



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Gestionale

**UN APPROCCIO BASATO SULLA
PROGRAMMAZIONE MATEMATICA PER LA
GESTIONE EFFICIENTE DI SISTEMI DI
RIDE-SHARING**

**A MATHEMATICAL PROGRAMMING BASED
APPROACH FOR EFFICIENTLY MANAGING
RIDE-SHARING SYSTEMS**

Relatore:

Dott.ssa **Ornella Pisacane**

Tesi di Laurea di:

Ilaria Crescini

Matricola n. S1077119

A.A. 2019 / 2020

*A nonno Mario, nonna Viola
nonno Lucio e nonna Anna
siete il mio sorriso più grande*

Sommario

Abstract	3
Capitolo 1. Introduzione	4
Capitolo 2. Letteratura	9
Capitolo 3. Descrizione del Modello	16
Capitolo 4. Descrizione casi di studio e sperimentazione.....	22
4.1 Validazione del modello.....	22
4.2 Scenari con stessa origine e stessa destinazione	23
4.3 Analisi di sensitività al variare delle fasce orarie.....	24
4.4 Analisi sensitività scenario con 50 richieste.....	25
4.4.1 Analisi al variare del costo di usura del veicolo	25
4.4.2 Analisi sensitività al variare del costo del servizio.....	26
4.4.3 Analisi sensitività al variare del numero di veicoli	27
4.5 Caso di studio verosimile	29
Capitolo 5. Conclusioni.....	34
Bibliografia	36
Sitografia.....	38
Ringraziamenti	39

Abstract

Nel mondo si sta affermando una tipologia di mobilità innovativa: il *ride sharing*, che permette di spostarsi da un luogo di origine ad uno di destinazione, condividendo con altri utenti l'auto.

Questa forma di mobilità è vantaggiosa per l'utente che può prenotare il suo "passaggio" (da qui il termine "ride") senza dover essere soggetto agli orari rigidi dei mezzi pubblici e soprattutto, per chi usa l'auto solo in poche occasioni, consente di abbattere i costi fissi e di manutenzione che si devono invece sostenere possedendo un'auto propria. Il *ride sharing* è anche una forma di mobilità eco-sostenibile, se pensiamo alla riduzione delle auto su strada che questa comporta e quindi, implicitamente, alla riduzione delle emissioni inquinanti e ad un miglioramento della qualità della vita dei cittadini.

Obiettivo di questo lavoro di tesi è in primis introdurre ai sistemi di *ride sharing*, evidenziandone i vantaggi, analizzando l'interesse degli utenti nel web in relazione anche a sistemi di *ride sharing* già attivi come Uber e Lyft.

Quindi, si descrivono i principali contributi in letteratura che propongono approcci basati sull'ottimizzazione matematica per la gestione efficiente dei servizi di *ride sharing* introducendo anche la prospettiva futura in cui questi facciano uso di veicoli a guida autonoma. Si mostra e si discute quindi l'interesse che questi sistemi stanno riscuotendo nell'ambito della ricerca scientifica.

Successivamente, si descrive un modello di programmazione lineare, derivato da quello proposto da Xiao et.al (2020), per un problema di *ride sharing* su prenotazione con l'obiettivo di instradare opportunamente le richieste degli utenti.

La formulazione matematica proposta è infine implementata mediante il linguaggio di modellazione algebrica Ampl.

La validazione del modello proposto è fatta su un caso di studio "giocattolo" in cui il numero di richieste da servire è molto basso.

La fase di testing del modello è invece condotta su due scenari differenti: uno, più semplice, in cui si ipotizza che tutti gli utenti condividano lo stesso punto di origine e di destinazione. L'altro, invece, più complesso in cui ogni utente specifica un punto di origine e di destinazione differente da quello degli altri. In entrambi i casi, le istanze di testing sono state generate durante il lavoro di tesi.

Capitolo 1. Introduzione

I sistemi di *ride sharing*, che stanno ricevendo molta attenzione grazie agli innumerevoli vantaggi che offrono agli utenti, sono nati con lo scopo di raccogliere le richieste di trasporto di vari utenti (anche persone che non si conoscono) con orari e itinerari simili in maniera tale da supportare la condivisione. Questi sistemi possono offrire significativi vantaggi sociali e ambientali riducendo, ad esempio, il numero di auto su strada con un ingente riduzione della congestione del traffico e di conseguenza favorendo anche una riduzione delle emissioni inquinanti.

L'origine della *sharing mobility* si può attribuire alla pratica, molto più antica, dell'autostop, ovvero richiedere un passaggio (in realtà in quel caso, direttamente a bordo della strada). Successivamente, grazie soprattutto agli avanzamenti tecnologici, si è passati ad utilizzare il telefono per prenotare una corsa; fino ai giorni nostri, in cui, grazie all'avvento di Internet, l'utilizzo di browser e app apposite, basta un semplice click per organizzare un itinerario.

Lo sviluppo di tecnologie digitali offre la possibilità di far incontrare domanda e offerta favorendo forme di organizzazione anche molto efficienti dei servizi di mobilità.

Il *ride sharing* è quindi una forma di mobilità condivisa ma non va confuso con il *car sharing* o con il *car pooling* che, seppur nella stessa categoria, si differenziano su diversi aspetti. Il *carpooling* definisce un servizio in cui il conducente del veicolo deve percorrere una tratta indipendentemente dal fatto che stia offrendo un passaggio o dal fatto che trovi o no persone con cui viaggiare.

Il maggior esponente nel mondo per questo servizio è BlaBla Car, con 90 milioni di utenti e oltre 25 milioni di viaggiatori ogni trimestre (www.blablacar.it). Il *car sharing* è un servizio di mobilità urbana che permette di prenotare e noleggiare un veicolo anche per pochissimo tempo, facendo così risparmiare, in generale, sull'acquisto e la manutenzione di un mezzo privato.

In Italia, il più ampio servizio di *car sharing* si sviluppa a Milano, con sei operatori in servizio e quasi 3000 auto in circolazione (www.comune.milano.it).

Linda Gobbi dell'Osservatorio Future Concept Lab afferma che: “*L'auto stessa diventa supporto di comunicazione. Si mettono in relazione tecnologia, sostenibilità e performance urbana per diffondere messaggi e promuovere nuovi comportamenti*”(Mangini,2014). Queste parole riassumono gli obiettivi e i benefici

che caratterizzano il *ride sharing*. Il servizio mira ad ottimizzare gli spostamenti effettuati dalle persone, permettendo agli utenti di risparmiare sulle spese di viaggio tramite la condivisione dei costi e fornendo un mezzo di trasporto a coloro che non possiedono una macchina. In più, garantito un alto grado di efficienza e di sicurezza, permette di ridurre notevolmente la congestione del traffico, riducendo il numero di auto in circolazione e creando occasioni di socializzazione tra passeggeri.

Per sviluppare un progetto di *ride sharing* efficiente e di conseguenza le decisioni gestionali e di ottimizzazione, bisogna stabilire gli obiettivi che possono variare in:

- **Minimizzare i km percorsi.** È fondamentale a livello sociale perché riduce l'inquinamento ed il traffico.
- **Minimizzare il tempo di viaggio.** Dal punto di vista sociale, è una misura importante per le emissioni e per la velocità dei veicoli.
- **Massimizzare il numero di partecipanti.** È di grande interesse per i gestori i cui ricavi sono collegati al numero di combinazioni di successo

Uno dei motivi per cui non si può sempre puntare a questi tre obiettivi contemporaneamente, consiste nel dover considerare le preferenze e i vincoli dei consumatori. La condizione più limitante è il tempo. *Rider* e *Driver* compilano delle preferenze di orario e il fornitore svilupperà un accoppiamento con orario di partenza più vicino possibile a quello desiderato. In questo modo, si minimizzano le informazioni inserite dall'utente ma si limita la flessibilità. Questo problema può essere parzialmente risolto inserendo una finestra temporale, nella quale il fornitore dovrà considerare anche le possibili congestioni del traffico, entro la quale la corsa deve essere garantita. Oltre al tempo bisogna valutare anche le caratteristiche preferenziali, ad esempio una donna potrebbero non sentirsi al sicuro in un viaggio da sola con un uomo, oppure qualcuno potrebbe non gradire la condivisione della corsa con fumatori. Per sviluppare un piano di lavoro bisogna, quindi, prima definire gli obiettivi e le metodologie che si vogliono adottare (Agatz et.al, 2012).

Un progetto internazionale che affronta il problema di *sharing mobility* e fornisce servizi di *ride sharing* è sviluppato da Uber (www.uber.com/it/it/). “*Creiamo opportunità facendo girare il mondo*” è lo slogan esposto sul sito di questa azienda per descrivere e far conoscere di cosa si occupa. Uber è una multinazionale, nata nel 2008, con sede a San Francisco che permette un servizio di trasporto attraverso tecnologie che mettono in contatto passeggeri e conducenti. In pochi anni, ha

raggiunto un business valutato 70 miliardi di dollari (dati 2016). Ha incontrato molti ostacoli, tra cui una forte opposizione dei tassisti a causa del servizio che fornisce driver privi di licenza. Uber opera in 66 nazioni in più di 507 città in tutto il mondo (www.ilsole24ore.com). Oggigiorno, è considerato uno dei principali fornitori di servizi di *ride sharing* nel mondo. L'app organizza e combina gli spostamenti in tempo reale: tutti possono essere potenziali *driver*, basta iscriversi alla piattaforma e rendersi disponibili al servizio tramite la propria auto. Per utilizzare Uber è sufficiente avere un indirizzo mail e un numero di telefono e si può richiedere la corsa dal browser o dall'app. All'interno del campo "Dove si va?" si inserisce la destinazione, si imposta il punto di partenza e si "Conferma" la richiesta per essere abbinati all'autista partner più vicino. Si può monitorare il suo arrivo sulla mappa. Una volta arrivati a destinazione, si hanno diverse opzioni di pagamento: contanti, carta di credito o il saldo Uber Cash. Infine, sia passeggero che autista possono lasciare una recensione per valutare la corsa. Il prezzo è calcolato in base alla durata e alla distanza. Sono previsti supplementi per pedaggi, cancellazione, tempo di attesa e costi di prenotazione (www.uber.com).

Il maggior competitor di Uber per servizi di *ride sharing* negli Stati Uniti è rappresentato da Lyft. La *mission* di questa compagnia è "*improve people's lives with the world's best transportation*". Il progetto di Lyft viene lanciato nel 2012 con il focus su tre parole chiave: Società, Economia e Ambiente. Nel 2018 ha servito più di 30 milioni di passeggeri e 2 milioni di *driver* raggiungendo 8.1 miliardi di dollari in prenotazioni e 2.2 miliardi di dollari di ricavi (www.lyft.com). I driver sono detti "*carstache*" dato che ogni auto che fornisce il servizio è decorata con dei grandi baffi rosa. La principale differenza con Uber consiste nel passare tramite Facebook, mettendo in contatto *driver* e *rider* attraverso un algoritmo che mira a scegliere il *matching* migliore in base alla cerchia di amici e agli interessi mostrati nel profilo (Mangini, 2014). Per utilizzare Lyft è necessario registrarsi e creare un proprio account per poi prenotare tramite app o browser. Bisogna compilare le voci in cui va inserito il luogo di *pickup* e *drop-off* e selezionare il tipo di corsa desiderata, nel caso si scelga la tipologia "*Shared*", si accetta la possibilità di condividere l'auto con altri passeggeri e si avrà diritto ad una riduzione del prezzo. Accettata la richiesta, si riceverà il nome del guidatore, il tempo stimato di attesa, la valutazione, la foto del profilo e un'immagine della macchina. Arrivati a destinazione, in caso di mancato

pagamento, questo verrà addebitato automaticamente tramite il metodo di pagamento registrato nell'account. Anche per Lyft come per Uber, al termine della corsa sia *driver* che *rider* lasciano una recensione relativa alla corsa appena effettuata (www.lyft.com).

Per analizzare l'attenzione degli utenti del Web per il *ride sharing* possiamo osservare i seguenti grafici che mostrano rispettivamente l'interesse nel tempo verso il *ride sharing*, per Uber e per Lyft.



Figura 1: Interesse per il ride sharing. Fonte: Google Trends

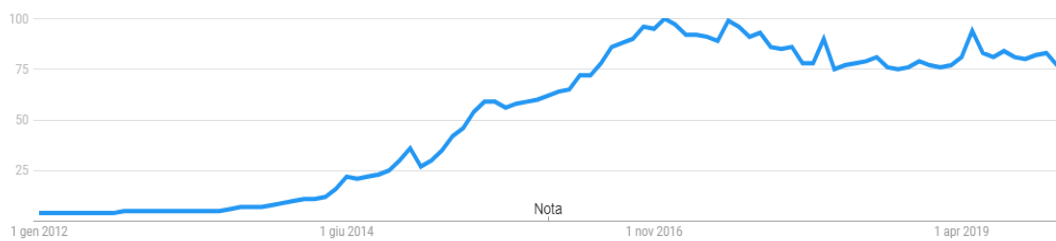


Figura 2: Interesse per Uber. Fonte: Google Trends

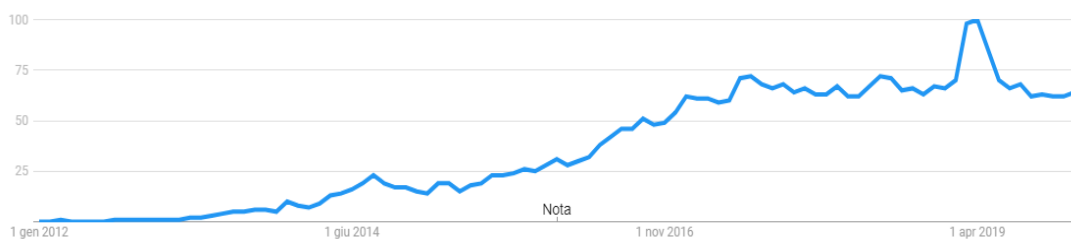


Figura 3: Interesse per Lyft. Fonte: Google Trends

La Figura 1, riporta all'interno del grafico le informazioni a partire da Gennaio 2014 fino a Gennaio 2020, la Figura 2 e 3 riportano dati da Gennaio 2012 a Gennaio 2020. Valutando e incrociando i dati ricavati dai tre grafici e in questi intervalli di tempo si può notare come l'interesse per il *ride sharing* è stato fin da subito importante e in crescita per alcuni anni andando a diminuire verso il 2008 dove per un lungo periodo l'attenzione è stata sensibilmente bassa. Successivamente all'introduzione nella panoramica internazionale di progetti mirati al servizio di *ride sharing* come ad esempio Uber e Lyft, l'interesse è nuovamente aumentato e ha raggiunto il picco massimo nel 2016. Negli ultimi anni, gli utenti sono particolarmente curiosi di conoscere questo tipo di mobilità e sempre più persone si aprono alla possibilità di usufruire di questo servizio.

Il resto del capitolo è organizzato come segue: il capitolo 2 effettuerà una breve disamina della letteratura, evidenziando i contributi più recenti all'ottimizzazione di tali sistemi. Il capitolo 3 introdurrà il problema dell'ottimizzazione degli itinerari, la notazione usata ed il modello matematico rivisto ed implementato in questo lavoro di tesi. Il capitolo 4, invece, descriverà i risultati ottenuti su diversi casi di studio e l'analisi di sensitività condotta al variare di alcuni parametri di input del modello. Infine, il capitolo 5 concluderà il lavoro e descriverà possibili sviluppi futuri.

Capitolo 2. Letteratura

In questo capitolo, descriviamo brevemente i principali contributi della letteratura sul *ride sharing*, con particolare attenzione a quelli che hanno proposto metodi e modelli di ottimizzazione.

I primi articoli che parlano di *ride sharing* risalgono addirittura al 1942, Geo. L. J. 185 (1942-1943) riporta che in periodo di guerra, i proprietari dei veicoli hanno adottato molte misure al fine di preservarne l'utilizzo. La limitata disponibilità di macchine, pneumatici e gas hanno creato dei nuovi problemi economici che hanno portato alla necessità di cooperare, perciò sono stati sviluppati piani di *car sharing* e *ride sharing*, sostenuti dal programma di governo.

Bernard S. Meyer (1942-1943) riporta come oltre ai problemi economici sopra elencati si aggiunge il requisito della “*Gasoline Rationing Regulations*” ovvero un regolamento sul razionamento della benzina per chilometraggio aggiuntivo che vincola e stabilisce se il richiedente del servizio di *ride sharing* può o non può partecipare alla tratta..

Jacob J. Gordon (1943-1944) presenta il caso dell'Illinois e spiega come con l'avvento del razionamento degli pneumatici e della benzina e un corrispondente incremento della necessità di usare le automobili per i trasporti da e per i lavori di guerra nei distretti periferici, ha portato un aumento del numero di persone che adottano piani di *ride sharing*. Si sofferma anche sull'aspetto legale, in quanto in caso di servizio non andato a buon fine o con problemi se il passeggero dell'auto intraprende una causa per lesioni personali contro il conducente, si potrebbero verificare conseguenze legali.

La riduzione delle emissioni dovute al minor numero di auto in circolazione è uno dei benefici che caratterizzano il *ride sharing*.

L'inquinamento dell'aria è oggetto di studio già da molti anni. Infatti, Levofsky et. al (2001) mostrano come le città Americane hanno problemi per la qualità dell'aria a causa dell'utilizzo delle auto e nonostante il trasporto pubblico e il *carpooling*, non riescono ad essere risolti. Questo dato secondo il loro studio non è sorprendente dato che solo l'11% della popolazione che abita nelle periferie degli Stati Uniti vive in zone in cui le fermate per i trasporti pubblici sono entro un quarto di miglio e il servizio ha intervalli di frequenza minori di 15 minuti. Un nuovo modo di trasporto pubblico, che promuovono in questo articolo è proprio il *ride sharing* che utilizzando

il GPS e la comunicazione tramite wireless può formulare le combinazioni tra guidatori e passeggeri in modo che entrambi ne traggano beneficio.

Agatz et. al (2012) spiega come i servizi di *ride sharing* possono offrire significativi vantaggi sociali e ambientali riducendo il numero di auto utilizzate per i viaggi personali e migliorandone l'utilizzo dei posti disponibili. Una delle componenti necessarie per un sistema di *ride sharing* di successo è una tecnologia di ottimizzazione efficace ed efficiente che abbina piloti e passeggeri. Agatz et. al (2012) presentano i problemi di gestione che si devono affrontare quando si sviluppa una tecnologia a supporto del *ride sharing* e studiano i modelli presenti in letteratura. Molti hanno provato a formulare modelli di ottimizzazione mirati al:

- *ride sharing* su prenotazione, la disponibilità delle informazioni di viaggio e le richieste avvengono antecedentemente all'inizio del servizio e non variano durante l'attuazione.
- *ride sharing* dinamico, in cui si riceve e gestisce la domanda in tempo reale e si cerca di inserire all'interno dello stesso veicolo più passeggeri con orario e luoghi di origine e destinazione simili. Le informazioni e le richieste potrebbero cambiare durante l'esecuzione del servizio.

Daganzo e Ouyang (2019) mostrano un quadro generale e analitico sui sistemi che si occupano di servizi di trasporto *door-to-door*. All'interno del modello vengono inseriti anche i casi di taxi non condiviso e il servizio di trasporto a chiamata che comprende il servizio di *dial-a-ride* ovvero una prestazione completa in cui si porta il passeggero dall'origine alla destinazione desiderata e di *ride sharing* attualmente utilizzato da Lyft e Uber. Daganzo e Ouyang (2019) descrivono i risultati ricavati dal loro studio come non perfettamente realistici in quanto al fine dello svolgimento delle simulazioni e dell'analisi dei risultati sono state fatte semplificazioni rilevanti come nel caso degli algoritmi di assegnamento usati dai fornitori del servizio che nella realtà sono molto più complicati di quelli riportati in questo studio. Riconoscono che oltre a proporre uno sviluppo semplice, questo è anche adattabile a molti casi di interesse, può essere utilizzato dalle compagnie di taxi e dalle agenzie governative per esplorare strategie operative e di prezzo.

Santos et. al(2015) trattano un problema di ottimizzazione combinatoria che modella situazioni di *ride sharing* dinamico e *taxi-sharing*. I passeggeri che desiderano prenotare e condividere un taxi o una corsa, tramite una app, inseriscono la location

in cui si trovano, la destinazione, l'intervallo di tempo che hanno a disposizione e a differenza di molti altri progetti viene inserito anche il costo massimo che sono disposti a pagare. Gli autisti devono quindi definire a priori un prezzo al km. Il focus del modello è quello di riuscire a progettare un itinerario al fine di soddisfare il maggior numero di richieste, rispettando le restrizioni. Considerando servizi dinamici, le richieste arrivano on line in tempo reale e l'itinerario deve essere modificato per adattarsi alle nuove richieste. Santos et. al(2015) propongono, per far fronte al *ride sharing* dinamico, di dividere il giorno in brevi periodi temporali e per ognuno di questi creare un'istanza di un problema statico in cui gli input sono fissi. Sviluppano un metodo che divide il problema in una parte statica che necessita di un'euristica per la risoluzione e una parte che si occupa dei problemi di percorso che vengono risolti tramite un algoritmo. Santos et. al(2015) affermano che la loro proposta di far inserire il vincolo di prezzo rende il modello più generale e realistico rispetto ad altri presenti in letteratura, a prova di ciò hanno effettuato esperimenti con istanze basate su dati reali che hanno dimostrato come il loro metodo può effettivamente risolvere il problema anche in larga scala.

Un'altra proposta per ottimizzare e gestire il servizio di *ride sharing* dinamico viene esposta da Simonetto et.al (2019) dove il problema è formulato come una successione di processi in cui avviene un assegnamento lineare tra i veicoli e le richieste dei consumatori. L'algoritmo, così come è costruito mira a massimizzare l'efficienza computazionale. Tramite i *datasets* dei taxi di New York City e dell'area metropolitana di Melbourne, mostrano come, gestendo il servizio di *ride sharing* dinamico attraverso il loro algoritmo, si hanno reali benefici in termini di efficienza e in più si arriva alla soluzione in tempi molto rapidi pur garantendo un buon livello qualitativo.

I fornitori di servizi di *ride sharing* usano le decisioni di prezzo e di abbinamento per controllare e gestire i servizi, Özkan E. (2020) mostra come queste scelte possono essere fatte combinandole o in modo interscambiabile così, ha analizzato il caso in cui vengono fissate le decisioni di abbinamento secondo una semplice regola e vengono ottimizzate solo le decisioni sul prezzo, cercando di capire se questo è sufficiente per raggiungere la performance ottimale. Studiando l'interazione tra le decisioni di prezzo e abbinamento di un'impresa di *ride sharing* si è giunti alla conclusione che ignorare l'ottimizzazione dell'abbinamento porta a risultati in

termini di prestazione inferiori. Analogamente è stato dimostrato che fissando le decisioni sul prezzo e ottimizzando le decisioni sugli abbinamenti il risultato non è quello ottimale. Quindi Özkan E. (2020) stabilisce che l'ottimizzazione in una sola delle dimensioni (o prezzo o abbinamento) non ha benefici per l'impresa, mentre l'ottimizzazione combinata del prezzo e degli abbinamenti può portare ad un incremento significativo della performance.

Li et.al (2019) affermano che la progettazione attenta della domanda è una strada promettente per l'ottimizzazione congiunta dell'assegnazione del veicolo richiesto e del *routing* di una flotta di veicoli. Nell'articolo hanno sviluppato un quadro probabilistico di domanda focalizzandosi sulla massimizzazione del numero previsto di prelievi dei passeggeri, date le distribuzioni di probabilità delle domande future. L'idea chiave, che differenzia lo studio da molti altri presenti in letteratura, è quella di assegnare le richieste ai veicoli in modo probabilistico e viene proposta un'approssimazione della funzione obiettivo per sviluppare un'euristica a doppio subgradiente. Risultati di esperimenti numerici basati su informazioni reali per Manhattan mostrano che, in confronto ad uno sviluppo in cui la domanda è ignota, la soluzione con studio probabilistico della domanda migliora l'efficienza dei prelievi dei passeggeri fino al 46%. Sviluppando un'ottimizzazione che combina più veicoli di una flotta porta al 19% in più dei prelievi rispetto a quello con ottimizzazioni separate su singoli veicoli.

La letteratura più recente sull'argomento pone l'attenzione all'evoluzione tecnologica e al futuro del *ride sharing* analizzando l'effetto che potrebbe avere su strade urbane se come mezzi di trasporto si utilizzassero veicoli a guida autonoma ovvero senza guidatore. La *SAE International* (2014) identifica 6 livelli di guida autonoma da 0 a 5 che vanno rispettivamente da non autonoma e completamente autonoma. Quest'ultimi veicoli sono capaci di monitorare l'ambiente e eseguire compiti di guida dinamica in ogni tipologia di strada. Gli sviluppi tecnologici hanno portato ad un maggiore fattore di sicurezza che permettere di usare queste auto come taxi per la mobilità urbana. Utilizzati nello schema di servizio del *ride sharing* possono fornire l'opportunità di trasformare il ruolo del guidatore in passeggero e in Xiao et.al(2020) si presentano due metodologie per studiare l'effetto che questi veicoli potrebbero avere se venissero utilizzati su strade urbane:

- Simulazione ad agenti
- Ottimizzazione matematica

Martinez and Viegas (2017) hanno usato la simulazione ad agenti al fine di costruire un modello di *ride sharing* caratterizzato da taxi 100% automatizzati, per soddisfare la domanda all'interno della città. I risultati forniti mostrano che, nel caso di studio della città di Lisbona, con metropolitana in funzione, ogni veicolo autonomo può togliere 9 su 10 macchine in circolazione con la necessità di includere al massimo 5 minuti di attesa; escludendo l'utilizzo della metro, il numero si riduce a 5 su 10. Fagnant and Kockelman (2014) hanno utilizzato una metodologia simile per studiare l'utilizzo di una flotta di veicoli autonomi confrontandoli con l'utilizzo dell'auto privata. I loro risultati indicano come ogni veicolo autonomo può sostituire 11 veicoli convenzionali, causando però un aumento del 10 % della distanza percorsa. Spieser et al. (2014) hanno sviluppato una formulazione matematica per studiare il caso della città di Singapore stimando il numero di veicoli autonomi per sostituire tutte le tipologie di trasporto personale, concludendo che la *shared mobility* potrebbe ricoprire la domanda di trasporto personale con 1/3 delle vetture attualmente in uso. Sulla base dei precedenti risultati, un sistema di veicoli autonomi può portare benefici nel trasporto urbano riducendo il numero di veicoli su strada pur garantendo la stessa capacità. Xiao et.al(2020) descrivono il servizio di *dial-a-ride* del *ride sharing* per taxi automatizzati dove questo sistema di mobilità automatizzata permette di fornire un servizio simile a quello delle normali compagnie di trasporto ma con costi ridotti e più flessibilità in termini di tempo e di riallocazione dei veicoli. Lo studio avviene su strada urbana, considerando anche le possibili congestioni stradali causate da questi stessi veicoli. In generale, sono molti gli studi recenti sull'uso dei veicoli autonomi come taxi o come mezzi per la *shared mobility*, tuttavia, come evidenziato da Xiao et.al (2020), non viene posta la giusta attenzione all'impatto sul traffico che una flotta di veicoli autonomi di dimensioni reali può causare in una rete stradale di dimensioni reali. Il modello di ottimizzazione dovrebbe tener conto che un numero elevato di veicoli in alcune parti della rete stradale potrebbe causare congestioni, rilevanti nell'ingegneria dei trasporti. Xiao et.al (2020) propongono un modello di programmazione non lineare intera che ottimizza l'itinerario della flotta di veicoli autonomi al fine di massimizzare il profitto del sistema. Per poter analizzare e gestire un servizio di *ride sharing*

dinamico dividono la giornata attraverso orizzonti temporali, che poi vengono risolti con un approccio basato su un algoritmo personalizzato Lagrangiano rilassato che permette di ottenere una soluzione vicina a quella ottimale. Esperimenti con dati reali sono stati svolti sulla città di Delf, Olanda e hanno dimostrato la qualità dell'algoritmo proposto.

Fagnanti e Kockelman (2016) forniscono tecniche di simulazione e metodi di valutazione per anticipare e valutare il potenziale impatto dell'adozione di veicoli a guida autonoma e la loro applicazione per la *shared mobility* focalizzandosi in particolar modo sul *ride sharing* dinamico. Le loro analisi si sono svolte studiando il potenziale impatto per l'area urbana di Austin, Texas e i risultati suggeriscono che il *ride sharing* dinamico riduce sia la media del tempo di servizio (tempo di attesa + tempo all'interno del veicolo) che i costi di viaggio per gli utilizzatori di veicoli autonomi condivisi anche includendo i costi per le fermate extra dei passeggeri e l'itinerario non diretto.

Il rapido sviluppo tecnologico ha accelerato le tempistiche per il pubblico uso di veicoli completamente autonomi e con la stessa velocità anche l'opinione pubblica si è evoluta. Gurumurthy e Kockelman (2020) studiano il modello di scelta dei veicoli a guida autonoma e la disponibilità degli Americani a pagare per viaggiare con un estraneo all'interno di un veicolo a guida autonoma in diversi tipi di viaggi, sia di lunga che di breve percorrenza. Hanno ottenuto 2588 risposte complete ad un sondaggio con 70 domande mirate a comprendere i possibili problemi di privacy e di sicurezza dovuti al fatto di partecipare al viaggio con un estraneo. Per analizzare i risultati sono stati stimati due modelli: uno per predire quanto gli Americani sono disposti a pagare per condividere una corsa e un altro per determinare quanto sarebbero disposti a pagare per rendere anonima la loro posizione mentre stanno all'interno del veicolo a guida autonoma. I risultati suggeriscono che per il primo caso la disponibilità al pagamento aumenterà con il tempo e che in futuro l'uso di veicoli autonomi per la *shared mobility* sarà molto utile per viaggi di business a lunga distanza e per quanto riguarda l'analisi delle risposte relative alla privacy le stime suggeriscono che non è un problema primario.

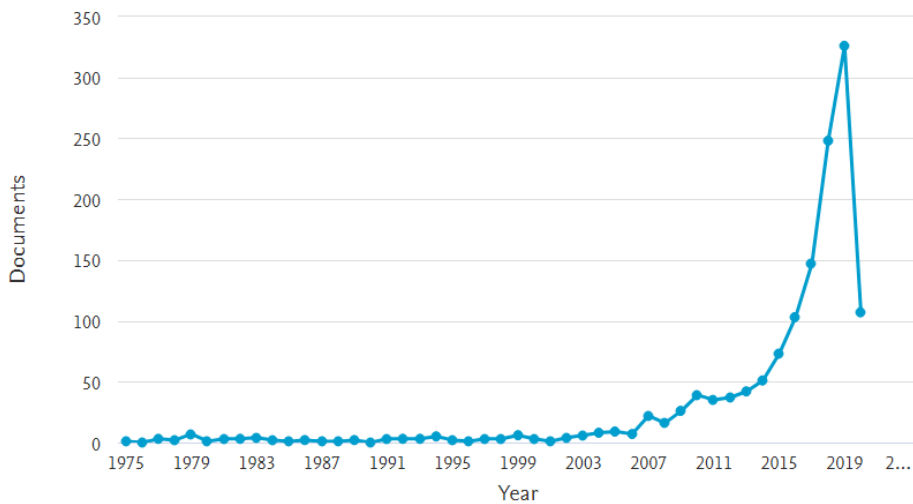


Figura 4: Documenti per anno. Fonte: Scopus

Per analizzare l'interesse della letteratura negli anni, viene riportato il precedente grafico, estrapolato dall'analisi delle ricerche per il *ride sharing* in Scopus (<https://www.scopus.com>). Nel sito sono registrati 1372 articoli relativi a questo argomento. Come si può notare dal grafico l'interesse verso l'argomento ha iniziato ad essere rilevante verso il 2007 in cui sono registrati 22 articoli. Negli anni a seguire l'attenzione è andata sempre in crescendo, in particolar modo un aumento esponenziale si verifica dal 2012 anno in cui avviene l'introduzione nella panoramica internazionale di progetti mirati al servizio di *ride sharing* come ad esempio Uber e Lyft. Nel 2019 sono registrati 326 articoli in Scopus a dimostrazione che questa tipologia di trasporto è al centro dell'interesse letterario ed è vista come una realtà concreta per la mobilità odierna e futura. Fissando come data finale di questo grafico Giugno 2020, possiamo ipotizzare che anche il 2020 verificherà un alto numero di articoli relativi a questo argomento in quanto sono già registrati 107 documenti.

Capitolo 3. Descrizione del Modello

In questo capitolo, si descrive un modello matematico con l'obiettivo di instradare opportunamente le richieste degli utenti. La formulazione matematica presa in considerazione è stata successivamente implementata mediante il linguaggio di modellazione algebrica Ampl (www.ampl.com).

Il modello, derivato dalla formulazione di Xiao et.al (2020), si riferisce al caso di sistema di *ride sharing* su prenotazione ovvero le richieste degli utenti sono note in anticipo. L'ipotesi fatta è che la compagnia di *ride sharing* può avere il controllo totale sul sistema, è libera di accettare o rifiutare le richieste di viaggio, nell'ottica di massimizzare il profitto prendendo in considerazione i ricavi derivanti dalle corse, il costo del carburante, il costo di usura dei veicoli e le penalità economiche previste al fine di massimizzarne l'efficienza.

Ovviamente, si ipotizza, in uno scenario futuro, che il sistema di *ride sharing* sia in grado di rimpiazzare tutte le modalità di trasporto privato e che le uniche alternative di viaggio sono rappresentate dall'uso dei mezzi pubblici (esempio, la metro).

Nella Figura 5 si presenta un piccolo esempio descritto da Xiao et.al (2020) per mostrare come funziona lo scenario proposto tramite un grafo non orientato e pesato. I valori su ogni lato del grafo mostrano il tempo di viaggio minimo. In questo caso, tre passeggeri pianificano di viaggiare dal nodo 1 al nodo 3. Per questi due passeggeri, il percorso più breve sarà 1-2-3 con tempo totale di viaggio pari a 6.

Non sempre è possibile compiere il percorso che richiede il minor tempo di percorrenza dato che il tempo di viaggio è influenzato dalle possibili congestioni del traffico che si possono verificare nell'intervallo di tempo considerato. Ad esempio, se quest'ultime avvengono tra il collegamento 1-2 del percorso più breve 1-2-3, il tempo di viaggio per quel collegamento aumenterà, il che crea altre possibilità competitive di percorso tipo 1-4-3 che potrebbe risultare anche più brevi del tragitto 1-2-3 con congestioni.

Il modello di ottimizzazione ha bisogno di decidere quale percorso deve essere scelto per soddisfare la richiesta di viaggio dei clienti. I passeggeri prenotano una corsa ad esempio tramite un'applicazione online fornendo le informazioni di viaggio necessarie: l'origine, la destinazione, l'intervallo di tempo nel quale deve avvenire la corsa ed un massimo tempo per cui è disposto ad aspettare.

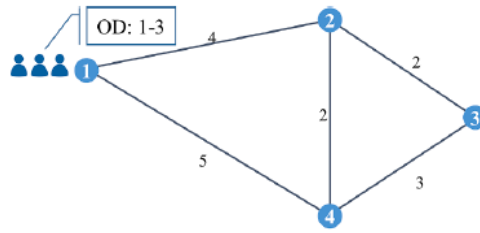


Figura 5: Esempio rete stradale. Fonte: Xiao et. al (2020)

La Figura 6 mostra le componenti del tempo per ogni richiesta. L'orario di partenza per ogni richiesta e può assumere qualunque valore tra a^e tempo desiderato di partenza e $a^e + w^e$ massimo tempo di attesa considerato, l'orario di arrivo può verificarsi solamente entro l'intervallo di tempo $a^e + opt^e$ tempo di viaggio più breve e $a^e + w^e + lon^e$ tempo di viaggio più lungo.

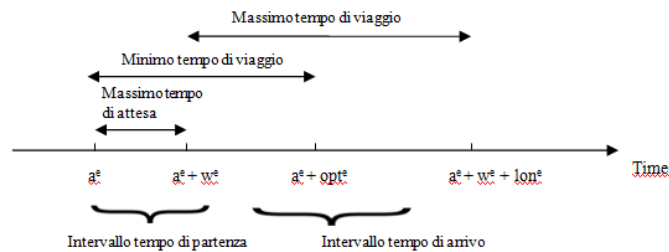


Figura 6: Componenti del tempo in relazione alle richieste. Fonte: Xiao et. al(2020)

L'insieme dei nodi del grafo, ovvero l'insieme di tutti i luoghi di destinazione e origine, è rappresentato dall'insieme I . Gli intervalli di tempo sopra presentati sono contenuti nell'insieme T , con $|T|$ è il numero massimo totale di incrementi temporali. L'insieme E contiene tutte le richieste pervenute dagli utenti, dove $|E|$ è il numero massimo di richieste nell'intervallo temporale considerato. Per svolgere la prestazione di *ride sharing*, l'elemento base sono i veicoli che adempiono al servizio: l'insieme V contiene tutti i veicoli a disposizione, dove $|V|$ è il numero totale di auto. Immaginando uno scenario reale, se la corsa deve avvenire tra la stazione ferroviaria (nodo origine), ad esempio della città di Ancona, e il palazzetto dello Sport (nodo destinazione), i fornitori del servizio devono conoscere quali collegamenti stradali ci sono tra i due luoghi e la loro distanza, quindi G è l'insieme dei collegamenti stradali tra i nodi. Il grafo pesato, presenta i valori del tempo per ogni collegamento, che vengono calcolati in base alla distanza e alla velocità minima e massima stabilita, l'insieme M combina le dimensioni spazio-tempo dei collegamenti nella rete stradale ovvero mette in relazione la distanza tra nodi e il tempo di percorrenza.

La notazione utilizzata in questa sezione è riassunta in Tabella 1 sottostante.

Tabella 1: Notazione

Notazione	Descrizione
Insiemi	
I	$=\{1, \dots, i, \dots, I\}$, insieme dei nodi della rete stradale, I è il numero totale di nodi.
T	$=\{0, \dots, t, \dots, T\}$, insieme degli istanti di tempo nel periodo di ottimizzazione, T è il numero totale di incrementi temporali nel periodo in esame.
E	$=\{1, \dots, e, \dots, E\}$, insieme delle richieste di viaggio, E è il numero massimo di richieste nel periodo di ottimizzazione.
V	$=\{1, \dots, v, \dots, V\}$, insieme dei veicoli, V è il numero totale di auto nel sistema.
G	$=\{\dots, (i, j), \dots\}$, insieme dei collegamenti nella rete stradale, i e j sono nodi adiacenti, $i, j \in I, i \neq j$.
M	$=\{\dots, (i_{t_1}, j_{t_2}), \dots\}$, insieme dei collegamenti spazio-temporali nella rete stradale, $\forall (i, j) \in G, \forall t_1, t_2 \in T, t_1 < t_2, \delta_{ij}^{\min} \leq t_2 - t_1 \leq \delta_{ij}^{\max}$
Parametri	
a^e	Tempo desiderato di partenza, $\forall e \in E$.
w^e	Massimo tempo di attesa per le richieste di viaggio, $\forall e \in E$.
m^e	Nodo di origine, $\forall e \in E$
n^e	Nodo di destinazione, $\forall e \in E$.
opt^e	Tempo di viaggio più breve, $\forall e \in E$.
lon^e	Tempo di viaggio più lungo, $\forall e \in E$.
δ_{ij}^{\max}	Massimo tempo di viaggio in intervalli di tempo sul collegamento dal nodo i al nodo j, $\forall (i, j) \in G$.
δ_{ij}^{\min}	Minimo tempo di viaggio in intervalli di tempo sul collegamento dal nodo i al nodo j, $\forall (i, j) \in G$.
d_{ij}	Distanza di viaggio dal nodo i al nodo j, $\forall (i, j) \in G$, km.
vcap	Capacità di posti a sedere, massimo numero di persone che possono condividere la corsa.
cr	Costo servizio, euro/intervallo di tempo.
cf	Costo carburante, euro/km.
cv	Costo usura veicolo, euro/giorno.
cp	Costo penalità se la domanda non viene soddisfatta, euro/richiesta.
cd	Costo penalità per ritardo della corsa, euro/intervallo di tempo.

Variabili	
p^{evt}	Variabile binaria uguale a 1 se la richiesta di viaggio e è fatta dal veicolo v iniziando all'istante t , oppure è uguale a 0, $\forall e \in E, \forall v \in V, \forall t \in T, a^e \leq t \leq a^e + w^e$
A^{evt}	Variabile binaria uguale a 1 se la richiesta di viaggio e è fatta dal veicolo v finendo all'istante t , oppure è uguale a 0, $\forall e \in E, \forall v \in V, \forall t \in T, a^e + opt^e \leq t \leq a^e + w^e + lon^e$
$x_{it_1jt_2}^v$	Variabile binaria uguale a 1 se il veicolo v guida da i a j dal tempo t_1 al tempo t_2 , altrimenti è uguale a 0, $\forall (i_{t_1}, j_{t_2}) \in M, \forall v \in V$

Il modello di ottimizzazione per risolvere il problema ha la seguente formulazione:

Funzione obiettivo:

$$(1) \max Z = \sum_{e \in E, v \in V, t \in T} cr \cdot p^{evt} \cdot opt^e - \sum_{(it_1, jt_2) \in M, v \in V} cf \cdot x_{it_1jt_2}^v \cdot d_{ij} - cv \cdot V$$

$$- \sum_{e \in E} cp \cdot \left(1 - \sum_{v \in V, t \in T} p^{evt} \right)$$

$$- \sum_{e \in E, v \in V} cd \cdot \left(\sum_{t \in T} (A^{evt} \cdot t) - \sum_{t \in T} p^{evt} \cdot (a^e + opt^e) \right)$$

Vincoli:

$$(2) p^{evt} \leq \sum_{j_{t_2} \in \{j_{t_2} | m_{t_1}^e, j_{t_2}\} \in M} x_{m_{t_1}^e j_{t_2}}^v \quad \forall e \in E, \forall v \in V, \forall t \in T$$

$$(3) A^{evt} \leq \sum_{i_{t_1} \in \{i_{t_1} | i_{t_1}, n_{t_1}^e\} \in M} x_{i_{t_1}, n_{t_1}^e}^v \quad \forall e \in E, \forall v \in V, \forall t \in T$$

$$(4) \sum_{t \in T} p^{evt} = \sum_{t \in T} A^{evt} \quad \forall e \in E, \forall v \in V$$

$$(5) \sum_{t \in T} (A^{evt} \cdot t) - \sum_{t \in T} (p^{evt} \cdot t) \geq opt^e \cdot \sum_{t \in T} p^{evt} \quad \forall e \in E, \forall v \in V$$

$$(6) \sum_{t \in T} (A^{evt} \cdot t) - \sum_{t \in T} (p^{evt} \cdot t) \geq lon^e \cdot \sum_{t \in T} p^{evt} \quad \forall e \in E, \forall v \in V$$

$$(7) \sum_{v \in V, t \in T} p^{evt} \leq 1 \quad \forall e \in E$$

$$(8) \sum_{e \in E, t_1 \in T, t_1 \leq t} p^{evt_1} - \sum_{e \in E, t_2 \in T, t_2 \leq t} A^{evt_2} \leq vcap \quad \forall t \in T, t < T, \forall v \in V$$

$$(9) \sum_{(i_{t_1}, j_{t_2}) \in M, t_1 \leq t, t_2 \geq t} x_{i_{t_1}, j_{t_2}}^v = 1 \quad \forall v \in V, \forall t \in T$$

$$(10) \sum_{i_{t_2} \in \{i_{t_2} | (i_{t_2}, i_{t_1}) \in M\}} x_{i_{t_2}, i_{t_1}}^v = \sum_{j_{t_3} \in \{j_{t_3} | (i_{t_1}, j_{t_3}) \in M\}} x_{i_{t_1}, j_{t_3}}^v \quad \forall i \in I, \forall t_1 \in T, \forall v \in V$$

$$(11) \sum_{j_{t_2} \in \{j_{t_2} | (i_0, j_{t_2}) \in M\}, v \in V} x_{i_0, j_{t_2}}^v = V \quad i_0 = \text{initial station}$$

$$(12) p^{evt} \in \{0,1\} \quad \forall e \in E, \forall v \in V, \forall t \in T, a^e \leq t \leq a^e + w^e$$

$$(13) A^{evt} \in \{0,1\} \quad \forall e \in E, \forall v \in V, \forall t \in T, a^e + opt^e \leq t \leq a^e + w^e + lon^e$$

$$(14) x_{i_{t_1}, j_{t_2}}^v \in \{0,1\} \quad \forall (i_{t_1}, j_{t_2}) \in M, \forall v \in V$$

La funzione obiettivo (1) considera sia il lato gestore del servizio che il lato utenti. È formulata al fine di generalizzare i costi-benefici sommati per entrambi (gestore ed utente). Essa rappresenta il profitto giornaliero, da massimizzare, prendendo in considerazione i ricavi derivanti dalle corse, il costo del carburante ed il costo di usura dei veicoli.

I ricavi vengono quantificati tramite la somma degli utili ottenuti dalle richieste soddisfatte, i quali sono calcolati tramite il prodotto tra il costo del servizio orario (cr) moltiplicato per il minor tempo di percorrenza.

Il costo di usura del veicolo è considerato in base al numero dei veicoli, si moltiplica il coefficiente del costo di usura giornaliero per il numero di veicoli nel sistema,

significa che questa è una componente costante nella funzione obiettivo e non influenza lo spazio risolutivo.

Per i passeggeri che vengono rifiutati dal sistema è prevista una penalità per il fornitore . Analogamente, anche in caso di ritardo della corsa e di conseguenza un ritardo di consegna è prevista una penalità. Tutto questo mira a garantire un alto livello di efficienza e di servizio.

I vincoli (2) e (3) impongono che la richiesta dal nodo di origine i al nodo destinazione j può solo essere soddisfatta dal veicolo v nel tempo t se questo veicolo compie il percorso tra i nodi i e j nello stesso istante di tempo.

Il vincolo (4) assicura che la richiesta di viaggio compiuta ha un orario di partenza e un orario di arrivo, si eguagliano le variabili binarie p^{evt} e A^{evt} che in caso di richiesta soddisfatta assumono lo stesso valore.

I vincoli (5) e (6) impongono che il tempo totale di viaggio deve essere compreso tra il tempo di viaggio più breve (*shortest travel time*) e il tempo di viaggio più lungo (*longest travel time*) della richiesta. Il tempo più breve (opt^e) di ogni richiesta è calcolato tramite un algoritmo di percorso ottimo usando il minimo tempo di viaggio tra i nodi i e j (ij_{min}). Xiao et.al (2020) hanno effettuato un test comparativo con e senza vincoli (5) e (6), il risultato a cui si perviene è il medesimo.

Il vincolo (7) assicura che ogni richiesta può essere servita solo da un veicolo.

Il vincolo (8) impone che il numero di passeggeri che vengono caricati in ogni veicolo durante l'intervallo di tempo considerato, non può eccedere la capacità di posti dei veicoli. La parte a sinistra di questo vincolo calcola il numero di passeggeri a bordo dall'istante t a $t+1$ considerando tutte le attività di prelievo e rilascio di passeggeri dall'istante di tempo t .

Il vincolo (9) assicura che in ogni istante di tempo ogni veicolo deve avere uno status: partenza da un nodo, arrivo ad uno di essi, tragitto. L'azione di parcheggio non è consentita.

Il vincolo (10) garantisce la conservazione del flusso, il numero di veicoli che partono dal nodo i all'istante t è uguale al numero di veicoli che arrivano al nodo i all'istante t .

Il vincolo (11) descrive lo status iniziale della flotta dei veicoli.

I vincoli (12), (13) e (14) definiscono il dominio per le variabili decisionali.

Capitolo 4. Descrizione casi di studio e sperimentazione

In questo capitolo, si descrivono i casi di studio usati durante la fase di validazione e testing del modello matematico descritto nel capitolo precedente e, successivamente, implementato mediante il linguaggio di modellazione algebrica Ampl (www.ampl.com).

4.1 Validazione del modello

Al fine di validare la formulazione proposta nel capitolo 3, si è costruito un caso base molto semplice, prendendo come esempio la città di Ancona e stabilendo come origine l'aeroporto Raffaello Sanzio e come destinazione l'Università Politecnica delle Marche con sede a Monte Dago. Si considerano, quindi, 5 richieste con stesso nodo di origine e destinazione, stesso orario di partenza e con due soli veicoli per il servizio la cui capacità di posti è 3.

La distanza calcolata tramite Google Maps (www.google.it/maps) tra questi due luoghi è 20 km e trattandosi principalmente di strade urbane/provinciali il limite massimo di velocità è imposto a 70 km/h mentre il limite di velocità minimo che garantisce la scorrevolezza del tratto è stato approssimato a 20 km/h.

Da qui si è calcolato il tempo massimo di percorrenza ovvero 60 minuti e il tempo minimo di percorrenza ovvero 17 minuti, che è il valore associato al tratto in Figura 7. Il tempo massimo di attesa per la corsa è fissato a 15 minuti.

I costi considerati sono tratti da Xiao et. al(2020) e sono i seguenti:

- $c_r = 1$ euro/minuto;
- $c_f = 0.1$ euro/km;
- $c_v = 20$ euro/veicolo/giorno;
- $c_p = 1$ euro/richiesta;
- $c_d = 0.2$ euro/min.

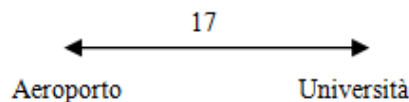


Figura 7: Grafo pesato problema base

Per questo scenario base, si ottiene un ricavo pari a 85 euro a cui vanno sottratti il costo del carburante e il costo di usura del veicolo. Non viene applicata alcuna

penalità in quanto tutte le richieste sono soddisfatte nell'intervallo di tempo richiesto. Quindi, si ha un valore di funzione obiettivo ovvero di profitto pari a 41 euro. Come già specificato, analizzare questo caso è importante ai fini della validazione del modello ma è poco significativo ai fini applicativi.

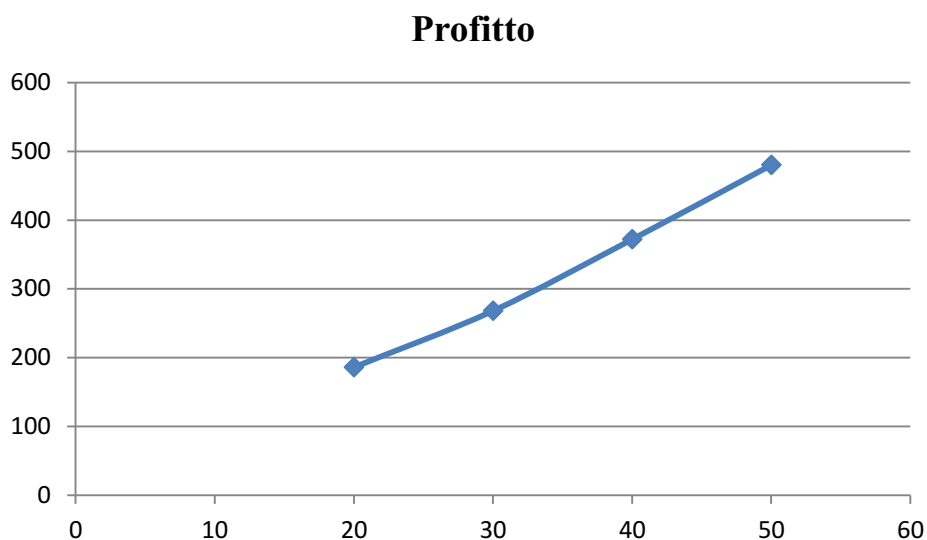
4.2 Scenari con stessa origine e stessa destinazione

Basandoci sempre sullo scenario base presentato nella Figura 7, si è aumentato il numero di richieste da 20 fino 50 con un incremento ogni volta di 10, ottenendo i risultati descritti in tabella:

Tabella 2: Risultati al variare delle richieste

Numero Richieste	Veicoli Utilizzati	Profitto [euro]	Tempo di esecuzione [s]
20	7	186	0,4
30	11	268	1,4
40	14	372	2,3
50	17	480	3,6

Riportando questi risultati nel grafico in cui nelle ascisse si pone il numero di richieste e nelle ordinate il profitto:

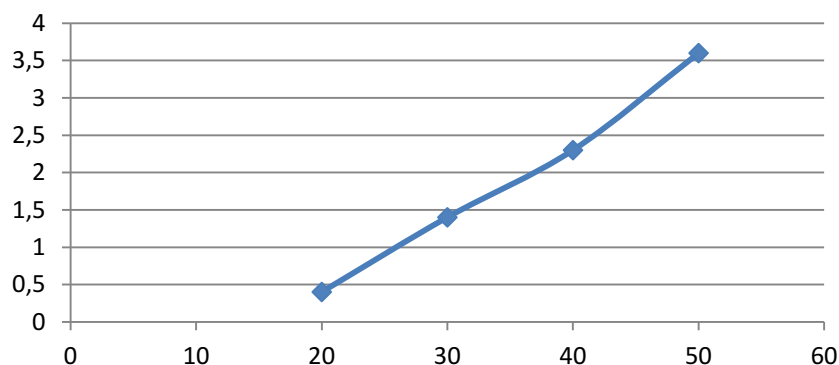


si nota che all'aumentare delle richieste di viaggio aumenta anche il profitto nonostante, l'aumento del numero dei veicoli in servizio che ovviamente comporta

anche un aumento della componente che considera il costo di usura. Contrariamente all'aumento del costo di usura, si verifica, all'aumento del numero di richieste soddisfatte, una diminuzione dei costi dovuti alle penalità per richiesta non soddisfatta. Lo studio all'aumentare del numero di richieste è effettuato per rendere anche lo scenario base più verosimile, far girare il modello con solamente 5 richieste è stato fondamentale ai fini della validazione del modello ma è poco significativo ai fini applicativi e allo stesso tempo poco profittevole. Ragionevolmente è stato aumentato il numero di richieste per permettere una reale comprensione dei risultati ottenuti dall'implementazione. Il problema è stato impostato per poter soddisfare tutte le richieste quindi all'aumentare di quest'ultime è necessario aumentare il numero di veicoli per rendere il problema ammissibile. A dimostrazione di questo, osservando i risultati esplicitati nella Tabella 2 per soddisfare 30 richieste, dallo scenario precedente con 20 richieste e 7 veicoli, è stato necessario aggiungerne 4 per un totale di 11 veicoli.

Nel lanciare il programma in Ampl si nota che al crescere delle richieste aumenta notevolmente il tempo necessario per poter vedere visualizzata in video la soluzione secondo i tempi presentati nella Tabella 2. Questo aumento è dovuto al fatto che aumentando le richieste aumentano la dimensione del problema, cosicché il risolutore necessita di tempi sempre più lunghi. Anche in questo caso si riporta un grafico per evidenziarne l'andamento.

Tempo di esecuzione



4.3 Analisi di sensitività al variare delle fasce orarie

Seguendo queste considerazioni si può osservare che nel caso in cui la distanza da percorrere sia breve, facendo un esempio reale, nell'ipotesi si voglia andare dalla

stazione ferroviaria di Ancona, all'Università Politecnica delle Marche la cui distanza è 5 km, con un costo di usura pari a 20 euro, il profitto avrà valore negativo dato che il guadagno sarà nettamente inferiore ai costi sostenuti.

Analogamente a quanto fatto per le richieste di viaggio, fissando quest'ultime a 5 e basandosi sempre sullo scenario presentato nel Figura 7, variando gli orari di partenza in un intervallo di un'ora, ad esempio dalle 8:00 alle 9:00, si ottengono i risultati riassunti in Tabella 3:

Tabella 3: Risultati al variare dell'orario di partenza

Orari Partenza	Profitto [euro]
Tutte le richieste con stesso orario	41
Due richieste con un orario Tre richieste con un altro orario	41
Cinque richieste con 5 orari differenti poco distanti tra loro	41
Cinque richieste con orari casuali	41

All'interno di un intervallo orario limitato, come in questo caso, si possono variare in qualsiasi modo gli orari delle richieste ma, con un tempo di attesa accettato pari a 15 minuti, la variazione degli orari non produce alcun effetto nel valore del profitto che rimane costante.

4.4 Analisi sensitività scenario con 50 richieste

Si prende in esame lo scenario con 50 richieste presentato precedentemente e si vanno a variare alcuni valori al fine di comprendere e analizzare il comportamento di questo modello.

4.4.1 Analisi al variare del costo di usura del veicolo

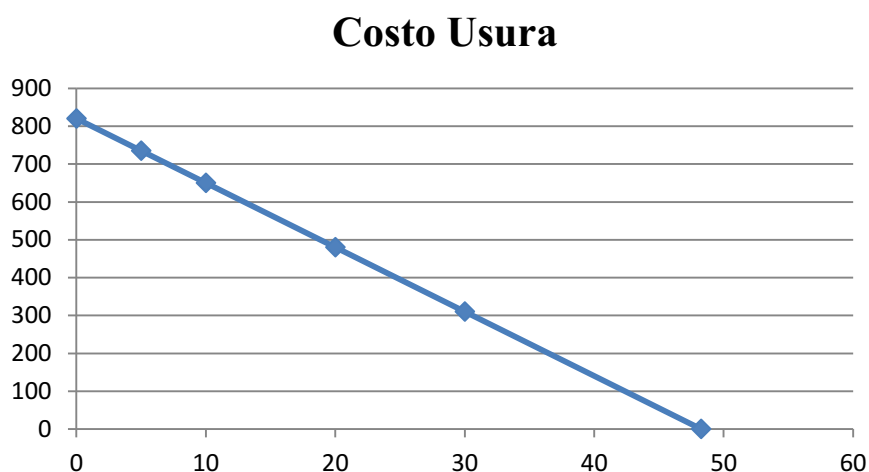
Il costo di usura (cv) è considerato pari a 20 euro/giorno e incide in modo rilevante sul profitto dato che anche nel caso in cui un veicolo del sistema non soddisfi nessuna richiesta, questo costo è calcolato anche per quel determinato veicolo. Inoltre, se il numero di richieste è molto basso e il tragitto è molto breve i ricavi del servizio non vanno ad ammortizzare i costi di usura che porteranno ad avere un

valore di profitto negativo, allo stesso modo se il numero di richieste per una corsa breve è elevato e per soddisfarle si necessita di un alto numero di veicoli allora il profitto sarà nuovamente negativo. Tenendo fissi tutti gli altri valori, si va ad aumentare e diminuire il costo di usura, ottenendo i risultati riassunti in tabella:

Tabella 4: Risultati al variare del costo di usura

Numero richieste	Costo di usura	Profitto
50	0	820
50	10	650
50	20	480
50	30	310
50	48,25	0

Come ci si poteva aspettare, all'aumentare del costo di usura diminuisce il profitto e viceversa. Per un costo pari a 48,25 la funzione obiettivo del problema diventa nulla, quindi non è consigliabile economicamente andare oltre questa soglia. La componente di usura non dipende dal percorso effettuato ma solamente dal coefficiente costo (cv) e dal numero dei veicoli quindi incide nel profitto in modo inversamente proporzionale, come si può notare dal grafico:



4.4.2 Analisi sensitività al variare del costo del servizio

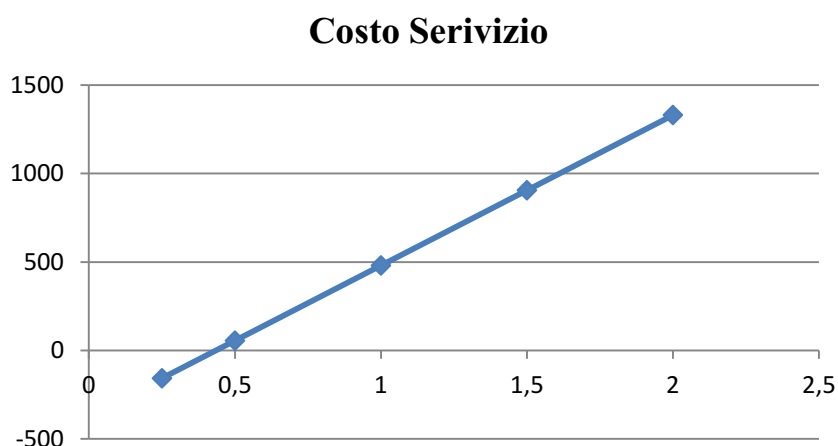
Contrariamente al caso precedente, questa componente dipende dal minor tempo di percorrenza della distanza in cui avviene il percorso in caso di richiesta soddisfatta ma, analogamente ci si aspetta che tenendo fissi tutti gli altri parametri, se aumenta il

costo del servizio aumenterà il profitto e viceversa. Nel nostro caso di studio, il valore è posto pari a 1 euro/tempo, ovviamente più il tragitto sarà lungo, maggiori saranno i ricavi. Andando a fare l'analisi di sensitività si ottengono i seguenti risultati:

Tabella 5: Risultati al variare del costo del servizio

Numero richieste	Costo servizio	Profitto
50	0,25	-157,5
50	0,5	55
50	1	480
50	1,5	905
50	2	1330

Si nota come anche una minima variazione porti ad una grande differenza nel profitto, questo risultato è molto importante in quanto le aziende che vogliono adottare il servizio devono sempre controllare i dati delle corse che si effettuano e decidere se apportare una piccola modifica che magari per l'utente che riceve il servizio non è molto rilevante ma che ai fini del profitto aziendale potrebbe fare una grande differenza. Anche per questa ipotesi si inserisce un grafico al fine di evidenziarne ancor meglio l'importanza.



4.4.3 Analisi sensitività al variare del numero di veicoli

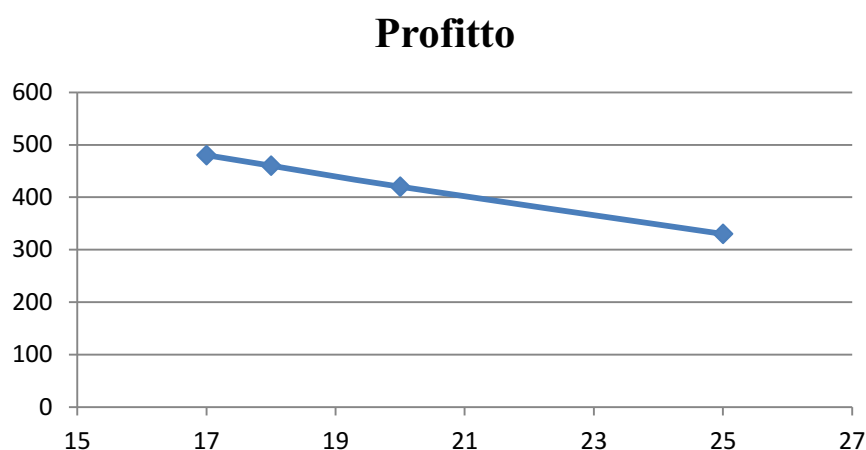
Si va ad effettuare un'ultima analisi al variare del numero dei veicoli, posto che tutti gli studi fatti fino ad ora per 50 richieste hanno assunto un numero di veicoli pari a

17, questo è anche il numero minimo con cui Ampl riesce a garantire l'ammissibilità del problema. Per questa analisi andremo a valutare anche la differenza nei tempi di esecuzione per i vari casi in quanto, aumentando il numero di veicoli si va ad aumentare la dimensione del problema, al contrario delle modifiche delle precedenti analisi. Abbiamo i seguenti risultati:

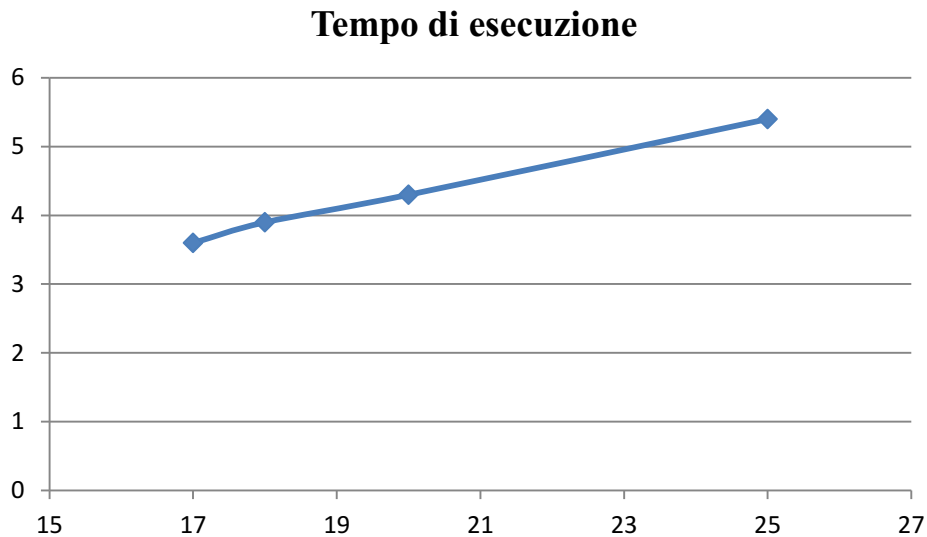
Tabella 6: Risultati al variare del numero di veicoli

Numero richieste	Numero veicoli	Profitto	Tempo esecuzione [s]
50	17	480	3,6
50	18	460	3,9
50	20	420	4,3
50	25	330	5,4

Nella soluzione di questi problemi preliminari, si è imposto che tutte le richieste devono essere soddisfatte quindi, se questo avviene per 17 veicoli è ovvio che ogni veicolo che viene aggiunto andrà ad incidere nel problema solo a livello della componente di usura. Si ha quindi, una diminuzione del profitto pari al prodotto tra il costo di usura e il numero di veicoli aggiunti. Nel grafico sottostante questo concetto è ben evidente:



Come si era previsto, anche il tempo di esecuzione aumenta, secondo l'andamento presentato nel grafico:



4.5 Caso di studio verosimile

Accertato il modello con casi semplici e immediati, si è sviluppato un caso reale in cui i passeggeri richiedono il servizio di *ride sharing* per arrivare dai principali luoghi di trasporto come stazioni ferroviarie e aeroporto ad alcuni luoghi turistici nella provincia di Ancona e Macerata. Il problema prevede 10 richieste, formulate in questo modo:

1. Da: centro città di Senigallia → A: centro città di Ancona;
Orario : 08.00
2. Da: stazione ferroviaria di Ancona → A: aeroporto Raffaello Sanzio Falconara;
Orario : 09.00
3. Da: Santuario della Santa Casa a Loreto → A: stazione ferroviaria di Ancona;
Orario : 10.00
4. Da: stazione ferroviaria di Jesi → A: spiaggia a Falconara;
Orario : 09.30
5. Da: Cattedrale San Ciriaco ad Ancona → A: Casa di Leopardi a Recanati;
Orario : 09.00
6. Da: Casa di Leopardi a Recanati → A: stazione ferroviaria di Loreto;
Orario : 11.30

7. Da: stazione ferroviaria di Loreto → A: Museo Internazionale della Fisarmonica a Castelfidardo;
Orario : 10.00
8. Da: stazione ferroviaria di Jesi → A: spiaggia a Numana;
Orario : 09.30
9. Da: aeroporto Raffaello Sanzio Falconara → A: Lungomare di Porto Recanati
Orario : 10.00
10. Da: centro città di Senigallia → A: Museo Internazionale della Fisarmonica a Castelfidardo.
Orario : 08.00

L'area geografica da coprire è la seguente:



Figura 8: Disposizione geografica richieste. Fonte:OpenStreetMap

Le distanze tra questi luoghi, come negli esempi precedenti, sono state stimate tramite il sito di Google Maps (www.google.it/maps) e per calcolare i tempi di percorrenza come velocità minima si è utilizzato 20 km/h mentre come velocità massima 70 km/h, questo perché sono state considerate solo le strade urbane e provinciali escludendo le autostrade dato che il modello non prevede un costo per il pagamento del pedaggio. Per quanto riguarda il tempo massimo di attesa e i costi fissi dovuti al servizio, al carburante, all'usura del veicolo e alle penalità rimangono

invariati rispetto al caso base sopra presentato. Nella Tabella 7 vengono riassunti i valori attribuiti ai parametri del modello.

Tabella 7: Valore parametri base del modello

Parametro	Valore
w ^e	15 min
vcap	3
cr	1 euro/min
cf	0,1 euro/km
cv	20 euro/veicoli/giorno
cp	1 euro/richiesta
cd	0,2 euro/min

Si è analizzato il problema al variare del numero dei veicoli e si ottengono i risultati riassunti in Tabella 8 :

Tabella 8: Risultati caso di studio

Numero Richieste	Numero Veicoli	Numero Richieste soddisfatte	Profitto	Tempo di risoluzione [s]
10	1	2	34,6	3,5
10	2	5	77,4	8,9
10	3	8	109,4	32,3
10	4	10	131,4	78,2

Come si può notare, al crescere del numero dei veicoli, cresce anche il numero di richieste soddisfatte, questo perché si riesce a coprire un'area geografica più ampia. Di conseguenza, dato che le richieste da soddisfare hanno una distanza in km che permette di ammortizzare il costo di usura, aumentando il numero di veicoli aumenta anche il profitto.

Analizzando il caso con 1 solo veicolo, vengono soddisfatte solamente 2 richieste, la richiesta numero 1 e la numero 10, che come si può osservare hanno lo stesso luogo di origine. Ciò significa che negli intervalli di tempo considerati e con il tempo di attesa di 15 minuti, il veicolo 1 riesce a soddisfare entrambe le corse. Il tragitto che compie è il seguente:

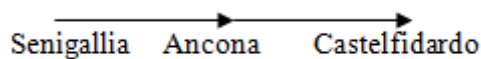


Figura 9: Tragitto veicolo

Per soddisfare un maggior numero di passeggeri, il problema è stato implementato con 2 veicoli. Questa variazione permette di soddisfare 5 richieste, in cui il primo veicolo si occupa delle richieste 4., 6. e 8., mentre il secondo veicolo soddisfa la numero 1. e la 10. come nel caso precedente. Il tragitto che compie il veicolo 2 è:

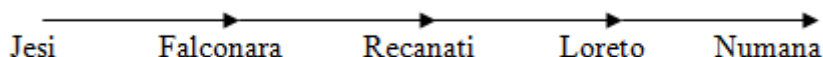


Figura 10: Tragitto primo veicolo

Analizzando il caso con 3 veicoli, si riescono a soddisfare 8 richieste, la prima e la seconda auto coprono le corse finora presentate mentre la terza prende in carico le corse 2., 3. e 5. con il seguente tragitto:

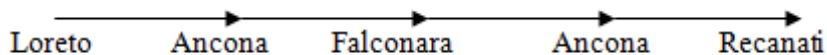


Figura 12: Tragitto terzo veicolo

Come si può notare dalla Tabella 8, tutte le richieste dei passeggeri riescono ad essere soddisfatte con 4 veicoli. Analogamente al caso precedente, il veicolo 1 soddisfa le richieste 2., 3. e 5., il veicolo 2 soddisfa la 1. e la 10, mentre il veicolo 3 cambia corse e soddisfa le richieste 4., 7., e 8. mentre il veicolo 4 gestisce la 6. e la 9. I tragitti di questi ultimi due saranno rispettivamente:

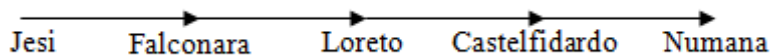


Figura 11: Tragitto terzo veicolo

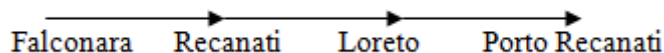
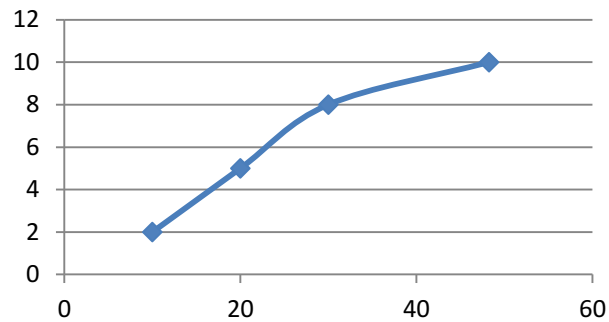


Figura 13: Tragitto quarto veicolo

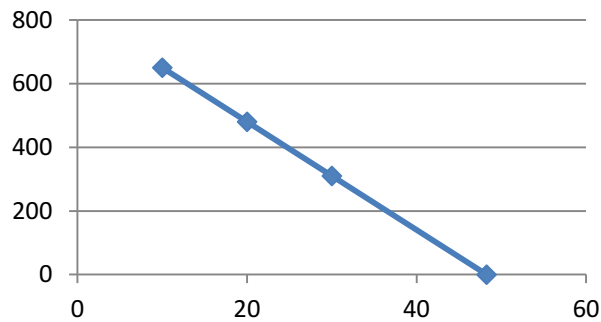
Analogamente alla crescita dei veicoli, del profitto e delle richieste soddisfatte, aumenta anche il tempo che Ampl impiega ad arrivare alla soluzione, questo perché

il numero di combinazioni possibili aumenta e di conseguenza anche il problema aumenta di dimensione. Nei seguenti grafici è riportata la crescita rispettivamente delle richieste soddisfatte, del profitto e del tempo di esecuzione in relazione ai veicoli utilizzati.

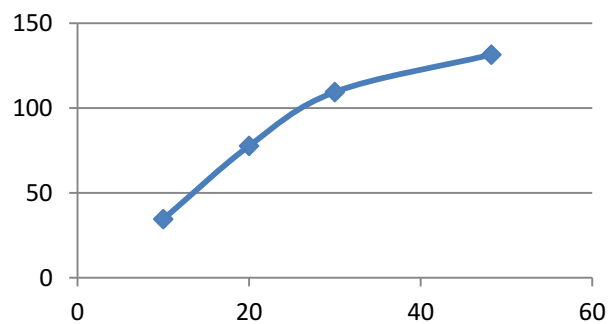
Richieste Soddisfatte



Tempo esecuzione



Profitto



Come si può notare, la crescita del tempo di esecuzione è talmente repentina che può essere paragonata ad una crescita di tipo esponenziale.

Capitolo 5. Conclusioni

Il *ride sharing* è un'importante forma di mobilità condivisa che ha notevoli impatti positivi a livello sociale, ambientale ed economico. A livello sociale perché consente una maggiore sinergia tra le persone; a livello ambientale, perché permette una significativa riduzione delle emissioni inquinanti e della congestione del traffico, riducendo il numero di auto su strada ed infine a livello economico, perché consente di abbattere tutti i costi fissi rispetto a chi, invece, possiede un'auto propria.

L'interesse della letteratura si concentra principalmente sulla formulazione di modelli di programmazione matematica e sullo sviluppo di algoritmi di ottimizzazione al fine di gestire in maniera efficiente le richieste degli utenti e i veicoli a disposizione.

Con lo sviluppo tecnologico, negli anni, il *ride sharing* si è evoluto e si è affermato sempre più come un'importante alternativa alle classiche tipologie di trasporto. Come dimostra anche l'interesse del web verso questo argomento, interesse che si registra sempre più in crescita.

Obiettivo di questa tesi è stato quello di risolvere un problema di gestione delle richieste in un sistema di *ride sharing* su prenotazione, ovvero instradare opportunamente le richieste degli utenti al fine di massimizzare il profitto giornaliero e garantire un servizio efficiente. Nel sistema quindi preso in considerazione, l'assunzione fatta è che gli utenti prenotino in anticipo il servizio, indicando il tempo in cui vorrebbero ricevere il passaggio, una soglia di tolleranza che sono comunque disposti ad aspettare, un'origine ed una destinazione del tragitto.

La formulazione di programmazione lineare intera, ispirata da un lavoro già presentato in letteratura, è stato implementato nel linguaggio di modellazione algebrica AMPL ed opportunamente testato su diverse istanze verosimili, generate durante il lavoro di tesi.

In particolare, sono stati presi in considerazione due casi di studio: uno più semplice in cui tutte le richieste condividono origine e destinazione del tragitto ed uno più complesso in cui invece ogni utente ha una propria origine e destinazione.

In entrambi i casi, il modello viene risolto in tempi di calcolo accettabili. Un'accurata analisi di sensitività, condotta su parametri di input ritenuti più significativi, ha consentito di dedurre alcune considerazioni.

Ad esempio, il profitto è notevolmente sensibile al costo del servizio; una minima variazione di quest'ultimo può contribuire ad una variazione anche significativa del profitto. Le penalità di cui si tiene in conto nella funzione obiettivo, da pagare in caso di richiesta non soddisfatta e/o di ritardo, impattano significativamente sul profitto. Questo significa che, ovviamente, se venissero eliminate dalla funzione obiettivo, si avrebbe un valore di profitto alto e sarebbe più vantaggioso a livello economico per l'azienda; ma non si considererebbe il punto di vista dei passeggeri. Punto di vista che sicuramente è molto importante soprattutto ai fini della fidelizzazione del cliente.

Il modello proposto non è adatto ad uno scenario dinamico in cui le richieste degli utenti arrivano quindi dinamicamente nel sistema perché, come detto, prevede solo il caso di richieste prenotate prima del periodo di pianificazione preso in esame .

Sviluppi futuri di questo lavoro potrebbero utilizzare questo modello come base e apportare le giuste modifiche per studiare un sistema di *ride sharing* dinamico in cui vengono considerati i tempi di percorrenza anche in relazione alle congestioni stradali ed in cui le richieste degli utenti non sono tutte note prima del processo di ottimizzazione.

Ovviamente, si potrebbe pensare di proporre anche approcci di ottimizzazione alternativi a quelli esatti, come euristiche e meta-euristiche, per risolvere casi di studio con tante richieste in tempi di calcolo comunque ragionevoli.

Infine, un'estensione molto interessante di questo lavoro potrebbe prevedere una flotta di veicoli a guida autonoma che, grazie agli sviluppi tecnologici, si stanno sempre più affermando nel campo della mobilità e che potrebbero presto iniziare ad essere utilizzati anche nel trasporto pubblico.

Bibliografia

Agatz, N., Erera, A., Savelsbergh, M., & Wang, X. (2012). Optimization for dynamic ride-sharing: A review. *European Journal of Operational Research*, 223(2), 295-303.

Bulman, J. S. (1942). Car Sharing Plans. *Geo. LJ*, 31, 185.

Meyer, B. S. (1942). Tort Liability under the Wartime Car Sharing Plan. *Geo. Wash. L. Rev.*, 11, 1.

Gordon, J. J. (1943). Tort Liability in Ride-Sharing Arrangements. *Ill. L. Rev.*, 38, 293.

Levofsky, A., & Greenberg, A. (2001, January). Organized dynamic ride sharing: The potential environmental benefits and the opportunity for advancing the concept. In *Transportation Research Board 2001 Annual Meeting* (pp. 7-11).

Özkan, E. (2020). Joint Pricing and Matching in Ride-Sharing Systems. *European Journal of Operational Research*.

Lin, Q., Xu, W., Chen, M., & Lin, X. (2019, July). A Probabilistic Approach for Demand-Aware Ride-Sharing Optimization. In *Proceedings of the Twentieth ACM International Symposium on Mobile Ad Hoc Networking and Computing* (pp. 141-150).

Liang, X., de Almeida Correia, G. H., An, K., & van Arem, B. (2020). Automated taxis' dial-a-ride problem with ride-sharing considering congestion-based dynamic travel times. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 112, 260-281.

Santos, D. O., & Xavier, E. C. (2015). Taxi and ride sharing: A dynamic dial-a-ride problem with money as an incentive. *Expert Systems with Applications*, 42(19), 6728-6737.

Fagnant, D. J., & Kockelman, K. M. (2018). Dynamic ride-sharing and fleet sizing for a system of shared autonomous vehicles in Austin, Texas. *Transportation*, 45(1), 143-158.

Daganzo, C. F., & Ouyang, Y. (2019). A general model of demand-responsive transportation services: From taxi to ridesharing to dial-a-ride. *Transportation Research Part B: Methodological*, 126, 213-224.

Gurumurthy, K. M., & Kockelman, K. M. (2020). Modeling Americans' autonomous vehicle preferences: A focus on dynamic ride-sharing, privacy & long-distance mode choices. *Technological Forecasting and Social Change*, 150, 119792.

Simonetto, A., Monteil, J., & Gambella, C. (2019). Real-time city-scale ridesharing via linear assignment problems. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 101, 208-232.

Sitografia

Sito ufficiale BlaBlaCar: <https://www.blablacar.it/>

“Car Sharing”, <https://www.comune.milano.it/servizi/car-sharing> , Sezione Servizi,
Sito ufficiale Comune di Milano, Marzo 2020.

Daniela Mangini, “Lyft: l’antagonista di Uber fa scuola in Italia”,
<https://www.wired.it/> , Wired.it, Ottobre 2014.

Sito ufficiale Uber: <https://www.uber.com/it/it/>

“Uber”, <https://argomenti.ilsole24ore.com/uber.html>, Sezione Aziende, Il Sole 24
Ore, Agosto 2017.

Sito ufficiale Lyft: <https://www.lyft.com/>

Sito Google Trends: <https://trends.google.it/trends/?geo=IT>

Sito Scopus: <https://www.scopus.com/>

Sito Ampl: <https://ampl.com/>

Sito Google Maps: <https://www.google.it/maps>

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

Ringraziamenti

Ringrazio la professoressa Ornella Pisacane per la disponibilità e la professionalità che ha dimostrato in questi mesi. Ha supportato con attenzione il mio lavoro ed è sempre stata un esempio di come vanno rispettati i propri impegni con dedizione e passione.

Ringrazio nonno Lucio per il suo sguardo furbo con cui esprime l'amore verso la nostra famiglia e che mi fa sempre sorridere, ringrazio nonna Anna per avermi insegnato a trovare sempre il lato positivo nelle cose e per il suo sguardo forte e fiero con cui mi guarda ogni volta. Ringrazio nonna Viola per aver fatto nascere una delle mie più grandi passioni, in ogni mio dolce ci sei tu e tutti i tuoi insegnamenti, ringrazio nonno Mario per la sua forza, la sua bellezza d'animo e i suoi occhi azzurri che ancora oggi mi proteggono, mi mancano.

Ringrazio la mia famiglia per essere così unita nelle varie diversità, ringrazio mio padre per esserci sempre e per sostenere ogni nostro sogno, ringrazio mia madre per tutti i sacrifici che fa per noi e per essere la dimostrazione che il rispetto e la fiducia si guadagnano con il duro lavoro. Il vostro amore è l'insegnamento più bello che potevate trasmettermi. Ringrazio mia sorella per tutte le sue idee strampalate, per tutte le risate e le emozioni condivise, sei un sostegno e una spalla, sei sempre stata un esempio da seguire anche quando mi obblighi a fare dei lavori artistici.

Ringrazio Zia Stefania per essere una confidente preziosa e per tutti i consigli con cui mi aiuti a trovare la mia strada. Ringrazio la mia figlioccia Laura per rappresentare la mia versione mini e per essere sempre al mio fianco e scusami se ancora continuo a svegliarti montandoti sopra ma per me avrai sempre 14 anni.

Ringrazio Zio Aldo e Zia Rita per esserci sempre stati con la vostra gentilezza e la vostra cultura che sono un modello per me.

Ringrazio tutti i miei cugini, le mie zie e i miei zii con cui brindisi, gran mangiate e gran sorrisi non sono mai mancati, vi porto sempre con me.

Ringrazio Vane per tutte le volte che abbiamo volato insieme e per tutte le volte che ancora voleremo, noi ci saremo sempre.

Ringrazio Teresa, per tutti i messaggi di incoraggiamento e forza che non mi ha fatto mai mancare, Hercules è ormai il nostro migliore amico.

Ringrazio i miei bimbi che con i loro sorrisi e la loro genuinità hanno tirato fuori la parte migliore di me.