

ALMA MATER STUDIORUM · UNIVERSITÀ DI
BOLOGNA

FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE, FISICHE E NATURALI
Corso di Laurea Magistrale in Informatica

**“Vehicle Routing Problem”:
un caso di studio**

Relatore:
Chiar.mo Prof.
Fabio Panzieri

Correlatore:
Ing. Alberto Torrini

Presentata da:
Davide Malagoli

Sessione II

Anno Accademico 2010-2011

Indice

Introduzione	i
1 Stato dell'arte	1
1.1 Lo scenario di Wincor Nixdorf	1
1.1.1 Storia ed organizzazione aziendale	1
1.1.2 Wincor Nixdorf Retail Consulting	3
1.1.2.1 La missione aziendale	3
1.1.2.2 La metodologia di lavoro	3
1.1.3 L'interesse dei clienti al problema	3
1.1.3.1 Le cause del fallimento dei progetti affrontati dai clienti	3
1.1.4 L'interessamento di Wincor al problema	4
1.2 Background	4
1.2.1 Me.R.Sy	4
1.2.2 Geocodifica	5
1.2.3 Gite e gite cartografiche	5
1.2.3.1 Punti di consegna	5
1.2.3.2 Depositi	6
1.2.3.3 Gite "aperte" e gite "chiuse"	6
1.2.4 PTV AG	6
1.2.5 TPS	6
1.2.6 Euristiche di Clarke e Wright	7
1.2.7 Euristiche e Metaeuristiche	7
1.2.8 Tabu Search	8
1.2.9 GENIUS	9
1.2.9.1 GENI	9
1.2.9.2 US	10
1.2.10 TabuRoute	10
1.2.11 Granular Tabu Search	11
1.2.12 PTV Intertour	11
1.2.12.1 PTV Intertour Standard	12
1.2.12.2 PTV xServer	12
1.2.13 MEFISTO	14
1.3 Vehicle Routing Problem	17
1.4 Algoritmo genetico	18
1.4.1 Principio generale	18
1.4.2 Inizializzazione	19
1.4.3 Selezione	19

1.4.4	Riproduzione	19
2	Architettura proposta	21
2.1	Progetto di massima della soluzione	21
2.1.1	Requisiti della soluzione	22
2.1.2	Modalità di realizzazione	22
2.1.3	Valutazione delle alternative	23
2.2	Il progetto proposto	23
2.2.1	Processi del cliente	23
2.2.2	Problemi secondari	24
2.2.3	Training su PTV Intertour	25
2.2.4	Configurazione di PTV Intertour	26
2.2.4.1	Parametri dell'euristica	26
2.2.4.2	Qualifiche	27
2.2.4.3	Visualizzazione dei risultati	27
2.2.4.4	Velocità dei mezzi	28
2.2.4.5	Validazione dei risultati	29
2.2.5	Comportamento dello strumento in caso di scenari dinamici	29
2.2.5.1	Problemi di formato sui dati in input	30
2.2.5.2	Nuove gite, calcolate su più giorni	30
2.2.6	Prima presentazione dei risultati al cliente	30
2.2.7	Percorso più corto o più breve?	31
2.2.7.1	Il componente MEFISTO	31
2.2.7.2	Le gite che non tornavano	31
2.2.7.3	La ricerca dei giusti valori per i fattori	32
2.2.7.4	Validazione dei risultati	33
2.2.8	Presentazione dei risultati definitiva al cliente	33
2.3	Analisi costi-benefici	33
2.3.1	Vantaggi e svantaggi utilizzando PTV Intertour	33
2.3.2	Vantaggi e svantaggi utilizzando PTV XTour	33
2.3.3	L'incompletezza delle mappe	34
2.3.4	Scelta finale	34
3	Implementazione	37
3.1	Approccio generale	37
3.1.1	Reimplementazione di Granular Tabu Search	38
3.1.2	L'algoritmo genetico	38
3.2	Ottenere i dati di input	39
3.3	Risultati ottenuti	39
3.4	Validazione risultati	39
	Conclusioni	41
	A Prima Appendice	43
	Bibliografia	44

Elenco delle figure

1.1	Inserzione di tipo 1	10
1.2	Inserzione di tipo 2	10
1.3	Rimozione di tipo 1	10
1.4	Rimozione di tipo 2	11

Elenco delle tabelle

Introduzione

La grande distribuzione organizzata, abbreviata dagli addetti ai lavori in GDO, è composta da grandi strutture o grandi gruppi (in alcuni casi multinazionali) con molte strutture distribuite su tutto il territorio nazionale, internazionale o addirittura mondiale. Nel gergo tecnico si distingue tra strutture della Grande Distribuzione (GD) e strutture della Distribuzione Organizzata (DO). Le prime vedono grosse strutture centrali gestite da un unico soggetto proprietario, che gestiscono punti di vendita quasi sempre diretti. Le seconde vedono invece piccoli soggetti aggregarsi secondo la logica de “l’unione fa la forza”: attraverso infatti l’adesione ai gruppi d’acquisto i piccoli e medi dettaglianti possono ottenere agevolazioni economiche in termini di approvvigionamento, derivanti dal maggior potere contrattuale nei confronti dell’industria da parte delle centrali, oltre che a vantaggi conseguibili dallo sfruttamento del marchio e dall’ottenimento di supporto in termini di know-how e coordinamento strategico.

All’interno di questo contesto mondiale si colloca Wincor Nixdorf Retail Consulting.

Nata nel 1990 dall’acquisizione da parte di Siemens AG della pionieristica società di informatica Nixdorf Computer AG, specializzata nello sviluppo di sistemi bancari, si è imposta come un’azienda leader nella consulenza e nello sviluppo di tecnologie innovative per il settore bancario e per il retail, che oggi rappresentano il core business dell’azienda. Sviluppatori di soluzioni end-to-end, il punto di forza dell’azienda sta nel combinare soluzioni hardware con software e servizi, sviluppando offerte che soddisfano le esigenze del mercato e dei clienti basandosi su standard aperti, che si integrano senza problemi nell’ambiente IT degli utenti.

Nel caso trattato in questa tesi ad un cliente di Wincor Nixdorf, Primafrost, era stata mostrata l’opportunità di migliorare la sua gestione di distribuzione delle merci.

Primafrost si occupa di servire i numerosi canali di vendita del Gruppo Lombardini (supermercati, discount, ipermercati, cash & carry, e-commerce, grossisti), ed è detentrica di un magazzino presso Mantova. Ogni giorno da questo magazzino partono i mezzi che riforniranno una serie di punti vendita che sono sparsi in tutto il nord d’Italia, ma fino ad ora la gestione del carico e dell’instradamento dei veicoli contenente la merce era di tipo manuale, effettuata da un dipendente esperto della cartografia stradale italiana.

Da sempre attenta non solo alla qualità della merce trasportata, ma anche alla precisione dell’ordine evaso e alla tempestività della distribuzione, e dato anche il crescere costante del numero di punti vendita, Primafrost ha deciso di incrementare la sua qualità di servizio, cercando di automatizzare il più possibile

la creazione delle gite e l'instradamento dei veicoli, e quindi ha accettato la proposta di Wincor Nixdorf.

Era necessario tuttavia mostrare al cliente che la soluzione progettata poteva funzionare, e quindi la sua adozione era subordinata al buon esito di uno studio di fattibilità. In questa tesi viene riportato il lavoro svolto durante la redazione dello studio di fattibilità svolto presso Wincor. Verranno evidenziati gli apporti personali al lavoro svolto e le soluzioni progettate, nonché i risultati sperimentali.

Verrà inoltre svolto un confronto tra gli strumenti utilizzati e lo stato dell'arte per quanto riguarda la ricerca in questo settore.

Capitolo 1

Stato dell'arte

In questo capitolo riporteremo quello che è stato osservato essere oggi giorno lo stato dell'arte per quanto riguarda il problema trattato.

Nella prima sezione analizzeremo il modo di vedere il problema da parte del mondo industriale, in particolare faremo riferimento allo scenario descritto da Wincor Nixdorf.

Nella sezione successiva introdurremo una serie di termini e concetti che saranno utili più avanti in questa tesi, ed infine nell'ultima sezione parleremo un po' del problema dell'instradamento dei veicoli e delle sue varianti.

1.1 Lo scenario di Wincor Nixdorf

In questa sezione parliamo in breve dell'azienda Wincor Nixdorf, della sua struttura organizzativa, per poi concentrarci sul problema che i suoi clienti si erano trovati ad affrontare. Da lì esamineremo brevemente le motivazioni che hanno spinto Wincor ad intraprendere il progetto di cui si parla in questo elaborato e la metodologia con cui hanno deciso di affrontare il problema. Poiché il lavoro descritto in questo documento riguarda un'opera concepita presso Wincor Nixdorf Retail Consulting, solo la realtà di questa compagnia sarà descritta nel dettaglio.

1.1.1 Storia ed organizzazione aziendale

Le origini dell'odierna azienda [11] partono nel lontano 1952, nel "Labor für Impulstechnik" del pioniere informatico Heinz Nixdorf. Nel 1968 diventa Nixdorf Computer AG (1968-1990), poi Siemens-Nixdorf Informationssysteme AG (1990-1998), e Siemens-Nixdorf Retail & Banking Systems GmbH (1998-1999). Wincor Nixdorf venne infine fondata nell'ottobre 1999 come compagnia indipendente. Nel 1999 l'organizzazione viene rilevata dalla finanziaria Kohlberg Kravis Roberts insieme al partner Goldman Sachs, e prende il nome di Wincor Nixdorf.

Il suffisso "Wincor", composto da "win" e "core", rappresenta la promessa di profitto e la competenza della compagnia nei settori retail e banking [10].

Oggi Wincor Nixdorf - quotata alla Borsa di Francoforte - conta a livello mondiale oltre 7.000 dipendenti e un fatturato di circa 2 miliardi di Euro. E' presente in oltre 90 paesi, con 31 filiali consociate nazionali. I dati di mercato

fatti registrare nel 2005 indicano che, nei segmenti degli ATM e dei sistemi POS Retail, Wincor Nixdorf è leader di mercato in Germania e al terzo posto a livello mondiale.[12]

In Germania l'azienda è composta da 20 compagnie:

1. Wincor Nixdorf International GmbH
2. Wincor Nixdorf Banking Consulting GmbH (BCON)
3. Wincor Nixdorf Branch Technology GmbH
4. Wincor Nixdorf GmbH Business Administration Center (BAC)
5. Wincor Nixdorf Customer Care GmbH
6. Wincor Nixdorf Services GmbH
7. Wincor Nixdorf Facility GmbH
8. Wincor Nixdorf Facility Services GmbH
9. Wincor Nixdorf property management Ilmenau GmbH & Co.
10. Wincor Nixdorf Logistics GmbH
11. Wincor Nixdorf Lottery Solutions GmbH
12. Wincor Nixdorf Real Estate GmbH & Co.
13. Wincor Nixdorf Retail Consulting GmbH (RCON)
14. Wincor Nixdorf Retail Services GmbH
15. Wincor Nixdorf Security GmbH
16. Wincor Nixdorf Services GmbH
17. Wincor Nixdorf Technology GmbH
18. Wincor Nixdorf Portavis GmbH
19. Prosystems IT GmbH e Bank Consulting AG, di cui Wincor Nixdorf possiede il 51%

In Italia, Wincor Nixdorf è presente dal 1999 con un Gruppo strutturato in tre società:

1. Wincor Nixdorf
2. Wincor Nixdorf Retail
3. Wincor Nixdorf Retail Consulting

che coprono l'intera offerta di consulenza, prodotti e servizi per i settori bancario e di vendita al dettaglio. Wincor Nixdorf Italia conta un organico di circa 180 persone.

1.1.2 Wincor Nixdorf Retail Consulting

1.1.2.1 La missione aziendale

Wincor Nixdorf Retail Consulting (nel seguito WNRC) ha come scopo quello di offrire consulenza su processi del business aziendale alle aziende della Grande Distribuzione Organizzata (nel seguito GDO).

1.1.2.2 La metodologia di lavoro

Dopo aver disegnato i processi con i clienti sorge il problema di come supportarli dal punto di vista dell'Information Technology.

WNRC è anche in grado di sviluppare specifiche applicazioni software a supporto dei processi disegnati con i clienti.

L'approccio di WNRC allo sviluppo software non è quello di una *software house* ma quello di offrire ai clienti "soluzioni" ritagliate su misura dei processi da informatizzare.

Nello sviluppo di queste soluzioni WNRC ha avuto l'abilità di integrarle organicamente le une con le altre; oggi costituiscono una suite di nome Merchandise Retail System (acronimo Me.R.Sy, vedi 1.2.1) che in pratica è un ERP per le aziende della GDO.

Le aree funzionali coperte dall'aziende sono molte, in particolare la logistica dei Centri di Distribuzione (nel seguito Cedi).

1.1.3 L'interesse dei clienti al problema

Tipicamente le aziende trattate da WNRC possiedono centinaia di Punti di Vendita (nel seguito Pdv) nei vari canali (Ipermercati, Supermercati, Cash&Carry, Discount, Internet, ecc.)

I Cedi consegnano a questi Pdv diverse volte alla settimana; da cui ne derivano importanti costi di trasporto.

I clienti di Wincor stanno diventando sempre più sensibili a queste voci di costo (anche perchè destinate a crescere nel tempo) e questa area sta diventando per WNRC interessante per nuove possibilità di business.

Negli ultimi anni alcuni clienti di Wincor hanno tentato di affrontare il problema della minimizzazione dei costi di trasporto con dei progetti autonomi, ma sono tutti falliti.

1.1.3.1 Le cause del fallimento dei progetti affrontati dai clienti

Le cause principali del fallimento si ritiene possano essere queste:

1. La complessità del problema è stata sottovalutata
2. L'approccio al problema non è stato quello giusto; ad esempio si è cercato di dare uno strumento sofisticato in mano al responsabile delle spedizioni il quale:
 - (a) non aveva il bagaglio culturale necessario (spesso questa figura è un ex-caminista)

- (b) Provocava un conflitto di interessi (queste figure, se abili, sono ben remunerate; lo strumento, se funziona, erode il potere di queste figure...)
- 3. Non si è capito la necessità di fortissima integrazione fra lo strumento di integrazione cartografica e quello che, nel processo, sta a monte e a valle (ad esempio, una volta pianificato le gite bisogna essere in grado di pilotare il picking ed il carico del camion in modo da rispettare la pianificazione)

1.1.4 L'interessamento di Wincor al problema

In conclusione Wincor Nixdorf riteneva che:

- I tempi fossero maturi per spingere, con alcuni dei clienti principali, un progetto di “minimizzazione costi trasporto” che, utilizzando un sofisticato tool di pianificazione cartografica, permettesse di ridurre questa importante voce di costo.
- condizione necessaria (e non sufficiente) per concludere, assieme ai clienti, il progetto con successo, fosse quella di integrare il tool all'interno di Me.R.Sy., permettendo ai due software di dialogare e di scambiarsi dati
- fosse necessario un approccio propositivo presso i clienti di questo progetto

La fattibilità di questo progetto era tuttavia subordinata al successo di un “Proof of Concept” nel quale si sarebbero dovuti fornire anche indicazioni sull'incidenza del risparmio potenziale.

1.2 Background

In questa sezione è possibile trovare chiarimenti sui termini che verranno usati nelle sezioni successive.

1.2.1 Me.R.Sy

"Me.R.Sy." (Merchandising Retail System) [1] è la suite gestionale di Wincor Nixdorf. risponde alle esigenze delle aziende retail gestendo l'intera filiera della moderna distribuzione: dalla negoziazione col fornitore alla logistica della merce, dal punto di vendita al consumatore finale.

La suite applicativa Me.R.Sy., grazie alla sua modularità, che permette di configurare l'applicazione in modo graduale e progressivo nel tempo, controlla con efficacia ed efficienza tutti i processi caratteristici di un'azienda retail, garantendo alti livelli di flessibilità.

I moduli della Suite Me.R.Sy. insistono su 4 aree applicative:

1. **Area Commerciale:** supporta l'impresa e gli utenti nell'ambito della relazione con l'industria. L'ambiente applicativo, basandosi su questa solida struttura anagrafica, garantisce una copertura ampia e profonda di tutte le funzionalità inerenti il ciclo passivo (rapporto tra distributore e produttore) e il ciclo attivo (rapporto tra distributore e punto vendita).

2. **Area Logistica:** supporta l'impresa e gli utenti nell'ambito della gestione del ciclo merci e del magazzino. Nella gestione dei processi caratteristici, Me.R.Sy. può utilizzare tecnologie sia in ambito radiofrequenza (RF) che in ambito voice, garantendo precisione nell'esecuzione delle attività e una tracciabilità completa dei prodotti.
3. **Gestione della Rete:** permette la gestione delle superfici di vendita evolutesi, nel modello e nelle funzioni, con le best practice italiane del canale. Integra in sé tutte le anagrafiche necessarie alla completa gestione dei negozi, nonché la possibilità di utilizzare, per le politiche commerciali, alcuni specifici moduli per la progettazione, applicazione e controllo della politica commerciale.
4. **Area Store:** garantisce un'ampia copertura funzionale per i processi di back office, mantenendo in loco la sola interfaccia con la barriera casse e le bilance.

1.2.2 Geocodifica

La geocodifica [3] consente di attribuire ad un indirizzo presente in un database (via, numero civico, località, provincia, nazione) una coppia di coordinate geografiche. La geocodifica consente il posizionamento degli indirizzi sulla cartografia digitale e, quindi, la loro successiva visualizzazione e rielaborazione per attività di analisi, di pianificazione, di geomarketing, etc.

1.2.3 Gite e gite cartografiche

Il percorso che un veicolo terrestre (es. automobile, camion, treno, ecc.), navale, o aereo) compie partendo dal punto di partenza a quello di arrivo, e passando nel suo tragitto attraverso vari punti di controllo, non ha una denominazione univoca in italiano: "giro" o "tragitto" sono in genere le parole più appropriate. Nei problemi di instradamento dei veicoli (vedi 1.3) l'insieme dei veicoli potrebbe tranquillamente essere composto anche da veicoli navali o aerei, senza cambiare di molto la tecnica di soluzione del problema stesso. Per questo in questo elaborato si parlerà in modo generico di "gite".

Con il termine "gita" si intende il percorso che un veicolo (terrestre navale, o aereo) compie partendo dal punto di partenza a quello di arrivo, e passando nel suo tragitto attraverso vari punti di controllo, che sono rappresentati dai punti di consegna.

Una gita è quindi una sequenza ordinata di cui ogni elemento rappresenta un punto di consegna. Ogni gita ha come primo elemento sempre un deposito tra quelli che sono stati definiti.

Una gita cartografica è una gita in cui i punti di consegna sono geocodificati.

In questo elaborato ogni volta in cui si parla di gite si intende gite cartografiche.

1.2.3.1 Punti di consegna

Un punto di consegna rappresenta un cliente che fa richiesta ad un deposito di un qualche tipo di bene o merce, e che deve essergli recapitato alle sue coordinate.

Ogni punto di consegna possiede un identificativo univoco ed una serie di coordinate che permette di localizzarlo all'interno dello spazio del problema. Nel caso lo spazio del problema sia rappresentato da mappe geografiche generalmente si utilizzano coordinate geografiche, mentre nel caso di mappe cartografiche digitali si può passare anche a tecniche di geocodifica.

La definizione dell'unità di misura della merce è in genere definita o concordata con l'utilizzatore finale, quindi nel caso di merci possono essere pallet, roll, ecc. o anche confezioni singole.

1.2.3.2 Depositi

Sono punti di consegna speciali, che hanno una richiesta nulla (i depositi non possono fare richieste tra di loro). Ogni gita parte sempre da uno dei depositi. In questo elaborato sarà trattati solamente casi in cui vi è un solo deposito, quindi sarà anche rispettata la convenzione utilizzata in letteratura di indicare il deposito con l'identificativo 0.

1.2.3.3 Gite “aperte” e gite “chiuse”

Una gita, per essere tale secondo la nostra definizione, deve sempre partire dal deposito. Una gita si dice “chiusa” se il punto di arrivo è il deposito di partenza, “aperta” altrimenti.

Nei problemi di instradamento dei veicoli classici normalmente si suppone che i veicoli debbano partire e tornare al deposito di partenza. Questo elaborato non si discosta dalla letteratura da questo punto di vista, quindi quando si parla di gite senza specificare diversamente si suppone che si stia parlando di gite “chiuse”.

1.2.4 PTV AG

PTV (Planung Transport Verkehr) AG [14], costituita nel 1979 a Karlsruhe, Germania è una compagnia di consulenza e sviluppo software.

Il business di PTV è principalmente concentrato nelle aree del trasporto, della mobilità e della logistica, e sviluppa software per la pianificazione e l'ottimizzazione dei trasporti e delle gite.

La compagnia è ora attiva in 4 continenti, ha 700 dipendenti e 1500 clienti in 75 nazioni. Alcuni dei loro prodotti software sono utilizzati in Germania anche dalle università nella formazione dei futuri ingegneri del traffico.

Una famiglia di prodotti commerciali che sicuramente ha conquistato una certa fetta di mercato per quanto riguarda la pianificazione delle gite è rappresentata dal marchio “Maps & Guide”.

1.2.5 TPS

TPS (Transport Planning Service) [13] nasce a Perugia nel 1993 dall'iniziativa di un giovane gruppo di ingegneri specialisti nel settore della pianificazione dei trasporti. L'obiettivo comune era ed è quello di fornire ad operatori pubblici e privati, consulenze, prodotti e servizi nel campo dell'ingegneria del traffico, dei trasporti e della logistica. In questo ambito, TPS ha avviato un'importantissima partnership con la PTV AG, azienda leader a livello europeo nello sviluppo di soluzioni software per la mobilità.

La struttura organizzativa della TPS è articolata sul territorio nazionale italiano con uffici a Perugia (sede legale ed operativa con certificazione di qualità UNI EN ISO 9001:2000), Bologna e Milano.

A livello operativo TPS è strutturata nelle seguenti unità:

- team di progettazione e consulenza nei campi dell'ingegneria del traffico, della logistica e dei trasporti
- unità tecnica per rilievi ed indagini nei settori del traffico e dei trasporti
- rete commerciale e unità tecnica di supporto per l'assistenza post-vendita dei software
- laboratorio di sviluppo software laboratorio di ricerca

L'organico della TPS è per la quasi totalità costituito da ingegneri ed architetti esperti in pianificazione dei trasporti, ingegneria del traffico e modellistica applicata. Ad essi si affianca l'attività di un nucleo di programmatori che lavora nello sviluppo di soluzioni software basate su cartografia digitale.

1.2.6 Euristiche di Clarke e Wright

L'euristica di Clarke and Wright² di cui si parla in questo elaborato di tesi è meglio conosciuta come "algoritmo dei risparmi di Clarke and Wright" (nome originale: "Clarke and Wright Savings Algorithm").

È senz'altro l'euristica più conosciuta nell'ambito del Vehicle Routing Problem, ed è basato sull'idea di risparmio.

Si suddivide in 2 fasi: il calcolo dei risparmi e la fusione delle gite.

Per quanto concerne il calcolo dei risparmi, quando due gite $(0, \dots, i, 0)$ e $(0, j, \dots, 0)$ esiste un cammino tra i e j e la nuova gita creata sarebbe ancora fattibile, allora viene computato un'ammontare chiamato risparmio, che è pari a $s_{ij} = c_{i0} + c_{0j} - c_{ij}$, ovvero la distanza che si è risparmiato tornando al deposito una volta di meno. I risparmi vengono quindi ordinati in modo non crescente.

La fusione delle gite può essere fatta in due modi: sequenziale o parallelo.

Nel caso parallelo, partendo dal massimo risparmio fino al minimo si effettuano le giunzioni delle gite, sempre però cercando di rispettare i vincoli di fattibilità.

Nel caso sequenziale invece si esamina una gita per volta, e si cerca tra i risparmi, sempre dal maggiore al minore, se si può combinare la gita corrente con un'altra rispettando i vincoli di fattibilità.

I risultati sperimentali dicono che la versione parallela è più performante di quella sequenziale, e quindi in questo elaborato quando ci si riferirà a questa euristica si intenderà sempre la sua versione parallela.

1.2.7 Euristiche e Metaeuristiche

Sono state proposte diverse approcci basati su euristiche per risolvere il problema dell'instradamento dei veicoli (vedi 1.3), che possono essere raggruppati in due insiemi distinti:

1. Quelli basati su euristiche "classiche" (sviluppate principalmente tra gli anni '60 e inizio '90)

2. Quelli basati su “metaeuristiche” (sviluppate tra la metà degli anni '90 ed i primi anni del terzo millennio)

Le euristiche compiono una esplorazione limitata dell'albero delle scelte e delle combinazioni possibili producendo però generalmente una soluzione comunque buona rispetto a quella ottima. Gran parte delle soluzioni commerciali oggi-giorno esistenti appartengono alla prima famiglia, anche e soprattutto perchè questo tipo di euristiche può essere esteso per tenere conto della diversità dei vincoli riscontrati in contesti reali.

Vedremo invece come le soluzioni analizzate in quest'elaborato (PTV Inter-tour Standard e gli xServer) appartengono alla seconda famiglia, rappresentando così un'evoluzione rispetto al panorama generale.

Nelle metaeuristiche infatti l'enfasi è posta invece sull'esplorazione in profondità dell'albero delle scelte, o almeno di quelle regioni dell'albero che appaiano più promettenti. Questi metodi tipicamente combinano tecniche sofisticate per la ricerca dei vicini, la memorizzazione delle strutture dati e la ricombinazione dei risultati.

La qualità delle soluzioni così ottenute è più alta rispetto a quella delle euristiche più classiche, ma richiede un maggior tempo per essere trovata. Tra l'altro, queste procedure richiedono una configurazione abbastanza precisa di alcuni parametri utilizzati dall'algoritmo, e che servono all'euristica per adattarsi al contesto di impiego. Questa configurazione in alcuni casi può diventare particolarmente problematica.

Nonostante tutto però la differenza tra euristiche e metaeuristiche sembra risiedere nel fatto che le seconde posseggono una serie di accorgimenti per evitare di rimanere bloccati in minimi locali mediante una gestione più permissiva del risultato trovato: nelle euristiche classiche spesso si passa infatti da una soluzione fattibile all'altra, in una continua ricerca di miglioramento; nelle metaeuristiche spesso invece la scelta della soluzione successiva può riguardare anche soluzioni non fattibili, poichè si è visto che sperimentalmente questo approccio permette di trovare più velocemente la soluzione giusta.

1.2.8 Tabu Search

Tabu Search è una metaeuristica molto famosa all'interno della comunità della Ricerca Operativa, e diverse sue estensioni sono state usate anche in ambito VRP.

In Tabu Search vengono analizzate sequenze di soluzioni in modo iterativo: ad ogni iterazione vengono prodotte diverse soluzioni da una variazione della soluzione ottenuta al passo precedente. Da questo insieme viene scelta la configurazione “migliore”, ovvero quella che porta più vicino all'obiettivo che si vuole raggiungere.

Per evitare la creazione di cicli nella scelta delle soluzioni, le soluzioni che sono state esaminate recentemente sono contrassegnate come “tabù”, il che significa che per un certo numero di iterazioni non possono essere più prese in considerazione.

L'approccio basilare di questa metaeuristica, nell'arco di una decina d'anni, è stato utilizzato da diversi autori, i quali lo hanno in genere arricchito di diverse caratteristiche e migliorie. Ad esempio, per risparmiare memoria, alcune

estensioni di Tabu Search non memorizzano le soluzioni interamente, ma solo qualche attributo.

Tra gli approcci più famosi o innovativi ricordiamo:

- TabuRoute, descritto poco più avanti in questo documento (cap. 1.2.10). Concepito da Gendreau, Laporte e Hertz, integra al suo interno l'euristica GENIUS (vedi 1.2.9).
- Adaptive Memory, di Rochard e Taillard, poichè intriduce il concetto di memoria adattiva per potenziare gli approcci basati su Tabu Search
- Granular Tabu Search, di Toth e Vigo, poichè tuttora viene ritenuto un ottimo approccio per risolvere l'instradamento dei veicoli

1.2.9 GENIUS

GENIUS [9] è un'euristica utilizzata per risolvere il problema del commesso viaggiatore, ma che è stata impiegata anche in campo VRP da TabuRoute (vedi cap.1.2.10).

L'acronimo in realtà descrive due euristiche, "GENeralized Insertion" e "Us-tring and Stringing", e che servono ognuna per un passo specifico di questo algoritmo a due fasi.

La prima si occupa, dato un nodo, di inserirlo all'interno di una sequenza circolare (che di norma è una gita).

La seconda euristica, in un secondo momento, si occupa di migliorare la gita trovata, e funge perciò da port-ottimizzazione.

Gli schemi con cui queste euristiche aggiungono o tolgono nodi dalla gita concedono determinate caratteristiche all'algoritmo, e quindi vengono analizzate di seguito.

1.2.9.1 GENI

"GENeralized Insertion" viene utilizzata per inizializzare la gita.

L'inserzione non viene fatta in maniera casuale ma segue degli schemi, che andiamo ad illustrare:

1. Nel primo schema di inserzione si suppone che il nodo n debba essere inserito tra n_i ed n_j (diversi tra loro), e che esista un nodo n_k diverso dagli altri due. Non è necessario che i due nodi siano adiacenti, come si vede bene nella figura 1.1. Come si vede alcuni segmenti della sequenza sono stati "invertiti". Notare che questo schema si riduce ad un inserzione classica nel caso in cui $n_i = n_{i+1}, n_j = n_{j+1}, n_k = n_{k+1}$.
2. Il secondo schema assomiglia al primo, ma questa volta si suppone anche l'esistenza di un nodo n_l diverso dagli altri. notare che in questo caso le "inversioni" nella gita sono numerose, come si vede in figura 1.2.

Degno di nota è il fatto che, per come lavora quest'euristica, non si può partire da una gita vuota, ma bensì devono esserci almeno 3 nodi. Questo problema è dovuto alla struttura degli schemi di inserzione, ed è possibile risolverlo aggiungendo nodi casualmente alla gita fino ad arrivare a 3. Un'altra caratteristica che deriva dall'uso di questi schemi è la non necessità di un componente che perturbi la soluzione, poichè le "inversioni" negli schemi servono proprio a questo.

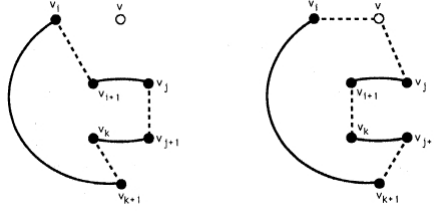


Figura 1.1: Inserzione di tipo 1

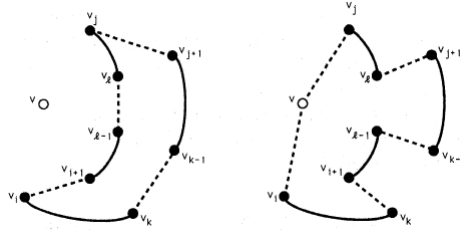


Figura 1.2: Inserzione di tipo 2

Visto che esistono 2 schemi di inserzione, viene sempre scelto l'inserimento che porta alla costruzione di una gita di costo minimo tra le alternative.

1.2.9.2 US

In modo iterativo “Unstringing and Stringing”, toglie un nodo dalla gita e lo reinsertisce, sempre usando gli schemi di GENI per il reinserimento. La rimozione dei nodi dalla gita non viene fatto a caso, ma seguendo determinati schemi, che come si può notare dalla figure 1.3 e 1.4, altro non sono che l'inverso dei passi di inserzione descritti nel paragrafo precedente.

1.2.10 TabuRoute

Tra gli approcci derivati da Tabu Search, TabuRoute [1.2.10] introduce diverse caratteristiche innovative. La lista delle soluzioni che possono essere raggiunte da quella corrente viene determinata usando GENI (vedi 1.2.9.1), eliminando un vertice da una gita e cercando di inserirlo in un'altra mediante un criterio di minimo costo.

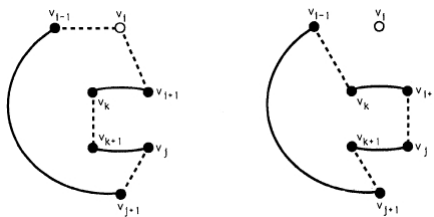


Figura 1.3: Rimozione di tipo 1

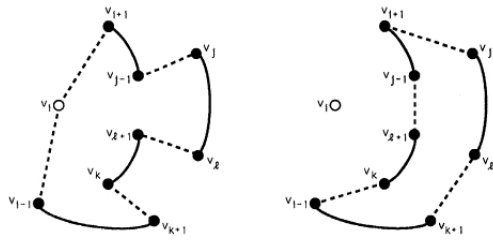


Figura 1.4: Rimozione di tipo 2

Un'altra importante caratteristica consiste nell'utilizzo di fattori di penalizzazione per svantaggiare la scelta di soluzioni che non rispettano i vincoli (dette anche inammissibili). Più precisamente:

- la funzione di ricerca viene lasciata libera di selezionare anche soluzioni inammissibili, a patto che abbiano un costo minore.
- Dopo un certo numero di soluzioni inammissibili esaminate consecutivamente i fattori di penalità aumentano, e così aumenta anche il costo delle soluzioni che violano i vincoli
- Dopo un certo numero di soluzioni ammissibili consecutive invece il valore dei fattori di penalità decresce

Questa tecnica viene utilizzata per creare un mix di soluzioni ammissibili e non che impedisca alla ricerca di fermarsi in un minimo locale.

Ultima importante peculiarità di questo algoritmo è l'utilizzo di false partenze: più soluzioni iniziali vengono generate, e solo la più promettente viene scelta come punto di partenza.

1.2.11 Granular Tabu Search

È una metaeuristica, introdotta da Toth e Vigo, che ha finora ottenuto eccellenti risultati per il VRP [8].

L'idea di base, molto promettente, è che gli archi lunghi difficilmente faranno parte della soluzione ottima. Viene quindi introdotto un limite "di granularità" per gli archi, scelto anche in base alla lunghezza media degli archi contenuti in una soluzione ottenuta in un'euristica veloce (nei risultati sperimentali era stata usata quella di Clarke e Wright).

L'implementazione di Granular Tabu Search quindi riprende quella di TabuRoute e vi aggiunge quest'ultima caratteristica, diminuendo così i tempi di calcolo.

Nella versione originale sono considerate solo mosse di tipo OR1 o OR2 per lo scambio dei nodi all'interno delle gite.

1.2.12 PTV Intertour

PTV Intertour non è un'applicativo, ma bensì una suite di programmi specializzati per la pianificazione e l'ottimizzazione dei giri per la grande distribuzione [5]. Ogni software ha alcune funzionalità leggermente diverse che lo rende adatto ad uno specifico compito.

Funzionalità	Prodotto
Pianificazione automatica dei giri di distribuzione	PTV Intertour Standard
Master route planning	PTV Intertour Strategy
Location planning	PTV Intertour Strategy
Pianificazione delle zone di vendita e ottimizzazione della rete commerciale	PTV Map&Market
Componenti server per l'integrazione di funzionalità geografiche e di ottimizzazione dei percorsi in applicativi distribuiti	PTV xServer

Qui di seguito approfondiremo solo gli applicativi che sono interessanti per questo elaborato.

1.2.12.1 PTV Intertour Standard

PTV Intertour è un software che permette di risolvere complessi scenari di distribuzione e raccolta merci sul territorio. Suggerendo una programmazione ottimizzata dei viaggi e degli impieghi della flotta veicolare, sia su base giornaliera che settimanale, consente di risparmiare fino al 20% dei costi di distribuzione. Per garantire risultati di questo tipo Intertour include un framework per l'ottimizzazione (MEFISTO, vedi pag. 14) e ed una dettagliata cartografia digitale su cui viene effettuato il calcolo delle distanze stradali e dei tempi di percorrenza tra le destinazioni. PTV Intertour può generare automaticamente i viaggi assegnando fermate e mezzi in pochi secondi, oltre a permettere anche di aggiungere le fermate una ad una senza compromettere l'efficienza dei viaggi nel complesso. E' possibile tuttavia manipolare la soluzione trovata per adattarla meglio alle proprie esigenze, aggiungendo, togliendo o scambiando fermate tra i viaggi, o addirittura aggiungere nuove fermate non precedentemente pianificate all'interno di un giro. Nella composizione dei viaggi PTV Intertour tiene conto di tutti i possibili vincoli sia temporali, sia strutturali che logistici: orari di servizio per la consegna/ritiro con più fasce temporali giornaliere; tempi di turnazione dei mezzi; data e orari di disponibilità della merce; tempi di guida nel rispetto dei limiti di legge; tempo massimo di permanenza a bordo della merce; quantitativi da consegnare (roll, pallet, volume, peso); capacità delle diverse tipologie di mezzi della flotta; richiesta di equipaggiamenti particolari sui mezzi per determinate merci, clienti; depositi di distribuzione/transit point/multidrop; vincoli di passaggio intermedio su magazzini per il prelievo/scarico della merce; limitazione della durata dei viaggi; generazione di viaggi con concarico.

1.2.12.2 PTV xServer

I PTV xServer basilarmente offrono le stesse funzionalità dei componenti della suite Intertour, ma usando un'architettura orientata ai servizi. Questo comporta una serie di indiscutibili vantaggi:

1. permettono di ideare soluzioni con un'occhio di riguardo per la scalabilità. Gli xServer sono indipendenti l'uno dall'altro, e grazie alla tecnologia clus-

ter, si può espandere il pool di macchine utilizzate in qualsiasi momento e quindi soddisfare eventuali richieste di prestazioni maggiori

2. sono compatibili con le tecnologie attuali di sviluppo, tutti i componenti hanno interfaccia standard XML/SOAP e questo significa che possono essere facilmente integrati in sistemi ed applicativi
3. i bundle degli xServer sono completamente standalone, e non necessitano di nessuna installazione
4. mantengono performance elevate poichè l'integrazione dei moduli avviene sì tramite un framework di comunicazione scritto in Java ma i singoli moduli sono scritti in linguaggio C++
5. sono multiplatforma, in quanto possono essere installati in ambiente Windows o Linux e sono in grado di sfruttare i sistemi multiprocessore
6. hanno un approccio nativamente Web 2.0, con interattività garantita grazie all'utilizzo della tecnologia AJAX
7. vi è un intero portale completamente dedicato al prodotto ("PTV Developer Zone") dove consultare tutte le ultime novità sui prodotti disponibili, tutte le statistiche sul materiale cartografico, scaricare aggiornamenti e nuove release, consultare FAQ ed ottenere supporto

Qui di seguito riportiamo i 7 server, ognuno con il compito ad esso associato:

1. **xMap:** si occupa della navigazione dinamica delle mappe AJAX e rappresentazione interattiva di percorsi, informazioni sul traffico, veicoli e, più in generale, POI, punti, polilinee, aree, immagini, etc.
2. **xLocate:** si occupa della geocodifica e validazione di indirizzi (dall'indirizzo alle coordinate). Supporta differenti formati di coordinate geografiche (WGS-84, GeoDecimal, GeoMinSec, Mercator etc.), permette la geocodifica inversa (dalle coordinate all'indirizzo). Possiede un modalità batch per la geocodifica di grandi quantità di indirizzi e differenti metodi di ricerca che possono essere combinati l'uno con l'altro (binary, fuzzy, phonetic)
3. **xRoute:** possiede tutte le funzionalità legate al calcolo di percorsi con più tappe intermedie, distanze e tempi di percorrenza (generazione della lista descrittiva del percorso e dei dati necessari alla rappresentazione del percorso su mappa). Permette inoltre di calcolare i percorsi per diversi tipologie di veicolo tenendo conto di pedaggi autostradali.
4. **xSequence:** ottimizzazione di una sequenza di tappe nel rispetto di vincoli operativi quali finestre orarie e molti altri parametri propri del mondo del trasporto e della logistica (carico/scarico, quantità, categorie di veicoli, ...). La differenza principale rispetto a xRoute sta nel fatto che viene considerata una sola sequenza, non tutti i percorsi contemporaneamente
5. **xDima:** calcolo ottimizzato di matrici di distanza (tempi e distanze).
6. **xCluster:** utile per la creazione di gruppi omogenei di punti in funzione di parametri geografici e altri criteri.

7. **xTour**: ottimizzazione dei giri in funzione di parametri quali la capacità dei veicoli, le finestre temporali di aperture e chiusura, etc. Gli ordini vengono suddivisi in giri ottimizzati nel rispetto dei vincoli riducendo i chilometri percorsi, il tempo e il numero di veicoli necessari. La differenza principale rispetto a xCluster sta nel fatto che xTour non si occupa di raggruppare i clienti in base alle consegne periodiche, mentre la differenza rispetto a xRoute è rappresentata dalla strategia di ottimizzazione, in particolare xTour tiene conto anche delle finestre di consegna.

1.2.13 MEFISTO

MEFISTO (Metaheuristics Framework for Information Systems in Transport Optimisation) [6] è, come dice il nome, un framework per l'implementazione di metaeuristiche, disegnato dai suoi autori ed ora sfruttato da PTV per le sue soluzioni commerciali.

Lo sviluppo di MEFISTO è dovuto al fatto che fino a poco tempo fa i requisiti per un componente business in ambito VRP erano:

- la correttezza del modello, che doveva essere più vicino alla realtà possibile
- il tempo di calcolo, che doveva essere il minimo possibile o comunque un ammontare ragionevole

Questo aveva portato a vincoli più stringenti come distanze asimmetriche, finestre temporali diverse per ogni utente, tempi di attesa massimi, eterogeneità della flotta, vincoli di precedenza, ecc, mentre i tempi di calcolo venivano ridotti affidandosi ad euristiche particolarmente rapide e ad una successiva fase di post-ottimizzazione (come succedeva nel caso di GENIUS, vedi 1.2.9).

Questa classe di problemi, in letteratura conosciuta come 'problemi "ricchi" di instradamento dei veicoli' (nome originale: "rich vehicle routing problems"), ha avuto particolare fortuna negli anni passati.

Recentemente però ha cominciato ad emergere un ulteriore requisito, ovvero la qualità della soluzione stessa, richiesta che si aggiungeva ai precedenti vincoli posti. Contemporaneamente l'avanzamento tecnologico dell'hardware aveva permesso di ottenere dei tempi di calcolo sufficientemente brevi a fronte di una buona qualità della soluzione. Questi fattori portarono quindi ad un cambio di atteggiamento verso il problema, e permesso ad approcci più sofisticati, come le metaeuristiche, di poter essere usate su ampia scala, e non solo per soddisfare i bisogni del singolo cliente.

Di metaeuristiche però non ve n'era una sola, e la ricerca in questo campo intanto continuava inesorabilmente. Per mostrare un comportamento trasparente rispetto alla particolare metaeuristica utilizzata e mantenere compatibilità sulle interfacce, era necessario sviluppare una framework più generale. Da questa idea nacque MEFISTO.

L'intero framework è scritto in C++ e si compone di un'architettura suddivisa in 3 livelli:

1. il primo livello è sostanzialmente indipendente dall'applicazione e dalla metaeuristica implementata. Fornisce soltanto le funzioni principali e le strutture dati che servono a rappresentare le entità fondamentali di qualsiasi metaeuristica. Fanno parte di questo livello le classi che rappresentano

il generatore di mosse, le mosse stesse, lo spazio delle soluzioni e la ricerca locale

2. il secondo livello contiene tutte le classi che servono alla specifica metaeuristica, ed ereditano le funzionalità dalle classi del primo livello
3. il terzo livello è fortemente dipendente dall'applicazione utilizzata e dal tipo di problema trattato. Ad esempio, per quanto riguarda l'ambito VRP, questo livello dovrà contenere le classi rappresentanti le mosse per scambiare nodi ed archi

Nell'articolo originale vengono inoltre riportati i risultati sperimentali ottenuti in un caso reale e utilizzando un'estensione di Granular Tabu Search, a cui sono state aggiunte anche mosse di swap e A-B.

Dalle informazioni che ci sono state fornite da TPS e PTV questa metaeuristica doveva essere molto simile a quella utilizzata da PTV Intertour Standard e dagli xServer.

1.3 Vehicle Routing Problem

Il problema dell'instradamento dei veicoli (in inglese "Vehicle Routing Problem", o VRP) riguarda la determinazione di un insieme ottimale di gite che dovranno essere utilizzati da una flotta di veicoli per servire un dato insieme di clienti. Come è possibile intuire data la sua similitudine con il problema del commesso viaggiatore, la sua complessità è elevata, appartiene infatti all'insieme dei problemi NP-hard.

Come problema combinatorio e di ottimizzazione è un classico nella letteratura della Ricerca Operativa: sono passati ormai più di 50 anni da quando Dantzig e Ramser introdussero il problema nel 1959.

Nella letteratura vi è una predisposizione a indicare questo problema con il suo nome od il suo acronimo inglese. Tale convenzione verrà d'ora in poi rispettata anche in questo elaborato.

Il "Vehicle Routing Problem" è un problema importante per il trasporto, la logistica e la distribuzione [4]. Lo scopo implicito è quello di minimizzare il costo per la distribuzione delle merci, quindi è chiaro che vi è anche molto interesse industriale, non solo di ricerca, su questo problema.

A partire dall'articolo di Dantiz e Ramster e successivamente quello di Clarke e Wright (nel 1964), furono quindi concepiti centinaia di modelli e algoritmi furono proposti per trovare una soluzione il più possibile ottima, ma data l'elevata complessità del problema stesso finora sono state prodotte solo euristiche che producono approssimazioni più o meno precise in un tempo ragionevole.

La versione classica del VRP prevede che l'intera flotta parta da un unico deposito, visiti una serie di punti di consegna, e poi ritorni al deposito di partenza. Inoltre tutte le richieste dei clienti sono deterministiche, conosciute in anticipo, e non possono essere suddivise tra i mezzi. Esistono però alcune variazioni, più o meno note, di grande interesse pratico:

- **Capacitated VRP (CVRP):** in questa versione i mezzi che compongono la flotta hanno una capacità limitata ma uguale per tutti, e che quindi funge da vincolo nel calcolo della soluzione
- **Multi-Capacitated VRP (MCVRP):** come nel CVRP i mezzi hanno una capacità limitata, ma le capacità dei singoli veicoli possono essere diverse tra loro
- **VRP with Time Window (VRPTW):** valgono tutti vincoli descritti per il CVRP, e si aggiunge un vincolo sull'intervallo di tempo in cui la merce deve essere consegnata. Ogni cliente espone un intervallo di tempo in cui è "aperto", e quindi ricettivo alla consegna della merce, chiamata finestra di consegna. Beni consegnati al di fuori della finestra di consegna non vengono raccolti e contano come consegna mancata. Il problema quindi si arricchisce di complessità perchè non è più importante coprire solamente tutti i clienti con un dispendio minimo, ma bisogna anche assicurarsi di consegnare la merce in tempo, in modo da minimizzare l'ammontare di merce non consegnata.

Per ognuna di queste è prevista sia la versione "simmetrica", ovvero dove gli archi hanno lo stesso costo sia in un verso che nell'altro, che quella "asimmetrica", dove invece il costo dell'arco dipende anche dal verso in cui lo si percorre. In questo

elaborato, a meno che non specificato esplicitamente, si intendono sempre le versioni asimmetriche di tali problemi, in quanto le versioni simmetriche non sono che un caso particolare di quelle asimmetriche.

Esistono anche variazioni che contemplano l'utilizzo di più depositi invece di averne uno solo centralizzato, ma non saranno descritte in questo elaborato.

1.4 Algoritmo genetico

Un algoritmo genetico è un'euristica di ricerca che cerca di riprodurre il processo di evoluzione naturale. Questa euristica è generalmente usata per generare utili soluzioni nei problemi di ottimizzazione e ricerca. Gli algoritmi genetici alla classe più generale dei problemi evolutivisti, i quali generano soluzioni a problemi di ottimizzazione usando tecniche ispirate sempre all'evoluzione naturale, quali ereditarietà, mutazione, selezione e crossover.

1.4.1 Principio generale

In un algoritmo genetico [17], una popolazione di stringhe (chiamate cromosomi, geni o genotipi del genoma) che rappresentano le soluzioni candidate (chiamate individui o fenotipi) in un problema di ottimizzazione, evolvono verso soluzioni migliori.

Tradizionalmente, le soluzioni sono rappresentate come stringhe binarie, ma sono possibili anche altre rappresentazioni ovviamente. Gli algoritmi genetici sono impiegati in molti campi quali (bio)informatica, ingegneria, economia, chimica, matematica, fisica, ecc.

Un tipico algoritmo genetico richiede:

1. un modo per rappresentare mediante geni il dominio delle soluzioni
2. una funzione detta "di idoneità", per valutare il dominio delle soluzioni

La funzione "di idoneità" viene generalmente utilizzata per favorire le soluzioni "idonee" o comunque buone rispetto al problema, e svantaggiare le altre.

Pseudocodice di un semplice algoritmo genetico generazionale:

1. Scegli la popolazione iniziale di individui
2. Valuta l'idoneità di ogni individuo
3. Ripeti fino a che il criterio di terminazione non è raggiunto: (time out, idoneità minima raggiunta, ecc.)
 - (a) scegli gli individui più idonei per la riproduzione
 - (b) dai origine ai nuovi individui attraverso il crossover dei geni e la mutazione
 - (c) Valuta l'idoneità di ogni nuovo individuo
 - (d) rimpiazza gli individui meno idonei con i nuovi

1.4.2 Inizializzazione

Inizialmente vengono generate tanti corredi genetici quanti individui della popolazione iniziale. queste rappresentano le soluzioni iniziali. La dimensione della popolazione iniziale dipende dal problema in questione, ma di solito contiene centinaia o migliaia di individui.

Sempre parlando in linea generale, questa popolazione viene generata casualmente, cercando di coprire l'intero spettro della soluzioni possibili. Oppure si può anche utilizzare particolari intervalli di valori in cui si pensa possano annidarsi le soluzioni migliori.

1.4.3 Selezione

Durante ogni iterazione successiva, una porzione della popolazione esistente viene selezionata per dare vita ad una nuova generazione.

Le soluzioni individuali vengono selezionate attraverso un processo basato sull'idoneità del singolo individuo, dove le soluzioni con un più alto punteggio di idoneità hanno maggiore probabilità di essere selezionate.

Esistono più strategie di scelta, ognuna con i suoi pro e contro:

1. **metodo della roulette:** con questo metodo ogni individuo ha una idoneità f_i ed una probabilità di essere scelto pari a $p_i = \frac{f_i}{\sum_{j=1}^N f_j}$, dove N è il numero degli individui scelti. Questo permette di ottenere una selezione abbastanza uniforme e rappresentativa rispetto alla effettiva idoneità degli individui.
2. **campionamento universale stocastico:** simile al metodo della roulette, ma con migliori probabilità matematiche dal punto di vista della previsione
3. **metodo del torneo:** richiede la simulazione di diversi "tornei" tra una ristretta cerchia di individui scelti a caso tra la popolazione. Il vincitore di ogni torneo, ovvero quello più idoneo, viene scelto per la riproduzione. La pressione selettiva indotta da questo metodo può essere moderata variando la dimensione degli individui coinvolti. Più il numero degli individui è grande, minore è la probabilità che gli individui deboli vengano selezionati.
4. **metodo della troncatura:** semplicissimo, semplicemente seleziona i migliori K individui sulla base dell'idoneità e li fa riprodurre tra loro.

1.4.4 Riproduzione

Nel passo successivo viene creata una seconda generazione di individui (o soluzioni) mediante una simulazione della riproduzione sessuale: il crossover.

Per ogni nuova soluzione che si vuole produrre, una coppia di soluzioni "genitrici" viene selezionata. Producendo un "bambino" attraverso le operazioni che spiegheremo a breve, viene creata una nuova soluzione che ha molto in comune con i suoi "genitori".

Lo scopo ultimo è quello di far progredire le soluzioni verso una nuova generazione, potenzialmente "migliore" di quella precedente.

Esistono diversi meccanismi di crossover, alcuni tra i più famosi sono:

1. Crossover puntuale: viene selezionato un indice particolare all'interno delle due stringhe che rappresentano i corredi genetici dei "genitori", e quindi si effettua lo scambio dei due segmenti
2. Crossover a doppio punto: simile al crossover puntuale, ma con 2 punti di scambio
3. "Cut and Splice": simile al crossover puntuale, ma i punti di scambio non hanno lo stesso indice. Atipico rispetto ai precedenti poiché può produrre "prole" con stringhe di lunghezza diversa rispetto ai "genitori"
4. Crossover uniforme: si seleziona una probabilità con cui due bit delle due stringhe si scambieranno (tipicamente 0.5) e si lancia una monetina per ogni bit della stringa

All'interno di questo processo la mutazione serve unicamente ad impedire che le soluzioni si adagino su un "minimo locale": se la mutazione è vantaggiosa infatti, l'intero gruppo tende a compiere un balzo in avanti da un punto di vista evolutivo, altrimenti viene semplicemente scartata senza alterare il risultato finale.

Ovviamente esistono anche meccanismi diversi dalla mutazione e dal crossover, ma non saranno affrontati in quest'elaborato.

Capitolo 2

Architettura proposta

Il problema posto da Primafrust, che riguardava il carico, scarico e la definizione delle gite per la flotta degli automezzi era facilmente riconducibile ad una particolare istanza di VRP.

Questo tipo di problemi sono tutti NP-hard, tuttavia sono già disponibili diverse soluzioni commerciali (basate su euristiche) che permettono di ottenere soluzioni molto buone, se non ottime.

Quando il sottoscritto ha cominciato ad occuparsi di questo progetto lo studio di fattibilità non era nella sua fase iniziale, per cui alcune scelte erano già state fatte, in quanto si era già arrivati ad una bbozza generale del progetto, e visto un paio di alternative possibili. Si è tuttavia deciso di riportare comunque tutti i dati, sia quelli precedenti al mio arrivo sia quelli successivi per dare un'idea più articolata del contesto di lavoro. Ogni sezione deve essere vista come una fase dello studio di fattibilità, ed alla fine di ogni sezione viene riportato quello che è stato il risultato dell'incontro finale con gli stakeholder.

Tutte le scelte precedenti al mio arrivo verranno presentate nella prima sezione di questo capitolo, e successivamente si passerà al problema vero e proprio: la scelta tra un'architettura "vecchio stampo", con l'utilizzo di software stand-alone, oppure l'adozione di una più moderna architettura Web service ma un attimo più complessa da progettare e realizzare.

2.1 Progetto di massima della soluzione

Precedentemente alla proposta di Wincor Nixdorf, presso Primafrust la gestione della flotta (ovvero carico e gite) era affidata ad un dipendente dell'azienda, il quale essendo un ex-camionista ed avendo una larga esperienza della rete stradale italiana poteva senza dubbio soddisfare le esigenze dell'azienda.

Ma questa gestione portava diversi problemi:

1. Il futuro di quella parte dell'azienda era accentrato tutto nelle mani di un solo uomo
2. La gestione manuale non dava nessuna garanzia di portare a soluzioni ottime o quantomeno buone, benchè si fossero presi diversi accorgimenti e vi fosse buona volontà da parte di tutti

3. Questa gestione non conveniva nemmeno al suddetto dipendente, il quale a caus del suo ruolo poteva prendersi pochissime ferie

Si cercava dunque una soluzione che permettesse di automatizzare l'intero processo, o almeno ua sua parte, in modo da alleviare gli svantaggi dovuti alla situazione attuale.

2.1.1 Requisiti della soluzione

La soluzione proposta, per risultare accettabile da parte di Primafrost, doveva:

1. permettere di automatizzare, in tutto o in parte, la generazione delle gite, una volta forniti ovviamente i dati necessari (mezzi, richieste, ecc.)
2. offrire garanzie di minimizzazione dei costi maggiori rispetto alla normale gestione manuale
3. permettere di modificare le gite generate, possibilmente in maniera semplice e veloce, garantendo così un maggior controllo sull'output prodotto
4. offrire garanzie di rispettare le norme sindacali vigenti per gli autisti dei camion, tra cui è contemplata anche ilrispetto dei tempi di riposo
5. essere pronta, almeno in una forma prototipale, in un tempo relativamente breve

Per essere accettabile da parte di Wincor la soluzione doveva:

1. rispettare i vincoli posti dal cliente
2. permettere una gestione dei dati integrata con l'ERP aziendale, Me.R.Sy

Requisiti impliciti da parte del cliente potevano essere sulla possibile interfaccia del prodotto, che doveva essere user-friendly e non intralciante dal punto di vista operativo.

Da parte di Wicor Nixdorf un requisito implicito poteva essere la necessità di uno strumento o applicativo che non necessitasse più di tanto un continuo intervento da parte dei suoi dipendenti.

2.1.2 Modalità di realizzazione

Realizzazione o acquisizione (con esame e valutazione delle eventuali alternative)

Come già spiegato nella sezione 1.1.2.2, Wincor Nixdorf non ha un approccio simile a quello delle software house, quindi di sicuro la scelta strategica era di puntare su prodotti già realizzati, e customizzarli per il cliente, piuttosto che svilupparne altri ex-novo.

Per Primafrost in particolare era stata già realizzata un'applicazione per la gestione dei carichi dei mezzi e per la visualizzazione delle gite (tra l'altro già integrata con Me.R.Sy.). Sembrava quindi logico cercare di integrare il tutto con un'applicazione/servizio che calcolasse in automatico le gite in base a i carichi. La visualizzazione delle gite veniva fatta con una versione di "PTV Maps & Guide".

Era quindi logico cercare una soluzione applicativa sempre progettata da PTV, sia perchè poteva risultare più semplice da integrare sia perchè PTV al momento è una delle aziende leader nel campo.

2.1.3 Valutazione delle alternative

Le 3 alternative possibili erano le seguenti:

1. ottimizzare le gite usando gli XServer
2. ottimizzare le gite usando PTV Intertour
3. lasciare tutto com'era (non era una vera alternativa, ma era piuttosto l'ultima spiaggia)

L'alternativa era dunque tecnologica, in quanto bisognava solo decidere se l'ottimizzazione delle gite doveva essere fatta automaticamente piuttosto che manualmente, e se era meglio utilizzare Web Service o un approccio applicativo classico.

2.2 Il progetto proposto

Come visto nella sezione precedente, molti aspetti partivano già inquadrati, e tuttavia non era chiaro quale fosse l'alternativa vincente.

Ci si è quindi informati prima sui processi del cliente coinvolti, e si è cercato di sconvolgerli il meno possibile, come spiegato nella prima sottosezione.

Per alcuni problemi secondari, di cui parliamo a breve, sembrava che la componente umana fosse imprescindibile in alcuni casi. Inoltre non era chiaro cosa un'architettura orientata ai servizi aggiungesse all'architettura, per cui si era partiti facendo test utilizzando l'applicazione stand-alone. Chiaro non era neppure quanto tempo ci volesse ad eseguire una corretta configurazione dello strumento, e se questa configurazione potesse essere unica nonostante la variabilità degli scenari.

Nel mio lavoro non ero solo, anzi la mia mansione era di affiancare un giovane impiegato (Primo Tilli) che era stato incaricato di occuparsi del problema. Tutto il lavoro svolto da me e da Primo si trova nelle sottosezioni successive.

2.2.1 Processi del cliente

Sicuramente si può pensare che esista una documentazione ufficiale in cui sono descritti i processi di Primafrust, anche se in modo non necessariamente formale, tuttavia comprensibilmente quella documentazione non ci è stata fornita.

La mia conoscenza dei processi di Primafrust deriva esclusivamente dal bagaglio di conoscenza posseduto da Wincor Nixdorf, e da quanto è emerso negli incontri con il cliente, quindi la visione che ne deriva potrebbe essere certamente limitata, ma a mio parere è abbastanza completa per permettere uno sguardo generale alla metodologia di lavoro.

Il processo che era interessante per noi era il processo di gestione delle consegne, e questo poteva essere scomposto come segue:

1. Sotto-processo di raccolta dati dei clienti
 - ricezione degli ordini
 - eventuale modifica delle finestre di consegna

2. sotto-processo di preparazione della flotta

- (a) creazione delle gite
- (b) eventuale correzione dei carichi dei veicoli
- (c) assegnazione degli autisti
- (d) carico veicoli

3. Sotto-processo di dispiegamento delle consegne

- tracciamento dei mezzi in marcia

Come si può notare alcuni di questi sotto-processi ho deciso di suddividerli usando elenchi puntati invece che numerati. Questo deriva dal fatto che non so con certezza in che ordine vengano svolte le attività.

Per quanto conosco infatti Primafrost stabilisce con i punti di consegna delle finestre di servizio, entro le quali la merce deve essere consegnata perchè è presente il personale addetto allo scarico. Consegnare al di fuori di queste finestre risulta quindi in uno spreco di tempo e denaro sia per l'azienda che per il punto di consegna, quindi risultano essere un vincolo operativo.

Periodicamente l'azienda quindi raccoglie gli ordini dai suoi clienti/punti di consegna e da questi dati parte nella preparazione della flotta.

Le gite vengono create su base giornaliera, e chiaramente non è necessario che ogni cliente abbia ordini nuovi ogni giorno, quindi i possibili scenari che ne derivano sono abbastanza dinamici.

Come già accennato in altre sezioni, il processo di creazione delle gite viene svolto prevalentemente a mano da un dipendente (un ex-camionista, per la precisione) che ha grande esperienza delle strade italiane, e quindi può fare previsioni sulle situazioni contingenti che si potrebbero presentare agli autisti in determinate vie ed in determinati momenti della giornata.

Una volta trovato il percorso, è necessario calcolare una stima dei chilometri da percorrere e tempo potenziale impiego di tempo. Almeno questa parte non era eseguita in maniera completamente manuale, ma mediante il software 'Maps&Guide' si riusciva ad ottenere stime abbastanza precise.

Fatte le gite e apportate eventuali correzioni, la flotta ed i carichi sui mezzi vengono preparati, ed una volta partiti i mezzi vengono tracciati temporalmente mediante appositi strumenti, in modo da assicurarsi che gli autisti rispettino i tempi di lavoro e di riposo. Alcuni di essi in particolare sono già tracciati anche mediante GPS, quindi si possono ottenere informazioni anche sulla gita realmente percorsa, anche se tuttavia sono una ristretta minoranza.

2.2.2 Problemi secondari

Un vincolo operativo piuttosto ovvio è rappresentato dalla capacità dei mezzi di trasporto. Le eccezioni per quanto riguarda questo limite non possono che essere gestite in maniera manuale, con conseguente rischio di perdita di ottimalità della soluzione.

Con la vecchia suite capitava ogni tanto una incorretta gestione dei carichi dei camion.

La componenete umana in questo caso si rivelava indispensabile: spesso era necessario modificare le gite già calcolate per far tornare i conti, ed un uomo con una discreta esperienza ed abilità poteva individuare in pochissimo tempo le modifiche che servivano allo scopo senza aumentare i mezzi e senza sconvolgere più di tanto la vecchia pianificazione.

Un'altro problema che persino con i mezzi di oggi non viene trattato nelle applicazioni commerciali è l'eccesso di traffico che alcune strade riscontrano periodicamente durante la giornata, il quale può creare diversi disagi agli autisti.

Ancora una volta un essere umano con un po' di esperienza può riuscire invece a prevedere il problema, e addirittura sa indicare se il problema affligge uno solo dei versi di marcia, e può quindi avvalersene nel tentativo di ottimizzare le gite.

Per quest'ultimo problema PTV sta compiendo degli studi e dei rilevamenti statistici, ma è chiaro che ancora per un po' di tempo l'essere umano è destinato a rimanere indispensabile.

Come se non bastasse le tipologie di merce caricata incidono sul tipo di veicolo da utilizzare, e da quest'ultimo dipende quanta merce di un certo tipo può essere caricata. Ad esempio non è possibile caricare assieme articoli di ortofrutta e salumi, poichè non sarebbe a norma rispetto alle norme vigenti. La merce ortofrutticola infatti ha una certa carica batterica e micotica, che rischia di contaminare il resto della merce, e si rende necessario l'utilizzo di una paratia per dividere i tipi di merce. La paratia è possibile montarla se il mezzo possiede almeno 2 ingressi al vano merci, e quindi questo limita la scelta all'interno della flotta.

Questo genere di problemi di carattere alquanto complesso è ancora risolvibile in maniera semi-automatica, ovvero l'operatore è in grado di indicare una serie di vincoli che chiameremo "qualifiche" sulle merci, i veicoli e persino gli autisti, nel caso si necessitasse di abilitazioni particolari, e lasciare che un software di un qualche tipo risolva il problema delle corrispondenze, ma anche in questo caso la costruzione dei vincoli non può che essere fatta da una persona che conosce la situazione contingente al problema.

2.2.3 Training su PTV Intertour

Per prima cosa si è voluto provare ad usare PTV Intertour, in modo da non complicare da subito la possibile architettura finale.

Per utilizzare l'applicazione è necessario di un'addestramento veramente minimo (fornitori dai dipendenti di TPS), gran parte dei comandi dell'interfaccia sono abbastanza intuitivi. Giusto per avere una panoramica diciamo che Intertour accetta in input file dati con formato ASCII, XML, CSV oppure anche da tabelle di frontiera in formato SQL SERVER o ORACLE [15].

I dati necessari all'applicazione riguardano depositi (in cui sono inclusi anche gli ordini), veicoli ed autisti. Questi dati vengono chiamati "master data", e vengono memorizzati in locale su filesystem, e successivamente processate dall'applicazione, la quale ricava anche i dati relativi alla geocodifica degli indirizzi.

Da qui PTV Intertour ricava quella che si chiama "matrice delle distanze", ovvero ad ogni coppia di destinazioni associa la distanza del più breve percorso che passa tra le due. questa matrice è utilizzata dall'euristica per trovare la corretta soluzione.

Nei *master data* è possibile indicare quelli che vengono chiamati dall'applicazione 'giri base', ovvero gite precalcolate dall'utente esterno. PTV Intertour permette infatti sia di calcolare le gite ex-novo, sia di una funzionalità per cercare di utilizzare i 'giri base' come punto di partenza nella ricerca di una soluzione ottima.

L'ultima funzionalità che ci hanno illustrato era l'utilizzo di quella che in Ricerca Operativa viene chiamata 'post-ottimizzazione', ovvero un possibile raffinamento ulteriore della soluzione trovata, basata sul componente MEFISTO (vedi 1.2.13).

Per un'interfacciamento più user-friendly o per semplice integrazione con l'ERP aziendale è possibile inoltre utilizzare un altro applicativo, IT Manager, che permette di caricare facilmente i dati e memorizza tutto in un database in formato SQL SERVER.

L'interfaccia di IT Manager è poco più che minimale, ma contiene tutte le funzionalità necessarie: è possibile modificare i dati, mandare a Intertour solo un sottoinsieme ben preciso, ecc. Inoltre è permette di verificare le coordinate di georeferenziazione disegnando il punto su una mappa.

2.2.4 Configurazione di PTV Intertour

La spiegazione che ci era stata data su questo prodotto era davvero dettagliata, ma tuttavia tutti i dettagli che ci erano stati forniti erano utili solo come aiuto durante lo svolgimento dei casi d'uso più o meno tipici, mentre il funzionamento interno del programma, come ci si poteva aspettare, rimaneva per lo più oscuro.

In questa fase l'attività principale è stata quella di eseguire una attenta esplorazione dell'interfaccia alla ricerca di parametri che ci permettessero di migliorare i risultati. A questa era affiancata una attività di validazione misurando come si comportava in alcuni casi reali.

2.2.4.1 Parametri dell'euristica

Ben presto ci siamo resi conto che il controllo sui risultati poteva essere anche molto fine, anche se abbiamo riscontrato qualche potenziale pecca. Oltre a diversi tool per la visualizzazione dei risultati infatti, l'applicazione ci forniva funzionalità:

- per cambiare alcune proprietà relative ai mezzi (velocità media, qualifiche, costi per fascia oraria/kilometrica, ecc.)
- per aggiungere/modificare alcuni vincoli per quanto riguardava la soluzione (tempo massimo che un mezzo poteva attendere presso un punto di consegna in attesa che aprisse, costo relativo alla singola unità di tempo, finestre di consegna, ecc.)
- per decidere se adottare i "giri base" come punto di riferimento o meno (era possibile ad esempio decidere di tenere fissi i clienti che dovevano essere visitati nelle gite, ma fare in modo che fosse l'applicativo a decidere qual'era l'ordine che minimizzava i costi)
- per tenere traccia dei vincoli che erano stati eventualmente violati dalla soluzione, mediante una piccola console.

Ognuna di queste funzionalità ci aiutava nella creazione di uno scenario simulato che cercavamo di rendere il più possibile vicino alla realtà. Più lo scenario che andavamo a creare si avvicinava allo scenario del nostro problema, più i risultati che ottenevamo da Intertour sembravano affidabili, o quantomeno convincenti.

Un dettaglio che si rivelato importante successivamente stava nel fatto che i mezzi non erano visti come singole unità, ma come classi di veicoli. Gli attributi relativi al mezzo non appartenivano al singolo mezzo, ma all'intera classe. Questa particolarità ci è stato spiegato che era stata introdotta per motivi prestazionali: più la flotta era omogenea, più i calcoli si semplificavano, ed una simile rappresentazione forzava a distinguere solo ciò che era chiaramente differente.

2.2.4.2 Qualifiche

Per ogni mezzo era possibile definire arbitrariamente dei flag che rappresentassero le “qualifiche del mezzo”, che ci permettevano di risolvere problematiche complesse come quella dell'ortofrutta vista in 2.2.3.

Il meccanismo in sé era semplice, ed il sistema, dopo la prima volta era stato impostato, era in grado di memorizzare le qualifiche attivate in modo da non perderle tra una sessione di utilizzo e l'altra.

Era necessario prima di tutto attivare i flag per i mezzi che si sapeva possedessero certe caratteristiche e poi, ogni volta che un'ordine aveva certe caratteristiche, si attivava il flag corrispondente anche per il cliente (importante notare che la qualifica veniva vista come un'attributo del cliente, e non dei suoi ordini). Dopodiché era l'applicazione a tenere conto delle qualifiche e cercare di attribuire il mezzo giusto durante il calcolo della soluzione. Se il vincolo della qualifica non veniva rispettato dalla soluzione trovata, nella piccola console appariva quale gita aveva violato il vicolo e su quale punto di consegna. Era anche possibile automatizzare in parte anche le attivazioni delle qualifiche definendo alcune macro, ma nel nostro caso ne abbiamo fatto a meno perché non ne facevamo un uso così esteso.

2.2.4.3 Visualizzazione dei risultati

I punti di consegna appaiono rappresentati come dei pallini nella mappa che mostra l'applicazione, collegati da linee continue che sono le gite. Le gite si dipartono, come è logico, dal magazzino di Mantova, che appare come un triangolino. Come triangolini appaiono anche eventuali *transit point*, punti particolari che si comportano sia come normali destinazioni (un certo quantitativo di merce deve esservi consegnato) sia come magazzini (la merce, una volta arrivata, viene smistata utilizzando altri corrieri).

Questa rappresentazione, benché semplice ed abbastanza intuitiva, nasconde in sé quello che potrebbe essere considerato un errore di usabilità: le linee che congiungono i vari punti di consegna non ricalcano minimamente quello che è il percorso reale, sono semplicemente linee che congiungono coppie di punti nel modo più diretto possibile.

Questo significa, come è successo in caso reale, che se due punti si trovano ai due estremi di un lago e fanno parte della stessa gita vedremo una linea congiungerli e passare **sopra il lago**. Ad una prima vista questa rappresentazione potrebbe sembrare fuorviante oppure anche segnalare un errore nelle

impostazioni, ed è quello che è capitato. Invece, tenendo conto di quanto detto prima, è chiaro che non c'è niente di strano.

Questa rappresentazione potrebbe derivare anche da limiti pratici, in quanto non sappiamo se nella matrice delle distanze vengono memorizzate solo le distanze tra le destinazioni o anche i percorsi che le collegano. In ogni caso non è un difetto fatale, anzi per fortuna la mappa risulta molto utile anche in presenza di questo difetto.

2.2.4.4 Velocità dei mezzi

I dipendenti di TPS ci hanno subito avvertito di una peculiarità di questo prodotto: le zone a ZTL non sono correttamente gestite. Questo significa che se si fosse presentato ad esempio il caso di un punto di consegna in centro a Milano l'applicazione ci avrebbe segnalato che il punto era raggiungibile, ma non avrebbe segnalato che era necessario nell'ultimo tratto utilizzare un mezzo leggero o con autorizzazione. Bisognava quindi stare un attimo attenti ai risultati che lo strumento mostrava alla fine del calcolo.

A mio parere questo difetto sembra come al solito legato al fatto che nella matrice delle distanze non vengano salvati altri dati sul percorso più breve.

Per ovviare al problema, e cercare di far quadrare il più possibile i conti soprattutto per i tempi di viaggio, si doveva intervenire a mano, con 3 approcci possibili:

1. **osservare la gita, calcolare circa il punto in cui il mezzo entrava nella zona ZTL, mettere in quel punto un transit point, e impostare delle qualifiche sul vero punto di consegna in modo che fosse selezionato un mezzo leggero o autorizzato.** Questo era decisamente l'approccio più corretto, ma molto difficile e dispendioso in termini di tempo. Inoltre ricordiamo che era difficile stimare il punto preciso poichè la mappa non mostrava il vero percorso del mezzo, ma soltanto una linea che congiungeva 2 punti.
2. **stimare più o meno il punto dove il mezzo entrava nella zona ZTL, e stimare la velocità media del mezzo leggero, e modificare la velocità del mezzo pesante in modo che avesse un valore che era una specie di media pesata tra i due. Questo approccio risultava meno corretto, ma sembrava più veloce.** In realtà si perdeva comunque un po' di tempo, poichè i mezzi erano suddivisi in classi, e la velocità media era un'attributo della classe, non del veicolo, per cui sarebbe stato necessario isolare il mezzo scelto e metterlo in una classe a parte.
3. **era possibile modificare gli attributi relativi alla strada in modo da impostare un determinata velocità massima (una specie di limite di velocità).** Questo metodo, molto simile al secondo, in realtà risulterebbe molto più semplice perchè tutti i relativi calcoli verrebbero compiuti interamente dallo strumento, e di sicuro anche relativamente veloce. Tuttavia ancora una volta usando solo la mappa non si poteva capire da che via specifica il mezzo sarebbe passato, quindi era chiaro che si poteva utilizzare questa tecnica solo se ad esempio utilizzavamo Maps&Guide per visualizzare il percorso.

La nostra fortuna era che situazioni come quella sopra descritta non si presentavano, comunque abbiamo deciso di prendere nota del problema. Il vero difetto dal mio punto di vista non consisteva nel fatto che PTV Intertour non era in grado di risolvere agilmente il problema, ma piuttosto il fatto che non potesse nemmeno segnalare all'operatore che era necessario controllare i risultati.

2.2.4.5 Validazione dei risultati

Come test per la configurazione adottata abbiamo utilizzato dei dati provenienti da Primafrost e rilevati in giorno specifico, in modo da fare una prova con uno scenario reale, con tanto di "giri base" (ovvero le gite originali tracciate manualmente).

Sono state fatte più prove, provando a far variare il numero di punti di consegna e la loro disposizione, e controllando ogni volta se i tempi di riposo per i camionisti rispettavano le norme vigenti.

Ciò che si è potuto osservare è che, utilizzando le gite originali come punto di partenza si otteneva comunque un risparmio, misurabile attorno all'1-2%, che era nulla in confronto al caso in cui le gite venivano ricalcolate da capo. In quest'ultimo caso si poteva anche raggiungere il 5% lasciando agire per un po' la post-ottimizzazione.

Come già detto precedentemente in 2.1, queste percentuali possono apparire irrisorie, ma non lo sono affatto, poichè i fattori di costo per questo tipo di attività si aggirano complessivamente sull'ordine dei milioni di euro, e quindi si sta parlando di una discreta somma comunque.

Ciò che abbiamo inoltre rilevato sono le prestazioni del componente applicativo: in al massimo una decina di secondi un problema con circa 200 punti di consegna ed una ventina di mezzi era stato completamente risolto, senza violazioni di vincoli e migliorando la soluzione trovata manualmente del 3% circa (tra i vincoli contavano anche i tempi di riposo).

La post-ottimizzazione impiegava ben di più: in teoria la si poteva lasciare andare quanto si voleva, ma sperimentalmente si era notato che i miglioramenti più notevoli si avevano già entro i primi 2 minuti. Passato questo limite, il tempo tra un miglioramento ed il successivo tendeva ad allungarsi troppo, per cui si è deciso di impostare come condizione di terminazione il fatto che fossero passati 120 secondi. Pur usando un tempo così ristretto, si notava che in media la post-ottimizzazione migliorava la soluzione trovata dall'euristica dell'1-2% al massimo.

2.2.5 Comportamento dello strumento in caso di scenari dinamici

Prima di comunicare ufficialmente al cliente i dati che avevamo raccolto, era necessario fare anche delle prove con dati che provenissero da giornate diverse, in modo da vedere come lo strumento si comportava di fronte a scenari dinamici.

Per nostra fortuna il cliente era molto ben disposto nei nostri confronti, ed erano già disponibili i dati di alcune giornate, già riversati all'interno dell'ERP aziendale.

2.2.5.1 Problemi di formato sui dati in input

In questa fase abbiamo avuto qualche problema con il formato dei dati in input per Intertour. Me.R.Sy. infatti era in grado di restituirci tutti i dati che ci servivano in formato CSV, ma IT Manager, che noi usavamo per questa procedura, voleva che le colonne fossero in un certo ordine, mentre Intertour voleva che le coordinate per la georeferenziazione fossero nel formato Mercatore.

In sé e per sé questo problema era assai stupido, e forse si poteva risolvere anche solo con qualche macro di Microsoft Excel. Questa infatti è stata la prima strada che abbiamo seguito, ma ben presto ci siamo resi conto che i dati che provenivano dall'ERP non riguardavano solo le giornate che servivano a noi. Era dunque necessario filtrare i record ottenuti, e poi applicare tutte le trasformazioni necessarie. Con le macro di Excel era possibile eseguire le varie operazioni singolarmente, ma visto che avevamo più tabelle (quella dei mezzi e quella degli ordini dei clienti), la cosa si faceva più difficile, perché da una parte dovevamo riuscire ad escludere più dati possibile, mentre dall'altra non potevamo permetterci di far saltare i controlli dei riferimenti incrociati, per cui dovevamo eliminare solo lo stretto necessario. Per farla breve avevamo veramente bisogno di un'operatore che funzionasse più o meno come il JOIN di SQL per eseguire tutta la procedura in modo da non fare danni.

Così abbiamo provato ad usare le tabelle Excel come input per altri programmi che ci permettessero di utilizzare qualche operazione simile ai DBMS. Dato che l'ambiente in cui ci trovavamo a lavorare aveva un spiccata dominanza di sistemi e applicazioni Windows-like, abbiamo fatto una prova con MS Access, visto che apparteneva alla stessa suite.

Ben presto però ci siamo resi conto dei limiti che l'applicazione aveva, in quanto permetteva di importare le tabelle Excel, ma non permetteva di usare operatori come il JOIN perché di fatto non stava utilizzando veri database.

Così l'alternativa è stata l'utilizzo di SQL Server 2005 Express Edition, per via del fatto che comunque è un DBMS, è free, ed è della stessa casa, per cui potevamo aspettarci un po' di compatibilità.

Indagando un po' abbiamo infatti trovato una pratica funzionalità che ci permetteva di importare direttamente i dati dei file Excel all'interno delle tabelle del database e viceversa.

In questo modo siamo riusciti a risolvere tutto il problema in appena mezza giornata.

2.2.5.2 Nuove gite, calcolate su più giorni

Con i nuovi dati abbiamo potuto fare qualche test anche su pianificazioni di altre giornate di consegna. I risultati per fortuna si mantenevano nella media di quanto precedentemente osservato.

Con queste ultime prove avevamo dimostrato che lo strumento si comportava bene anche in presenza di scenari dinamici, senza cambiare impostazioni.

2.2.6 Prima presentazione dei risultati al cliente

Abbiamo potuto finalmente presentare in maniera ufficiale i risultati ottenuti in un meeting con tutti gli stakeholder riuniti. Oltre ad una rappresentanza di

Wincor Nixdorf e di Primafrost erano presenti anche TPS e gruppo Lombardini. Quest'ultimo in particolare era presente in quanto voleva conoscere quanto il metodo di consegna di Primafrost sarebbe cambiato, visto che l'azienda rifornisce i suoi punti di consegna.

L'incontro è proceduto abbastanza bene, il cliente ha confermato che dal suo punto di vista si stava andando nella direzione giusta.

Alcune gite di quelle originali tuttavia sembravano strane perchè erano stati registrati dei tempi che lo strumento non poteva riprodurre, così gli esperti di TPS e i dipendenti di Primafrost e Wincor Nixdorf si sono ripromessi di ricontrollare i dati per quelle gite in particolare.

E' emerso anche un'altro dato interessante, di cui però è meglio parlare nella sezione 2.3.

2.2.7 Percorso più corto o più breve?

Una sola domanda rimase in sospeso dopo questo primo incontro. I dirigenti di Primafrost, in linea del tutto teorica, si chiedevano se era possibile regolare lo strumento in modo che invece di utilizzare i percorsi più brevi tra i punti di consegna, utilizzasse invece quelli più veloci.

Questa richiesta era dovuta principalmente alle modalità di pagamento degli autisti: alcuni erano pagati al kilometro, altri all'ora, quindi non era così irragionevole cercare di minimizzare le distanze nel primo caso ed i tempi nel secondo.

Per riuscire a soddisfare la richiesta dovevamo sapere di più sull'architettura interna del programma e capire come manipolare i parametri dell'euristica in modo che tirasse fuori i risultati che ci servivano.

2.2.7.1 Il componente MEFISTO

MEFISTO è stato l'unico componente che ci appariva manipolabile da questo punto di vista, ed è stato anche l'unico componente interno di cui abbiamo ricevuto un minimo di documentazione da parte di TPS.

Il funzionamento in dettaglio di MEFISTO può essere trovato nella sezione 1.2.13. Il suo funzionamento può essere riassunto in poche parole: questo componente parte da una soluzione base trovata da un'euristica veloce e cerca di migliorarla. I pesi servono ad indirizzare la ricerca e quindi a determinare l'aspetto della soluzione finale.

I pesi non erano modificabili da interfaccia grafica, ed ecco perchè non li avevamo notati finora, ma da un file di configurazione, la cui locazione ci è stata indicata dai tecnici TPS.

Ciò che si è potuto notare è che, ponendo i risultati in un ipotetico piano cartesiano organizzato come in figura, la funzione risulta abbastanza prevedibile, tuttavia in alcuni casi che abbiamo trovato presentava alcune discontinuità.

Non era pertanto possibile prevedere in modo accurato i risultati che si sarebbero ottenuti.

2.2.7.2 Le gite che non tornavano

Oltre al problema della non completa prevedibilità dell'influenza dei fattori di costo, c'erano anche da tenere in considerazione le gite il cui costo non tornava.

sembrava infatti che i ottenuti dal precedente sistema, che usava Maps&Guide, non collimassero con i dati ottenuti utilizzando PTV Intertour. In particolare quelli ottenuti con Maps&guide sembravano in alcuni casi migliori.

La prima ipotesi da verificare era che stessero usando la stessa versione delle mappe, altrimenti era chiaro che da dati diversi derivassero risultati diversi.

Sono stati controllati quindi i percorsi di riferimento alle mappe, ma erano identici, e ce lo hanno confermato anche i tecnici TPS. Siamo pertanto tornati a controllare se esistevano altri parametri che influenzassero il calcolo e che fossero comuni ai due sistemi. A prima vista però questa strada sembrava un vicolo cieco.

La soluzione di questo problema venne data da Cristian, il dipendente di Primafrost che si occupava del calcolo delle gite. Mentre noi cercavamo di riprodurre i suoi risultati, lui aveva cercato di riprodurre i nostri, con successo.

Tutto si era risolto con la variazione di un singolo fattore, che dall'interfaccia sembrava effettivamente influenzare il calcolo del percorso, ma solo per quanto riguardava la sua lunghezza.

La figura illustra quello che esprimeva l'interfaccia: mettendo un valore massimo a quel coefficiente avremmo in teoria dovuto influenzare la ricerca in modo che selezionasse il percorso più breve, al contrario avrebbe selezionato il più veloce.

Non è dato sapere di preciso come questo singolo fattore influenzasse il calcolo, ma si possono fare supposizioni: supponendo che l'algoritmo utilizzato da entrambi i programmi sia simile a granular Tabu Search, quel fattore potrebbe in realtà aver influenzato la "granularità" dello spazio delle soluzioni, cambiando il numero di archi presi in considerazione. Una volta trovato quindi una disposizione degli archi simile, i due programmi avrebbero cominciato a restituire soluzioni simili tra loro.

2.2.7.3 La ricerca dei giusti valori per i fattori

Risolto il problema delle gite "non corrette", rimaneva il problema di trovare i valori "migliori" per soddisfare le esigenze del cliente.

Vi erano sostanzialmente 2 metodi possibili:

1. Cercare manualmente, attraverso una serie di prove, i valori corretti
2. Cercare di automatizzare il processo descritto al punto 1

Ognuna delle due scelte aveva vantaggi e svantaggi, ovviamente. Nel caso della ricerca manuale i tempi potevano essere anche molto lunghi e la qualità della soluzione trovata scadente, viceversa per il caso automatico, con la differenza che per automatizzare il processo e mantenere i tempi ragionevolmente brevi potevano essere necessarie risorse computazionali aggiuntive, all'epoca non disponibili.

Si è quindi optato per la prima scelta, raggiungendo una soluzione abbastanza buona dopo qualche giorno di lavoro.

Giusto per completezza, i risultati che si sarebbero potuti ottenere con una procedura automatica, sono spiegati nel capitolo 3, 3.

2.2.7.4 Validazione dei risultati

Tutte prove di cui si è parlato prima sono state effettuate sulle mappe e sugli ordini su ci sono anche state effettuate anche le prove fatte per laprima consegna, per cui eravamo piuttosto sicuri dei risultati.

2.2.8 Presentazione dei risultati definitiva al cliente

Il cliente, già contento perchè aveva intuito che si stava andando nella direzione giusta, è stato molto felice di sapere che c'era anche un modo di manipolare il risultato finale dell'applicazione. In questo modo se un domani fossero cambiate le esigenze, si poteva semplicemente agire sui parametri invece che gettare via tutto.

2.3 Analisi costi-benefici

A conti fatti le due architetture eran più o meno equivalenti dal punto di vista dei vantaggi e degli svantaggi.

Ciò che ha portato quindi ad una scelta netta è stato ciò che è emerso già dal primo incontro con gli stakeholder, ovvero il fatto che alcune informazioni non erano del tutto aggiornate all'interno delle mappe.

2.3.1 Vantaggi e svataggi utilizzzando PTV Intertour

Utilizzando Intertour i vantaggi che se ne ottenevano erano valutabili a livello di maggiore semplicità di utilizzo per l'utente finale se si utilizzava direttamente l'interfaccia grafica prevista dallo strumento, ed un costo minore o quantomeno comparabile a quello degli XServer.

D'altro canto l'applicazione non risultava così facile da integrare nell'architettura già esistente, infatti necessitava di qualche workaround solo per interfacciarlo direttamente con l'ERP.

Questa risultava essere un'ottima alternativa nel caso si fosse visto che la componente umana non poteva essere esclusa, in quanto anche se più difficile da integrare poteva risultare più usabile.

2.3.2 Vantaggi e svantaggi utilizzando PTV XTour

Utilizzando XTour era probabilmente più facile da integrare con la'rchitettura preesistente, ma non avrebbe necessariamente semplificato l'interazione con l'utente.

Grazie all'architettura basata su Web Service, si poteva riuscire a visualizzare le mappe anche all'interno di un browser con poco sforzo, visto che esistevano già librerie apposite.

Il problema sarebbe stato dover disegnare ex-novo una nuova interfaccia per l'utente, con possibili problemi di usabilità e di familiarizzazione con i nuovi controlli.

Inoltre non era detto che il costo fosse per forza contenuto, non sono mai state fatte abbastanza prove per avere la certezza se ogni XServer fosse più o meno indipendente dagli altri o se fosse necessario l'utilizzo di più di uno di

questi prodotti in sinergia. Facendo conto che le licenze erano diverse per ogni prodotto, significava potenzialmente pagarle tutte a parte singolarmente.

Questa poteva tuttavia essere un'ottima alternativa nel caso si fosse visto che la componente umana era escludibile quasi del tutto. Riducendo i controlli all'osso ed integrando tutto il resto, la qualità delle soluzioni era garantita.

2.3.3 L'incompletezza delle mappe

Già durante il primo incontro con gli stakeholder, come accennato nel capitolo 2.2.6, emerse subito un problema relativo al calcolo dei percorsi.

PTV Intertour infatti non ci permetteva di vedere di preciso quale percorso seguivano i mezzi, e Christian, che in Primafrust si occupava del calcolo delle gite, ha voluto vederci chiaro.

Ricalcolando i percorsi utilizzando Maps&Guide si ottenevano risultati un po' strani infatti (e queste erano le gite che non tornavano), mentre altri sembravano potenzialmente ignorare alcune restrizioni presenti sul manto stradale: in un caso particolare Christian ci ha spiegato che per percorrere una certa distanza in così poco tempo l'applicazione poteva potenzialmente aver deciso di passare per una galleria attraverso la quale un camion non poteva passare.

Ci siamo sentiti subito di escludere il caso, anche se sapevamo che Cristian aveva più esperienza di tutti noi in fatto di strade. In realtà parlandone un po' è uscito fuori che l'ipotesi di Cristian non era così insensata, in quanto la stessa TPS ha dovuto confessare che non era così garantito che le mappe fossero accurate al 100%: erano sicuramente complete ed aggiornate per quanto riguardava la cartografia, ma i dati riguardanti la viabilità erano anche frutto di PTV, e poteva darsi che l'Italia non fosse sempre così aggiornata.

2.3.4 Scelta finale

In realtà, per quanto il problema della completezza delle mappe sembrasse un problema minore, aveva rivelato una criticità: non potendo più garantire che i percorsi calcolati avrebbero rispettato di base i vincoli imposti dal codice della strada, non si poteva spingere più di tanto con l'ottimizzazione, anzi bisognava cercare di rifarsi il più possibile ai percorsi precalcolati in origine.

Non si è voluto comunque abbandonare il progetto, in quanto le premesse sembravano promettenti, ma era ormai chiaro che la componente umana non era eliminabile.

Si è quindi deciso di mantenere come applicazione di riferimento PTV Intertour, e di integrarlo in modo da fornire a Cristian tutti i controlli necessari. Con questo assetto la figura professionale di questo dipendente non veniva sostituita, anzi si permetteva all'individuo di crescere ulteriormente nella sua carriera professionale, diventando esperto nell'utilizzo dello strumento.

Questo permetterebbe un domani di poter in teoria affiancare a Cristian un assistente per poter gestire le consegne in caso di sua assenza, ed inoltre con il potenziale miglioramento dello strumento si potrebbero anche raggiungere risparmi sempre migliori, o almeno garantire che più o meno sarà sempre possibile un piccolo margine di risparmio.

Gli XServer non verranno pertanto impiegati, in quanto non offrirebbero i vantaggi sperati e rischierebbero di costare troppo ora le licenze. Questa

alternativa sarà rivalutata in futuro, quando magari più clienti utilizzeranno questo servizio e ci sarà bisogno di gestire configurazioni diverse.

Capitolo 3

Implementazione

Nell vicenda spiegata nella sezione 2.2.7.3 rimaneva un dubbio irrisolto: si poteva riuscire a trovare i coefficienti giusti in un modo automatico o comunque semi-automatico?

Questo ci avrebbe permesso di avere un minimo di sicurezza per quanto riguardava l'ottimalità della soluzione trovata e ci avrebbe risparmiato potenzialmente un sacco di fatica.

In questo capitolo presento un mio contributo completamente personale in cui ho cercato di rispondere a questo quesito.

Nella prima sezione parlerò in generale delle motivazioni che mi hanno fatto scegliere l'approccio che poi ho usato, quindi descriverò come ho ottenuto i dati, i risultati ottenuti ed infine come ho potuto validare i risultati.

3.1 Approccio generale

Era chiaro che non avrei potuto risolvere il problema utilizzando PV Intertour, in quanto nella documentazione di questo strumento non era minimamente spiegato se vi fosse un modo di impartire comandi all'applicazione senza passare per l'interfaccia grafica, quindi non era possibile utilizzarlo da riga di comando o mediante script di qualche genere.

La scelta quindi più ovvia era quella di utilizzare gli XServer, ed in particolare XTour in quanto, sempre stando alla documentazione, era il più simile da un punto di vista di funzionalità ed utilizzo.

TPS aveva fornito a Wincor un account per riuscire a scaricare le ultime versioni degli XServer direttamente dal sito di PTV, per cui questa parte non costituiva un problema.

I problemi sono cominciati quando, facendo delle prove con i vari applicativi, mi sono reso conto ingenuamente che le mappe non erano incluse nel download. Chiedendo a TPS mi sono reso conto che le mappe avrebbero occupato circa 10 GB, quindi non era possibile scambiarsi i file.

Ho abbandonato quindi quella strada, ma ho ottenuto lo stesso i dati, come spiegherò più avanti, poichè in ogni caso non esisteva un modo per importarli all'interno di XTour.

Ho deciso perciò di eseguire un semplice “dimostrazione”, ovvero un test che avrebbe dato risultati da interpretare in linea di massima, visto che ogni soluzione con un più ampio margine di precisione era da scartare.

Il mio approccio è stato quindi quello di reimplementare Granular Tabu Search e di compiere la ricerca dei fattori migliori attraverso un algoritmo genetico, per vedere se quest’ultimo mi aiutava a selezionare i coefficienti più promettenti in un tempo ragionevole.

3.1.1 Reimplementazione di Granular Tabu Search

Per reimplementare il Granular Tabu Search ho utilizzato direttamente l’articolo originale di Toth e Vigo. L’implementazione più prestante si sarebbe potuta ottenere certamente scrivendo tutto in C e ottimizzando per l’architettura su cui l’applicazione avrebbe dovuto girare.

Tuttavia il tempo per sviluppare l’intero codice sarebbe cresciuto troppo rispetto alle mie aspettative: C non possiede nativamente il supporto per liste, mappe di hash e iteratori, e tra l’altro benchè sia un linguaggio molto potente non prevede meccanismi per lavorare con gli oggetti senza allocare/deallocare la memoria manualmente, esponendo quindi il sistema a problemi di memory leak e salti ad aree di memoria non più allocate. Per correggere tutti i bug relativi alla gestione della memoria da soli a mio avviso sarebbe servita una settimana, con il rischio di bug non scovati ed effetti più o meno bizantini anche alla fine della revisione.

Avrei potuto puntare sul C++, ma conoscevo meglio Python, e sapevo che comunque anche il codice Python veniva compilato, anche se magari non era ottimizzato. Inoltre questo linguaggio aveva tutti i vantaggi che C non aveva, con l’unico difetto che non sapevo prevedere quali performance il codice finale avrebbe avuto. Quest’ultimo problema non era così importante, in fondo la mia era solo una dimostrazione: era importante che fosse corretta, non prestante.

3.1.2 L’algoritmo genetico

Ogni algoritmo genetico (come spiegato precedentemente in 1.4) non fa altro che rappresentare i geni degli individui mediante stringhe, calcolando per ogni stringa un valore di fitness, ed infine, mediante un processo di selezione, fa accoppiare gli individui migliori in modo che la nuova generazione sia migliore di quella prima. Nella riproduzione i corredi cromosomici dei genitori vengono mischiati tramite cross-over, in modo da ampliare lo spettro delle possibili soluzioni, ed infine c’è una probabilità di ottenere una mutazione, che aiuta a non rimanere ancorati ai “minimi locali”.

Se come geni prendiamo i coefficienti che usiamo per il granular tabu search, la rappresentazione in stringa di una specifica coppia di valori possibili può rappresentare il corredo genetico di un’individuo.

Nel caso che ci si presentava in azienda noi dovevamo cercare di riprodurre i risultati di PrimaFrost, trovando i coefficienti opportuni.

Possiamo quindi fare in modo che individui che ottengono i risultati vicini ad un valore preimpostato siano favoriti nel processo di selezione, in modo da ottenere una popolazione finale che presenti come geni solo i coefficienti più promettenti.

Ad ogni ciclo dell’algoritmo da me progettato infatti si ha:

1. inizializzazione degli agenti
2. calcolo della soluzione del problema mediante Granular Tabu Search (i coefficienti usati nella ricerca sono quelli presenti nei geni dell'individuo)
3. selezione degli individui in base ai risultati ottenuti (metodo della ruota della roulette)
4. Cross-over (uniforme) e mutazione

3.2 Ottenere i dati di input

Il fatto che non si potessero ottenere i dati direttamente dalle mappe di PTV non rappresentava un problema. avevo infatti trovato un simpatico tutorial sugli XServer bastato su Javascript, che permetteva di editare il codice [16].

Studiando un po' l'API pubblica descritta nella documentazione di PTV, ed avendo ancora un file Excel di quelli usati per PTV Intertour, sono riuscito ad impostare il programma in modo che, date una serie di città, calcolasse la lunghezza e la durata del percorso tra ogni coppia di città.

Il risultato di quest'operazione era una sorta di matrice delle distanze, ottima per il genere di problema che doveva essere trattato.

Visto che i punti di consegna erano dell'ordine del centinaio almeno, l'operazione ha richiesto qualche ora.

A causa di un limite sulla massima granularità nella mappa del tutorial, punti di consegna appartenenti alla stessa città collassavano. Ho eliminato quindi i punti coincidenti, in quanto erano rendevano solo più pesanti i calcoli da effettuare.

La matrice delle distanze che ho potuto utilizzare dopo quest'operazione risulta quindi un po' diversa da quella reale.

3.3 Risultati ottenuti

3.4 Validazione risultati

Conclusioni

Si può quindi concludere che, allo stato odierno, il mondo commerciale è ora in grado di rispondere anche alle esigenze di chi ogni giorno deve gestire un'intera flotta di veicoli e qualche centinaio di punti di consegna. Da un punto di vista prestazionale, si evidenziano gli eccellenti risultati raggiunti da PTV.

La vera criticità di oggi invece è tenere completi ed aggiornati i dati delle mappe, partendo da quelli riguardano strettamente la cartografia, fino ai dati sulla viabilità e la percorribilità delle strade.

Senza dati al pari con le aspettative, infatti, si possono creare situazioni spiacevoli in cui i risultati trovati sono inammissibili nella realtà delle cose, come dimostra il caso di Primafrost.

Siamo sicuri che le persone di TPS hanno realizzato quanto importante sia questa priorità, e sicuramente nei prossimi anni si impegneranno a fondo per migliorare la qualità delle loro mappe.

Questo potrebbe davvero rendere possibile, in un futuro molto prossimo, una reale disponibilità di una soluzione commerciale in grado di risolvere istanze del “Vehicle Routing Problem” in un tempo ragionevole.

Appendice A

Prima Appendice

Bibliografia

- [1] Sito Wincor Nixdorf, sezione Retail
(http://www.wincor-nixdorf.com/internet/site_IT/IT/Retail/Retail_node.html)
- [2] "The Vehicle Routing Problem", P. Toth, D. Vigo, *Society for Industrial and Applied Mathematics*, 2002
- [3] Sito TPS Italia, "Geocodifica e normalizzazione delle anagrafiche"
(http://www.tpsitalia.it/software/pianificazione_ottimizzazione_giri/geocodifica_normalizzazione_anagrafiche.php)
- [4] "The Truck Dispatching Problem", Dantzig, G.B., Ramser, J.H. (1959). *Management Science* 6 (1): 80–91. doi:10.1287/mnsc.6.1.80. Retrieved 2008-04-17.
(<http://links.jstor.org/pss/2627477>)
- [5] Sito PTV, sezione "Pianificazione ed ottimizzazione dei giri"
(http://www.tpsitalia.it/software/pianificazione_ottimizzazione_giri/)
- [6] "MEFISTO: A Pragmatic Metaheuristic Framework for Adaptive Search with a Special Application to Pickup and Delivery Transports", A Cardeneo, W Heid, F Radaschewski et al., *Operations Research Proceedings 2008: Selected Papers of the Annual International Conference of the German Operations Research Society (GOR) University of Augsburg, September 3-5, 2008*
- [7] "A tabu search heuristic for the vehicle routing problem", M. Gendreau, A. Hertz, G. Laporte, *Management Science*, 1994
- [8] "The granular tabu search and its application to the Vehicle-Routing Problem", P. Toth, D. Vigo, *INFORMS Journal on Computing*, 2003
- [9] "New insertion and postoptimization procedures for the traveling salesman problem", M. Gendreau, A. Hertz, G. Laporte, *Operations Research*, 1992
- [10] http://www.wincor-nixdorf.com/internet/site_DE/DE/WincorNixdorf/Press/pressreleases/1998-1999/KKRundGoldmanSachs_22_10_1999.html

- [11] "Wincor Nixdorf", Wikipedia tedesca
(http://de.wikipedia.org/wiki/Wincor_Nixdorf)
- [12] "Wincor Nixdorf" su sito "Pubbliway, il portale per il business online",
(http://www.pubbliway.com/informatica/wincor_nixdorf_s.r.l._1121241)
- [13] Sito TPS, sezione "Chi siamo"
(<http://www.tpsitalia.it/azienda/>)
- [14] "PTV Planung Transport Verkehr" sulla Wikipedia tedesca
(http://de.wikipedia.org/wiki/PTV_Planung_Transport_Verkehr)
- [15] Documentazione di PTV Intertour 5.9, fornitami da TPS Italia.
- [16] Sito PTV, sezione sviluppatori, "Interactive AJAX Tutorial for PTV MobilityPlatform" (<http://80.146.239.135/mp-ajax-api-samples/tutorial/tutorial.html>)
- [17] Wikipedia inglese, "Genetic Algorithm" (http://en.wikipedia.org/wiki/Genetic_algorithm)

Ringraziamenti