UNIVERSITA' POLITECNICA DELLE MARCHE

FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea triennale in Ingegneria Gestionale

Ottimizzazione della distribuzione dei dispositivi di protezione individuali ai comitati locali della Croce Rossa Italiana sul territorio marchigiano

Optimization of the distribution of personal protective equipment to local committees of the Italian Red Cross in the Marche region.

Relatore:

Prof.ssa Ornella Pisacane

Tesi di Laurea di:

Bruno Coriani

mat. 1090379

Correlatore:

Dott. Giovanni Ceccaroni

A.A. 2020/2021

A mia madre, àncora della mia vita

Ringraziamenti

Desidero ringraziare innanzitutto il relatore di questa tesi, la professoressa Ornella Pisacane per l'immensa disponibilità e dedizione dimostrate durante tutto il lavoro svolto insieme.

Ringrazio poi la mia famiglia, mio padre per la sua gioia ad ogni esame superato, mamma per le sue parole di conforto nei momenti peggiori e mia sorella per avermi supportato e per aver trovato questo percorso universitario che altrimenti non avrei mai conosciuto.

Un grazie sincero ai miei fedeli compagni di università: Ali con cui ho condiviso ogni progetto e con cui ho percorso fianco a fianco lo sprint verso questo traguardo così importante e soprattutto Eddi, l'amico che in questi tre anni c'è sempre stato quando il mondo sembrava crollarmi addosso.

Ringrazio Alberto e Michelangelo, punti fermi della mia vita e grazie ai quali sono diventato la persona che sono.

Ringrazio Simone, il mio maestro che nonostante la distanza mi ha sempre capito e spronato quando ero il primo a non credere nelle mie capacità.

Non posso che ringraziare anche la mia professoressa di matematica del liceo, Alessandra Soprani, senza la quale non mi sarei mai riappassionato alla matematica: la sua genuinità mi ha fatto fidare di lei e la sua severità mi ha trasmesso il senso del sacrificio.

Infine, un grazie speciale va anche a mio cugino Lorenzo e alla mia compagnia di amici, che sono riusciti ogni weekend a farmi dimenticare tutta la fatica fatta durante la settimana: senza la vostra serenità non sarei mai riuscito ad arrivare fino in fondo.

ABSTRACT

L'emergenza sanitaria in cui tutto il mondo si è trovato durante la pandemia, dovuta al virus SARS-CoV-2, ha evidenziato le conseguenze sulla società intera di non avere un piano organizzativo adeguato alla distribuzione di dispositivi di protezione individuale per la sicurezza del personale sanitario.

Uno studio dei sistemi logistici di tutte le attività che operano nel mondo della sanità ha quindi marcato la necessità di offrire un servizio efficiente e avere gli strumenti per poter gestire eventuali situazioni impreviste future.

A tal proposito, il mio progetto di tesi ha come obiettivo la formulazione ed implementazione di modelli matematici che possano essere di supporto all'organizzazione della distribuzione dei dispositivi di protezione individuale, o DPI, da parte della Croce Rossa Italiana sul territorio marchigiano.

Inizialmente, si è focalizzata l'attenzione sulla classe di problemi che, nell'ambito della Ricerca Operativa, è nota come *Vehicle Routing Problem*, o VRP, con riferimento anche alle diverse varianti.

In un secondo momento, si è approfondita l'organizzazione attuale della CRI Marche e la mappatura dei comitati sul territorio regionale.

Successivamente, sotto la definizione di alcune ipotesi semplificative del caso reale, sono stati formulati due modelli matematici che tengano conto di diversi aspetti del problema, come la capacità di ciascun veicolo e le finestre temporali in cui gli operatori della CRI sono disponibili ad erogare il servizio di distribuzione.

Questi modelli sono poi stati implementati mediante il linguaggio di modellazione algebrica AMPL. Al fine di validare la correttezza dei modelli formulati, sono stati anche costruiti dei casi di studio "giocattolo". Il lavoro di tesi si è concluso con una discussione approfondita dei risultati ottenuti sul caso fornito dalla Croce Rossa Marche.

CAPITOLO 1

1.1 INTRODUZIONE

L'oggetto della mia tesi si focalizza sull'organizzazione della distribuzione dei DPI, acronimo con cui vengono identificati tutti quei Dispositivi di Protezione Individuale, utilizzati in diversi settori ma in particolare in ambito lavorativo, che hanno lo scopo di eliminare o perlomeno minimizzare qualsiasi tipo di rischio in cui un operatore possa incorrere.

Nell'ultimo anno, alcune tipologie di DPI come guanti, mascherine chirurgiche o camici hanno visto crescere esponenzialmente la loro richiesta a causa della diffusione del virus SARS-CoV-2. Essa è una sindrome respiratoria acuta che sviluppa forme gravi di malattia principalmente nelle persone di età superiore ai 60 anni e in quelle con patologie preesistenti.

Una delle problematiche principali di questo virus riguarda la facilità con cui esso si trasmette. Infatti, le modalità di trasmissione sono diverse, come il contatto stretto con un malato che parlando, starnutendo o tossendo rilascia secrezioni infettive dalla bocca o dal naso, o come il toccarsi occhi e bocca dopo il contatto con delle superfici su cui delle persone malate, attraverso i comportamenti appena descritti, potrebbero aver rilasciato secrezioni infette.

1.2 MOTIVAZIONI

Per poter limitare il contagio, oltre a misure come il lavaggio frequente delle mani e il distanziamento sociale, in ambito lavorativo è stato reso obbligatorio l'utilizzo di diverse tipologie di DPI, soprattutto nel campo sanitario dove il contatto con gli infetti è quotidiano e in cui le misure di protezione devono essere ancor più efficaci. A tal proposito organizzazioni come la Croce Rossa hanno dovuto far fronte ad una situazione di emergenza sia nell'approvvigionamento che nella distribuzione di un

quantitativo ingente di DPI, destinato a tutti gli operatori e i volontari, a cui non erano abituati.

Focalizzando l'attenzione sulla seconda problematica, la logistica distributiva è diventata uno strumento strategico per migliorare la propria competitività in ambito aziendale. Uno studio mirato sull'organizzazione della distribuzione di un'azienda permette sia il miglioramento del livello di servizio sia l'abbassamento dei costi di distribuzione che, in un'ottica di ottimizzazione, risulta un obiettivo importante.

Nonostante non sia tra gli obiettivi della CRI l'aumento della loro competitività, tuttavia un miglioramento organizzativo in tale ambito permetterebbe di gestire le situazioni di emergenza sanitaria con meno difficoltà.

In particolare, l'organizzazione attuale della CRI Marche prevede che il quantitativo totale di DPI per tutti i comitati marchigiani arrivi alla sede regionale di Ancona e che, per la distribuzione, non ci sia un vero e proprio criterio da seguire.

1.3 OBIETTIVI

Il principale obiettivo da raggiungere con questo lavoro consiste nella formulazione di modelli matematici che riescano a trovare un'alternativa all'organizzazione attuale, garantendo una soluzione che organizzi le tratte compiute dai veicoli in fase di distribuzione con lo scopo di ottimizzare i costi di trasporto. Inoltre, questi modelli permettono di rispettare l'orario di servizio degli autisti che, in quanto volontari, hanno una disponibilità oraria ridotta. Infine, in un'ottica di eco-sostenibilità, l'ottimizzazione delle rotte percorse permette un consumo di carburante minore e quindi un minore impatto sull'ambiente.

I modelli matematici che sono stati formulati non sono limitati all'organizzazione della distribuzione di DPI in questa particolare situazione di emergenza. Infatti, il punto di forza di questi modelli è che sono prettamente teorici e possono essere riutilizzabili

in futuro dalla Croce Rossa in circostanze diverse da quella attuale semplicemente modificando i dati numerici del problema.

In un'ottica di semplificazione dell'attività di tesi, si è lavorato sull'ipotesi che sia la sede regionale a distribuire i DPI alle varie sedi dislocate nel territorio regionale. In questo senso, la visione del problema proporrebbe la minimizzazione dei costi di trasporto facendo partire dalla sede regionale il numero di veicoli minimo tale per cui si riesca a consegnare il quantitativo di DPI che spetta a ciascuna sede locale.

1.4 STRUTTURA DELLA TESI

Per la spiegazione dettagliata del problema affrontato, nel secondo capitolo si trova una spiegazione degli elementi teorici base dei problemi di VRP e, in particolare, delle caratteristiche di una delle varianti di questo problema, il *Capacitated Vehicle Routing Problem*, o CVRP, che sarà quella di interesse. In questa variante, oltre alle caratteristiche principali dei problemi di VRP, si prende anche in considerazione la capacità dei veicoli utilizzati per il trasporto in modo tale da organizzare le tratte di ciascun mezzo facendo sì che non vengano sovraccaricati in base alla loro disponibilità.

Nel terzo capitolo vengono presentati i diversi modelli matematici che sono stati utilizzati, andando a comprendere nel dettaglio il significato delle variabili e dei parametri in gioco. Successivamente verranno spiegati la funzione obiettivo e i vincoli che li caratterizzano.

Nel quarto capitolo si descrive la sperimentazione che è stata fatta sui modelli matematici descritti in precedenza, questi ultimi implementati mediante il linguaggio di modellazione algebrica AMPL (https://ampl.com/). In particolare, in questa sezione si trovano la descrizione di istanze giocattolo utilizzate per validare i modelli matematici e, soprattutto, di quella del problema reale.

L’ultimo capitolo riassume i risultati ottenuti dalle sperimentazioni; infine, vengono proposte delle idee su come questo problema possa essere trattato in futuro cercando di eliminare alcune ipotesi semplificative che sono state supposte.

CAPITOLO 2

2.1 INTRODUZIONE

In questo capitolo viene affrontata una disamina teorica sull'importanza della logistica emergenziale per poi approfondire la classe di problemi del VRP, partendo dalle caratteristiche base che accomunano le diverse varianti di questo problema per poi concentrarsi sulla variante del CVRP affrontata in questo progetto di tesi.

2.1.1 LA LOGISTICA EMERGENZIALE

Come riportato da [1] i modelli di ottimizzazione sono diventati uno strumento fondamentale per gestire la logistica emergenziale. Appartengono a questo ambito tutti quei processi di pianificazione e controllo del flusso di risorse per fornire assistenza alle persone durante una situazione di emergenza.

Le principali problematiche che devono essere affrontate in questo tipo di situazione da un punto di vista logistico sono: problemi di comunicazione e coordinamento, una domanda affetta da maggiore incertezza dovuta a una situazione in continua evoluzione, la consegna più efficiente e tempestiva della merce e, soprattutto, la limitatezza delle risorse in termini di approvigionamento.

Queste situazioni sono state affrontate anche nella pandemia dovuta al COVID-19 che si sta affrontando. Inoltre, il disastro epidemico dovuto al COVID-19 ha anche causato l'aumento della produzione di DPI del 40% e degli sprechi in campo sanitario di più del 25%. Come riportato da [2] , si stima per di più che la produzione di DPI aumenterà annualmente del 20% nel prossimo quinquennio. Quindi, la questione sull'impatto ambientale legata all'epidemia da COVID-19 è un tema che non va sottovalutato ed è per questo che i modelli di ottimizzazione matematica possono permettere di ridurre gli sprechi sia in termini di DPI che in termini di riduzione di emissioni di CO_2 da parte dei veicoli che si occupano della loro distribuzione.

Infatti, nell'ultimo anno la gestione degli sprechi in campo sanitario è diventato un tema molto sensibile e l'interesse verso i modelli di ottimizzazione in questo campo è cresciuta di pari passo.

2.1.2 PROBLEMI DI VRP

Per poter fornire una soluzione a queste problematiche, è necessario approfondire il mondo dei problemi di VRP. Essi nascono con l'obiettivo di progettare delle rotte ottime che devono essere compiute da una flotta di veicoli per poter servire un insieme di clienti, ciascuno con una determinata domanda da soddisfare. Le rotte da compiere devono rispettare dei vincoli ed hanno come obiettivo la minimizzazione dei costi totali di trasporto.

Tra le specifiche da dover considerare, nei VRP tutti i veicoli devono partire dalla stessa posizione denominata deposito e, una volta consegnata la merce richiesta dai clienti, ritornare al deposito. Inoltre, ciascun cliente deve essere servito soltanto da un veicolo.

In questo tipo di problemi il deposito può essere singolo o potrebbero essercene molteplici e a ciascuno di essi è associato un numero di veicoli. La flotta di veicoli può essere omogenea o eterogenea sia in termini di costi di trasporto che in termini di capacità. In base alle esigenze dell'azienda, potrebbe essere anche imposto ai veicoli un tempo di rientro entro cui ciascuno di essi debba ritornare al deposito.

2.1.3 VARIANTI DEL VRP

In letteratura sono state quindi formalizzate diverse varianti dei problemi di VRP che prendono in considerazione molteplici aspetti di questo problema e ciascuna di esse impone vincoli restrittivi diversi:

- il Vehicle Routing Problem with Time Windows: o VRPTW, in cui ciascun veicolo ha un tempo di rientro prefissato da rispettare e ciascun cliente ha una finestra temporale entro cui pretende di essere servito. In questa variante deve essere quindi introdotta una variabile che per ciascun veicolo tenga conto del tempo totale di utilizzo del veicolo, comprensivo di tempo di viaggio da un nodo all'altro e tempo di servizio in ciascun nodo;
- il Multi Depot Vehicle Routing Problem: o MDVRP, in cui è presente più di un deposito da cui partono i veicoli;
- lo Split Delivery Vehicle Routing Problem: o SDVRP, in cui si permette ai veicoli di poter servire i clienti più di una volta. Questo permette di poter suddividere la domanda di un cliente su due veicoli diversi, così da poter sfruttare totalmente la capacità di ciascun veicolo;
- Vehicle Routing Problem with Backhauls: o VRPB, in cui l'insieme dei clienti è composto da due gruppi, uno a cui deve essere fornita della merce e l'altro a cui deve essere ritirata;
- Asymmetric Distance-Constrained Vehicle Routing Problem: o ADVRP, in cui viene imposta una distanza massima da percorrere a ciascuno dei veicoli;
- Inventory Routing Problem: o IRP, in cui oltre a voler minimizzare i costi di trasporto della flotta di veicoli si focalizza l'attenzione anche sulla minimizzazione dei costi di magazzino;

La variante che in questo progetto di tesi è stata approfondita è il CVRP, nella quale si prende in considerazione il fatto che ciascun veicolo ha una capacità limitata da dover

rispettare. Ciò ha un impatto importante sulla determinazione delle rotte ottime: infatti impone che il quantitativo totale di merce richiesta dai clienti che ciascun veicolo può trasportare debba essere minore o uguale alla capacità di ciascun veicolo. Quindi, nel caso in cui un determinato numero di veicoli non sia in grado di soddisfare la domanda di tutti i clienti, è necessaria l'introduzione di un veicolo aggiuntivo nella flotta da utilizzare.

2.1.4 CENNI TEORICI

I problemi di VRP vengono descritti attraverso l'utilizzo di un grafo, una struttura formata da un insieme di punti detti nodi o vertici e da collegamenti tra essi detti archi. I nodi del grafo sono il deposito da cui partono i veicoli e i clienti da servire mentre gli archi rappresentano i tragitti svolti dai veicoli. Il grafo che si prende in considerazione in questo progetto di tesi è:

- Pesato sugli archi: ad ogni arco è associato un peso, che nel nostro caso fa riferimento al costo del viaggio da un nodo all'altro;
- Pesato sui nodi: ad ogni nodo è associato un peso, che nel nostro caso fa riferimento alla domanda di ciascun cliente;

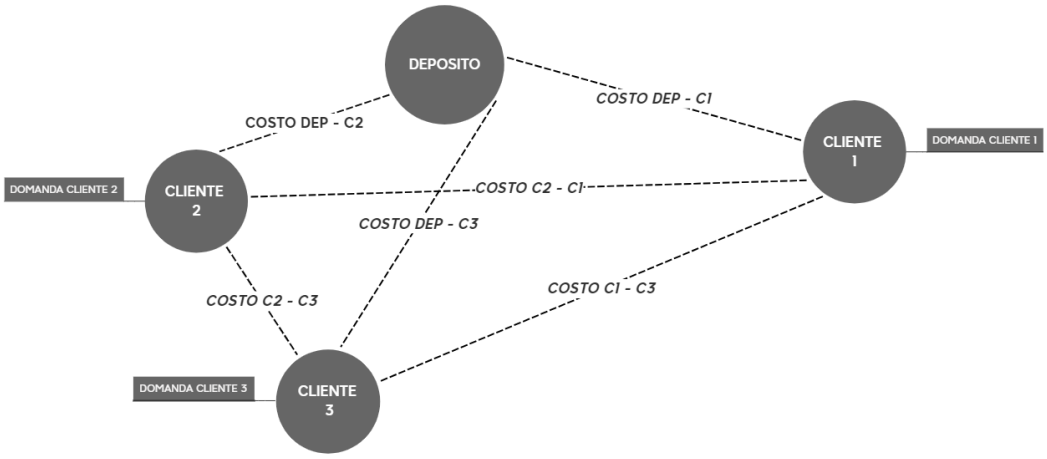

Figura 2.1: *Grafo Pesato*

2.2 STATO DELL'ARTE

In questa sezione si approfondisce come è nato l'interesse nei confronti dei problemi di VRP e, in particolare, lo studio che negli anni è stato fatto riguardante i problemi di CVRP.

Per la risoluzione di questo tipo di problemi, le tecniche che vengono utilizzate si suddividono principalmente in metodi che permettono l'individuazione della soluzione esatta e tecniche euristiche che, invece, consentono di trovare una soluzione approssimata in tempi più rapidi.

2.2.1 METODI ESATTI

Lo studio dei problemi di VRP affonda le sue radici più di 60 anni fa, nel 1959, quando G. Dantzig and J. Ramser in [3] promossero le prime formulazioni matematiche e i primi algoritmi per la risoluzione del problema della consegna del gasolio ai distributori di benzina.

Il grande interesse per questo tipo di problemi nasce principalmente per la sua importanza da un punto di vista pratico ma anche per la sua complessità. Infatti, essi vengono considerati problemi NP-hard, dove per NP si intende "polinomiale nel calcolo non deterministico".

I problemi di VRP rappresentano una generalizzazione, come riportano Laporte e Nobert in [4], del problema del "Travelling Salesman Problem", o TSP, che consiste nella determinazione del tragitto più corto per servire un gruppo di clienti una volta ciascuno. In generale, i problemi di VRP sono molto più difficili da risolvere rispetto ai problemi di TSP della stessa dimensione.

La variante del CVRP è stata una delle prime varianti studiata in quanto, in questo genere di problemi, risulta poco realistico non considerare la capacità dei veicoli con cui svolgere la distribuzione. Il problema più complesso che è stato risolto attraverso

algoritmi esatti fa riferimento a una platea di 50 clienti, mentre per dei casi più complessi di questo sono necessari i metodi euristici e meta euristici.

La variante del CVRP è un'estensione del famoso problema del Traveling Salesman Problem, in cui la differenza sostanziale è che viene utilizzato soltanto un veicolo per poter attuare la distribuzione.

Nel 1981 Fisher e Jaikumar in [5] hanno utilizzato la programmazione matematica per risolvere esattamente i problemi di CVRP, ma il tempo di calcolo della soluzione cresceva esponenzialmente all'aumentare dei dati in gioco.

Fino alla fine dell'ultimo decennio, come riportano Toth e Vigo in [6], i metodi principali utilizzati per la risoluzione di questa classe di problemi consistevano in algoritmi di "branch and bound", tecnica per la risoluzione di problemi di ottimizzazione combinatoria che consiste nella prova di tutte le soluzioni possibili fino a trovare la soluzione ottima.

Recentemente sono stati proposti metodi più sofisticati, come quelli basati sulle relazioni Lagrangiane, che permettono di incrementare le dimensioni del problema da poter risolvere attraverso una soluzione ottima esatta.

Anche all'interno della classe di problemi di CVRP va fatta una distinzione tra problemi di CVRP simmetrici e asimmetrici.

Per quanto riguarda i primi, anche denominati SCVRP, si fa riferimento ad un problema in cui la distanza tra un nodo e l'altro è uguale in entrambe le direzioni in cui l'arco che li collega venga percorso. Ciò comporta che la matrice dei costi di trasporto sia simmetrica.

I problemi di CVRP asimmetrici, o ACVRP, considerano il fatto che le distanze da percorrere tra un nodo e l'altro possano essere diverse in base alla direzione in cui l'arco si percorre, dovuto principalmente all'utilizzo di strade a senso unico che variano quindi il percorso da svolgere nel senso opposto.

Nonostante i primi possano essere considerati un caso particolare dei secondi, viene fatta questa distinzione in quanto i problemi di ACVRP risultano meno oggetto di studio dal momento che i metodi esatti non riescono ad ottenere risultati soddisfacenti per questo genere di istanze.

2.2.2 METODI EURISTICI E META-EURISTICI

I problemi di VRP che fanno riferimento a situazioni reali spesso sono costituiti da una quantità elevata di dati da tener conto; ciò rende impossibile l'utilizzo dei metodi esatti dal momento che ricercare la soluzione valutando tutte le possibili alternative comporta un tempo di computazione troppo elevato.

È per questo che sin dagli anni '60 è stato affiancato all'utilizzo di metodi esatti quello dei metodi euristici che svolgono una ricerca della soluzione in uno spazio limitato garantendo una soluzione ammissibile in un tempo di computazione meno elevato rispetto ai metodi esatti.

Infatti, nel 1964 Clarke and Wright hanno proposto in [7] l'utilizzo del primo approccio euristico per la risoluzione dei problemi di CVRP e da quel momento in poi sono nati moltissimi modelli e algoritmi per l'ottimizzazione delle varianti dei problemi di VRP.

Dieci anni più tardi, Gillett e Miller hanno provato ad usare un algoritmo di scansione per poter risolvere i problemi di CVRP, ma la soluzione fornita dall'algoritmo risultava instabile.

Fisher and Jaikumar nel 1981 in [8] proposero il metodo dei due step: nella fase iniziale avviene una clusterizzazione dei clienti in gruppi mentre nella seconda c'è la costruzione della rotta che per ciascun veicolo minimizzi i costi di trasporto.

A volte alcuni metodi svolgono la fase di costruzione delle rotte prima e poi applicano le tecniche di clustering, come quelli di Beasley del 1983 e di Haimovich e Kan del 1985.

Tuttavia, l'aspetto negativo di questi metodi è che la soluzione ammissibile che i metodi euristici classici trovano potrebbe essere molto lontana dalla soluzione ottima.

Per questo, come Laporte e Semet suggeriscono nel capitolo 5 "Classical Heuristics for the Capacitated VRP" presente in [9], nell'ultimo decennio è cresciuto l'interesse verso i metodi meta-euristici.

Questi metodi possono essere visti come procedure sofisticate di calcolo della soluzione che superano i metodi euristici trovando delle soluzioni di una qualità molto superiore, molto vicine alla soluzione ottima, pagando però un tempo di computazione più alto.

La differenza principalmente risiede nel fatto che i metodi meta-euristici per esplorare lo spazio delle soluzioni utilizzano mezzi come il Variable Neighborhood Search Method, o VNS, che permette di ricercare la soluzione senza necessariamente migliorare il valore di funzione obiettivo, come affermano Altinel e Öncan nell'articolo [10].

Recentemente alcuni ricercatori hanno riscontrato che l'utilizzo della ricerca locale per problemi di ottimizzazione potrebbe essere utile per garantire una soluzione di qualità migliore. Infatti, come riportato da Lin, Zne-Jung Lee, Ying e Chou-Yuan Lee in [11] il metodo della ricerca locale parte con una soluzione iniziale e ricerca soluzioni migliori solo nello spazio vicino alla soluzione iniziale.

Tuttavia, questo metodo potrebbe prendere come ottimo globale una soluzione che è ottima soltanto per una piccola area del campo delle possibili soluzioni.

I diversi metodi meta-euristici per i problemi di VRP vengono suddivisi in 6 famiglie:

- Simulated Annealing: o SA, sono dei metodi utilizzati per trovare un minimo globale quando si è in è presenza di più minimi locali e il più famoso è l'algoritmo di Osman

- Deterministic Annealing: o DA, sono dei metodi utilizzati per evitare i minimi locali. I primi a proporre un DA furono Rose, Gurewitz e Fox in [12]. Si differenziano dai precedenti metodi poiché le mosse che possono essere effettuate vengono validate o scartate in base a regole deterministiche
- Tabu Search: o TS, rappresenta l'evoluzione del metodo dello "steepest descent" e viene utilizzato per scovare il minimo di una funzione attraverso una serie di passaggi che ricavano un intorno entro cui la soluzione dovrebbe trovarsi
- Genetic Algorithms: o GA, sono degli algoritmi che operano a step e che dividono la quantità di dati in gruppi e a ciascuno step valutano i gruppi mantenendo le soluzioni migliori e scartando le peggiori. Il nome di questa tecnica deriva dalla somiglianza con i processi tipici dell'evoluzione naturale.
- Ant Systems: o AS, è un approccio costruttivo in cui le nuove soluzioni vengono create a ciascuna iterazione utilizzando informazioni utili provenienti dalle iterazioni precedenti.
- Neural Networks: o NN, sono modelli computazionali che si ispirano alla semplificazione di una rete neurale biologica.

Nel 1991 Alfa, Heragu e Chen in [13] testarono un metodo che consisteva nella formulazione della rotta, nella successiva clusterizzazione per trovare la soluzione iniziale e poi nell'utilizzo del SA per svolgere la neighborhood search.

Successivamente, come riportato in [14] Gendreau, Hertz e Laporte nel 1994 applicarono la Taburoute che permetteva di evitare di rimanere fermo negli ottimi locali e trovare soluzioni migliori. Questo algoritmo considera una sequenza di soluzioni adiacenti ottenute attraverso la rimozione di un vertice dalla rotta a cui appartiene e l'inserimento in un altro tragitto.

Una particolarità di questo metodo è che nella ricerca della soluzione ottima potrebbero essere ignorati i vincoli capacitivi dei veicoli; le soluzioni trovate potrebbero essere quindi non ammissibili.

Tuttavia, all'interno della funzione obiettivo vengono inseriti dei fattori penalizzanti per degli eccessi di capacità. Paradossalmente, il fatto che il modello prenda in considerazione soluzioni anche soluzioni non ammissibili fa sì che la probabilità che la soluzione ottima si incagli in un ottimo locale sia inferiore.

Nel 2003 Baker e Ayechew in [15] hanno provato l'utilizzo del GA sui problemi di VRP, cercando la prima soluzione ottima in maniera random e poi sostituendola attraverso il confronto fra le migliori soluzioni trovate successivamente.

Uno tra gli algoritmi meta-euristici proposti della classe degli AS è stato quello di Silvia Mazzeo e Irene Loiseau in [16], in cui spiegano che il nome di questa famiglia di metodi deriva dal fatto che questi metodi si comportano in maniera simile alle formiche nella ricerca del cibo durante la quale rilasciano una sostanza chiamata feromone nelle strade più promettenti.

Allo stesso modo questi algoritmi creano contemporaneamente delle soluzioni che si scambiano informazioni tra loro durante la procedura della ricerca ottima.

La ricerca che è stata svolta su modelli matematici e algoritmi euristici e meta-euristici svolta finora nel campo dei CVRP dimostra che ci sono i mezzi adatti per risolvere istanze con un grado di complessità soddisfacente.

Per quanto riguarda questa classe di problemi, è ormai evidente che gli studi futuri si concentreranno esclusivamente sui metodi meta-euristici, tecniche che permettono il miglior compromesso in termini di efficacia ed efficienza.

All'interno di questa famiglia, la ricerca sugli approcci di SA e DA è stata oggetto di maggiore approfondimento e sembra non poter promettere grandi miglioramenti futuri.

I metodi che attualmente invece sembrano essere i più competitivi sono quelli basati sulla Tabu Search, in cui i tempi computazionali risultano accettabili anche per istanze difficili.

Concludendo, le tecniche che al momento non sono state ancora molto approfondite sono quelle delle reti neurali che insieme alle AS potrebbero mostrare ottimi miglioramenti in futuro.

CAPITOLO 3

In questa sezione del progetto di tesi, si approfondiscono i due modelli matematici che sono stati formulati per il problema di CVRP in questione.

In primo luogo, verranno presentate le ipotesi fatte al fine di semplificare la situazione reale. Di seguito, si presenterà la notazione adottata per gli insiemi, le variabili ed i parametri del problema utilizzati nei modelli.

3.1 ASSUNZIONI SEMPLIFICATIVE

Per la formulazione del modello matematico sono state supposte alcune ipotesi che è necessario citare al fine di evitare ambiguità nella comprensione del progetto svolto. Esse, infatti, hanno un ruolo fondamentale nel semplificare il caso reale che altrimenti risulterebbe troppo complesso per essere affrontato con un approccio esatto, quantomeno in tempi di calcolo ragionevoli.

- Il modello è volto a creare una organizzazione delle rotte in cui tutti i veicoli partono dalla sede regionale e servono tutti i comitati locali
- Ogni sede che necessita di essere servita è visitata da un solo veicolo che deve soddisfare l'intera domanda
- La domanda di DPI viene organizzata in scatole
- Il tempo di servizio, cioè il tempo di scarico della merce a ciascuna sede, è stato settato a 1 minuto a scatola
- Come turno di consegna è stata stimata una fascia oraria di 5 ore, indicativamente dalle 15:00 alle 20:00, orario in cui è maggiore la presenza di volontari CRI cui generalmente è affidato anche il servizio di distribuzione merce.

3.2 NOTAZIONE DEL MODELLO

Per la formulazione dei modelli sono stati introdotti due insiemi, nove parametri e due tipi di variabili decisionali di cui, in questa sezione, ne vengono presentati la notazione ed il significato.

Insiemi → raggruppano gli elementi del problema

- K = insieme dei veicoli. È consentita avere anche flotta eterogenea con caratteristiche diverse, quindi, da veicolo a veicolo.
- N = insieme dei comitati da servire + deposito In + deposito Out. La necessità di distinguere tra deposito In e deposito Out è solo dovuto al fatto che il modello deve distinguere il tempo di partenza del veicolo da quello di rientro. Così facendo, si è deciso di clonare il deposito. Pertanto, deposito In e deposito Out di fatto rappresentano il deposito.

Parametri → rappresentano i dati del problema e sono delle quantità invariabili e note a priori

- d_{ij} $\forall$ (i, j) $\in$ N = distanza espressa in chilometri dall'i-esima alla j-esima sede
- m_i $\forall$ (i) $\in$ N = domanda in termini di DPI di ciascuna sede
- q_k $\forall$ (k) $\in$ K = capacità di ciascun veicolo k appartenente alla flotta di distribuzione
- p_i $\forall$ (i) $\in$ N = tempo di servizio, espresso in minuti, per ciascun comitato i, cioè il tempo di scarico della merce a ciascuna sede
- l = tempo massimo di rientro al deposito da dover rispettare in quanto coloro che si occupano della distribuzione sono volontari e non hanno una disponibilità intera della giornata
- t_{ij} $\forall$ (i, j) $\in$ N = tempo di viaggio espresso in minuti per andare da ciascuna sede all'altra. Questi valori sono stati ottenuti moltiplicando il relativo parametro d_{ij} per una velocità media.

- c_{ij} ∀ (i, j) ∈ N = costo di trasporto in euro per andare dall'i-esima sede alla j-esima

Variabili → sono le grandezze che definiscono la soluzione del problema. Si sono definite variabili binarie, che possono quindi assumere soltanto due valori, 1 o 0, a seconda che la condizione sia o meno soddisfatta

- x_{ijk} ∈ {0,1} ∀ i, j ∈ N, ∀ k ∈ K = {1 se (i, j) ∈ N è attraversato dal veicolo k; 0 altrimenti}
- y_k ∈ {0,1} ∀ k ∈ K = {1 se il veicolo k è utilizzato; 0 altrimenti}

3.3 MODELLI MATEMATICI

Entrambi i modelli sono composti da una funzione obiettivo da minimizzare e 8 vincoli, di cui 5 vincoli di viaggio, due vincoli di tempo e un vincolo di capacità.

3.3.1 PRIMO MODELLO MATEMATICO

Funzione obiettivo → si pone come scopo la minimizzazione della distanza totale di viaggio percorsa da tutti i veicoli usati.

$$min \sum_{i=0}^{N} \quad \sum_{j=0}^{N} \quad \sum_{j \neq i, k=1}^{N} d_{ij}\ x_{ijk}$$

Per quanto riguarda il parametro d_{ij} è stato calcolato partendo dalle latitudini e longitudini, reperite su Google Maps di ciascuna sede locale della CRI . Con questi dati la formula di Haversine ha permesso di calcolare la distanza chilometrica tra due sedi, in cui con la lettera φ sono espresse le latitudini mentre con la λ le longitudini:

$$d = 2r \sin^{-1}\left(\sqrt{\sin^2\left(\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{2}\right) + \cos(\Phi_1)\cos(\Phi_2)\sin^2\left(\frac{\lambda_2 - \lambda_1}{2}\right)}\right)$$

Vincoli → condizioni imposte che le soluzioni devono rispettare.

Sono presenti tre gruppi principali di vincoli:

- vincoli di viaggio

- vincoli di tempo
- vincoli di capacità

All'interno dei vincoli di viaggio ci sono diverse tipologie: ad esempio, l'intera domanda di una sede deve essere completamente soddisfatta da un unico mezzo, o anche il fatto che il percorso di ciascun veicolo termini alla sede regionale.

Per quanto riguarda i vincoli di tempo bisogna imporre che il tempo in cui un veicolo arrivi ad un nodo i sia inferiore rispetto al tempo a cui arriva al nodo j successivamente servito e che la durata totale del viaggio di un veicolo rispetti il tempo di rientro imposto.

L'ultima tipologia di vincoli presente nel modello fa sì che la quantità di DPI che ciascun veicolo trasporta debba essere minore o uguale alla capacità dei veicoli stessi.

Vincoli di viaggio

- il numero di archi uscenti dal deposito, che rappresentano il numero di viaggi, deve essere inferiore o al più uguale al numero di veicoli a disposizione

$$\sum_{k=1}^{K} \sum_{j=1}^{N} x_{ijk} \leq K \quad i = 0$$

- ciascun veicolo k utilizzato deve uscire dal deposito

$$\sum_{j=1}^{N} x_{ijk} = y_k \; i = 0, \qquad \forall k \in \{1, \dots, K\}$$

- ciascun veicolo k utilizzato deve entrare nel deposito

$$\sum_{j=1}^{N} x_{jik} = y_k \; i = 0, \;\; \forall k \in \{1, \dots, K\}$$

- ogni comitato non deve essere servito da più di un veicolo. In particolare, se il veicolo k non è usato, il valore della variabile y_k è nullo e ciò significa che il cliente i non potrà essere servito da questo veicolo.

$$\sum_{k=1}^{K} \sum_{i=0, i \neq j}^{N} x_{ijk} = y_k \ \forall \ i \ \in \{1, \dots, N\}$$

- il vincolo di conservazione di flusso impone che se il veicolo k è andato dalla sede i alla sede j allora necessariamente da quest'ultima deve ripartire

$$\sum_{j=0, i \neq j}^{N} x_{ijk} - \sum_{j=0, i \neq j}^{N} x_{jik} = 0 \ \forall k \ \in \{1, \dots, K\}, \forall i \ \in \{ 1, \dots, N\}$$

Vincoli di tempo

- i vincoli di aggiornamento dei tempi garantiscono che il tempo in cui ciascun veicolo arriva ad un nodo non sia minore del tempo di arrivo al nodo che lo precede nella sequenza più il tempo di servizio e che si rispetti il tempo di rientro. In particolare, se il veicolo k va da i a j, la variabile x_{ijk} vale 1 e quindi, il tempo di arrivo a j deve essere almeno uguale al tempo di arrivo ad i, più il tempo di servizio di i più il tempo per andare da i a j. Il fatto di aver inserito due gruppi di vincoli di aggiornamento dei tempi garantisce il soddisfacimento per uguaglianza.

$$t_{jk} \geq t_{ik} + x_{ijk} * \left(t_{ij} + p_i \right) - l * \left(1 - x_{ijk}\right) \ \forall \ k \ \in \{1, \dots, K\}, \ \forall \ i, j \in \{ 1, \dots, N\}$$

$$t_{jk} \leq t_{ik} + x_{ijk} * \left(t_{ij} + p_i \right) + l * \left(1 - x_{ijk}\right) \forall \ k \ \in \{1, \dots, K\}, \forall \ i, j \in \{ 1, \dots, N\}$$

Vincolo di capacità

- la somma di tutte le domande servite da un veicolo k deve essere minore o uguale alla capacità di tale veicolo

$$\sum_{i=1}^{N} m_i \sum_{j=1}^{N} x_{ijk} \leq q_k * y_k \ \forall \ k \in \{1, \dots, K\}$$

3.3.2 SECONDO MODELLO MATEMATICO

Il secondo modello matematico è analogo al modello precedente per quanto riguarda la struttura dei vincoli, mentre differisce da esso nella funzione obiettivo.

Infatti, è volto alla minimizzazione dei costi di trasporto dei tragitti che vengono percorsi dalla flotta dei veicoli.

Funzione obiettivo → rappresenta il costo associato ai tragitti percorsi.

$$min \sum_{i=0}^{N} \quad \sum_{j=0}^{N} \quad \sum_{j \neq i, k=1}^{N} c_{ijk} x_{ijk}$$

Il parametro c_{ijk} è stato calcolato partendo dal fattore di consumo di ciascun veicolo, che viene espresso in litri ogni 100 km. Dopo aver supposto il prezzo della benzina a 1,49 euro al litro, sono stati calcolati quanti km vengono percorsi da ciascun veicolo con 1 litro di benzina. Una volta calcolati tutti i dati necessari, il costo di trasporto per andare dalla sede i alla sede j è stato calcolato come:

$$\frac{distanza\ dalla\ sede\ i\ alla\ sede\ j * costo\ della\ benzina\ al\ litro}{chilometri\ percorsi\ con\ 1\ litro\ di\ benzina}$$

In presenza di flotta eterogenea, il numero di chilometri percorsi con un litro di benzina differirà a seconda del modello di veicolo considerato, demandando quindi a valori di questo parametro che cambiano anche in base al tipo di veicolo.

CAPITOLO 4

In questa sezione, verranno presentate le implementazioni dei modelli descritti nel capitolo precedente usando il linguaggio di modellazione algebrica AMPL. Per validare le formulazioni proposte, sono state dapprima generate alcune istanze “giocattolo” per poi sperimentare con il caso reale.

Infatti, essendo il problema reale difficile da risolvere, inizialmente sono stati formulati alcuni «toy example», esempi giocattolo meno complessi e più immediati del problema di CVRP in questione al fine di validare la correttezza del modello teorico.

Di seguito, verranno poi esposte le processazioni sui dati reali grazie alle quali sono state eliminate alcune ipotesi assunte rendendo il caso di studio verosimile.

Nell’ultima parte del capitolo, infine, si mostreranno i risultati che sono stati ottenuti per entrambi i modelli.

4.1 TOY EXAMPLE 1

Il primo esempio giocattolo che è stato elaborato riguarda il modello matematico che minimizza le distanze percorse dai veicoli.

I dati che sono stati utilizzati prendono in considerazione una situazione molto semplificata rispetto al caso reale.

Infatti, in questa prima istanza, è stato supposto che i nodi del grafo, e quindi le sedi, fossero 5 incluso il deposito da cui i veicoli partono (come in Figura 4.1.1).

Per ogni coppia di sedi è stata assunta anche la distanza che intercorre. La matrice delle distanze è stata assunta asimmetrica, valutando quindi l’ipotesi che, per motivi legati alla viabilità, la distanza tra una coppia di sedi potesse non essere la stessa in entrambi i sensi.

Inoltre, è stata ipotizzata la domanda di DPI (Tabella 4.1.2) per ciascuna sede tale da poter essere coperta dalla capacità totale della flotta dei veicoli, composta da due mezzi omogenei sia in termini di consumi che di capienza, settata a 150.

Per quanto riguarda i parametri relativi ai tempi sono state fatte queste considerazioni:

- l'intervallo di tempo in cui il veicolo attua la distribuzione è dalle 17:00 alle 20:00
- il tempo di servizio è stato settato a 1 minuto a scatolone
- i tempi di viaggio (Tabella 4.1.3) sono stati calcolati facendo il rapporto tra la matrice delle distanze (Tabella 4.1.1) e una velocità media (supposta uniforme) del veicolo. Per quanto riguarda la velocità, è stata supposta una velocità media di 50 km/h, in quanto i veicoli percorrono sia strade urbane che extraurbane.

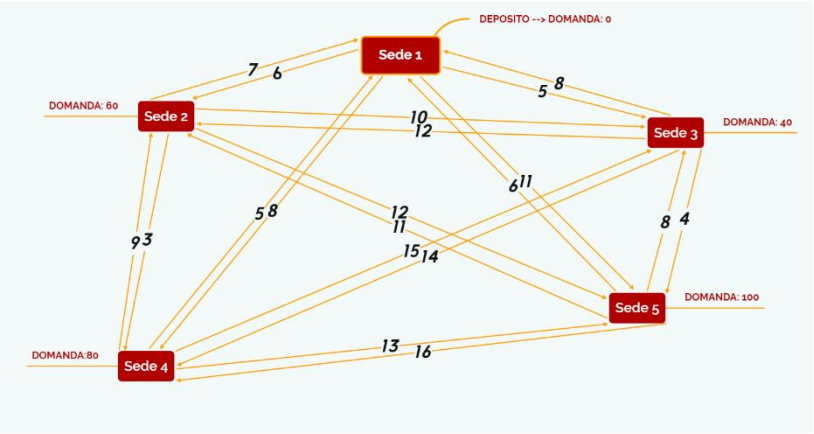

Figura 4.1.1: *Grafo Pesato Toy Example 1*

Tabella 4.1.1: *Distanze in km tra le sedi Toy Example 1*

Distanze tra le sedi					
	Sede 1	Sede 2	Sede 3	Sede 4	Sede 5
Sede 1	0	6	5	8	11
Sede 2	7	0	10	3	12
Sede 3	8	12	0	14	4
Sede 4	5	9	15	0	13
Sede 5	6	11	8	16	0

Tabella 4.1.2: *Domanda delle sedi Toy Example 1*

Domanda Sedi	
	Domanda
Sede 1	0
Sede 2	60
Sede 3	40
Sede 4	80
Sede 5	100

Tabella 4.1.3: *Tabella dei tempi di viaggio in minuti Toy Example 1*

Tempi di Viaggio					
	Sede 1	Sede 2	Sede 3	Sede 4	Sede 5
Sede 1	0	7	6	10	13
Sede 2	8	0	12	4	14
Sede 3	10	14	0	17	5
Sede 4	6	11	18	0	15
Sede 5	7	13	10	19	0

4.1.1 RISULTATI OTTENUTI

AMPL ha fornito la rotta ottima di ciascuno dei due veicoli e ha riportato anche i tempi di arrivo a ciascuna sede che sono evidenziati nella Figura 4.1.1.1; in verde si fa riferimento al tragitto del veicolo 1 mentre in blu a quello del veicolo 2. Infine, il valore di funzione obiettivo ottimo, che rappresenta la distanza percorsa dai veicoli, è di 29 km.

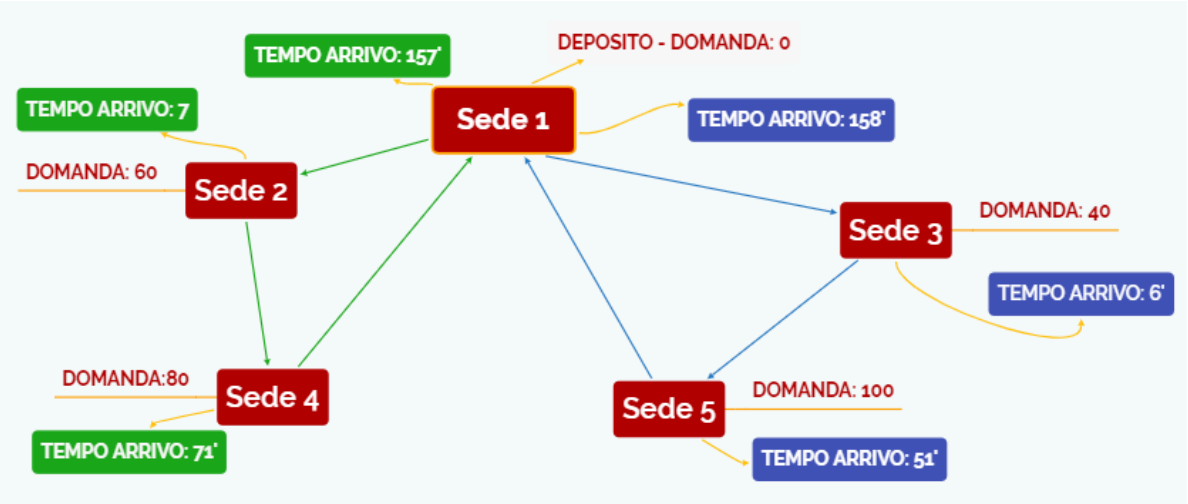

Figura 4.1.1.1: *Rotte veicoli Toy Example 1*

Tabelle 4.1.1.1 e 4.1.1.2: *Tragitti Veicoli 1 e 2 Soluzione Toy Example 1*

Tragitto Veicolo 1	
	Tempo di arrivo
Sede 1	15:00
Sede 3	15:06
Sede 5	15:51
Sede 1	17:38

Tragitto Veicolo 2	
	Tempo di arrivo
Sede 1	15:00
Sede 2	15:07
Sede 4	16:11
Sede 1	17:37

4.2 TOY EXAMPLE 2

Il secondo esempio giocattolo che è stato formulato segue la stessa procedura adottata nel toy example 1 per andare a validare il secondo modello che minimizza i costi di trasporto per la distribuzione dei DPI.

Una delle caratteristiche che lo differenziano dal caso precedente è la supposizione che la flotta di veicoli fosse composta sempre da due componenti omogenei in termini di capacità ma eterogenei in termini di costi di trasporto.

Per questo motivo è stata necessaria la creazione di due matrici di costi differenti che andassero a simulare l'utilizzo di due mezzi con diverso fattore di consumo che, in questa istanza, è stato anch'esso assunto.

Per quanto riguarda la domanda di DPI di ciascuna sede, essa è stata modificata al fine di avere un quantitativo totale di domanda che fosse totalmente servibile da un solo veicolo (Tabella 4.2.3). Ciò è stato fatto al fine di controllare la validità della variabile y che vale 0 nel caso in cui un veicolo non è necessario utilizzarlo.

È stato modificato quindi il vettore dei tempi di servizio che dipende strettamente dalla quantità di DPI da scaricare.

Tabelle 4.2.1 e 4.2.2: *Costi di trasporto veicoli 1 e 2 Toy Example 2*

Costi di trasporto veicolo tipo 1					
	Sede 1	Sede 2	Sede 3	Sede 4	Sede 5
Sede 1	0	6	5	8	11
Sede 2	7	0	10	3	12
Sede 3	8	12	0	14	4
Sede 4	5	9	15	0	13
Sede 5	6	11	8	16	0

Costi di trasporto veicolo tipo 2					
	Sede 1	Sede 2	Sede 3	Sede 4	Sede 5
Sede 1	0	9	8	11	14
Sede 2	10	0	13	6	15
Sede 3	11	15	0	17	7
Sede 4	8	12	18	0	16
Sede 5	9	14	11	19	0

Tabella 4.2.3: *Domande delle sedi Toy Example 2*

Domanda Sedi	
	DOMANDA
Sede 1	0
Sede 2	20
Sede 3	40
Sede 4	80
Sede 5	10

4.2.1 RISULTATI OTTENUTI

Una volta lanciati il file.mod e il file.dat su AMPL, si è determinata una soluzione (Figura 4.2.1.1) che fa uso di un solo veicolo per servire tutte le sedi, veicolo con fattore di consumo più basso.

In questo caso, il valore di funzione obiettivo ottimo, che rappresenta i costi totali di trasporto, è pari a 28€.

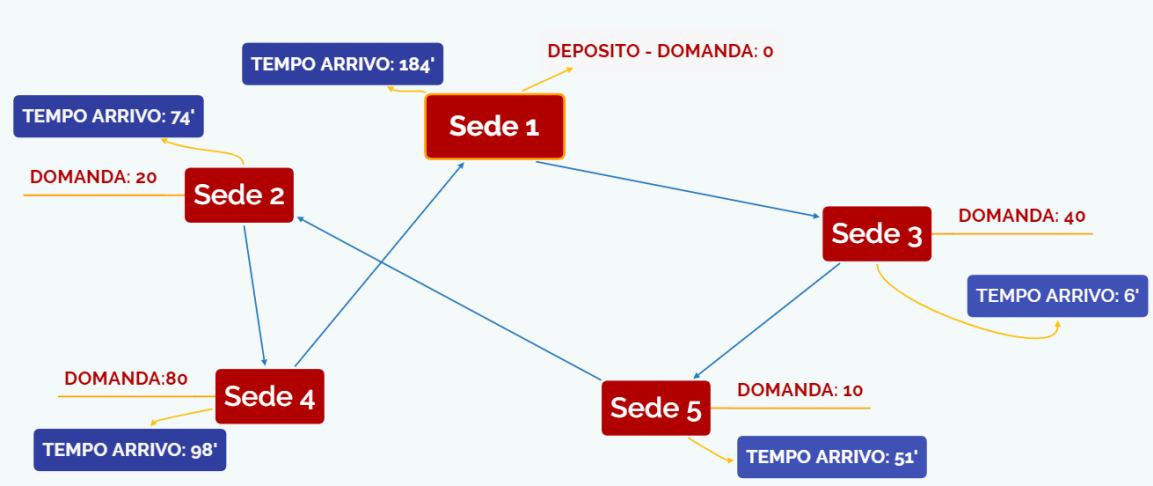

Figura 4.2.1.1: *Rotte veicolo Toy Example 2*

Tabella 4.2.1.2: *Tempi di arrivo veicolo 1 Toy Example 2*

Tragitto Veicolo 1	
	Tempo di arrivo
Sede 1	15:00
Sede 3	15:06
Sede 5	15:51
Sede 2	16:14
Sede 4	16:38
Sede 1	18:04

Su questa istanza è stata svolta un'analisi di sensitività: essa consiste nel valutare gli effetti sui risultati forniti da un modello indotti da modifiche ai parametri di input.

In questo caso, si vuole valutare l'impatto dell'aumento della domanda di una sede sul numero di veicoli usati. Pertanto, è stata aumentata la domanda della sede 5 di 5 scatole di DPI.

AMPL fornisce una soluzione che prevede l'utilizzo di entrambi i veicoli con un prezzo da pagare che sale da 28 € a 38 €.

4.3 CASO MINIMIZZAZIONE DELLE DISTANZE REALI

Dopo aver validato entrambi i modelli matematici attraverso i primi due esempi giocattolo, nella terza istanza si è tornati a far riferimento al problema di partenza cercando di eliminare alcune delle ipotesi assunte negli esempi giocattolo precedenti.

Infatti, il primo passo è stato quello di considerare tutte le 33 sedi locali della CRI Marche e la sede regionale di Ancona. Preliminarmente, è stata necessaria una fase di processamento dei dati che permettesse di calcolare le distanze chilometriche da una sede all'altra.

4.3.1 PROCESSAMENTO DEI DATI

Il primo passo necessario è stata l'individuazione delle sedi della Croce Rossa nel territorio Marchigiano mappandole con GOOGLE MAPS come in Figura 4.3.1.

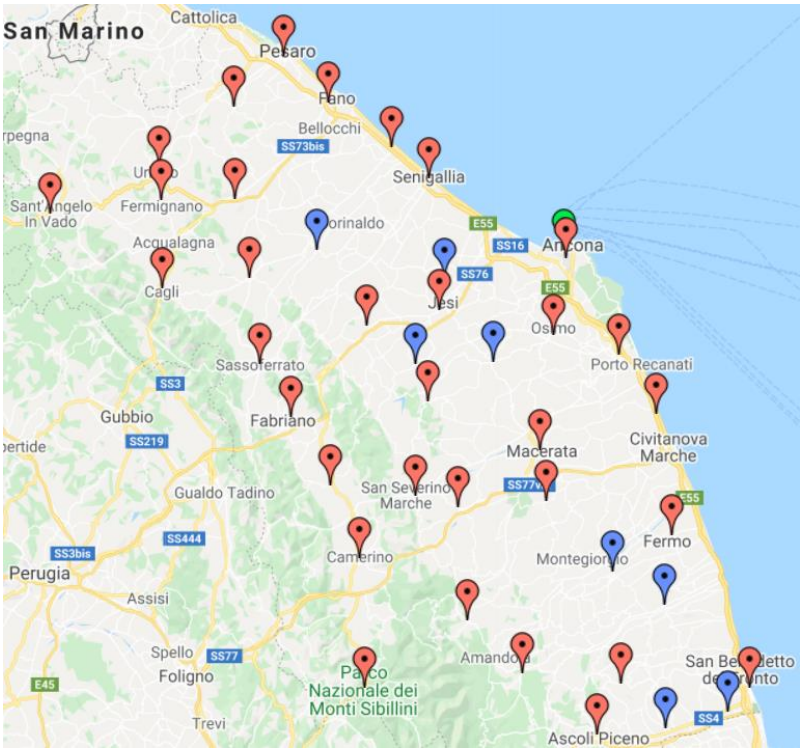

Figura 4.3.1: *Mappatura Sedi CRI Marche*

Nella figura 4.3.1 con il colore verde è indicata la sede regionale che fungerà da deposito nel seguente caso di studio, con il colore rosso le 33 sedi locali mentre con il colore blu le unità distaccate relative alle sedi locali che, in questo progetto, non sono state prese in considerazione. Successivamente, nella tabella 4.3.1 sono stati annotati gli indirizzi delle sedi in modo da poter ricavare le coordinate di ciascuna di essa.

Tabella 4.3.1: *Indirizzi delle sedi CRI Marche*

ANCONA: Via del Commercio, 7, 60127 Ancona,	**ASCOLI PICENO**: Via Berardo Tucci, 3, 63100 Ascoli Piceno
CAGLI: Via Flaminia Sud, 98, 61043 Cagli	**CAMERINO**: Viale Giacomo Leopardi, 35, 62032 Camerino
CASTELPLANIO: Via Giacomo Brodolini, 9, 60031 Piano Amato	**CASTIGNANO**: Borgo Garibaldi 7, 63072 Castignano
CINGOLI: Viale della Carità, 6, 62011 Cingoli	**FABRIANO**: Via Giuseppe di Vittorio, 60044 Fabriano
FANO: Via Carlo Gozzi, 10B, 61032 Fano	**FERMIGNANO**: Via Gaetano Donizetti, 21, 61033 Fermignano
FERMO: Via Lorenzo Perosi, 8, 63900 Fermo	**FOSSOMBRONE**: Via Kennedy, 25, 61034 Fossombrone
JESI: Viale Gallodoro, 84, 60035 Jesi	**LORETO**: Via Don Enzo Rampolla, 1, 60025 Loreto Stazione
MACERATA: Via Fausto Coppi, 14, 62100 Villa Potenza	**MAROTTA MONDOLFO**: Viale Europa, 1, 61037 Mondolfo PU
MATELICA: Via Fratelli Sciamanna, 41, 62024 Matelica	**MONTELABBATE – VALLEFOGLIA**: Via dell'Industria, 2, 61020 Vallefoglia
OSIMO: Via Molino Mensa, 66, 60027 Osimo AN	**PERGOLA**: Piazza Garibaldi, 23a, 61045 Pergola
PESARO: Via Gradara, 2, 61122 Pesaro PU	**PETRIOLO**: Via Regina Margherita, 11, 62014 Petriolo
PORTO POTENZA PICENA: Viale Piemonte, 16, 62018 Porto Potenza	**SAN BENEDETTO DEL TRONTO**: Largo XXIV Maggio, 63076 Centobuchi
SAN SEVERINO MARCHE: Via Giacomo Brodolini, 50, 62027 San Severino Marche	**SANT'ANGELO IN VADO**: Via Isola Fossi, 9, 61048 Sant'Angelo In
SARNANO: Largo Luigi Pierucci, 62028 Sarnano	**SASSOFERRATO**: Via Cavour, 33, 60041 Sassoferrato
SENIGALLIA: Via Foce Cesano, 5, 60019 Senigallia	**SIBILLINI**: Via Ascoli, 53, 63087 Comunanza
TOLENTINO: Viale Terme Santa Lucia, 60, 62029 Tolentino	**URBINO**: Via Sasso, 122, 61029 Urbino
VISSO: Strada Provinciale 209, Visso	**SEDE REGIONALE**: Via Terenzio Mamiani, 88, 60125 Ancona

Tabella 4.3.2: *Coordinate delle sedi della CRI Marche*

	Latitudine	Longitudine			Latitudine	Longitudine
DEPOSITO	43,6134681	13,5053629		MATELICA	43,31693	13,02067
ANCONA	43,59593	13,50577		MONTELABBATE - VALLEFOGLIA - ODV	43,90782	12,74399
ASCOLI PICENO	42,90455	13,58708		OSIMO	43,49195	13,48129
CAGLI	43,60911	12,6332		PERGOLA	43,60382	12,84156
CAMERINO	43,19967	13,08109		PESARO	43,91952	12,88057
CASTELPLANIO	43,53526	13,12276		PETRIOLO	43,26913	13,45443
CASTIGNANO - ODV	43,01995	13,62309		PORTO POTENZA PICENA	43,37235	13,69854
CINGOLI	43,39367	13,21094		SAN BENEDETTO DEL TRONTO	42,94949	13,83428
FABRIANO	43,37454	12,94506		SAN SEVERINO MARCHE	43,25659	13,18977
FANO	43,88325	13,01545		SANT'ANGELO IN VADO	43,71358	12,42994
FERMIGNANO	43,752	12,66327		SARNANO	43,12089	13,30642
FERMO	43,21148	13,73435		SASSOFERRATO	43,47543	12,86219
FOSSOMBRONE	43,70424	12,80853		SENIGALLIA	43,75546	13,15747
JESI	43,53289	13,23537		SIBILLINI	43,00431	13,39142
LORETO	43,46268	13,61811		TOLENTINO	43,23765	13,29308
MACERATA	43,34834	13,43772		URBINO	43,80904	12,65959
MAROTTA - MONDOLFO	43,80046	13,14597		VISSO	43,00394	13,10855
MATELICA	43,31693	13,02067				

Una volta individuate le coordinate di latitudine e longitudine di ciascuna sede è stata utilizzata la formula di Haversine presentata nel capitolo 3 per poter calcolare la distanza chilometrica tra ciascuna sede della CRI.

Una volta individuate le distanze tra ciascuna sede sono state inserite nel file dati in una matrice simmetrica 33 X 33, ipotizzando quindi che per ogni coppia di sedi i viaggi di andata e ritorno fossero della stessa distanza.

Per quanto riguarda gli altri parametri, la flotta di veicoli è composta da due componenti omogenei in termini di capacità, la domanda è stata ipotizzata mentre il

tempo di servizio è stato calcolato facendo il rapporto tra la nuova matrice delle distanze e la velocità del veicolo fissata a 50 km/h.

Infine, l'intervallo di tempo è stato aumentato a 5 ore, dalle 15:00 alle 20:00, dal momento che le distanze assumono valori alti e il numero di sedi è aumentato.

L'esecuzione in AMPL ha tuttavia rilevato l'impossibilità di determinare una soluzione ottima con la licenza in possesso.

Si è quindi pensato di affrontare la questione provvedendo ad un clustering che permette di individuare gruppi di comitati in cui poter raggruppare le varie sedi. Per poter fare ciò, il criterio utilizzato è stato quello di organizzare le sedi creando dei gruppi in base alla distanza minima fra le sedi.

Nella tabella 4.3.3 riportata di seguito si mostrano in rosso le 11 sedi prese come centro di ciascun gruppo a cui fanno riferimento le altre sedi; ciascuna sede centro non dista dai comitati del proprio gruppo più di 25 km.

Tabella 4.3.3: *Sedi della CRI Marche clusterizzate*

GRUPPI	SEDE CENTRO				
1	DEPOSITO				
2	ANCONA				
3	CASTELPLANIO	CINGOLI	JESI		
4	CASTIGNANO	SAN BENEDETTO DEL TRONTO	ASCOLI PICENO		
5	FABRIANO	SASSOFERRATO	PERGOLA		
6	LORETO	OSIMO	PORTO POTENZA PICENA		
7	PESARO	FANO	VALLEFOGLIA	SENIGALLIA	MAROTTA
8	PETRIOLO	MACERATA	FERMO		
9	SAN SEV MARCHE	TOLENTINO	CAMERINO	MATELICA	
10	SARNANO	SIBILLINI	VISSO		
11	URBINO	FERMIGNANO	FOSSOMBRONE	SANT'ANGELO IN VADO	CAGLI

Una volta clusterizzate le sedi, è stato riscritto il file dati ipotizzando che per ciascuna sede venissero richieste 4 scatole di DPI.

Tabella 4.3.4: *Domanda Sedi Clusterizzate*

Domanda Sedi Clusterizzate	
	Domanda
DEPOSITO	0
ANCONA	4
CASTELPLANIO	12
CASTIGNANO	12
FABRIANO	12
LORETO	12
PESARO	20
PETRIOLO	12
SAN SEVERINO MARCHE	16
SARNANO	12
URBINO	20

È stata quindi ricalcolata la matrice delle distanze fra le sedi clusterizzate.

Tabella 4.3.5: *Matrice delle distanze Clusterizzate*

Colonna1	DEPOSITO	ANCONA	CASTELPLANIO	CASTIGNANO - ODV	FABRIANO	LORETO	PESARO	PETRIOLO	SAN SEVERINO MARCHE	SARNANO	URBINO
DEPOSITO	0	2	39	79	62	23	72	46	56	68	85
ANCONA	2	0	38	77	61	21	74	44	54	66	86
CASTELPLANIO	39	38	0	84	27	49	56	48	37	58	57
CASTIGNANO - ODV	79	77	84	0	81	59	139	37	52	33	140
FABRIANO	62	61	27	81	0	66	72	51	28	48	64
LORETO	23	21	49	59	66	0	93	30	49	54	103
PESARO	72	74	56	139	72	93	0	102	93	113	26
PETRIOLO	46	44	48	37	51	30	102	0	26	24	105
SAN SEVERINO MARCHE	56	54	37	52	28	49	93	26	0	21	89
SARNANO	68	66	58	33	48	54	113	24	21	0	110
URBINO	85	86	57	140	64	103	26	105	89	110	0

Di seguito alla clusterizzazione delle sedi, è stato riscritto il file dati inserendo una matrice delle distanze che facesse riferimento soltanto ai centri dei cluster mentre per quanto riguarda le domande è stato ipotizzato che ciascun comitato necessitasse di 4 scatole di DPI.

Il vettore delle domande delle sedi cluster è stato ottenuto moltiplicando 4 per il numero di sedi appartenenti a ciascun gruppo mentre quello dei tempi di servizio ipotizzando che il tempo di carico e scarico fosse di un minuto a scatola.

4.3.2 RISULTATI OTTENUTI

La notevole riduzione delle sedi ha permesso ad AMPL di riuscire ad individuare la soluzione ottima in tempi rapidi. Infatti, la minima distanza percorsa da entrambi i veicoli è di 361 km; nelle tabelle 4.3.2.1 e 4.3.2.2 vengono riportati i tempi di arrivo a ciascuna sede mentre nella figura 4.5 la rotta ottima di entrambi i veicoli.

Tabelle 4.3.2.1 e 4.3.2.2: *Orari di arrivo dei veicoli alle sedi CRI*

TABELLA DEI TEMPI DI ARRIVO	
	VEICOLO 1
DEPOSITO	15:00
ANCONA	15:02
LORETO	15:27
PETRIOLO	16:09
CASTIGNANO	16:58
SARNANO	17:43
SAN SEVERINO MARCHE	18:16
DEPOSITO	19:28

TABELLA DEI TEMPI DI ARRIVO	
	VEICOLO 2
DEPOSITO	15:00
CASTELPLANIO	15:39
FABRIANO	16:18
URBINO	17:38
PESARO	18:20
DEPOSITO	19:52

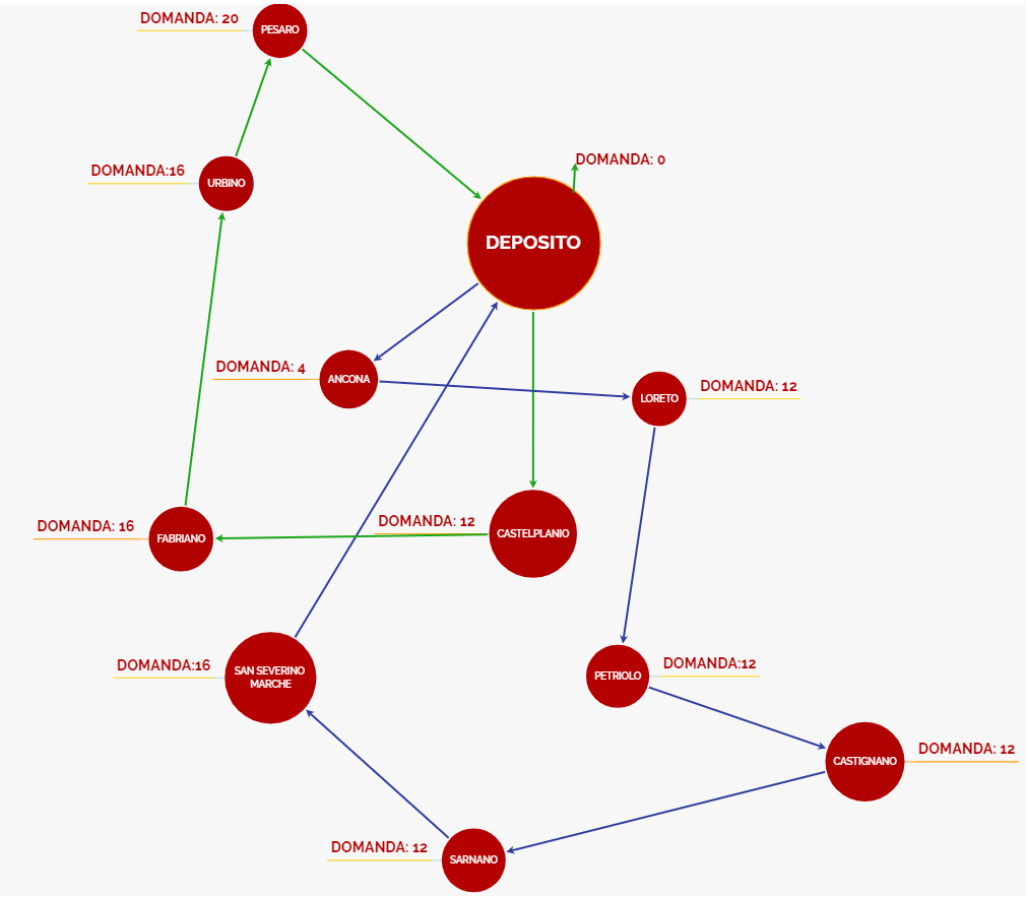

Figura 4.3.2.1: *Rotte veicoli caso minimizzazione distanze reali*

4.4 CASO MINIMIZZAZIONE DEI COSTI DI TRASPORTO REALI

A questo punto della sperimentazione il passo successivo è consistito nel testare l'istanza clusterizzata con le distanze reali tra le sedi anche con il secondo modello che minimizza i costi di trasporto.

Rispetto al caso precedente tutte le ipotesi effettuate sui dati sono rimaste invariate. Per quanto riguarda le matrici dei costi di trasporto, sono stati presi come mezzi due veicoli reali con i relativi fattori di consumo:

- Veicolo 1: Fiat Panda 1.2 Benzina → 7,6 Litri / 100 km
- Veicolo 2: Fiat Doblo 1.6 Benzina → 8,5 Litri / 100 km

Tabelle 4.4.1 e 4.4.2: *Matrici dei costi di trasporto dei veicoli 1 e 2*

Colonna1	DEPOSITO	ANCONA	CASTELPLANIO	CASTIGNANO - ODV	FABRIANO	LORETO	PESARO	PETRIOLO	SAN SEVERINO MARCHE	SARNANO	URBINO
DEPOSITO	0,00	0,24	3,70	7,51	5,87	2,22	6,88	4,37	5,01	5,01	5,01
ANCONA	0,24	0,00	3,59	7,35	5,85	1,97	7,01	4,15	4,92	4,92	4,94
CASTELPLANIO	3,70	3,59	0,00	7,97	2,60	4,63	5,33	4,53	4,05	4,03	3,98
CASTIGNANO - ODV	7,51	7,35	7,97	0,00	7,68	5,59	13,24	3,51	8,63	8,79	9,20
FABRIANO	5,87	5,85	2,60	7,68	0,00	6,27	6,91	4,86	5,09	5,12	5,18
LORETO	2,22	1,97	4,63	5,59	6,27	0,00	8,87	2,87	4,84	4,78	4,66
PESARO	6,88	7,01	5,33	13,24	6,91	8,87	0,00	9,74	5,08	4,84	4,24
PETRIOLO	4,37	4,15	4,53	3,51	4,86	2,87	9,74	0,00	4,97	4,95	4,92
SAN SEVERINO MARCHE	5,35	5,17	3,57	4,99	2,70	4,71	8,83	2,44	5,33	5,39	5,52
SARNANO	6,48	6,27	5,50	3,19	4,62	5,18	10,81	2,31	6,67	6,77	7,01
URBINO	8,10	8,18	5,46	13,32	6,08	9,79	2,45	9,97	5,72	5,55	5,12

Colonna1	DEPOSITO	ANCONA	CASTELPLANIO	CASTIGNANO - ODV	FABRIANO	LORETO	PESARO	PETRIOLO	SAN SEVERINO MARCHE	SARNANO	URBINO
DEPOSITO	0,00	0,27	4,14	8,40	6,57	2,48	7,70	4,89	5,60	5,60	5,61
ANCONA	0,27	0,00	4,01	8,22	6,54	2,21	7,84	4,64	5,50	5,50	5,52
CASTELPLANIO	4,14	4,01	0,00	8,91	2,91	5,18	5,96	5,07	4,53	4,51	4,45
CASTIGNANO - ODV	8,40	8,22	8,91	0,00	8,59	6,25	14,81	3,92	9,65	9,83	10,29
FABRIANO	6,57	6,54	2,91	8,59	0,00	7,01	7,72	5,44	5,69	5,72	5,79
LORETO	2,48	2,21	5,18	6,25	7,01	0,00	9,92	3,21	5,41	5,35	5,21
PESARO	7,70	7,84	5,96	14,81	7,72	9,92	0,00	10,90	5,68	5,41	4,75
PETRIOLO	4,89	4,64	5,07	3,92	5,44	3,21	10,90	0,00	5,56	5,54	5,50
SAN SEVERINO MARCHE	5,99	5,78	3,99	5,58	3,02	5,27	9,88	2,73	5,96	6,03	6,18
SARNANO	7,25	7,01	6,15	3,56	5,16	5,79	12,09	2,59	7,46	7,57	7,84
URBINO	9,06	9,15	6,11	14,89	6,79	10,95	2,74	11,15	6,40	6,21	5,72

4.4.1 RISULTATI OTTENUTI

Questa istanza dal punto di vista computazionale è risultata più complessa rispetto a quella precedente dal momento che al posto della matrice 11X11 delle distanze sono state valutate 2 matrici 11X11 relative ai costi di trasporto.

Nonostante ciò, AMPL dopo qualche minuto è riuscito a fornire la soluzione ottima che consiste in un costo totale per il trasporto di 45,4 €.

Nella tabella 4.4.1.1 vengono riportati i dettagli spesa relativi a ciascun veicolo, mentre nelle 4.4.1.2 e 4.4.1.3 i timetable degli arrivi a ciascuna sede CRI. Infine, nella figura 4.6, si individuano le rotte di ciascuno dei due veicoli.

Tabella 4.4.1.1: *Costi di trasporto per ciascun veicolo*

COSTI DI TRASPORTO	
VEICOLO 1	22,4
VEICOLO 2	23
TOTALE	45,4

Tabelle 4.4.1.2 e 4.4.1.3: *Tempi di arrivo alle sedi CRI dei veicoli 1 e 2*

TABELLA DEI TEMPI DI ARRIVO	
	VEICOLO 1
DEPOSITO	15:00
SAN SEVERINO MARCHE	15:56
SARNANO	16:31
CASTIGNANO	17:19
PETRIOLO	18:00
LORETO	18:47
ANCONA	19:17
DEPOSITO	19:24

TABELLA DEI TEMPI DI ARRIVO	
	VEICOLO 2
DEPOSITO	15:00
CASTELPLANIO	15:39
FABRIANO	16:20
URBINO	17:52
PESARO	18:30
DEPOSITO	19:54

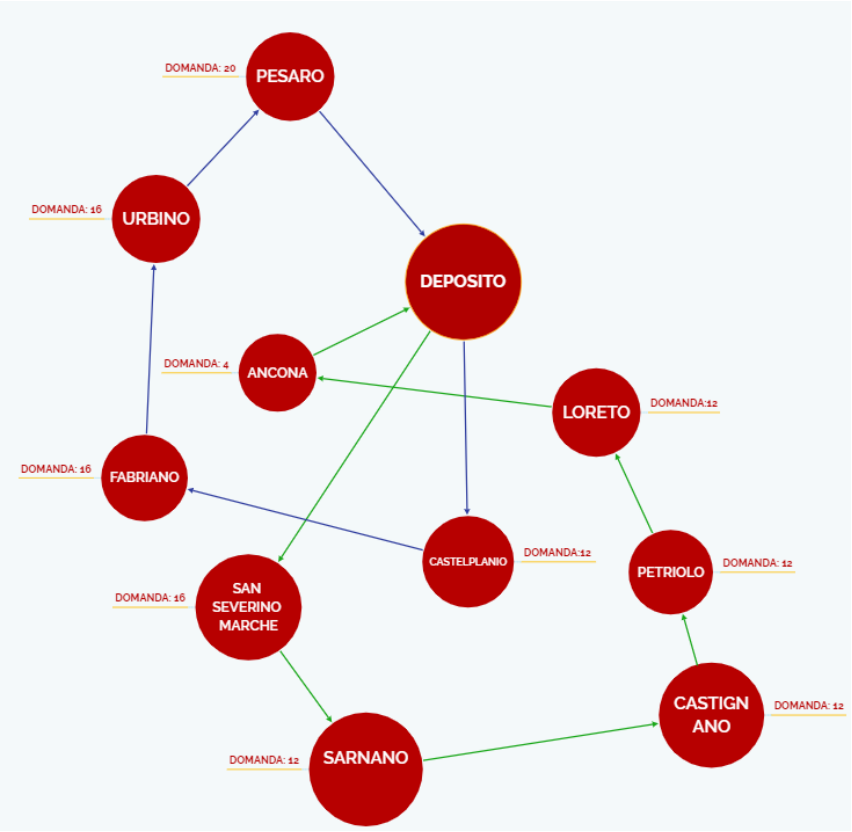

Figura 4.4.1.1: *Grafo delle rotte dei veicoli caso minimizzazione dei costi di trasporto reali*

4.5 CASO SIMULAZIONE DOMANDA REALE

In quest'ultima sezione del capitolo 4 viene esaminata l'implementazione svolta sul caso verosimile. Infatti, oltre ad utilizzare i dati relativi alle distanze reali fra le sedi, si è cercato di simulare la domanda di DPI relativa a ciascun comitato locale.

Per arrivare alla definizione di questi valori si è partito dai dati sulla regione Marche relativi alle ospedalizzazioni giornaliere: ciò ha permesso di ricavare dei dati verosimili per quanto riguarda i servizi quotidiani svolti dalla CRI Marche.

Questi valori giornalieri sono stati moltiplicati per il valore 3 che indica il numero di operatori presenti in ambulanza e per il fattore di utilizzo dei DPI. Quest'ultimo è stato trovato dai dati sugli ordini totali effettuati durante la pandemia dalla CRI per ciascuna tipologia di DPI. È stato preso come valore di riferimento il numero di FFP2 ordinate dal momento che ne viene utilizzata 1 per ciascun operatore in ogni servizio. È stato quindi calcolato il rapporto tra gli ordini di ciascuna tipologia di DPI e l'ordine di FFP2.

Da questo prodotto sono stati ricavati i dati verosimili sull'utilizzo settimanale di ciascuna tipologia di DPI per ciascun comitato; questi dati sono stati cumulati per ciascuna sede.

Dallo studio svolto sulla domanda di DPI relativa alle sedi locali, è stata presa in esame la domanda settimanale di ciascuna sede cumulativa di tutte le tipologie di DPI.

Successivamente, i valori trovati sono stati raggruppati in base alla clusterizzazione svolta nei precedenti casi, così da avere il valore simulato delle domande settimanali di DPI di ciascun cluster riportate nella tabella 4.5.1.

Tabella 4.5.1: *Domanda cumulativa e settimanale di DPI delle sedi clusterizzate*

Colonna1	Domanda Settimanale
	0
ANCONA	275
CASTELPLANIO	138
CASTIGNANO - ODV	254
FABRIANO	114
LORETO	160
PESARO	502
PETRIOLO	464
SAN SEVERINO MARCHE	128
SARNANO	17
URBINO	115

In merito agli altri parametri dell'istanza, la fascia oraria in cui viene effettuata la distribuzione continua ad essere dalle 15:00 alle 19:00, mentre per quanto riguarda i tempi di servizio, data la numerosità delle scatole da consegnare, si ipotizza che vengano scaricati 25 scatoloni al minuto.

Tabella 4.5.2: *Tempi di servizio in ciascuna sede*

TEMPI DI SERVIZIO	
DEPOSITO	0
ANCONA	11
CASTELPLANIO	5
CASTIGNANO	10
FABRIANO	5
LORETO	6
PESARO	20
PETRIOLO	18
SAN SEVERINO MARCHE	5
SARNANO	1
URBINO	5

La flotta di veicoli è composta anche in questo caso da due mezzi, con la differenza che la Fiat Panda è stata sostituita con un Fiat Ducato dal momento che si necessita di una capienza maggiore.

Come nei casi precedenti, sono state formulate due istanze, una per il modello che minimizza la distanza reale e una per quello che minimizza i costi di trasporto.

Nel primo caso la matrice delle distanze è invariata rispetto ai casi precedenti mentre nel secondo caso è stata ricalcolata la matrice dei costi di trasporto relativa al veicolo 2 rispettando il fattore di consumo del Ducato, 6,9 Litri / 100 km.

4.5.1 RISULTATI OTTENUTI PRIMO MODELLO

Per quanto riguarda l'implementazione del modello che minimizza le distanze, una volta lanciati i file su AMPL.

Rispetto al caso clusterizzato precedente, la soluzione ottima in questo caso è aumentata di 13 km attestandosi a 371 km percorsi dai due mezzi.

Nella figura 4.5.1.1 vengono riportate le rotte dei veicoli in merito alla soluzione ottima individuata dal software.

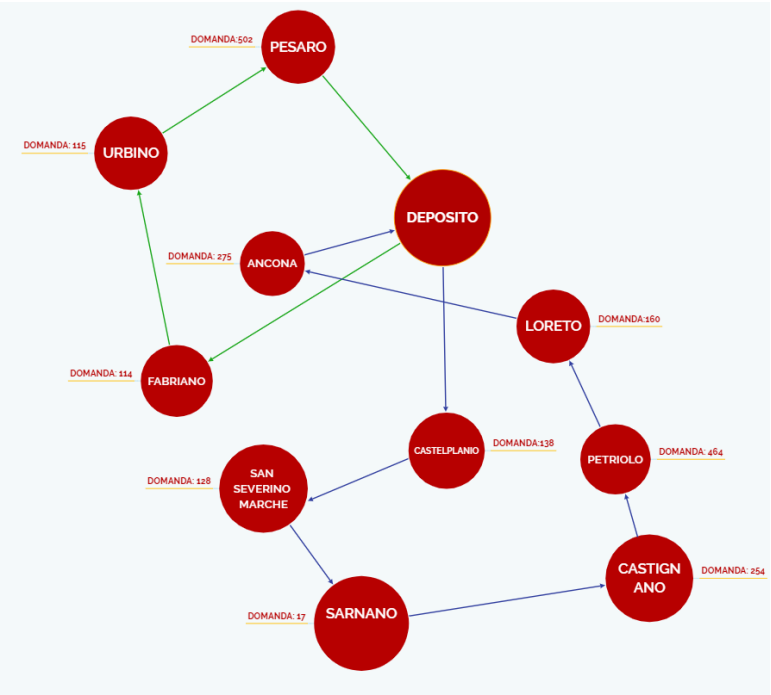

Figura 4.5.1.1: *Grafo delle rotte dei veicoli caso simulazione domanda reale*

Tabelle 4.5.1.1 e 4.5.1.2: *Tempi di arrivo alle sedi CRI dei veicoli 1 e 2*

TEMPI DI ARRIVO	
	VEICOLO 1
DEPOSITO	15:00
CASTELPLANIO	15:39
SAN SEVERINO MARCHE	16:30
SARNANO	17:05
CASTIGNANO	17:53
PETRIOLO	18:34
LORETO	19:21
ANCONA	19:51
DEPOSITO	19:58

TEMPI DI ARRIVO	
	VEICOLO 2
DEPOSITO	15:00
FABRIANO	16:02
URBINO	17:34
PESARO	18:12
DEPOSITO	19:38

4.5.2 RISULTATI OTTENUTI CON IL SECONDO MODELLO

Per quanto riguarda l'implementazione del secondo modello con la domanda simulata, la soluzione ottima trovata da AMPL risulta migliore se confrontata con quella individuata al caso 4.4. Infatti, il costo di trasporto in questa istanza si attesta a 42.93€, più basso del precedente di 2.47€.

Di seguito si riportano nella figura 4.5.2.1 il grafo che riassume le rotte di ciascuno dei due veicoli, mentre nelle tabelle 4.5.2.1 e 4.5.2.2 i tempi di arrivo alle sedi.

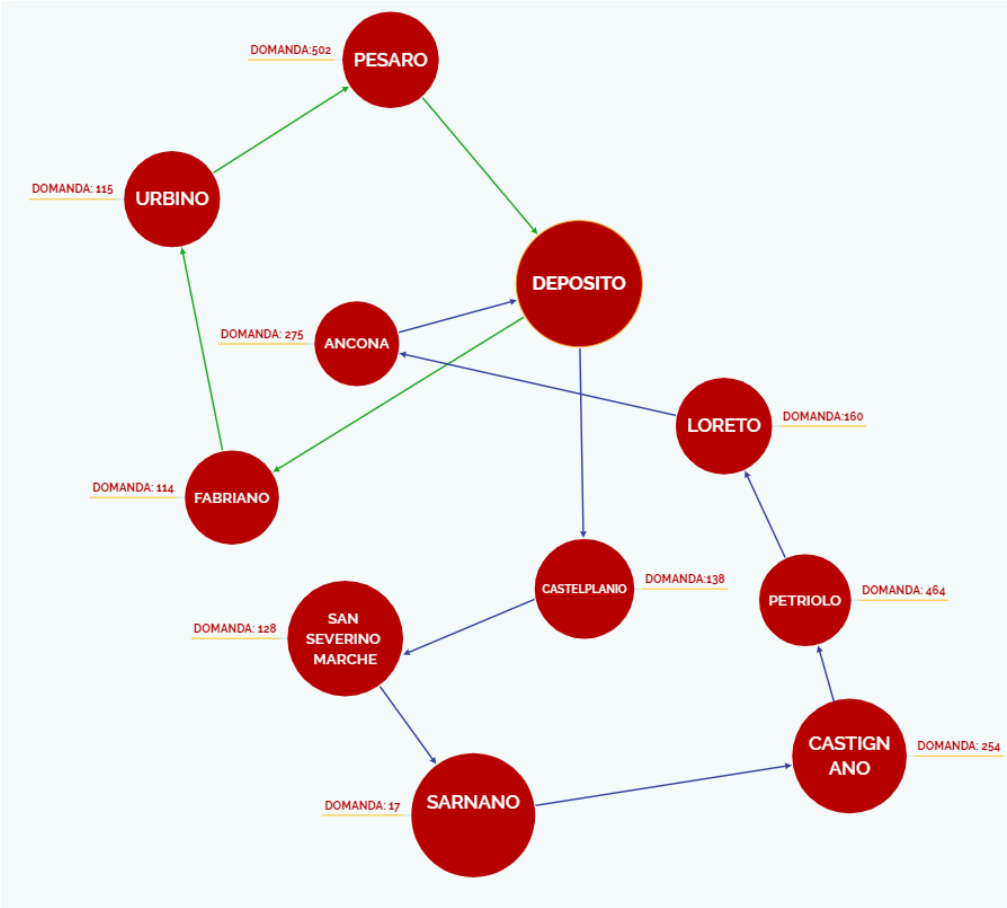

Figura 4.5.2.1: *Grafo delle rotte dei veicoli caso simulazione domanda reale*

Si può notare come, rispetto al caso 4.4, il veicolo 1 serva 7 sedi e non 6 includendo nel tragitto anche la consegna nella sede di Castelplanio. Da un punto di vista delle tempistiche, confrontando le tabelle 4.5.2.1 e 4.5.2.2 con le tabelle 4.4.1.2 e 4.1.1.3, si osserva che mentre il veicolo 1 aggiungendo una sede da servire torna al deposito con 12 minuti di ritardo, queste nuove rotte permettono al veicolo 2 di stare in strada 40 minuti in meno rispetto all'istanza precedente.

Tabelle 4.5.2.1 e 4.5.2.2: *Tempi di arrivo alle sedi CRI dei veicoli 1 e 2*

TABELLA DEI TEMPI DI ARRIVO	
	VEICOLO 1
DEPOSITO	15:00
CASTELPLANIO	15:39
SAN SEVERINO MARCHE	16:21
SARNANO	16:47
CASTIGNANO	17:21
PETRIOLO	18:08
LORETO	18:56
ANCONA	19:23
DEPOSITO	19:36

TABELLA DEI TEMPI DI ARRIVO	
	VEICOLO 2
DEPOSITO	15:00
FABRIANO	16:02
URBINO	17:11
PESARO	17:42
DEPOSITO	19:14

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

L'attività di distribuzione sta assumendo sempre più un ruolo importante da un punto di vista logistico. Infatti, avere una rete di trasporto efficiente permette sia di ottenere un vantaggio competitivo sia di apportare un beneficio in termini di impatto ambientale delle emissioni di $C0_2$ da parte dei mezzi di trasporto.

Inoltre, in questo campo si è anche sottolineata l'importanza del contributo delle tecniche studiate dalla Ricerca Operativa che permettono di risolvere problemi di VRP che riflettono esempi di realtà quotidiane.

Nel progetto di tesi, sono stati proposti due modelli di ottimizzazione con l'biettivo di minimizzare la distanza totale percorsa ed il costo totale di viaggio, assumendo una flotta eterogenea.

Per affrontare il caso di studio reale, è stato necessario pre-processare i dati a disposizione provvedendo ad una clusterizzazione delle sedi che ha consentito di ridurre il numero complessivo e quindi, risolvere in tempi di calcolo più ragionevole i modelli proposti.

Questa assunzione non è inverosimile visto che attualmente è previsto che un comitato funga da deposito per altri comitati più piccoli a cui possono quindi approvvigionarsi.

Un possibile sviluppo futuro potrebbe prevedere l'aumento del numero dei cluster. Avere più sedi cluster permetterebbe ad esempio di diminuire notevolmente le domande di ciascun gruppo e quindi di poter organizzare la distribuzione in maniera diversa dal momento che, attualmente, è stato imposto che ciascun veicolo soddisfi l'intera domanda di ogni sede servita.

Interessante potrebbe essere anche la formulazione di un modello che vada a minimizzare le emissioni di $C0_2$ dei mezzi della flotta dei veicoli utilizzati.

Rispetto ai modelli precedentemente descritti, si potrebbe modificare la formulazione della funzione obiettivo sostituendo ai coefficienti delle distanze che moltiplicano le x_{ijk} le emissioni di anidride carbonica per ciascun tragitto da una sede all'altra.

Questa variante del problema potrebbe avere dei risvolti molto utili in quanto una tra le sfide più importanti delle aziende in questo periodo è proprio l'attenzione alla riduzione dell'inquinamento ambientale.

In questo senso potrebbe essere anche interessante introdurre l'uso di veicoli eco-sostenibili per vedere l'impatto nei benefici da un punto di vista delle emissioni di $C0_2$.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- [1]: Caunhye, A. M., Nie, X., & Pokharel, S. (2012). Optimization models in emergency logistics: A literature review. *Socio-economic planning sciences*, *46*(1), 4-13.
- [2]: Dean, R. (2020). PPE: polluting Planet Earth. *British Dental Journal*, *229*(5), 267-267.
- [3]: Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The truck dispatching problem. *Management science*, *6*(1), 80-91.
- [4]: Laporte, G., & Nobert, Y. (1987). Exact algorithms for the vehicle routing problem. In *North-Holland Mathematics Studies* (Vol. 132, pp. 147-184). North-Holland.
- [5]: Fisher, M. L., & Jaikumar, R. (1981). A generalized assignment heuristic for vehicle routing. *Networks*, *11*(2), 109-124.
- [6]: Toth, P., & Vigo, D. (2002). Models, relaxations and exact approaches for the capacitated vehicle routing problem. *Discrete Applied Mathematics*, *123*(1-3), 487-512.
- [7]: Clarke, G., & Wright, J. W. (1964). Scheduling of vehicles from a central depot to a number of delivery points. *Operations research*, *12*(4), 568-581.
- [8]: Fisher, M. L., & Jaikumar, R. (1981). A generalized assignment heuristic for vehicle routing. *Networks*, *11*(2), 109-124.
- [9]: Toth, P., & Vigo, D. (Eds.). (2002). *The vehicle routing problem*. Society for Industrial and Applied Mathematics.
- [10]: “A new enhancement of the Clarke and Wright savings heuristic for the capacitated vehicle routing problem”.
- [11]: Lin, S. W., Lee, Z. J., Ying, K. C., & Lee, C. Y. (2009). Applying hybrid meta-heuristics for capacitated vehicle routing problem. *Expert Systems with Applications*, *36*(2), 1505-1512.

- [12]: Rose, K., Gurewitz, E., & Fox, G. (1990). A deterministic annealing approach to clustering. *Pattern Recognition Letters*, *11*(9), 589-594.
- [13]: Alfa, A. S., Heragu, S. S., & Chen, M. (1991). A 3-opt based simulated annealing algorithm for vehicle routing problems. *Computers & Industrial Engineering*, *21*(1-4), 635-639.
- [14]: Gendreau, M., Hertz, A., & Laporte, G. (1994). A tabu search heuristic for the vehicle routing problem. *Management science*, *40*(10), 1276-1290.
- [15]: Baker, B. M., & Ayechew, M. A. (2003). A genetic algorithm for the vehicle routing problem. *Computers & Operations Research*, *30*(5), 787-800
- [16]: Mazzeo, S., & Loiseau, I. (2004). An ant colony algorithm for the capacitated vehicle routing. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, *18*, 181-186.