



UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Gestionale

Ottimizzazione della Logistica Distributiva: il caso di studio dell'azienda Tre Elle
Optimization of the Distributive Logistics: the case study of the Tre Elle company

Relatore: Dott.ssa ORNELLA PISACANE

Tesi di Laurea di: IMELDA MINIELLO

Correlatore: Sig. STEFANO LUZI

matr.1062506

A.A. 2019/2020

Alle mie nonne, maestre di vita.

Con la realizzazione di questo elaborato concludo un percorso che ha inciso profondamente nel mio cammino di vita.

Prima di procedere con la trattazione, vorrei ringraziare quanti mi hanno dimostrato vicinanza in questo viaggio, che mi ha permesso di crescere a livello personale e professionale.

Desidero ringraziare anzitutto la mia relatrice, Prof.ssa Ornella Pisacane, per essersi resa sempre disponibile, per avermi seguito in maniera impeccabile e professionale, per essere stata il mio punto di riferimento, regalandomi preziosi consigli e fugando ogni mio dubbio. Ringrazio l'azienda Tre Elle, nella persona del Sig. Stefano Luzi, per avermi dato la possibilità di sviluppare il lavoro di tesi su un argomento così interessante, come quello dei trasporti, mettendo a disposizione i dati aziendali e fornendomi, anche grazie ai suoi collaboratori, tutte le informazioni di cui ho necessitato in questi mesi. Inoltre, grazie Stefano per avermi accolta nella tua azienda, trasformando l'esperienza di tirocinio nel mio primo lavoro, per aver creduto in me e per avermi dato la possibilità di crescere professionalmente e umanamente.

Esprimo profonda gratitudine al Prof. Andrea Monteriù, per avermi fatto conoscere la meravigliosa realtà della Tre Elle. Per avermi sempre sostenuta ed incoraggiata. Per l'empatia dimostratami nei momenti bui, durante il mio percorso di vita universitaria. Per la sua infinita umanità.

Ai miei genitori, Giuseppe e Loreta, rivolgo un immenso grazie, perché senza il loro aiuto non avrei potuto realizzare questo sogno. Grazie Mamma e Papà, per avermi dato la possibilità di vivere l'esperienza universitaria, per aver creduto in me anche quando ero io a non crederci più. Grazie per il supporto, per la pazienza e anche per le paternali di tanto in tanto, perché tutto ciò ha contribuito a rendermi la persona che sono.

Un grazie sincero ai miei fratelli Luigi e Donato che, con la loro allegria e i loro modi di fare, sono riusciti a tenermi sempre su col morale, distogliendo la mia attenzione dai problemi e regalandomi spensieratezza e sorrisi.

Rivolgo un grazie di cuore ad Antonio, il mio fidanzato, per avermi sempre dimostrato complicità, comprensione, pazienza, sostegno. Per avermi continuamente spronato a fare meglio e per aver creduto, insieme a me, in questa avventura. Senza di lui nulla sarebbe stato lo stesso.

Ringrazio profondamente la mia cara amica Rosanna, conosciuta durante l'esperienza universitaria, per la presenza costante, gli incoraggiamenti, i consigli, per avermi ricordato

le mie qualità e potenzialità ogni qualvolta ero sul punto di scoraggiarmi. Per avermi regalato sorrisi e momenti memorabili in questi anni vissuti assieme, durante i quali il nostro legame è diventato fraterno.

Un grazie particolare a Francesco, con il quale ho percorso e condiviso l'ultimo pezzo di strada, prima di arrivare al traguardo. Grazie per esserci stato ogni volta che ne ho avuto bisogno, per la gentilezza che mi hai sempre dimostrato, per l'aiuto e il sostegno che mi hai regalato.

Infine, desidero ringraziare me stessa, per essere stata in grado di portare a termine un percorso così impegnativo, riuscendo a conciliare studio e lavoro, anche quando sembrava impossibile poterlo fare. Per non essere crollata di fronte ai problemi di salute, piovuti dal cielo da un giorno all'altro durante il percorso universitario, e per aver avuto la caparbia di raggiungere l'obiettivo, nonostante tutto. Finalmente posso dire di avercela fatta.

Indice

ABSTRACT.....	9
CAPITOLO 1 - INTRODUZIONE.....	10
CAPITOLO 2 – STATO DELL’ARTE DEL VEHICLE ROUTING PROBLEM.....	12
2.0 CENNI STORICI.....	12
2.1 EURISTICHE.....	12
2.2 METAEURISTICHE.....	14
2.3 INTRODUZIONE AL VEHICLE ROUTING PROBLEM.....	15
2.4 VARIANTI DEL VRP.....	17
2.5 CAPACITED VEHICLE ROUTING PROBLEM WITH TIME WINDOWS (VRPTW).....	18
CAPITOLO 3 – IL CASO DI STUDIO DELLA TRE ELLE.....	21
3.0 TIPOLOGIA E FORMULAZIONE MATEMATICA DEL PROBLEMA.....	25
CAPITOLO 4 - RISULTATI COMPUTAZIONALI.....	28
4.1 ANALISI DI SENSITIVITA’.....	29
4.1.0 CASO BASE.....	29
4.1.1 VARIAZIONE <i>TIME WINDOWS</i>	30
4.1.1.1 CASO 1: <i>TIME WINDOWS</i> LASCHE.....	30
4.1.1.2 CASO 2: <i>TIME WINDOWS</i> MISTE.....	30
4.1.1.3 CASO 3: <i>TIME WINDOWS</i> MOLTO STRETTE.....	31
4.1.2 VARIAZIONE DELLA CAPACITA’ DI UN VEICOLO.....	31
4.1.2.1 CASO 1: BASE.....	31
4.1.2.2 CASO 2: RIDUZIONE CAPACITA’ VEICOLO.....	32
4.1.2.2.1 DIMEZZATA LA CAPACITA’ DEL VEICOLO 1.....	32
4.1.2.2.2 DIMEZZATA LA CAPACITA’ DEL VEICOLO 2.....	32
4.1.2.2.3 DIMEZZATA LA CAPACITA’ DEL VEICOLO 3.....	30
4.1.3 VARIAZIONE DEL NUMERO DI CLIENTI.....	33
4.1.3.1 CASO 1: NUMERO DI CLIENTI PARI A 5.....	33
4.1.3.2 CASO 2: NUMERO DI CLIENTI PARI A 7.....	33
4.1.3.3 CASO 3: NUMERO DI CLIENTI PARI A 10.....	34

4.1.3.4 CASO 4: NUMERO DI CLIENTI PARI A 12.....	34
4.1.3.5 CASO 5: NUMERO DI CLIENTI PARI A 15.....	34
4.2 CASO TRE ELLE.....	35
4.2.1 STRATEGIE A CONFRONTO.....	35
CAPITOLO 5 – CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI.....	37
BIBLIOGRAFIA.....	41

Abstract

Obiettivo della tesi è quello di risolvere un problema di instradamento di veicoli (*Vehicle Routing Problem* VRP), al fine di ottimizzare i costi legati alla gestione del trasporto di merce dal deposito verso i clienti. Poiché tali costi sono ritenuti direttamente proporzionali alla distanza totale percorsa dai veicoli adibiti alle consegne, quest'ultima è stata scelta come funzione obiettivo, da minimizzare, nella formulazione matematica del problema.

Caso di studio è l'azienda TRE ELLE che utilizza veicoli di diverse capacità ed i cui clienti esprimono anche delle finestre temporali (*Time Windows* TW) per il servizio.

Il modello matematico, formulato per questo VRPTW, è stato quindi implementato in Python e risolto utilizzando il solver Gurobi (sito web www.gurobi.com). Partendo dal caso base, è stata quindi condotta un'analisi di sensitività per studiare quanto sensibile è il modello a possibili variazioni di alcuni parametri di input.

Capitolo 1

Introduzione

Al giorno d'oggi, le aziende si trovano ad operare in un mercato sempre più competitivo e a dover fronteggiare, con elevata rapidità di risposta, le richieste di una domanda sempre più intransigente. Rispondere adeguatamente alle esigenze richiede uno sforzo, in termini di costi, che deve essere valutato attentamente dall'azienda per non incorrere in investimenti e scelte errate che potrebbero portare al fallimento della stessa. Poiché non sempre si riesce ad offrire un servizio o un prodotto *low cost*, è necessario monitorare e controllare tutte le variabili che contribuiscono all'oscillazione dei costi, per riuscire a pilotare l'azienda verso investimenti convenienti e scelte strategiche utili alla sua crescita. E' chiaro, dunque, come la dinamica dei costi assuma un ruolo cardine nel contesto aziendale. Tra i vari costi, oggetto di studio nell'analisi economica di un'azienda, rivestono un ruolo di rilevante importanza quelli legati alla **Logistica Distributiva**, che incidono pesantemente su quello totale. Risulta di fondamentale importanza analizzare e contenere i costi di trasporto, in quanto si stima che questi rappresentano quasi la metà dei costi logistici totali e, in industrie come quelle alimentari, possono rappresentare quasi il 70% del costo a valore aggiunto delle merci (De Backer et al.)[4]. Da qui, è nata l'idea di trattare ed approfondire tale argomento, in questo lavoro di tesi.

Il caso di studio in esame è stato sviluppato in seguito ad un'esperienza di tirocinio effettuata presso l'azienda *Tre Elle*, che mi ha permesso di approfondire gli aspetti organizzativi di gestione e consegna merci presso i clienti. Obiettivo di questa tesi è quello di proporre una soluzione che minimizzi i costi di trasporto, pianificando le tratte più convenienti da far percorrere alla flotta aziendale. Risulta fondamentale ottimizzare i costi di trasporto, per riuscire a garantire il miglior compromesso tra un adeguato livello di servizio erogato al cliente, in termini di rispetto delle date di consegna e, al contempo, il contenimento dei costi logistici che gravano sul prodotto.

Il modello matematico proposto è stato quindi implementato in Python e risolto usando il solver Gurobi.

Il problema di instradamento affrontato in questa tesi appartiene alla classe del *Vehicle Routing Problem*, comunemente abbreviato con l'acronimo VRP, tipico problema di

ottimizzazione, che si prefigge di stabilire i percorsi di una flotta di veicoli per rifornire i clienti al minimo costo. In particolare, nella tesi viene posta l'attenzione su una specifica sottoclasse del VRP: il *Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows (CVRPTW)*, in cui l'obiettivo è minimizzare i costi relativi alle rotte associate ai veicoli e i vincoli da rispettare sono la capacità dei veicoli e le finestre temporali di tipo hard.

La classe dei problemi VRP occupa una posizione rilevante nei settori del trasporto merci e della gestione di servizi e, per questo, ricopre un ruolo fondamentale in campo applicativo, nella risoluzione di algoritmi che riescano a risolvere in maniera efficiente un gran numero di istanze.

Il resto della tesi è organizzato come segue. Il capitolo 2 è dedicato alla letteratura inerente il VRP e i lavori ad esso dedicati. Nel capitolo 3 viene presentato il caso di studio sopra citato e descritto il modello formulato matematicamente. Il capitolo 4 fornisce i risultati di esperimenti eseguiti su casi generati a partire dal caso di studio. Nel capitolo 5 vengono tratte le conclusioni relative al lavoro svolto e ai risultati ottenuti.

Capitolo 2

Stato dell'arte del Vehicle Routing Problem

2.0 Cenni storici

Il Vehicle Routing Problem affonda le sue radici negli Stati Uniti di fine anni '50, quando Dantzing e Ramser modellarono un problema reale di distribuzione di gasolio alle stazioni di servizio, percorrendo la minima distanza possibile. In realtà, il modello fu generalizzato qualche anno più tardi da Clarke e Wright, i quali studiarono come servire un gruppo di clienti, allocati attorno ad un deposito centrale, con una flotta disomogenea di veicoli[1]. Oggigiorno, il VRP viene risolto anche per problemi inerenti l'erogazione di servizi, la consegna di merci, il trasporto di persone. La sua applicazione, per la risoluzione di casi reali, richiede una continua evoluzione e sviluppo di software, sempre più potenti e sofisticati, in grado di risolvere istanze via via crescenti in numero.

2.1 Euristiche

Quando risolvere un problema di modellazione matematica richiede dei tempi di risposta molto lunghi, si preferisce progettare un approccio euristico, capace di risolverlo in tempi più contenuti.

Un euristico è definito da Reeves “una tecnica che cerca buone soluzioni, quasi ottimali, ad un costo computazionale ragionevole senza essere in grado di garantire l'ottimalità [...]”[2].

Rispetto ai metodi esatti, l'euristica propone sì soluzioni approssimate, ma comunque vicine a quella ottima. I tempi di risoluzione dei problemi sono direttamente proporzionali alla qualità del risultato calcolato. Quanto più tempo impiega l'euristica a trovare la soluzione, tanto più accurata e vicina all'ottimo sarà quest'ultima. Essenziale è trovare il giusto compromesso tra i tempi di risposta e la qualità della soluzione trovata[4]. I risultati derivanti dalla risoluzione del problema sono classificati secondo un ordine gerarchico, ad esempio, nel caso del VRP: la minimizzazione del numero di veicoli è considerato l'obiettivo primario e la minimizzazione della distanza percorsa da tali veicoli risulta essere l'obiettivo secondario. In linea con quanto affermato da Bräysy[4], tali obiettivi

sono spesso in conflitto, poiché ridurre il numero di veicoli comporta inevitabilmente un aumento della distanza totale da far percorrere ai veicoli scelti. In questo senso, un algoritmo euristico per il VRP permette di selezionare delle rotte in maniera sequenziale, reiterando i passi fino a trovare una soluzione ammissibile.

Esistono *metodi sequenziali*, che costruiscono un percorso per volta, e *metodi paralleli*, tramite i quali è possibile costruire più percorsi contemporaneamente. I metodi classici di ricerca locale appartengono alla classe generale di euristica approssimativa che si basa sul concetto di miglioramento iterativo. Vale a dire che la soluzione migliora ad ogni iterazione.

In maniera intuitiva, dato

- ◆ un problema da minimizzare
- ◆ una sua soluzione ammissibile x
- ◆ il valore della funzione obiettivo $f(x)$ associato ad x
- ◆ definito un intorno di x (chiamato *vicinato*)

la ricerca locale esplora tale intorno in cerca di soluzioni migliori, procedendo per tentativi. La progettazione di una ricerca locale richiede la conoscenza dei seguenti passi:

- come generare una soluzione iniziale ammissibile
- come generare nuove soluzioni, ovvero l'applicazione delle mosse
- in base a quale criterio accettare il risultato

La generazione di mosse crea nuove soluzioni. La nuova soluzione identificata viene confrontata con la soluzione attuale. Se il risultato della nuova soluzione è migliore, quest'ultima viene scelta a discapito della soluzione corrente. L'algoritmo viene reiterato finché non si giunge ad una buona soluzione. Le strategie che portano alla scelta della soluzione migliore sono due:

- prima accettazione (First-Accept: FA)
- migliore accettazione (Best-Accept: BE)

La strategia FA sceglie la prima soluzione trovata che soddisfa il criterio di accettazione impostato dall'algoritmo; la strategia BE esamina dapprima tutte le soluzioni vicine che soddisfano il criterio di accettazione e, successivamente, sceglie la migliore tra queste. È importante evidenziare il fatto che gli algoritmi locali eseguono ricerche definite "miopi", in quanto l'ottimo locale ricercato e trovato con tali algoritmi può essere molto lontano dalla soluzione ottima globale. Questo perché gli algoritmi locali, accettando le soluzioni in modo sequenziale, producono una riduzione nel valore della funzione obiettivo. Nella

ricerca locale, individuato il minimo locale che restituisce la soluzione ottima (o comunque la miglior soluzione tra quelle trovate), l'algoritmo si arresta e restituisce come output proprio il minimo trovato.

Proprio al fine di ovviare al problema dei minimi locali, è generalmente consuetudine progettare algoritmi *metaeuristici*.

2.2 Metaeuristiche

Negli ultimi anni, si è assistito ad un crescente numero di lavori focalizzati alla progettazione di approcci metaeuristici, che rappresentano una generalizzazione degli approcci basati sulla ricerca locale. Per tali algoritmi la struttura generale rimane sempre la stessa, ma le varie componenti vengono modellate in base ai singoli problemi. La metaeuristica prende spunto da alcune affinità con la natura fisica. Un esempio è dato dagli *algoritmi genetici*[5], che si basano sulla genetica della popolazione. In questo tipo di algoritmo, l'insieme delle soluzioni ammissibili è dato dall'insieme di una popolazione di individui, identificati come cromosomi che, attraverso un processo iterativo, creano nuove generazioni, che coincidono con nuove soluzioni. Tali soluzioni, se generate in base a criteri di miglioramento della specie, risulteranno migliori rispetto alle soluzioni da cui sono state generate. I primi ad applicare l'algoritmo genetico al VRPTW furono Thangiah et al. come riportato in[5]. Con questo tipo di algoritmo si cerca di risolvere problemi di ottimizzazione che non si potrebbero risolvere altrimenti, attraverso un meccanismo concettualmente simile a quello attuato nei processi biochimici.

Gli step dell'algoritmo genetico sono:

- a. valutazione delle diverse soluzioni di partenza (configurate come diversi individui biologici)
- b. ricombinazione (similmente alla riproduzione biologica)
- c. introduzione di elementi di disordine (come nel caso di mutazioni genetiche casuali)
- d. generazione di nuove soluzioni, valutate scegliendo le migliori per pervenire all'ottimo.

Ognuna delle quattro fasi può essere definita *generazione*, come nel mondo animato. Gli algoritmi genetici rientrano nei *weak methods*, ovvero metodi di risoluzione dei problemi che si basano su poche assunzioni, ma che sono caratterizzati da una grande versatilità e, quindi, applicabili ad una vasta classe di problemi.

Di recente, in una revisione tassonomica della letteratura sui problemi di *routing* è stato dichiarato che la maggior parte degli articoli consultati utilizza la metaeuristica per risolvere il VRP e le sue varianti[6]; questo perché la metaeuristica è ampiamente riconosciuta come approccio efficiente per molti problemi di ottimizzazione.

2.3 Introduzione al Vehicle Routing Problem

Il problema di *routing* del veicolo è alla base della gestione della distribuzione e risulta di fondamentale importanza, poiché su di esso si basano migliaia di aziende ed organizzazioni impegnate nella raccolta e consegna di merci e/o persone.

Uno studio condotto nel 2009 da Eksioglu et al.[1] ha individuato ben 1021 articoli di riviste con VRP come argomento principale, pubblicati tra il 1959 ed il 2008. E proprio lo sviluppo di tale argomento, in riviste e libri specifici, ha contribuito ad ampliare la letteratura VRP, che è cresciuta esponenzialmente ad un tasso del 6% annuo.

Il VRP classico prevede l'utilizzo di una flotta omogenea, ovvero veicoli di uguali caratteristiche tecniche (in termini di peso, capacità, velocità etc). Ogni veicolo inizia e termina il proprio percorso da ed in un deposito, comune alla flotta. In alcune applicazioni, il deposito di partenza potrebbe non coincidere con quello di arrivo. Poiché le condizioni variano da un'impostazione all'altra, gli obiettivi e i vincoli incontrati nella pratica sono molto variabili.

Generalmente, l'ipotesi principale è che ogni cliente sia servito da uno ed un solo veicolo. Il VRP è comunemente usato per far riferimento alla versione CVRP, ovvero il VRP capacitivo, per il quale si assume anche che la capacità del mezzo non debba essere mai ecceduta. L'obiettivo è trovare un insieme di percorsi (anche detti *rotte*) al minimo costo. Il costo potrebbe essere rappresentativo della distanza totale percorsa, oppure del costo chilometrico totale o ancora della durata totale. In base ad accordi con i *driver* (autisti dei mezzi), potrebbe essere necessario imporre anche che la durata di ciascuna rotta non ecceda una massima consentita.

La rete stradale è rappresentata da un grafo, che può essere orientato, non orientato o misto. Nel primo caso, si considera che tutte le strade siano ad un unico senso di percorrenza; nel secondo, ad entrambi i sensi ed infine nel terzo, che alcune siano a doppio senso di circolazione ed altre no. I VRP su grafo misto sono ovviamente più complessi da trattare, sebbene siano più rappresentativi del contesto reale.

L'insieme dei nodi/vertici del grafo sono rappresentativi dei clienti e del deposito mentre, per ogni coppia di nodi/vertici, un arco/spigolo (a seconda che il grafo in questione sia orientato o meno) è rappresentativo di un collegamento fra i due.

Generalmente, ad ogni arco/spigolo viene associato un costo legato o alla lunghezza del tratto, oppure al tempo di percorrenza; in tali casi si parla di *grafo pesato*.

Nel caso in cui i clienti si suppongano localizzati sui nodi del grafo, si parla di Node Routing Problem (NRP, altrimenti detto *problema di pianificazione del veicolo*), sottoclasse del VRP, che verrà trattato nel dettaglio nel capitolo successivo.

Una generalizzazione del VRP è rappresentata dalla classe dei problemi di *routing* del veicolo stocastico (SVRP)[8], in cui uno o più parametri del problema sono associati a variabili casuali. E' stata rivolta l'attenzione a questa classe di problemi, in quanto vicini alla realtà e capaci di tenere conto della variabilità dei dati. Per modellare gli SVRP, vengono impiegati due approcci stocastici:

→ programmazione stocastica con ricorso (SPR: Stochastic Programming with Recourse)

→ programmazione di vincoli di probabilità (CCP: Chance Constraint Programming).

Il primo approccio considera le azioni (altrimenti dette *ricorso*) per contrastare le possibili violazioni dei vincoli poiché, trattandosi di parametri con variabili casuali, alle volte i vincoli potrebbero non contenere errori. Inoltre, l'SPR tiene conto del costo associato al ricorso nella funzione obiettivo. Al contrario, l'approccio CCP introduce vincoli per limitare la probabilità di errori, allo scopo di garantire un buon livello di qualità della soluzione.

Nel 1969, [Tillman 8] attua delle modifiche al noto euristico Clark&Wright, per risolvere il problema in cui la domanda di ciascun cliente è una variabile casuale, introducendo così il problema di *routing* del veicolo con richieste stocastiche (VRPSD). Nella letteratura VRPSD, relativamente ai modelli stocastici, le formulazioni SPR sono state dominanti rispetto alle formulazioni CCP.

Il VRP appartiene alla classe di problemi di ottimizzazione combinatoria NP-hard. Vale a dire che, per giungere alla soluzione esatta, si necessita di un tempo che cresce esponenzialmente con l'aumentare delle dimensioni del problema stesso.

Esistono in letteratura diversi approcci esatti proposti per il VRP che consentono di determinare una o più soluzioni ottime in un tempo ragionevole. Tuttavia, quando il numero di dati da elaborare è estremamente elevato, la loro applicazione richiede tempi molto elevati e, in alcuni casi, risulta addirittura impraticabile. Oggigiorno, le più grandi

istanze VRP che possono essere costantemente risolte mediante l'impiego di algoritmi esatti contengono circa 50 clienti, mentre casi più grandi possono essere risolti in modo ottimale solo in casi particolari [7].

2.4 Varianti del VRP

Per risolvere problemi con istanze sempre più vicine a casi reali, a partire dal modello classico, gli studiosi hanno elaborato nuove versioni di VRP, distinte per vincoli, funzioni obiettivo e variabili decisionali.

Un esempio è la variante trattata in questa tesi, il Capacitated Vehicle Routing Problem with Time Windows (CVRPTW), in cui è necessario rispettare le finestre temporali forti, ovvero intervalli di tempo entro cui servire necessariamente i clienti.

Di seguito sono riportate solo alcune delle varianti del VRP presenti in letteratura.

- VRP with Pick-up and Delivery (VRPPD):
 - ◆ problema di instradamento con ritiro e consegna, in cui è contemplata la possibilità che i clienti restituiscano alcuni prodotti. Dunque, poiché potrebbe presentarsi la necessità di effettuare, presso ogni cliente, due tipologie di operazioni, vengono impiegati due parametri: d_i rappresenta la domanda del singolo cliente, p_i indica, invece, la quantità di merce da ritirare presso lo stesso cliente. Si assume che la consegna della merce avvenga sempre prima del ritiro.
L'industria alimentare trova beneficio nell'utilizzo di questa variante del VRP, in quanto i supermercati fungono da punti di consegna e i fornitori, come grossisti o produttori, sono i punti di raccolta. Applicando la strategia di instradamento misto (ritiro/consegna), l'industria alimentare americana ha risparmiato 160 milioni di dollari all'anno dal 1982[9].
- VRP with Backhauls/Linehaul (VRPB/L):
 - ◆ problema di routing che include sia l'insieme di clienti ai quali devono essere consegnati i prodotti, e si parla in questo caso di VRP Linehaul; sia l'insieme dei fornitori presso i quali devono essere ritirate le merci, ed è il caso del VRP Backhauls. Molte aziende preferiscono evitare i prelievi prima di completare le consegne, anche quando non è implicata alcuna violazione della capacità, questo a causa dei costi aggiuntivi associati alla riorganizzazione dei carichi a bordo, per tale motivo, in alcuni casi, i ritiri vengono posticipati fino al completamento di tutte le consegne[9].

➤ VRP with Distance Constrained (DCVRP):

- ◆ problema di routing in cui bisogna rispettare il vincolo di lunghezza massima del tragitto percorso. Le tratte sono indicate con archi a cui è associata una lunghezza non negativa. La lunghezza totale, quindi del tragitto complessivo, non deve eccedere la lunghezza massima imposta dal vincolo. Le rotte dei veicoli vengono gradualmente costruite incorporando archi che producono i maggiori risparmi, ma che non comportano il superamento del limite superiore, rappresentato dalla lunghezza massima[10].

2.5 Capacited Vehicle Routing Problem with Time Windows (VRPTW)

Il problema di routing con finestre temporali di tipo hard (VRPTW) è un'estensione del VRP classico.

E' un problema di gestione della distribuzione che può riguardare consegne postali, bancarie, raccolta e smistamento dei rifiuti industriali, consegne presso i clienti, ritiro di merci presso i fornitori.

Il VRPTW[2] nasce da un problema ben più semplice e noto: il problema del commesso viaggiatore definito con l'acronimo TSP (Travelling Salesman Problem) in cui un viaggiatore, per l'appunto, deve visitare un certo numero di clienti prima di ritornare al punto di partenza. I dati noti sono il tempo necessario per spostarsi da un cliente all'altro, con l'unico veicolo a disposizione, e la posizione di ogni cliente, dunque la distanza tra le diverse posizioni. L'obiettivo è quello di visitare tutti i clienti nel minor tempo possibile, dunque, riducendo al minimo la distanza percorsa. Ad ogni cliente è associata una domanda, che non può eccedere la capacità massima del veicolo.

Partendo da questo problema e associando, ad ogni cliente, una finestra temporale detta appunto *time window*, si ottiene il Capacited Vehicle Routing Problem with Time Windows per il quale, oltre al vincolo di capacità, il veicolo deve visitare un cliente entro una determinata fascia oraria. Dunque, ogni cliente i è caratterizzato da un intervallo temporale $[e_i, l_i]$ entro il quale deve essere servito. Se il veicolo arriva al vertice j prima che la finestra temporale si apra, ovvero prima dell'istante e_j , è costretto ad attendere. Arrivare dopo la chiusura della finestra temporale, ovvero dopo l'istante l_j , non è, invece, consentito. Si presume che le finestre temporali e la domanda dei clienti siano conosciute a priori e che i veicoli partano dal deposito all'istante $t_0=0$.

I vincoli di tempo, in alcuni casi, possono essere violati, in relazione al tipo di finestre temporali, che possono essere di tipo *hard* o di tipo *soft*. Le time windows di tipo *hard* devono essere rispettate in maniera puntuale. Al contrario, quelle di tipo *soft* possono essere violate e la domanda del cliente può essere soddisfatta anche al di fuori della fascia oraria, a patto che vengano pagate delle penalità. In questo caso, la funzione obiettivo si complica, poiché diventa necessario prevedere un trade-off per ottimizzare anche la penalità.

A partire dal VRPTW base, è possibile sviluppare diverse varianti, con caratteristiche differenti, che rispecchiano i casi della vita reale. Di seguito vengono riportati degli esempi:

❖ Depositi multipli (MDVSPTW)[3]

- è il caso in cui si ha più di un deposito, ognuno caratterizzato da una flotta che serve gli insiemi dei clienti. L'obiettivo è soddisfare la domanda al costo minimo. Ogni attività inizia in un intervallo di tempo stabilito e i veicoli partono da vari depositi. E' un importante problema di ottimizzazione che trova applicazione nel campo del trasporto merci o nella pianificazione degli autobus urbani.

In letteratura si trovano pochi studi dedicati al MDVSPTW e i documenti di Mingozzi et al. e Desaulniers et al. sono gli unici articoli pubblicati che trattano di tale argomento[11].

❖ Scomparti multipli (MCVRPTW)[12]

- i veicoli utilizzati sono caratterizzati da vani con scomparti multipli a capacità limitata, fondamentali quando bisogna trasportare merce che deve rimanere separata durante il trasporto. E' il caso in cui ogni cliente richiede la consegna di un insieme diverso di prodotti, pertanto c'è necessità di trasportarli separatamente. Un esempio reale potrebbe essere il trasporto di benzina presso le stazioni di servizio. I camion cisterna impiegati per la consegna sono caratterizzati da più scomparti, necessari per separare le varie tipologie di benzina.

Sebbene il problema si presenti frequentemente nella realtà, è stato raramente studiato in letteratura.

Le motivazioni che portano a sviluppare e risolvere un problema di Vehicle Routing Problem possono essere svariate.

Ad esempio:

- minimizzare il numero di veicoli utilizzati per servire i clienti

- minimizzare la distanza percorsa, o il tempo impiegato a percorrerla; fattori che si tramutano in minimizzazione del costo totale
- minimizzare le penalità legate al parziale servizio fornito ai clienti

Da uno studio effettuato su 299 articoli pubblicati tra il 2009 ed il 2017, è emerso che le due varianti più trattate sono il VRP capacitivo (98.91%) ed il VRP con finestre temporali (37.32% di cui: 30.8% relativo a finestre temporali di tipo hard, 5.43% relativo a finestre temporali di tipo soft e 1.09% relativo a finestre temporali miste) [6].

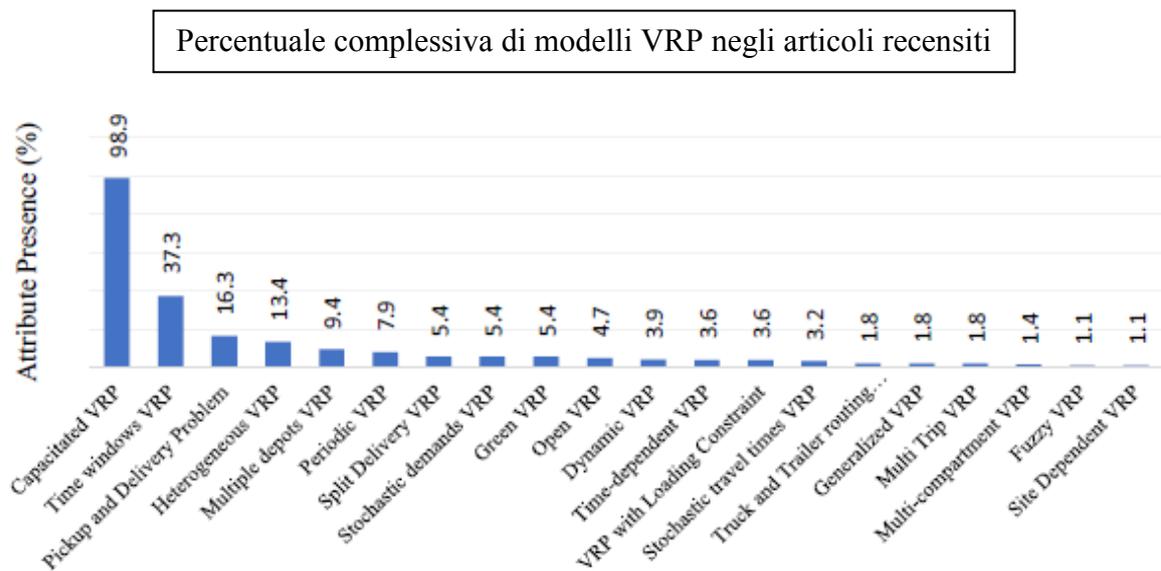


Fig.1[6]

Capitolo 3

Il caso di studio della Tre Elle

L'azienda Tre Elle, operante nel settore metalmeccanico, nasce nel 1951 a Fermo.

Si occupa di progettazione e realizzazione di manufatti metallici destinati ai più disparati settori. Nel 2011 dà vita al progetto DACA, per creare soluzioni espositive sia nel mondo museale che in quello dell'alta gamma.

Ad oggi, uno degli obiettivi dell'Azienda è quello di rinnovare la gestione dei trasporti al fine di migliorare l'efficienza e minimizzare i costi.

Per tale ragione, i principali aspetti da considerare sono descritti di seguito.

FLUSSI: ovvero il materiale che viene trasportato dall'azienda verso i propri clienti

- Materiale semilavorato che parte verso i trattamenti
- Materiale lavorato che dai trattamenti rientra in Azienda (per catalogazione, CQ,..)
- Materiale che parte dall'Azienda per essere venduto ai clienti.

RETE STRADALE

La strategia richiede di stabilire le rotte da seguire per la consegna delle merci presso i clienti in maniera da minimizzare la distanza complessivamente percorsa. Si noti che il costo totale di viaggio è una funzione della distanza percorsa e che, quindi, minimizzare la distanza percorsa significa anche minimizzare il costo totale di viaggio, imputabile al carburante speso. In ogni rotta o tratta, il veicolo ad essa associato parte dal deposito, dove si assume che la flotta di veicoli sia inizialmente allocata, visita un certo numero di clienti e rientra al deposito (Fig.2).

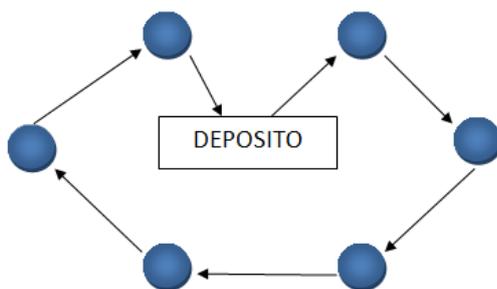


Fig.2

Ovviamente la scelta dell'itinerario presuppone il rispetto di vari vincoli: operativi (e.g. capacità dei mezzi) e/o normativi (e.g. ore di guida eseguibili per ciascun autista). Ciò potrebbe comportare una maggiore complessità nella definizione ed ottimizzazione del percorso e nella schedulazione dei veicoli.

CLIENTI

Grazie alla poliedricità di lavorazioni interne ed esterne che l'Azienda è in grado di offrire, il parco clienti è molto vario e copre i più disparati settori: dal fotovoltaico, all'illuminotecnica, all'energetico.

I principali clienti sono produttori di:

- ◆ Macchine per lavorazione legno
- ◆ Macchine per lavorazione pelli
- ◆ Macchine per lavorazione imballi
- ◆ Macchine per impianti di verniciatura
- ◆ Macchine per automazione informatica
- ◆ Batterie
- ◆ Forni alimentari
- ◆ Stufe per riscaldamento
- ◆ Bancomat
- ◆ Automazioni autostradali
- ◆ Automazione serramenti
- ◆ Arredamento
- ◆ Impianti per selezione/imballaggio nel settore ortofrutticolo.

Le sedi dei clienti sono ubicate, per la maggior parte, lungo la fascia adriatica.



Fig.3

L'organizzazione e il programma delle consegne dipende anzitutto dalla conferma d'ordine, attraverso la quale l'azienda si impegna ad evadere la richiesta nel tempo prefissato e comunicato al cliente. Solitamente i tempi di evasione dell'ordine sono pari a 4/5 settimane comprensive di trattamenti esterni che spaziano dalla verniciatura, alla lucidatura, serigrafia, brunitura, zincatura. Per la sola produzione interna, invece, sono previste 3 settimane lavorative. La consegna al cliente avviene il giorno successivo al rientro del materiale lavorato dal terzista.

A livello operativo si susseguono due step: nel pomeriggio precedente la consegna, presso il Magazzino Tre Elle, si effettua il carico del materiale pronto per la distribuzione; nella primissima mattinata, si parte dal Magazzino Tre Elle alla volta dei clienti, in modo tale da essere in consegna all'apertura dei vari magazzini.

Questa nuova idea di gestione dei trasporti prevede una migliore organizzazione dell'orario di lavoro con diminuzione degli straordinari, migliori condizioni lavorative per gli operai (che nel caso di orario prolungato si ritroverebbero a dover lavorare al carico della motrice nel tardo pomeriggio, quando in inverno è già buio, nel piazzale fa freddo e la luce è fioca), migliori condizioni lavorative per gli autisti che, partendo al mattino presto, viaggerebbero in autostrada con poco traffico e rientrerebbero in azienda con la luce del giorno.

Per la maggior parte dei clienti la data di consegna accordata in fase di conferma d'ordine è tassativa. Per alcuni, invece, c'è la possibilità di mediare la data e per programmare la consegna ci si può attenere agli accordi presi telefonicamente. Solitamente, se la data di consegna viene rispettata non c'è bisogno di avvertire il cliente dell'arrivo del materiale. Alcuni clienti hanno linee di montaggio schedate in base alle date di consegna comunicate da Tre Elle e, se le date non vengono rispettate, il cliente rischia di avere fermi produttivi. In tal caso, i danni economici arrecati al cliente vengono assorbiti dall'azienda Tre Elle attraverso penali da pagare e il cui ammontare varia in base all'entità del disagio provocato. In ogni caso, entro fine mese, bisogna che venga evaso tutto il materiale in carico per poter fatturare.

Oltre al problema dei fermo-linea e della fatturazione mensile, un altro motivo per il quale bisogna consegnare nei tempi stabiliti deriva dal fatto che alcuni clienti vendono i propri macchinari in tutto il mondo. Dunque, sulla base della data di consegna concordata, programmano il montaggio e il collaudo delle macchine, cui seguono le varie spedizioni internazionali. La puntualità è un aspetto molto importante che l'Azienda sta curando perché, insieme alla garanzia di qualità, è ciò che fa la differenza rispetto ai competitors.

VEICOLI

Nella pianificazione delle consegne, ricoprono un ruolo di rilevante importanza i mezzi messi a disposizione dall'azienda.

La flotta è eterogenea ed è costituita da tre motrici di diversa capacità. Il costo di utilizzo dei mezzi è pari ad 1,10 €/km.

→ Capacità di ciascun veicolo:

N°1 motrice Renault Premium

8000 kg netti

7,80x2,48 superficie di carico

2,70 h

N°1 Motrice Mercedes 18-28

9000 kg netti

8,50mx2,45m superficie di carico

2,75m h

N°1 furgonato Iveco

1320 kg netti

3,55mx1,75m superficie di carico

1,95m h

I veicoli, durante la notte, sostano nel piazzale dell'azienda con l'obiettivo di effettuare il carico nel pomeriggio e partire per le consegne all'alba del mattino seguente. Nella maggior parte dei casi, la saturazione del mezzo utilizzato avviene a volume: vengono impiegate ceste metalliche impilabili a riempire l'intero volume della motrice. In alcuni casi, un limite alla disposizione del materiale all'interno della motrice è proprio l'imballo.

Strategia:

- imballi speciali e cassette su europallet (80x120) facilmente impilabili
- carichi per l'intero volume disponibile

Queste due opzioni di saturazione del bilico sono dovute alla produzione diversificata tipica dell'azienda Tre Elle.

Sebbene l'azienda si avvalga della possibilità di usare veicoli di terzi, in questa tesi viene eseguita la pianificazione delle rotte dei soli veicoli appartenenti alla flotta azienda.

Ad esempio, per un cliente con sede X, l'azienda potrebbe non impiegare una motrice della flotta aziendale, bensì un autotrasportatore che ha sede vicino al cliente. Quindi, la merce viene consegnata con un mezzo aziendale al deposito più vicino a quello aziendale, dove

l'autotrasportatore effettua il carico e parte alla volta del cliente, viaggiando di notte. Al mattino effettua la consegna e rientra presso il deposito che ha sede X. I costi legati all'utilizzo di mezzi esterni dipendono dal volume, dal peso della merce trasportata e dal tragitto da effettuare.

3.0 Tipologia e formulazione matematica del problema

Il problema in esame appartiene alla classe NRP.

Nello sviluppo del caso in esame, si assume che sia nota a priori la lista di clienti da servire in uno specifico giorno. Dunque, l'obiettivo è quello di programmare le rotte che serviranno tutti i clienti previsti in quel giorno, al fine di minimizzare la distanza percorsa (e, quindi, i costi).

Per tale ragione, la pianificazione delle rotte è giornaliera.

Nel caso specifico, si assume che:

- E' noto il numero di veicoli disponibili
- Ogni rotta inizia e termina nel deposito dei veicoli
- Singolo deposito comune
- Ogni veicolo deve visitare, per ogni tratta, almeno un cliente
- Un cliente può essere servito da uno ed un solo veicolo

Il problema decisionale da risolvere riguarda l'assegnamento dei clienti ai veicoli e l'individuazione della sequenza di servizio per ciascun veicolo.

Dato un grafo $G=\langle V,A \rangle$ dove V è l'insieme dei vertici che contiene i clienti ed il deposito ed A è l'insieme degli archi.

Poiché si assume un singolo deposito in comune, è chiaro che nel nodo/vertice che lo rappresenta si avrà un arco in uscita, percorso dai veicoli diretti verso i clienti, ed un arco in entrata percorso dalla flotta che rientra a consegne terminate (sempre nello stesso deposito!). Per evitare confusione in sede di sviluppo della modellazione matematica, nasce l'esigenza di clonare il deposito. In questo senso, torna utile l'idea di Kallehauge et al. descritta in [5], in base alla quale il grafo è caratterizzato da $V=|C|+2$ vertici. L'insieme degli i clienti (con $i=1,\dots,n$) è rappresentato da C , mentre il deposito dai vertici 0 ad indicare il deposito di uscita dei veicoli (definito *DepositoOut*) ed $n+1$ per il deposito di rientro (definito *DepositoIn*).

Il problema si articola come segue.

Insiemi → raggruppano gli elementi del sistema

K = insieme dei *veicoli*

C = insieme dei *clienti*

V = insieme dei *vertici* (*clienti* + *depositoOut* + *depositoIn*)

A = insieme degli *archi* che collegano i vertici

Funzione obiettivo → rappresenta il costo associato all'evento

- Minimizzare il costo totale al chilometro:

$$\min \sum_{(i,j) \in A} \sum_{k \in K} c_f d_{ij} x_{ij}^k \quad (1)$$

dove c_f indica il costo al km del carburante, posto nella sperimentazione (capitolo 4) a 1.10.

Parametri → sono i dati del problema e rappresentano delle quantità fissate che dipendono dai diversi elementi del sistema

- ◆ $d_{ij} \forall (i,j) \in V$ indica la *distanza*, espressa in km, per spostarsi dall' i-esimo al j-esimo vertice
- ◆ $t_{ij} \forall (i,j) \in V$ indica il *tempo di viaggio*, espresso in ore, per spostarsi dall' i-esimo al j-esimo vertice
- ◆ $r_j \forall j \in C$ rappresenta la *domanda*, espressa in kg, del j-esimo cliente
- ◆ $p_i \forall i \in V$ indica il *tempo di servizio* al cliente i, ovvero quanto tempo si impiega a scaricare la merce al nodo i-esimo
- ◆ $[e_j, l_j] \forall j \in C$ indica la *fascia oraria* entro cui servire il cliente i-esimo
- ◆ $q_i \forall i \in K$ indica la *capacità*, espressa in kg, del i-esimo veicolo
- ◆ l_0 rappresenta il *tempo massimo* per rientrare al deposito, anche perché i contratti degli autisti sono vincolati a delle condizioni sindacali

Variabili decisionali → grandezze che definiscono la soluzione del problema

$x_{ij}^k = \{1 \text{ se } (i,j) \in A \text{ è attraversato dal veicolo } k; 0 \text{ altrimenti}\}$

$y^k = \{1 \text{ se il veicolo } k \text{ è usato; } 0 \text{ altrimenti}\}$

$\tau_i^k = \text{tempo di arrivo al cliente } i \text{ del veicolo } k$

$x_{ij}^k \in \{0,1\} \forall i,j \in A, \forall k \in K$

$$y^k \in \{0,1\} \quad \forall k \in K$$

$$\tau_i^k \geq 0 \quad \forall i \in V, \forall k \in K$$

Vincoli → condizioni che devono essere soddisfatte dalle soluzioni che si ricercano (si ricorda che di seguito verrà indicato *depositoOut* con 0 e *depositoIn* con n+1)

- ogni cliente deve essere servito da uno ed un solo veicolo

$$\sum_{k \in K} \sum_{j \in V/i \neq j} x_{ij}^k = 1 \quad \forall i \in C \quad (2)$$

- la capacità totale del veicolo non deve essere ecceduta

$$\sum_{i \in C} r_i \sum_{j \in V/i \neq j} x_{ij}^k \leq q^k y^k \quad \forall k \in K \quad (3)$$

- il veicolo k esce dal deposito se è usato

$$\sum_{i \in C} x_{0i}^k = y^k \quad \forall k \in K \quad (4)$$

- il veicolo k rientra in deposito se è stato usato

$$\sum_{i \in C} x_{i(n+1)}^k = y^k \quad \forall k \in K \quad (5)$$

- vincolo di conservazione del flusso

$$\sum_{j \in V/i \neq j} x_{ij}^k - \sum_{j \in V/i \neq j} x_{ji}^k = 0 \quad \forall i \in C, \forall k \in K \quad (6)$$

- vincoli di aggiornamento dei tempi di arrivo

$$\tau_j^k \geq \tau_i^k + (p_i + t_{ij})x_{ij}^k - l_0(1 - x_{ij}^k) \quad \forall k \in K, \forall i, j \in V | j \neq i \quad (7)$$

- vincoli di time windows (hard)

$$e_j \sum_{i \in V} x_{ij}^k \leq \tau_j^k \leq l_j \sum_{i \in V/i \neq j} x_{ji}^k \quad \forall j \in V, \forall k \in K \quad (8)$$

Capitolo 4

Risultati computazionali

Il modello matematico per il problema di instradamento dei veicoli, oggetto di studio di questa tesi, è stato implementato in *Python* usando le API di Gurobi v8.1.1.

In questo capitolo, si discutono i risultati ottenuti al variare di alcuni parametri di input ritenuti più significativi.

Le metriche prese in considerazione per la valutazione degli esperimenti sono:

1. il **costo**, ovvero la funzione obiettivo del modello;
2. il **numero di veicoli usati**, significativo perché al variare di alcuni parametri (ad esempio la larghezza delle *time windows*), varia il numero di veicoli utilizzati, che rappresenta un costo per l'azienda;
3. il **tempo di calcolo della soluzione**, poiché dà un'indicazione sul tempo necessario a trovare una soluzione (significativo per la pianificazione delle rotte giornaliere).

Di seguito vengono introdotti, nell'ordine, il *caso base* (ricavato in collaborazione con l'azienda) e altri 3 casi generati a partire da questo. Per ognuno di essi viene fatto variare un parametro, tenendo fissi tutti gli altri.

I parametri di cui si studia la variazione sono:

- ◆ larghezza delle *time windows*, per le quali verranno presi in considerazione tre casi
 1. clienti con *time windows* molto larghe, che quindi incideranno poco nella pianificazione delle rotte
 2. clienti con *time windows* molto strette e clienti con *time windows* molto larghe
 3. clienti con *time windows* molto stringenti
- ◆ capacità dei veicoli
- ◆ numero di clienti

Infine, il modello viene applicato ad un caso reale, quello della Tre Elle.

4.1 Analisi di sensitività

4.1.0 Caso base

Il *caso base* è un caso che potremmo definire “giocattolo”, costruito per la validazione del modello.

E' stato considerato un insieme di 10 clienti ($|C|=10$). Il motivo di tale scelta è duplice:

1. rappresenta il numero medio di richieste che l'azienda può soddisfare nell'arco della giornata;
2. dato che il problema risulta essere NP-hard, il tempo di risoluzione di un'istanza cresce esponenzialmente al variare della grandezza dell'input (numero di clienti). In questo caso, è stata scelta una grandezza limite per il numero di clienti in modo da ottenere il risultato in tempi ragionevoli.

Il grafo associato al caso in esame è formato da 12 vertici, considerando il deposito iniziale e quello finale, e 110 archi. Infatti, nel caso d'esempio è stato generato un arco per ogni coppia ordinata di clienti (per un totale di 90 archi) più 20 archi dal Deposito1 a tutti i clienti e da questi al Deposito2.

Il numero massimo di veicoli utilizzabili è pari a 3.

La finestra temporale di partenza è larga 10 ore ($e_j=1$, $l_j=10$, per ogni cliente j).

La capacità dei tre veicoli, espressa in kg, è pari a 1344 per il Veicolo1, 1292 per il Veicolo2 e 2831 per il Veicolo3.

Il tempo massimo (l_0) è pari a 10 ore.

Il costo del carburante è di 1.10€.

Per ogni parametro del *caso base* è stato stabilito, in accordo con l'azienda, un valore minimo e un valore massimo, in modo da definire un intervallo di scelta per i valori di quel parametro (Tab.1). La scelta dei valori è stata eseguita randomicamente nell'intervallo prestabilito.

Parametro	Intervallo	Unità di misura
domanda ($r_j \forall j \in C$)	[150 , 451]	kg
distanza ($d_{ij} \forall (i,j) \in V$)	[11.9 , 178]	km
tempo servizio ($p_i \forall i \in V$)	[0, 0.5]	h
numero veicoli	[0 , 3]	-
tempo viaggio ($t_{ij} \forall (i,j) \in V$)	[0.2 , 3]	h

Tab.1

A partire da questo *caso base*, è stata effettuata un'analisi di sensitività variando, rispettivamente, la larghezza delle *time windows*, la capacità dei veicoli e il numero dei clienti.

4.1.1. Variazione *time windows*

4.1.1.1 Caso 1: *time windows* lasche

Impostazione delle *time windows* di 10 ore (intervallo $[e_j=1, l_j=10]$) per ogni cliente.

Di seguito i valori delle metriche ottenuti eseguendo il modello:

Costo [€]	579.70
Veicoli utilizzati	Veicolo2, Veicolo3
Tempo di calcolo [sec]	265.0

Tab.2

Dalla tabella (Tab.2) si può osservare che, con *time windows* larghe, con soli 2 veicoli è possibile soddisfare la richiesta dei clienti, sostenendo un costo pari a 579.70€. Il tempo di calcolo è pari a 4'25''.

4.1.1.2 Caso 2: *time windows* miste

In questo caso l'analisi viene eseguita considerando due gruppi di clienti.

In particolare: 5 clienti con *time windows* molto lasche (intervallo di 10 ore $[e_j=1, l_j=10]$) e 5 clienti con *time windows* molto strette (intervallo di 3 ore $[e_j=2, l_j=5]$).

Costo [€]	790.93
Veicoli utilizzati	Veicolo1, Veicolo2, Veicolo3
Tempo di calcolo [sec]	440.0

Tab.3

In questo caso (Tab.3), rispetto al caso precedente, si ha un aumento della funzione obiettivo e del numero di veicoli impiegati. Il solver impiega più tempo nell'elaborazione dei dati, per un tempo complessivo pari a 7'20''.

4.1.1.3 Caso 3: *time windows* molto strette

Analisi eseguita considerando un intervallo di *time windows* pari a 3 ore [$e_j=2$, $l_j=5$] per ogni cliente.

Costo [€]	836.49
Veicoli utilizzati	Veicolo1, Veicolo2, Veicolo3
Tempo di calcolo [sec]	120

Tab.4

Rendendo le *time windows* più stringenti, il costo aumenta rispetto ai due casi precedenti, mentre il tempo di calcolo, pari a 2', diminuisce nettamente (Tab.4). Questo perché lo spazio di ricerca relativo all'arrivo e alla partenza di ogni veicolo verso e da ogni cliente è ridotto. Il cambiamento dell'itinerario dei veicoli, con conseguente aumento della distanza percorsa, comporta un aumento evidente del costo.

4.1.2 Variazione della capacità di un veicolo

4.1.2.1 Caso 1: base

Viene considerata per tutti e tre i veicoli la capacità indicata nel caso generale, ovvero

- Veicolo1: 2344 kg
- Veicolo2: 1292 kg
- Veicolo3: 2831 kg

Costo [€]	579.70
Veicoli utilizzati	Veicolo2, Veicolo3
Tempo di calcolo [sec]	265

Tab.5

Si osserva (Tab.5) come la richiesta dei clienti viene soddisfatta utilizzando 2 veicoli e sostenendo un costo pari a 579.70€. Il solver genera i risultati in un tempo pari a 4'25''.

4.1.2.2 Caso 2: riduzione capacità veicolo

4.1.2.2.1 Dimezzata la capacità del veicolo 1

Costo [€]	579.70
Veicoli utilizzati	Veicolo1, Veicolo3
Tempo di calcolo [sec]	254.92

Tab.6

Anche in questo caso (Tab.6) le richieste vengono soddisfatte impiegando 2 veicoli e sostenendo lo stesso costo del caso precedente. Il tempo di calcolo per elaborare i dati di circa 4'30''.

4.1.2.2.2 Dimezzata la capacità del veicolo 2

Costo [€]	579.70
Veicoli utilizzati	Veicolo1, Veicolo3
Tempo di calcolo [sec]	136.46

Tab.7

Nella Tab.7 è evidente come la domanda dei clienti viene soddisfatta con l'ausilio di 2 veicoli e sostenendo lo stesso costo del caso precedente. Il tempo di calcolo per elaborare i dati è pari a 2'16''.

4.1.2.2.3 Dimezzata la capacità del veicolo 3

Costo [€]	579.70
Veicoli utilizzati	Veicolo1, Veicolo3
Tempo di calcolo [sec]	410

Tab.8

Anche in questo caso (Tab.8) le richieste vengono soddisfatte impiegando 2 veicoli e sostenendo lo stesso costo del caso precedente. Il tempo di calcolo per elaborare i dati è di circa 6'50''.

Per tutti e tre i casi in esame, si può notare come il costo non varia, poiché il numero di veicoli utilizzati rimane sempre lo stesso ed, evidentemente, i chilometri percorsi non variano.

4.1.3 Variazione del numero di clienti

Nello scenario generale è stato definito *caso base* quello relativo a 10 clienti. Considerando questo come caso limite, contenente il numero massimo di clienti possibili, di seguito viene eseguita un'analisi che riguarda una diminuzione ed un aumento del numero di clienti.

Negli esperimenti che seguono è stata fissata una *time window* lasca per ogni cliente.

4.1.3.1 Caso 1: numero di clienti pari a 5

Costo [€]	356.59
Veicoli utilizzati	Veicolo3
Tempo di calcolo [sec]	0.25

Tab.9

La domanda di 5 clienti viene soddisfatta impiegando un solo veicolo e sostenendo un costo pari a 356.59€. L'elaborazione dei dati è molto veloce e avviene in un tempo pari ad un quarto di secondo. Dati riassunti nella Tab.9.

4.1.3.2 Caso 2: numero di clienti pari a 7

Costo [€]	485.25
Veicoli utilizzati	Veicolo1, Veicolo3
Tempo di calcolo [sec]	3.16

Tab.10

All'aumentare del numero di clienti, aumenta il costo rispetto al caso precedente, poiché aumenta la distanza percorsa, e aumenta anche il numero di veicoli per poter soddisfare la domanda totale. Il tempo di calcolo è pari a poco più di 3 secondi. (Tab.10).

4.1.3.3 Caso 3: numero di clienti pari a 10

Costo [€]	579.70
Veicoli utilizzati	Veicolo2, Veicolo3
Tempo di calcolo [sec]	268.28

Tab.11

Il costo per poter soddisfare la domanda continua ad aumentare (Tab.11), seppur il numero di veicoli è pari a 2, come nel caso precedente. Ciò è dovuto al fatto che, aumentando il numero di clienti, aumenta la distanza percorsa e, dunque, il costo. Anche il tempo di calcolo aumenta 4'28''.

4.1.3.4 Caso 4: numero di clienti pari a 12

Costo [€]	574.25
Veicoli utilizzati	Veicolo1, Veicolo3
Tempo di calcolo [sec]	5530

Tab.12

Continuando ad aumentare il numero di clienti, il numero di veicoli resta invariato rispetto al caso precedente poiché la capacità complessiva dei due veicoli utilizzati riesce a soddisfare la domanda, mentre il costo subisce una lieve diminuzione. Il tempo necessario per l'elaborazione dei dati è molto più lungo e pari a 1h32'10''. (Tab.12).

4.1.3.5 Caso 5: numero di clienti pari a 15

Costo* [€]	[360.65 , 956.66]
Veicoli utilizzati	Veicolo1, Veicolo2, Veicolo3
Tempo di calcolo [sec]	3600

Tab.13

*Nei risultati sopra descritti (Tab.13), l'esecuzione del solver è stata arrestata dopo 1 ora. In questo lasso di tempo il solver è stato in grado di fornire una soluzione ammissibile, ma non ottima.

Sono stati, inoltre, effettuati altri due esperimenti con un numero di clienti pari a 20 e 25 ma, in entrambi i casi, nell'arco di un'ora, il solver è riuscito ad identificare solamente un

limite inferiore ai valori delle soluzioni (368.22 per 20 clienti, 323.48 per 25 clienti), non certificando una soluzione ottima.

4.2 Caso Tre Elle

Infine, il modello è stato applicato ad un caso reale, quello della Tre Elle.

Per lo studio di tale caso sono stati presi in esame i dati reali, relativi ad una giornata lavorativa, estrapolati dal database aziendale.

Nella giornata presa in considerazione, le consegne vengono effettuate presso 7 clienti per una domanda complessiva pari a 2165kg. Si hanno a disposizione 3 veicoli con capacità eterogenea rispettivamente di 1000 kg per il veicolo1, 9000 kg per il veicolo2 e 1320 kg per il veicolo3.

Per ogni cliente è stata assunta una *time window* continua di 10 ore ($[e_j=1, l_j=10]$).

Costo [€]	501.3932
Veicoli utilizzati	Veicolo2
Tempo di calcolo [sec]	3.10

Tab.14

Dalla tabella (Tab.14) risulta che il tempo di elaborazione dei dati è in linea con il caso del paragrafo 4.1.3.2 con numero di clienti pari a 7.

4.2.1 Strategie a confronto

Di seguito viene confrontata la soluzione del modello con una soluzione ottenuta utilizzando un approccio tipicamente adottato dai gestori delle consegne. Tale approccio consiste nel saturare il più possibile la capacità dei veicoli scelti per la consegna. Nel caso specifico, è stato calcolato manualmente il costo totale di un'ipotetica politica di riempimento, che cerca di saturare il più possibile il veicolo1, assegnando al veicolo2 la domanda residua. In questo modo risulterà un assegnamento non ottimale dei veicoli ai clienti.

Per mostrare la differenza dei due approcci si considera il caso reale sopra descritto, impostando la capacità del veicolo 2 a 1500 kg anziché 9000 kg.

Costo [€]	717.3232
Veicoli utilizzati	Veicolo1, Veicolo2
Tempo di calcolo [sec]	3.50

Tab.15

Rispetto al caso reale, il numero di veicoli è raddoppiato, con conseguente aumento del costo. (Tab.15).

La soluzione ottima prevede che i due veicoli utilizzati partano con un carico di 1385 kg per il veicolo 2 e di 780 kg per il veicolo 1.

I percorsi effettuati dai due veicoli sono i seguenti:

- ◆ veicolo 2: cliente1 (300kg), cliente2 (285kg), cliente3 (200kg), cliente6 (450kg), cliente7 (150kg)
- ◆ veicolo 1: cliente4 (400 kg), cliente5 (380 kg).

Invece, pensando ad una politica di saturazione volumetrica dei veicoli, partendo dal veicolo1, si avrebbe un riempimento iniziale di tale veicolo pari a 980 kg e del veicolo2 pari a 1185 kg (avendo un riempimento quasi totale del veicolo 1), con i seguenti percorsi:

- ◆ veicolo 2: cliente1 (300kg), cliente2 (285kg), cliente6 (450kg), cliente7 (150kg)
- ◆ veicolo 1: cliente4 (400 kg), cliente3 (200kg), cliente5 (380 kg).

In questo modo il cliente3 verrebbe servito dal veicolo1.

Ne segue che il costo totale subisce un aumento legato all'incremento della distanza percorsa dal veicolo1.

Infatti, la nuova distanza è data da

$$d_{TreElle} - d_{2,3} - d_{3,6} + d_{2,6} + d_{4,3} + d_{3,5} \\ = 652.11 - 13.9 - 43.8 + 54.4 + 12.8 + 140 > d_{TreElle} \quad (9)$$

Dove $d_{TreElle}$ rappresenta la distanza totale percorsa dai veicoli utilizzati nel caso Tre Elle (paragrafo 4.2).

Con tale confronto si vuole sottolineare che, tenendo in considerazione solamente il riempimento dei veicoli e non anche la distanza per l'assegnamento ai clienti, si ottiene una soluzione non ottima dal punto di vista del costo.

Capitolo 5

Conclusioni e sviluppi futuri

In questo capitolo, vengono analizzate le conseguenze che le variazioni dei parametri considerati comportano sulle metriche scelte.

Dai risultati ottenuti dalla sperimentazione sulle *time windows*, si evince che il modello è sensibile alla variazione di queste.

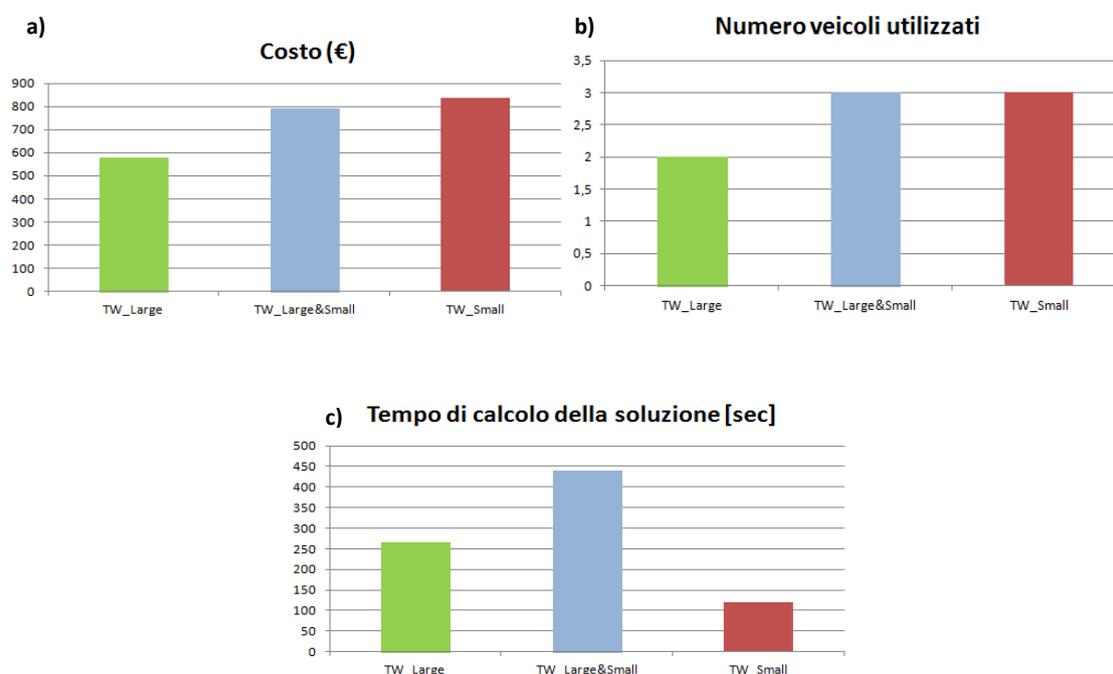


Fig.4: a)costo, b)numero dei veicoli utilizzati, c)tempo di calcolo della soluzione al variare delle *time windows*

Infatti, per ogni caso preso in esame, variano tutte le metriche considerate, ovvero costo, numero di veicoli utilizzati e tempo di calcolo della soluzione. In particolare, la riduzione delle *time windows* di alcuni clienti comporta l'aumento del numero di veicoli utilizzati poiché i clienti con le *time windows* più stringenti non potrebbero essere soddisfatti con lo stesso numero di veicoli nel caso in cui le *time windows* fossero state tutte più lasche.

L'aumento del numero di veicoli utilizzati comporta un aumento dei costi, poiché la distanza totale percorsa aumenta.

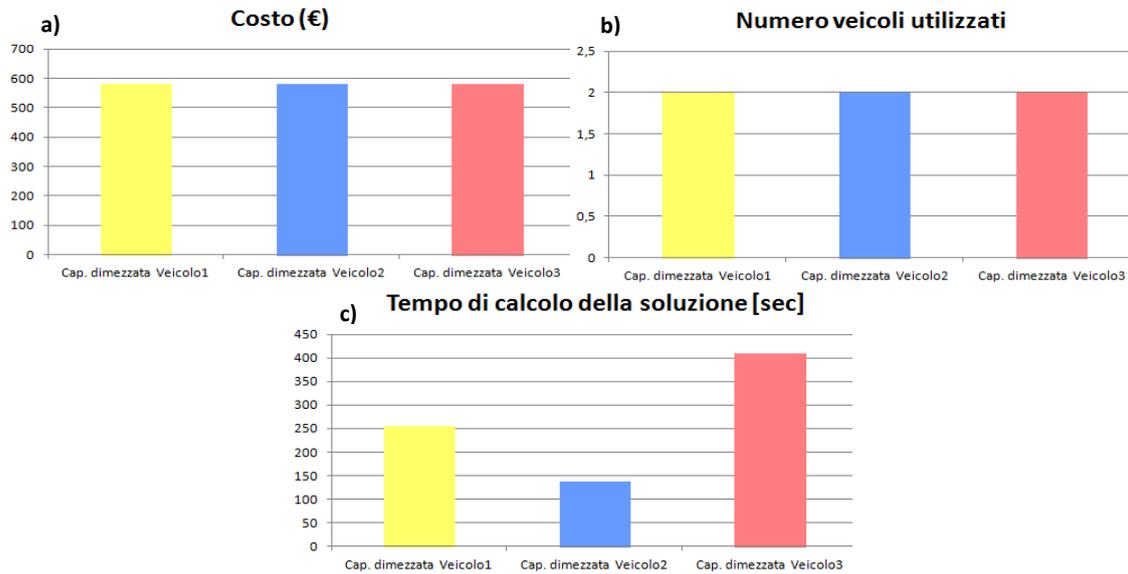


Fig.5: a)costo, b)numero veicoli utilizzati , c)tempo di calcolo della soluzione al variare della capacità del veicolo più capiente.

Dalla Fig.5 è possibile osservare che cambiare la capacità di un solo veicolo, rispettivamente del Veicolo1, Veicolo2 e Veicolo3, non comporta una variazione del costo, fintanto che il numero di veicoli utilizzati rimane invariato. Il tempo di calcolo della soluzione, invece, ha una variazione significativa al variare della capacità dei veicoli.

Come mostrato nel caso reale e riassunto nella Fig.6, il variare la capacità del veicolo più capiente, da 9000 kg a 1500 kg, comporta una variazione nel numero di veicoli con conseguente aumento del costo.

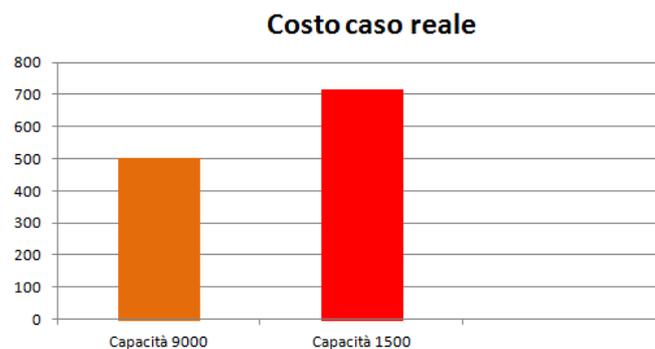


Fig.6

Questo dimostra che il modello risulta essere sensibile alla variazione della capacità di un veicolo, solamente quando questa comporta una variazione nel numero di veicoli utilizzati.

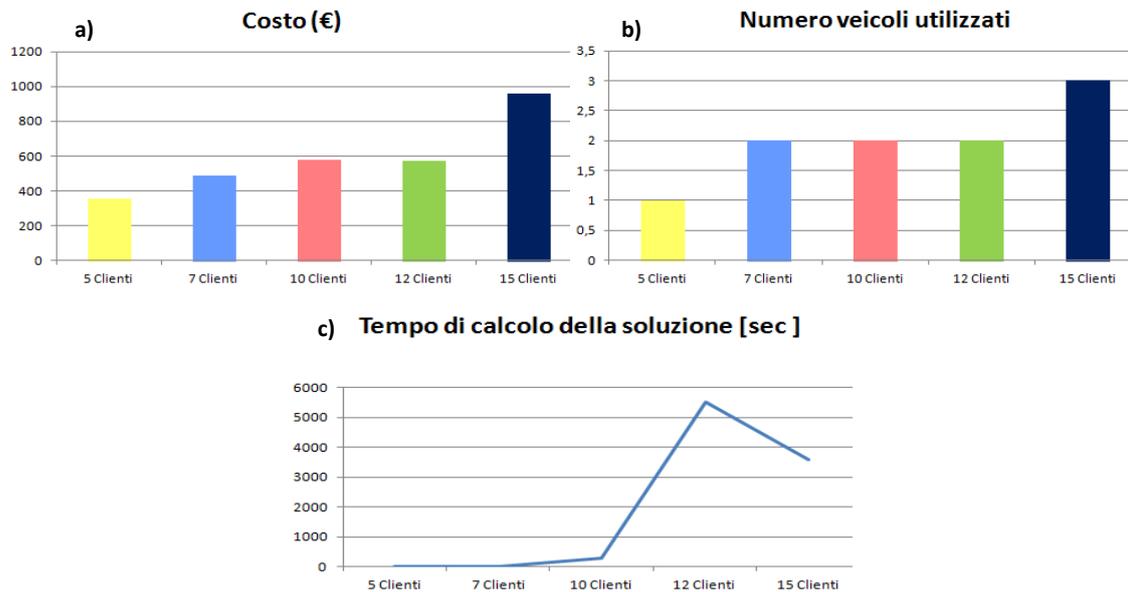


Fig.7: a)costo, b)numero veicoli utilizzati , c)tempo di calcolo della soluzione al variare del numero di clienti

Dalla Fig.7 risulta evidente come al variare del numero di clienti si ha un aumento del costo, ovvia conseguenza dell'aumento della distanza percorsa. La complessità del problema è sottolineata dal fatto che un piccolo aumento nel numero di clienti (da 10 a 12) comporti un aumento considerevole del tempo di calcolo della soluzione, poiché il problema è NP-hard.

Infine, il modello proposto è stato confrontato con una strategia di assegnazione dei veicoli ai clienti basata sulla saturazione volumetrica.

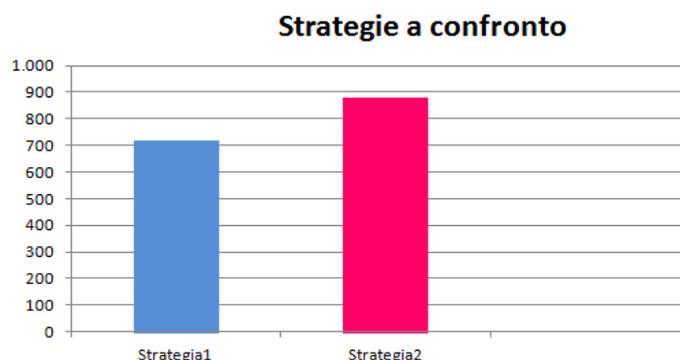


Fig.8

Come mostrato nella Fig.8, la *strategia1* rappresentante la soluzione calcolata dal modello proposto in questa tesi è migliorativa rispetto alla *strategia2*, tipico approccio utilizzato nella pianificazione giornaliera delle consegne, in quanto la soluzione ottima ottenuta presenta un evidente risparmio sui costi.

Sviluppi futuri prevedono lo studio e lo sviluppo di approcci risolutivi più efficienti, che permettano di ottenere buone soluzioni in tempi ragionevoli, soprattutto all'aumentare del valore di alcuni dati di input.

Bibliografia

- [1] Braekers, K., Ramaekers, K., & Van Nieuwenhuyse, I. (2016). The vehicle routing problem: State of the art classification and review. *Computers & Industrial Engineering*, 99, 300-313.
- [2] El-Sherbeny, N. A. (2010). Vehicle routing with time windows: An overview of exact, heuristic and metaheuristic methods. *Journal of King Saud University-Science*, 22(3), 123-131.
- [3] Desaulniers, G., Lavigne, J., & Soumis, F. (1998). Multi-depot vehicle scheduling problems with time windows and waiting costs. *European Journal of Operational Research*, 111(3), 479-494.
- [4] Bräysy, O., & Gendreau, M. (2005). Vehicle routing problem with time windows, Part I: Route construction and local search algorithms. *Transportation science*, 39(1), 104-118.
- [5] Kallehauge, B., Larsen, J., Madsen, O. B., & Solomon, M. M. (2005). Vehicle routing problem with time windows. In *Column generation* (pp. 67-98). Springer, Boston, MA.)
- [6] Elshaer, R., & Awad, H. (2020). A taxonomic review of metaheuristic algorithms for solving the vehicle routing problem and its variants. *Computers & Industrial Engineering*, 140, 106242.
- [7] Toth, P., & Vigo, D. (Eds.). (2002). *The vehicle routing problem*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [8] Gutierrez, A., Dieulle, L., Labadie, N., & Velasco, N. (2018). A Hybrid metaheuristic algorithm for the vehicle routing problem with stochastic demands. *Computers & Operations Research*, 99, 135-147.
- [9] Mosheiov, G. (1998). Vehicle routing with pick-up and delivery: tour-partitioning heuristics. *Computers & Industrial Engineering*, 34(3), 669-684.
- [10] Laporte, G., Nobert, Y., & Taillefer, S. (1987). A branch-and-bound algorithm for the asymmetrical distance-constrained vehicle routing problem. *Mathematical Modelling*, 9(12), 857-868.
- [11] Hadjar, A., & Soumis, F. (2009). Dynamic window reduction for the multiple depot vehicle scheduling problem with time windows. *Computers & Operations Research*, 36(7), 2160-2172.

[12] Li, C. L., Simchi-Levi, D., & Desrochers, M. (1992). On the distance constrained vehicle routing problem. *Operations research*, 40(4), 790-799.