo poi altri vincoli e nuovi obiettivi il problema è diventato troppo complesso e sono state sviluppate nuove euristiche e meta-euristiche. Degli studi recenti hanno implementato meta-euristiche a due stadi in cui vengono minimizzate il numero di rotte e la distanza totale percorsa. Questi approcci includono il Simulated Annealing e il Tabu Search. Una meta-euristica piuttosto utilizzata per questo tipo di problema è l'Adaptive Large Neighborhood Search (ALNS) proposta da (Ropke S., 2006). Recentemente (Zhou X., 2018) ha risolto il Vehicle Routing Problem Pickup and Delivery (VRPPDTW) sviluppando un modello di network con stati spazio-tempo.

### *Demand Responsive Transit*

Una delle principali caratteristiche DRT che discrimina l'approccio algoritmico da usare è il tipo di raccolta delle richieste che può essere statico o dinamico: nel primo caso tutte le richieste da servire sono conosciute prima della pianificazione, mentre nel secondo caso le richieste vengono fatte anche durante il servizio e le rotte vengono modificate in tempo reale per accogliere la domanda. Grazie allo sviluppo di internet e delle nuove tecnologie il DRT più studiato è il secondo caso con richieste analizzate in tempo reale. In particolare, viene studiato un DRT misto, infatti spesso una parte di richieste sono già conosciute prima di iniziare la pianificazione, quindi una difficoltà aggiuntiva è programmare le rotte che servono queste richieste conosciute in modo abbastanza lasco da poter introdurre le future richieste dinamiche.

Un primo esempio interessante (Madsen O. B. G., 1995) presenta la soluzione di un problema reale sviluppato per persone anziane o con disabilità a Copenaghen. Gli utenti possono specificare la finestra temporale dell'arrivo o della partenza, ma non entrambe. I veicoli sono di diversi tipi e non tutti sono sempre disponibili. Le richieste vengono raccolte dinamicamente, la velocità dei veicoli è variabile e i veicoli possono essere fuori servizio per dei guasti. Gli autori hanno sviluppato un algoritmo di inserimento richieste chiamato REBUS, le nuove richieste vengono aggiunte alle rotte esistenti considerando la difficoltà di inserimento. Gli autori hanno testato istanze fino a 300 utenti e 24 veicoli ottenendo soluzioni di buona qualità in un tempo computazionale breve.

Uno studio diverso (Teodorovic D., 2000) utilizza una funzione obiettivo non fissata, ma un insieme di tre criteri da minimizzare: distanza totale percorsa, attesa dei veicoli e tempo di viaggio degli utenti. Quando arriva una nuova richiesta viene calcolato l'aumento di distanza percorsa e di attesa dei veicoli per ogni rotta esistente e ognuna di queste possibilità viene etichettata con "piccolo", "medio", "grande" riferito all'aumento dei tempi. In base ai risultati l'algoritmo assegna a ogni rotta, quindi a ogni veicolo, un grado di preferenza di utilizzo ("molto debole", "debole", "medio", "forte", "molto forte") che permette di scegliere la rotta migliore. Queste etichette vengono assegnate con una logica fuzzy, secondo cui un predicato non deve essere vero (1) o falso (0) solamente, ma può avere anche valori di verità intermedi. Gli autori hanno testato istanze con 900 richieste.

Un altro approccio (Colorni A., 2001) ha testato tre diverse funzioni obiettivo: massimizzazione delle richieste servite, massimizzazione della qualità del servizio percepita dagli utenti e la minimizzazione della distanza percorsa. Nel loro sistema di prenotazione viene considerata una fase di negoziazione con l'utente, affinché quest'ultimo non richieda finestre temporali troppo strette. L'algoritmo di inserimento della nuova richiesta viene diviso in due parti, una prima parte di clustering delle richieste ed una seconda di routing. La seconda parte applica un algoritmo di branch-and-bound a un insieme di richieste che hanno finestre temporali simili.

Alcuni lavori (Coslovich L., 2006) presentano algoritmi a due fasi per gestire il caso dell'inserimento di una nuova richiesta in una rotta esistente. La prima fase viene usata per creare un vicinato ammissibile per ogni rotta esistente attraverso un algoritmo 2-opt. La seconda fase inserisce la nuova richiesta con l'obiettivo di minimizzare l'insoddisfazione degli utenti.

Un nuovo algoritmo a due fasi (Shen J., 2017) è stato infine proposto con l'obiettivo di minimizzare il costo totale del sistema. In questo caso i punti di salita e discesa dei passeggeri sono in posizioni prestabilite, in quanto si suppone di servire un'area suburbana a bassa densità, in cui gli abitanti

possono raggiungere a piedi le fermate prestabilite. I veicoli passeranno per una certa fermata solo se ci sono delle richieste da servire. Nella prima fase vengono servite le richieste che si hanno prima dell'inizio del servizio, mentre nella seconda fase si aggiungono le nuove richieste dinamicamente. Gli autori hanno svolto una simulazione su un caso realistico nella città di Nianjing ed hanno confermato l'efficienza del loro algoritmo confrontandolo con un algoritmo enumerativo.

Le simulazioni di trasporto sono un'opzione utile per valutare le prestazioni dei sistemi DRT. Una recente esperienza (Armellini M., 2021) propone la simulazione di servizi DRT utilizzando il pacchetto software per simulazioni microscopiche Eclipse SUMO (Simulation of Urban MObility) come framework di lavoro. Le richieste del DRT sono gestite dinamicamente dal modulo di schedulazione dello strumento SUMO. Questo modulo è anche responsabile della chiamata di un algoritmo risolutore per il Dial-a-Ride-Problem (DARP), dell'elaborazione dei suoi risultati e dell'invio dei veicoli DRT in base ad essi. Lo strumento consente anche una più facile implementazione di altri metodi per risolvere il DARP. Per dimostrare l'utilizzo dello strumento è stato presentato un servizio DRT operante in due quartieri centrali della città di Brunswick (Germania).

La ripianificazione ottimale dei percorsi di una flotta di veicoli per ottenere una migliore flessibilità rispetto alla domanda è in definitiva un ottimo esempio di attività operativa che può essere rappresentata come un problema di ottimizzazione. Risolvere questi problemi diventa sempre più difficile con più veicoli o reti più grandi, nonché quando si considerano vincoli come la capacità dei veicoli. La letteratura più recente mostra che algoritmi quantistici come Quantum Approximate Optimization Algorithm (QAOA) possono essere utilizzati per risolvere determinati problemi di trasporto, suggerendo che i computer quantistici potrebbero essere in grado di affrontare queste applicazioni in futuro (Choi J., 2019). Molte iniziative di ricerca in tutto il mondo stanno analizzando il potenziale e l'efficienza dei computer quantistici, concentrandosi in particolare su problemi specifici che i computer classici non possono risolvere o problemi che i computer quantistici possono gestire in modo più efficiente, come appunto quelli di routing. Tuttavia, gli errori inerenti al processo di computazione quantistica gli effetti di decoerenza nell'hardware quantistico di oggi limitano ancora le prestazioni anche per dimostrazioni su piccola scala.

## Caratteristiche generali del servizio

Come detto, il trasporto a chiamata (TC) viene fornito per mezzo di flotte di veicoli di piccole dimensioni (come, ad esempio, minibus o van) e consiste in un'offerta di servizio per spostamenti, in genere non di lungo raggio, personalizzati in base alle richieste dell'utenza. In particolare, diversamente dal classico trasporto locale, il TC non si basa sul concetto di linee la cui percorrenza e orari sono fissati, ma corrisponde alla definizione dinamica dei percorsi in modo da adattarli all'insieme di richieste ricevute, ognuna caratterizzata sia da un'origine e destinazione diversa, sia da tempi di partenza e/o arrivo diversi. I viaggi dei mezzi per il TC vengono quindi determinati cercando di coniugare un alto livello di servizio all'utenza con criteri di economicità: i viaggi infatti servono un certo numero di utenti alla volta adattando il percorso alla domanda servita con un buon livello di flessibilità.

Le modalità di servizio e la relativa pianificazione costituiscono gli aspetti da un lato qualificanti e dall'altro critici per l'efficacia ed efficienza del servizio. Con modalità si intende il tipo di procedura di accesso al servizio, in particolare l'anticipo con cui le richieste vengono raccolte rispetto al momento in cui dovranno essere servite. Il TC può essere offerto attraverso una prenotazione che viene chiusa con un determinato anticipo rispetto al servizio. Tale anticipo può andare dalle 24 ore precedenti, all'estrema dinamicità del tempo reale, in cui le richieste sono raccolte sino a pochi minuti (ad esempio, 15) prima del possibile servizio. Inoltre, anche gli strumenti messi in atto per raccogliere le richieste, dai call center alle *app*, influenzano la modalità di risposta e i metodi utilizzati per la pianificazione sono chiaramente influenzati da essa. Una grande differenza nelle tecniche utilizzate deriva dai passi del processo di pianificazione del servizio, in particolare dai tempi in cui viene confermata la presa in carico di una richiesta fornendo all'utenza le informazioni riguardo al relativo viaggio (punto e tempo di partenza, tempo stimato di arrivo a destinazione). Il processo inoltre è anche influenzato dalla flessibilità ammessa rispetto ai tempi di partenza e arrivo. In generale, infatti, la procedura di pianificazione può consistere nella seguente sequenza di passi:

1. Raccolta richieste entro il minimo anticipo consentito
2. Elaborazione piani di viaggio per i veicoli per servire le richieste
3. Comunicazione all'utenza dei dettagli di viaggio e conferma

Evidentemente tali passi possono essere iterati considerando tutte le richieste insieme (ad esempio, la raccolta viene completata entro le 24 ore precedenti) e fornendo il feedback a tutta l'utenza alla fine della pianificazione, oppure, all'estremo opposto, considerando ogni singola richiesta che dovrà essere inserita nella pianificazione e il cui feedback verrà fornito sostanzialmente in tempo reale. Dal punto di vista della pianificazione si passa quindi da una procedura off-line che determina un piano consolidato, a una procedura on-line che può rielaborare la pianificazione al momento del ricevimento delle singole richieste. Nel caso di rielaborazioni, per mantenere un'elevata qualità del servizio, i dettagli dei viaggi comunicati all'utenza dovranno essere modificati il meno possibile, applicando solamente una tolleranza di pochi minuti sulle tempistiche dichiarate.

La pianificazione, in generale, dovrà considerare due classi distinte di obiettivi:

1. la minimizzazione dei costi operativi (tipicamente associati alla distanza complessiva percorsa dai mezzi e dal numero di mezzi impiegati);
2. la massimizzazione del livello di servizio offerto all'utente (che corrisponde al soddisfacimento dei requisiti temporali per i viaggi richiesti, dai tempi indicati per la partenza e/o l'arrivo, alla durata complessiva del viaggio).

Nel seguito verranno descritte le caratteristiche del servizio di TC considerate per questo progetto, mettendo in evidenza le assunzioni fatte sulla modalità di raccolta delle richieste e sulla conseguente interazione con l'utenza.

Requisiti e assunzioni considerate per il servizio di trasporto a chiamata

Il servizio di TC vuole implementare un sistema DRT di tipo generale e flessibile su aree urbane a cui sono associate flotte di minibus. Tale servizio si basa su un modello di pianificazione delle rotte dei veicoli e su un relativo algoritmo di tipo generale, ossia che, sotto opportune ipotesi operative, potrà essere utilizzato facendo riferimento ad un'area urbana di qualunque dimensione (dal quartiere all'intera città). Inoltre tale modello potrà essere esteso, eventualmente solo dal punto di vista metodologico, prendendo in considerazione la possibilità di connettere aree diverse servite dal TC attraverso le linee di forza.

Sono qui nel seguito definite le assunzioni ipotizzate per le modalità di attuazione del servizio di TC:

1. Le richieste di servizio saranno acquisite tramite un'apposita applicazione entro il giorno che precede quello in cui è richiesto il servizio. In particolare, sarà definito un orario entro il quale le richieste per il giorno seguente dovranno essere ricevute.
2. Le richieste dovranno essere caratterizzate da una origine e una destinazione e da un orario desiderato di partenza e di arrivo. Per tali orari sarà specificata una finestra di tolleranza entro cui la partenza e l'arrivo dovranno avvenire.
3. Il servizio fornirà una risposta di conferma indicando il luogo preciso di origine e di destinazione (in particolare entro una distanza massima da quelli specificati in origine dall'utenza) e gli orari.
4. L'utenza potrà eventualmente rifiutare la proposta che verrà considerata accettata qualora rispetti i limiti di tolleranza per spazio e tempo chiaramente indicati per il servizio.



**Unione Europea**  
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale