



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI GUGLIELMO MARCONI

FACOLTÀ DI SCIENZE E TECNOLOGIE APPLICATE

CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA INFORMATICA

«NETWORK OPTIMIZATION VIA ANT COLONY ALGORITHM:
IL CASO DELLA RETE DI TRASPORTO URBANO DI ROMA»

Relatore: Prof. LUCA REGOLI

Candidato: ROBERTO MARISALDI
Matricola: STA04455-L8

Anno Accademico
2015/2016

INDICE

Sommario	5
Introduzione	7
1. Ottimizzazione di reti	11
1.1 Reti di trasporto	11
1.2 Ricerca operativa e grafi	12
1.3 Approccio classico ai problemi di network optimization	14
1.4 Shortest Path via Dijkstra Algorithm	15
1.5 Ricerca del Maximum Flow path	17
1.6 Ricerca del Maximum Flow – Minimum Cost	20
2. Ant Colony Optimization Algorithm	23
2.1 Stigmergia e swarm intelligence	23
2.2 Ant Colony Optimization	26
2.3 Ant system ed i grafi	28
2.4 Ant Colony Optimization System	30
2.5 Il contesto applicativo di ACS. Un'analisi generale	33
3. Ottimizzazione del trasporto pubblico di Roma	37
3.1 La struttura urbana di Roma – Un cenno storico	37
3.2 L'area geografica dello studio	39
3.3 Le matrici origine-destinazione e la zonizzazione	42
3.4 Percorsi reali vs routes on the grid	48
3.5 La rete di trasporto di Roma	51
3.6 Ottimizzazione: obiettivi e dati di partenza	57
4. Implementazione di ACS nell'ottimizzazione del trasporto pubblico della città di Roma	61
4.1 VBA per Excel. Perché?	61
4.2 I dati di partenza	62
4.3 Implementazione: il core dell'algoritmo	64
4.4 Una piccola ed importante routine	65
4.5 La main procedure e la definizione delle strutture dati	69
4.6 La procedura "Ant": il codice dell'algoritmo ACS	74
4.7 Le transition rule	81
4.8 Le procedure LocalUpdateRule e GlobalUpdateRule	86
4.9 La scelta dei migliori percorsi	87
5. Risultati	91
5.1 Una prima valutazione	91
5.2 Come valutare le prestazioni delle linee	94
5.3 Risultati back to back: linee originali vs linee ACS	104
5.4 Risultati: linee originali vs linee ACS con partenze ridotte	110
5.5 Linee ACS nell'ipotesi di un bacino d'utenza aumentato	117
Conclusioni	127
Bibliografia	129

ABSTRACT

Insetti come pachidermi. Per quanto paradossale, l'obiettivo di questo lavoro è quello di utilizzare l'intelligenza delle formiche per riconquistare le strade di Roma, più di due millenni dopo il celebre tentativo di Annibale con i suoi elefanti.

Il trasporto pubblico, in un'epoca di crescente attenzione ai temi ambientali e di convivenza con un permanente stato di traffico congestionato, vede aumentare quotidianamente la propria importanza come mezzo per soddisfare la richiesta di mobilità nelle città, soprattutto nelle metropoli. La scelta che porta le persone all'utilizzo di un autobus o di una linea di metropolitana interrata è legata ad una serie di fattori come la comodità, la rapidità, la distanza dalla propria posizione e da quella di arrivo. Dall'altra parte del servizio vi sono coloro che il sistema di trasporto lo dirigono e che, nel soddisfare al meglio gli utenti, devono cercare un equilibrio con la sostenibilità economica e le esigenze pratiche della gestione quotidiana.

Lo scopo di questa tesi è quello contribuire a ottimizzare la rete di trasporto pubblico di Roma, la più grande metropoli italiana. Nello specifico s'intende studiare e applicare un approccio che permetta di ridisegnare le linee di trasporto esistenti variandone il percorso per consentire a un maggior numero di persone di utilizzare il servizio pubblico senza costringerle a spostarsi per raggiungere le fermate. Al tempo stesso lo studio si prefigge di limitare l'aumento della lunghezza chilometrica delle linee per evitare da un lato il dilatarsi dei tempi di viaggio e dall'altro per garantire un bilanciamento tra il potenziale incremento di utenza e la variazione dei costi fissi.

Ridisegnare un sistema di trasporto focalizzandosi sul miglioramento di determinati parametri è un'operazione che ricade all'interno di un ampio insieme di metodiche e tecniche conosciuto come ottimizzazione di reti. È infatti di uso comune la denominazione "rete di trasporto pubblico" per indicare tutto il complesso sistema di tragitti, mezzi, frequenze. L'ottimizzazione di reti è diventata nel corso degli anni uno degli argomenti più importanti su cui si è concentrata maggiormente tutta la ricerca operativa, quella la branca della logica matematica sviluppatasi nella seconda metà del secolo scorso sulla scia degli studi di pionieri come Turing¹, Minsky², Dijkstra³. Non è un caso che con il termine "problema di routing", con cui oggi si indica un generico problema d'instradamento in una rete, sia diventato di accezione comune: navigatori satellitari che risolvono reti stradali e router informatici che risolvono reti di calcolatori sono oggetti con cui quotidianamente

¹ (Turing, 1950)

² (Minsky, 1967)

³ (Dijkstra, 1959)

abbiamo rapporti più o meno diretti a livello professionale, ludico, domestico.

Capire come muoversi in un reticolo di punti come città, stazioni, fermate percorrendo percorsi come strade, rotte, sentieri cercando di ottimizzare al meglio gli spostamenti è stato fin dagli anni '50 un tema su cui la sensibilità dell'opinione pubblica prima e degli scienziati poi è risultata più spiccata soprattutto a causa dell'aumento esponenziale dei trasporti su ruota del dopoguerra.

Gli studi relativi all'ottimizzazione delle reti di trasporto si sono focalizzati su due aspetti fondamentali: minimizzare la lunghezza necessaria ad uno spostamento e massimizzare il flusso di merci o persone di un tragitto commerciale. Gli studi tra gli altri di Dijkstra, Ford-Fulkerson⁴ e più recentemente di Orlin⁵ e Ahuja⁶, hanno portato nel tempo alla formulazione ed a successivi miglioramenti di algoritmi in grado di ricercare percorsi minimi e percorsi di massimo flusso di reti estremamente estese e complesse. Un risultato importante è stata la formulazione di procedure per l'ottenimento dei cosiddetti percorsi "maximum flow – minimum cost", quelli ossia in grado di garantire a tragitti commerciali un massimo flusso di beni/persone pur con la percorrenza di un tragitto il più breve possibile. Principali limiti di tali algoritmi sono risultati l'elevata potenza di calcolo richiesta ed i tempi di risoluzione proporzionali alla complessità del problema.

Nell'ultimo quarto del secolo scorso, contemporaneamente alla formulazione dell'ultima generazione di algoritmi deterministici di ottimizzazione di reti, l'osservazione e lo studio del comportamento sociale di alcune specie di insetti ha ispirato il lavoro di alcuni ricercatori come Gerardo Beni⁷ e portato alla definizione del concetto di intelligenza di sciame. La capacità di comunicare con il resto della propria comunità da parte di soggetti fondamentalmente privi della capacità di prendere decisioni complesse si è dimostrata la base grazie alla quale specie come le termiti sono in grado di costruire nidi, dalla struttura estremamente elaborata, alti decine di metri. Il processo con il quale la banale scelta del singolo elemento dello sciame diventa il tramite con cui si produce e si sviluppa un comportamento di comunità molto più complesso parte dall'utilizzo dello spazio come mezzo di comunicazione. Un insieme di segnali volatili emessi da ogni individuo in base alla scelta elementare fatta (che potrebbe essere, per esempio, quella di passare sopra o sotto un ostacolo) condiziona le decisioni degli altri appartenenti allo sciame che si comportano di conseguenza, portando l'intero gruppo a seguire solo la scelta più favorevole, lasciando che i segnali degli individui, che si perdono o muoiono, scompaiano nel tempo. Insetti, uccelli, pesci sono

⁴ (Ford, 1962)

⁵ (Orlin, 2013, Jun)

⁶ (Ahuja, 1988)

⁷ (Beni, 1993)

solo alcuni esempi di specie specializzate in forme di stigmergia, la capacità di prendere decisioni in base ai segni presenti nell'ambiente, presenti in natura.

Sulla base di questi studi, Marco Dorigo⁸ nei primi anni '90 ha sviluppato un algoritmo basato sull'intelligenza di sciame ed in grado di risolvere problemi di ottimizzazione di reti. Nello specifico l'algoritmo si riferisce al comportamento delle formiche ed è stato chiamato ACO, Ant Colony Optimization, algoritmo di ottimizzazione basato sulle colonie di formiche. La ricerca di questa dissertazione si basa sull'applicazione di questo algoritmo, nello specifico dell'evoluzione denominata ACS o Ant Colony System, al caso reale della rete di trasporto di Roma.

Se è vero che ACO prima ed ACS poi sono inizialmente stati scritti per risolvere prevalentemente problemi di percorso minimo (o shortest path), la loro formulazione ha ispirato il lavoro di questa tesi grazie alla loro generalità. L'algoritmo si basa sull'idea che le formiche seguano, nel medio-lungo termine, il percorso più conveniente per raggiungere la loro meta che sia cibo o sia l'ingresso del nido. Le formiche che intraprendono un percorso non ottimale vedono la loro scelta scartata in breve tempo grazie ad un meccanismo di volatilità dei messaggi ormonali con cui gli insetti comunicano e questo garantisce la convergenza verso una soluzione ottima in breve tempo. Il percorso che la formulazione originale dell'algoritmo ricerca è il più breve in grado di connettere i punti di partenza ed arrivo.

Lo scopo della nostra ottimizzazione è quello di ottenere percorsi in grado di mantenere la loro brevità pur raccogliendo un maggior numero di passeggeri, e di farlo basandosi su dati reali applicando l'algoritmo ACS alla rete di trasporto pubblico di Roma. Per fare questo, le nostre formiche virtuali devono potere viaggiare e andare a caccia di cibo in un ambiente che, pur mantenendo rigide formulazioni matematiche, possa rappresentare la situazione reale delle linee in essere e della richiesta di mobilità. Innanzitutto la città deve essere trasformata in una grande scacchiera in cui all'interno delle sue celle ricadono aree predeterminate del territorio urbano, come se sulla città fosse adagiata una griglia di dimensioni predefinite. Poi le linee esistenti del trasporto pubblico devono essere ridisegnate sopra a questa rete e gli spostamenti relativi ai percorsi devono trasformarsi in transizioni tra le celle che compongono questa scacchiera. A questo punto, conoscendo i nidi rappresentati dai capolinea possiamo fare viaggiare le nostre formiche alla ricerca dei migliori percorsi, non prima di avere distribuito nelle celle l'informazione, sotto forma di ormone virtuale, relativa alla richiesta di mobilità nelle varie aree della città. In questo modo, l'algoritmo viene settato per ricercare un percorso che colleghi sorgente e destinazione transitando su

⁸ (Dorigo M. , 1992)

zone la cui desiderabilità è proporzionale alla richiesta di mobilità dell'utenza.

Una volta ottenuta una rete con nuovi percorsi, è necessario testarne le performance con un adeguato algoritmo per valutare il grado di ottimizzazione sia dal punto di vista del gestore della rete che dell'utente. Un'evoluzione che simuli un utilizzo più ampio del sistema di trasporto è un'ipotesi che deve essere presa in considerazione non solo per valutare la sostenibilità dell'ottimizzazione con un bacino d'utenza aumentato ma soprattutto nell'ottica di un progressivo interesse verso il trasporto modale per motivazioni pratiche, sociali e soprattutto ambientali.

La struttura della dissertazione che ha lo scopo d'illustrare le basi teoriche e la realizzazione pratica di quanto detto prevede: un primo capitolo nel quale si discutono gli approcci tradizionali agli algoritmi di routing; un secondo capitolo nel quale s'illustra in dettaglio l'algoritmo Ant Colony System; un terzo capitolo nel quale viene analizzata la situazione attuale del trasporto pubblico della città di Roma e la sua traduzione in una forma sfruttabile per l'ottimizzazione della rete di trasporto; un quarto capitolo centrato sull'implementazione pratica dell'algoritmo in linguaggio informatico; un quinto capitolo con i risultati della simulazione di un giorno d'esercizio delle linee tradizionali confrontate con le linee frutto dell'implementazione dell'algoritmo ACS.

La tesi che con questo lavoro ci si accinge a dimostrare è che utilizzando l'algoritmo Ant Colony System sia possibile ottimizzare la rete di trasporto pubblico della città di Roma, migliorando il rapporto passeggeri trasportati su km di rete in condizioni normali e di aumentato bacino d'utenza.

BIBLIOGRAFIA

- Ahuja, R. K. (1988). *Network flows*. Cambridge MA.: Alfred P Sloan School of Management.
- Baietti, S. (2006). ANAS, La storia e la cronologia del GRA di Roma. *Strade dell'Informazione (periodico ANAS a diffusione interna)*, n° 1.
- Beni, G. W. (1993). Swarm intelligence in cellular robotic systems. In W. T. Townsend, *Robots and Biological Systems: Towards a New Bionics?* (pp. 703-712). Tuscany, Italy: Springer.
- Caceres, N. J. (2007). Deriving origin destination data from a mobile phone network. *Intelligent Transport Systems, IET 1.1*, 15-26.
- Cui, A. (2006). Bus passenger origin-destination matrix estimation using automated data collection systems. Cambridge, Massachusetts, USA: Massachusetts Institute of Technology.
- Dhillon, S. S. (2007). Performance analysis of the AntNet algorithm. *Computer Networks 51.8*, 2104-2125.
- Diestel, R. (2000). *Graph Theory*. Springer.
- Dijkstra, E. W. (1959). A note on two problems in connexion with graphs. *Numerische mathematik*, 269-271.
- Dorigo, M. &. (1997). Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *Evolutionary Computation, IEEE Transactions on*, 1(1), 53-66.
- Dorigo, M. (1992). Optimization, learning and natural algorithms. *Ph. D. Thesis*. Milano, Italy.
- Edmonds, J. &. (1972). Theoretical improvements in algorithmic efficiency for network flow problems. *Journal of the ACM (JACM)*, 19(2), 248-264.
- Ford, L. R. (1962). *Flows in networks*. Princeton: Princeton University Press.
- Goldberg, A. V. (1997). An efficient implementation of a scaling minimum-cost flow algorithm. *Journal of algorithms 22.1*, 1-29.

- Grassé, P. P. (1986). *Termitology. Termite anatomy-physiology-biology-systematics. Vol. III. Behaviour-sociality-ecology-evolution-systematics*. Paris: Masson.
- Klingman, D. A. (1974). NETGEN: A program for generating large scale capacitated assignment, transportation, and minimum cost flow network problems. *Management Science* 20.5, 814-821.
- Krauthamer, R. (1980). *Rome, Profile of a City, 312 - 1308*. Princeton: Princeton University Press.
- Liao, L. D. (2007). Extracting places and activities from gps traces using hierarchical conditional random fields. *The International Journal of Robotics Research*, 119-134.
- Minsky, M. L. (1967). *Computation: finite and infinite machines*. Prentice-Hall, Inc.
- Nielsen, G. &. (2008). *Network Design for Public Transport Success—Theory and Examples*. Oslo: Norwegian Ministry of Transport and Communications.
- Orlin, J. B. (2013, Jun). Max flows in $O(nm)$ time, or better. *Proceedings of the forty-fifth annual ACM symposium on Theory of computing* (pp. 765-774). Coimbra: ACM.
- Rüetschi, U. J. (2005). Modelling wayfinding in public transport: Network space and scene space. *Spatial Cognition IV. Reasoning, Action, Interaction* (pp. 22-41). Frauenchiemsee: Springer Berlin Heidelberg.
- Sheffi, Y. (1985). *Urban transportation network*. Englewood Cliffs: Prentice Hall.
- Singh, V. K. (2010). Applications of Maximal Network Flow Problems in Transportation and Assignment Problems. *Journal of Mathematics Research* 2.1, 28.
- Turing, A. M. (1950). Computing machinery and intelligence. *Mind*, 433-460.
- van Heeswijk WJA, M. M. (2014). *Freight consolidation in network with transshipments*. Eindhoven: Beta Working Papers.

- Yang, H. a. (1998). Optimal traffic counting locations for origin-destination matrix estimation. *Transportation Research Part B: Methodological* 32.2, 109-126.
- Yoshikawa, M. a. (2010). *Ant colony optimization routing algorithm with tabu search*. Hong Kong: Proceedings of the International Multiconference of Engineers and Computer Scientists. Vol. 3.
- Yu, B. e. (2005). Optimizing bus transit network with parallel ant colony algorithm. *Proceedings of the Eastern Asia Society for Transportation Studies*. Vol. 5.