



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei Materiali (D.I.C.A.M.)

Corso di Dottorato di Ricerca in Tecnica ed Economia dei Trasporti - S.S.D. ICAR/05

La progettazione di interventi per una mobilità sostenibile in ambito urbano



Tesi di dottorato di
Antonino Lo Burgio

Coordinatore del Corso e Tutor
Prof. Ing. Marco Migliore

XXIV Ciclo – A.A. 2011-2013



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO

FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale, dei
Materiali (D.I.C.A.M.)

Corso di Dottorato di Ricerca in Tecnica ed Economia dei Trasporti
S.S.D. ICAR/05

**La progettazione di interventi per una mobilità
sostenibile in ambito urbano**

Tesi di dottorato di:
Antonino Lo Burgio

Coordinatore del Corso:
Prof. Ing. Marco Migliore

Tutor:
Prof. Ing. Marco Migliore

XXIV Ciclo – A.A. 2011-2013

*A papà Franco, a mamma Pina
e a Maria Rita*

INDICE

INTRODUZIONE.....	1
CAPITOLO 1	
PARKING PRICING COME STRUMENTO PER UNA MOBILITA’	
SOSTENIBILE IN AMBITO URBANO	5
1.1 Premessa	5
1.2 Stato dell’arte	8
1.3 Schemi di <i>pricing</i>	13
1.3.1 <i>Electronic Road pricing di Singapore</i>	15
1.3.2 <i>Congestion Tax di Stoccolma</i>	18
1.3.3 <i>Toll Rings Norvegesi</i>	20
1.3.4 <i>Congestion Charging di Londra</i>	22
1.3.5 <i>Ecopass di Milano</i>	25
1.3.6 <i>SFpark</i>	28
1.3.7 <i>Differenze tra i sistemi di pricing</i>	31
1.4 Il sistema proposto	32
1.4.1 <i>La circolazione a stanze</i>	33
1.4.2 <i>L’architettura del sistema</i>	38
1.4.3 <i>I Tag RFID</i>	40
1.5 Conclusioni	50
CAPITOLO 2	
L’OTTIMIZZAZIONE DELLA TARIFFA DI SOSTA PER LA	
RESTRIZIONE DEGLI ACCESSI	53
2.1 Premessa metodologica	53
2.2 Analisi territoriale: delimitazione e zonizzazione	55
2.2.1 <i>Delimitazione dell’area e delle fasce temporali</i>	58
2.2.2 <i>Zonizzazione</i>	58
2.3 Modellazione dell’offerta di trasporto	60
2.3.1 <i>Il grafo</i>	61
2.3.2 <i>Le funzioni di costo</i>	64
2.3.3 <i>La modellazione della sosta</i>	68
2.3.4 <i>QuantumGIS</i>	70

2.4	La domanda di trasporto	72
2.4.1	<i>L'approccio descrittivo</i>	78
2.4.2	<i>L'approccio comportamentale</i>	79
2.4.3	<i>Il modello di scelta modale</i>	83
2.5	L'interazione domanda/offerta	85
2.5.1.	<i>Il problema dell'assegnazione</i>	86
2.5.2.	<i>L'algoritmo di assegnazione ToN</i>	89
2.5.3.	<i>L'algoritmo di assegnazione DUE</i>	91
2.5.4.	<i>L'ipercammino di minimo costo</i>	92
2.5.5.	<i>Il software AxE</i>	100
2.6	Il modello di progettazione.....	104
2.6.1	<i>La funzione obiettivo</i>	106
2.6.2	<i>Metodo per la risoluzione del problema</i>	111
2.7	Conclusioni.....	114
 CAPITOLO 3		
L'APPLICAZIONE SULLA CITTA' DI PALERMO		115
3.1	Premessa	115
3.2	La città di Palermo	116
3.2.1	<i>Il contesto territoriale di riferimento</i>	117
3.2.2	<i>I poli di attrazione</i>	118
3.3	L'area di studio e la zonizzazione.....	122
3.4	L'offerta di trasporto	125
3.4.1	<i>La rete viaria</i>	126
3.4.2	<i>Il sistema dei parcheggi</i>	127
3.4.3	<i>Il grafo stradale</i>	133
3.4.4	<i>Il trasporto pubblico locale</i>	137
3.5	La matrice OD	140
3.6	Lo scenario progettuale	143
3.7	L'euristica.....	144
3.8	Le iterazioni	152
 CONCLUSIONI.....		165
 RINGRAZIAMENTI		169
 BIBLIOGRAFIA.....		171

INTRODUZIONE

*“Sembra sempre impossibile
finché non viene realizzato”
Nelson Mandela*

Da diversi anni ormai l'uso dell'automobile privata si è configurato come il *modus operandi* privilegiato dai cittadini per rispondere al problema della mobilità urbana. Sempre più spesso il traffico veicolare privato invade quotidianamente i centri urbani, contribuendo sensibilmente a peggiorare le condizioni di vivibilità delle città.

Pertanto, è importante tentare di dare risposte alternative, tecnologicamente innovative ed economicamente sostenibili a un problema così complesso come quello della mobilità. Le esperienze pregresse dimostrano che non bastano misure mirate e di breve periodo per superare questo problema; non bastano i soli interventi tecnici a risanare la frattura che si è creata tra il cittadino e la città, ma bisogna andare più in profondità partendo dagli aspetti culturali e comportamentali. Se si vuole ridare la giusta funzione e dimensione urbana a ogni luogo e risollevarne i centri urbani dalla condizione di invivibilità, bisogna, infatti, cambiare le abitudini di mobilità degli utenti. Da un lato bisogna agire sull'offerta di trasporto pubblico, rendendolo sempre più performante in termini di servizio e d'impatto ambientale; dall'altro bisogna limitare l'accesso e l'uso del mezzo privato sempre più abusato negli ultimi anni. Molte città, tuttavia, trovano notevoli difficoltà a creare aree in cui limitare l'accesso ai veicoli privati a causa di vincoli sia infrastrutturali sia di tipo economico. Infatti, qualunque politica di *pricing* si voglia adottare si dovrà far fronte a dei costi di investimento iniziali per l'implementazione del sistema, e di gestione. Per quanto concerne le politiche di *parking pricing*, per quanto complesse e differenziate possano essere

le tariffe, esse presentano costi d'implementazione molto contenuti, ma costi di gestione molto elevati a causa dei sistemi di monitoraggio e controllo, che nella maggior parte dei casi si basano prevalentemente sull'impiego di personale. Viceversa, le politiche di *road pricing* presentano costi di gestione più bassi ma per la loro implementazione possono richiedere elevati investimenti.

Oltre all'aspetto di tipo economico, qualunque sia lo schema di *pricing* che si vuole adottare, un altro tema importante che bisogna affrontare è quello dell'accettabilità del sistema, molto spesso visto come strumento iniquo che limita l'accesso ai centri urbani solo ad alcune fasce di utenti. Punto importante da non sottovalutare è, quindi, quello relativo al sistema di tassazione, che deve essere tale da raggiungere gli obiettivi prefissati senza che l'utente lo percepisca come un'ulteriore tassazione o come uno strumento che contribuisce ad aumentare la distanza tra le varie classi sociali.

Lo scopo di tale studio è quello di proporre un modo diverso di intendere le zone a traffico limitato, sia dal punto di vista della loro pianificazione sia dal punto di vista tecnologico e gestionale. Si intende puntare a risultati concreti e innovativi, ricercando strumenti, processi e soluzioni per il miglioramento della pianificazione, organizzazione e gestione delle aree a traffico limitato.

La tematica in oggetto viene discussa e approfondita in tre capitoli.

Il primo capitolo offre una breve disamina dello stato dell'arte dei metodi e modelli utilizzati per il calcolo delle tariffe per diversi schemi di *pricing*. Inoltre, viene approfondito il concetto di *road pricing* attraverso l'illustrazione di *best practices* internazionali, evidenziandone i risultati conseguiti e i limiti di impiego di tali politiche. Infine, viene introdotta, da un punto di vista concettuale e tecnologico, la soluzione alternativa per il controllo degli accessi in area urbana sviluppata in questo studio.

Nel secondo capitolo verrà discussa la metodologia proposta per la determinazione e l'ottimizzazione della tariffa di parcheggio, come soluzione sostitutiva alle politiche attuali di *pricing* all'interno delle aree a traffico li-

mitato. Tale modello matematico è stato integrato da regole di buona progettazione, che consentono di ottenere una buona soluzione in maniera relativamente veloce. Come in tutti gli studi sulla mobilità, si è seguito il classico schema che parte dall'individuazione e zonizzazione dell'area di studio, la definizione dell'offerta e la stima della domanda di trasporto, per passare, infine, alla simulazione dell'interazione tra domanda e offerta. L'approccio seguito per risolvere il problema di progetto in esame è di tipo misto *Algoritmico-Euristico*, che attraverso l'ottimizzazione di una funzione obiettivo sottoposta a vincoli consentirà di trovare la soluzione.

Infine, nel terzo capitolo, la metodologia verrà applicata alla città di Palermo, per evidenziare potenzialità e limiti del modello. Per l'applicazione del metodo si è deciso di utilizzare software gratuiti e open source, per rispettare quelle che sono oggi le direttive in tema di *spending review* delle pubbliche amministrazioni, per consentire a qualsiasi Ente di poter effettuare una progettazione in house senza ricorso ad applicativi costosi e complessi. In particolare si è utilizzato il software *open source* di analisi territoriale *QGis (Quantum Gis)*, che ha permesso, oltre alla costruzione del grafo, un'analisi ed elaborazione dei dati più approfondita. Per quanto concerne la fase di assegnazione della domanda all'offerta di trasporto si è utilizzato l'applicativo gratuito *AxE (Assegnazione per Esperti)* realizzato dal Prof. Giorgio Salerno.

CAPITOLO 1

PARKING PRICING COME STRUMENTO PER UNA MOBILITA' SOSTENIBILE IN AMBITO URBANO

In questo capitolo verrà introdotto, da un punto di vista concettuale e tecnologico, la soluzione proposta per la limitazione degli accessi in area urbana. Nello specifico, dopo una breve disamina dello stato dell'arte dei metodi e modelli utilizzati per il calcolo delle tariffe per diversi schemi di pricing, verranno analizzati alcuni casi emblematici di gestione degli accessi in area urbana.

1.1 Premessa

Il trend di crescita della domanda di trasporto, ormai consolidato da diversi anni soprattutto in ambito urbano, è fortemente correlato a diversi fattori di carattere economico, demografico e sociale. Tuttavia i costi, i tempi necessari per realizzare nuove infrastrutture e una serie di vincoli urbanistici e ambientali, spesso non consentono un adeguato aumento dell'offerta di trasporto. Ciò è particolarmente vero nella realtà italiana, dove le città sono soggette a vincoli anche di natura storica, artistica e urbanistica. Di conseguenza, le reti stradali urbane sono caratterizzate da elevati livelli di congestione, con costi sociali e ambientali diretti e indiretti, a carico sia dei singoli utenti sia della collettività, tali da far considerare il traffico come uno dei più importanti e urgenti problemi da risolvere in ambito urbano.

A fronte di queste problematiche, lo studio in oggetto vuole affrontare il tema del *road pricing* e del *parking pricing* e di come questi strumenti si

possono integrare all'interno del sistema trasportistico già esistente. La finalità è stata quella di mettere a punto un metodo che consenta di progettare sistemi efficienti di *pricing*, di simularne il loro funzionamento e di misurare le performance.

L'adozione di uno schema di *pricing* può rappresentare una parte rilevante di una più generale strategia di gestione del traffico e/o di miglioramento dello stato dell'ambiente nelle aree urbane. Un qualsivoglia schema di tariffazione può integrarsi con altre misure, quali, ad esempio: la limitazione dell'accesso veicolare a determinate aree (zone a traffico limitato, aree pedonali), la previsione di misure e la realizzazione di interventi sulla rete stradale funzionali a una riduzione della velocità di percorrenza da parte dei veicoli (*traffic calming*), la promozione della mobilità ciclopedonale (piste ciclabili, attraversamenti pedonali protetti, ecc.), il potenziamento delle reti di trasporto pubblico e la realizzazione di interventi finalizzati a garantire la regolarità del servizio (corsie riservate, priorità semaforica, ecc.), la promozione dell'uso associato di autovetture private negli spostamenti sistematici (*car pooling*) e lo sviluppo di flotte di autovetture collettive (*car sharing*). Si può, inoltre, prevedere la modulazione delle tariffe di *road pricing* per promuovere l'uso di veicoli a elevata efficienza e ridotto impatto ambientale e/o la penalizzazione di veicoli inquinanti o caratterizzati da elevati consumi.

Le resistenze che accompagnano il dibattito sull'adozione di schemi di *pricing* nei centri urbani tendono a concentrarsi sulla presunta iniquità dello strumento, che renderebbe di fatto accessibili i centri urbani a coloro che possono permettersi di pagare la tariffa di accesso. Tuttavia le prospettive che si aprono nel medio termine in relazione all'adozione di tecnologie innovative di *rilevamento* e di *infomobilità* consentono di ipotizzare un completo ribaltamento dei criteri di tassazione del traffico stradale, dove il carico fiscale potrebbe essere rimodulato in relazione agli effettivi comportamenti di ogni singolo utente. Buoni risultati si potranno ottenere grazie alla sempre più massiccia diffusione di nuove apparecchiature ad alta tecnologia basate sull'informazione all'utenza, riguardo alle opportunità e/o limitazioni alla

circolazione. Tali sistemi, noti come *sistemi per l'infomobilità*, si basano sul rilievo in tempo reale di grandezze caratteristiche della mobilità (flussi, opportunità di sosta, ecc.) e sono finalizzati all'utilizzo ottimale della capacità delle infrastrutture esistenti, alla gestione dei flussi in relazione alla dinamicità della domanda e al coordinamento di servizi per la mobilità.

Emerge in modo evidente, a questo punto, la necessità di avere modelli di decisione capaci di utilizzare al meglio queste fonti d'informazione. Infatti, mentre dal punto di vista tecnologico gli strumenti necessari a questi sistemi diventano sempre più consolidati ed economici, l'intero processo di acquisizione, strutturazione, organizzazione e analisi dei dati, al fine di ricavare informazioni utili per la pianificazione e la gestione del traffico, presenta ampi margini di miglioramento. Questi si stanno delineando in maniera sempre più netta man mano che diversi modelli di ottimizzazione e gestione, ad esempio nella produzione e distribuzione di beni, vengono introdotti nei sistemi produttivi e determinano precise esigenze informative.

A fronte di questi temi si vuole proporre un modello di *pricing* innovativo, sia dal punto di vista tecnologico sia metodologico, che tiene conto da un lato della fattibilità tecnico-economica e dell'altro dell'aspetto della mobilità e dell'impatto ambientale in area urbana.

L'obiettivo è quello di controllare e limitare la mobilità all'interno di una determinata area urbana attraverso un nuovo modo di concepire le *ZTL* (*Zone a Traffico Limitato*). Si vuole realizzare un sistema efficiente, flessibile ed economico nel quale vengono abbandonate le vecchie tecniche di controllo degli accessi, come la lettura automatica delle targhe ai gate d'ingresso all'area *ANPR* (*Automatic Number Plate Recognition*), poiché molto costose e invasive da un punto di vista infrastrutturale.

Prima di passare alla descrizione del sistema proposto è utile analizzare i sistemi esistenti e i fattori che li caratterizzano, in modo da avere un quadro completo sullo stato di fatto e per riuscire a confrontare al meglio le alternative.

1.2 Stato dell'arte

Data la complessità del tema trattato, questo lavoro è stato affrontato partendo da un'analisi dello stato dell'arte sia relativa ai modelli di progettazione delle tariffe sia a progetti già avviati in diverse città e le relative *best practices*; ciò ha permesso di avere un quadro di riferimento chiaro sugli aspetti teorici e di implementazione delle politiche di *pricing*.

A seguire verrà riportata una sintesi dei riferimenti bibliografici sui modelli per la determinazione delle tariffe, base necessaria per lo sviluppo del metodo proposto nel secondo capitolo, e nei paragrafi successivi alcuni esempi di sistemi di *pricing* applicati in importanti città.

Negli anni la comunità scientifica internazionale ha prodotto tantissimi studi su come governare le esternalità prodotte dal traffico stradale percepite dagli utenti attraverso politiche di *pricing*. Sono stati proposti molti schemi di applicazione di *pricing* in area urbana e altrettanti modelli per la determinazione delle tariffe, ognuno con i propri obiettivi e limiti. Questo lavoro vuole aggiungere un tassello a questo vasto mondo proponendo un modo nuovo schema di *pricing* abbinato a un metodo per la determinazione delle tariffe. Il tutto prende le mosse da un lavoro di Migliore (2002) dal titolo *The perception of network congestion by using parking fees*, il cui obiettivo principale è il calcolo delle tariffe di parcheggio tenendo in considerazione il costo della congestione generata dagli utenti nella rete stradale e nei parcheggi. In tale studio non viene considerato il traffico di attraversamento, ma la presenza di un sistema di trasporto pubblico e quindi una domanda elastica nei confronti della modalità di trasporto. Attraverso questo studio è stato dimostrato che le tariffe di parcheggio calcolate sono un massimo locale della funzione non convessa, che stima il *surplus* degli utenti generato dalla tariffa stessa.

Poiché l'obiettivo dello studio è quello di proporre un metodo per la limitazione degli accessi in area urbana, è opportuno analizzare i metodi e i modelli già esistenti per il calcolo delle tariffe nei vari schemi di *pricing*.

Il *road pricing* può essere implementato con una diversa gamma di forme che variano per il loro livello di complessità, nelle forme di pagamento e da un punto di vista tecnologico (Gomez-Ibanez e Small, 1994), argomento questo che verrà approfondito nei successivi paragrafi con le attuali innovazioni apportate in negli ultimi anni. Alla base dei sistemi di *road pricing* c'è l'idea metodologica fondata sul principio economico del *costo marginale*. Si parla di *costo marginale sociale* e *costo marginale privato*, la cui differenza è proprio la tariffa da far pagare in modo che il singolo utente percepisce il costo marginale sociale (Pigou, 1920). In generale, il *costo marginale privato* è rappresentato dai costi operativi, dal tempo di viaggio, dal rischio di incidenti e da un possibile pedaggio in cui incorre un utente che si aggiunge alla corrente di traffico. Invece, il *costo marginale sociale* è rappresentato dall'incremento di costo generalizzato che ciascuno degli utenti presenti sulla strada deve sostenere a seguito dell'aggiunta di un altro veicolo al flusso. In condizioni ideali in cui costo marginale privato e sociale coincidono si verificherebbe la condizione di efficienza della rete di trasporto. All'interno del settore dei trasporti, quest'idea è stata applicata al problema di assegnazione all'equilibrio da Beckmann *et al.* (1956), che mostra il costo marginale ottimale rispetto al totale dei costi degli utenti in un modello deterministico monoutente e monomodale con domanda rigida e funzioni di costo d'arco separabili. Questo ragionamento viene esteso da Bellei *et al.* (2000) per un modello stocastico multimodale e multiutente con domanda elastica.

Tra i sistemi di *pricing*, quello che nel tempo ha avuto più sviluppo, se non altro per la facilità di applicazione in ambito urbano e per i bassi livelli d'infrastruttura necessari per attuarlo, è il *parking pricing*. Anche in questo il calcolo della tariffa ottimale di parcheggio assume un ruolo di primo piano. In questo campo, già nel 1981 Van Der Goot elaborò e sperimentò a Derby, in Olanda, un modello di utilità disaggregata per l'assegnazione della domanda di sosta. Dieci anni dopo Gattuso (1991) sviluppò un modello *Logit multinomiale* non di rete per l'assegnazione pseudo-dinamica della domanda di sosta, invece Bifulco (1993) propose due modelli stocastici pseudo-

dinamici, rispettivamente di rete e non di rete. Partendo da questi studi, Migliore (1998) propose un modello di assegnazione pseudo-dinamica non di rete della domanda di sosta all'offerta, con l'obiettivo di simulare l'evoluzione temporale dell'interazione domanda-offerta. Tutti questi studi sui modelli d'ottimizzazione della domanda/offerta di sosta hanno come scopo principale quello di proporre un modello in grado di rappresentare il contesto e le principali variabili in gioco nel problema della sosta, valutandone le reazioni degli utenti. Il modello proposto da Migliore (1998) risulta molto utile per implementare un processo d'ottimizzazione in cui fissata la funzione obiettivo è possibile determinare la tariffa ottima (Migliore, 2002).

Oltre ai motivi prima citati, la tariffa di parcheggio è anche un importante strumento per governare quello che viene chiamato *traffico parassita*, e cioè quella componente di traffico urbano in cerca di parcheggio. Questa componente non è affatto trascurabile, dato che studi condotti in diverse città del mondo la stimano pari a un terzo del traffico del centro città. Uno dei motivi principali della creazione del traffico parassita è, ovviamente, la maggiore domanda di parcheggio rispetto all'offerta. Oltre a programmare la costruzione di nuovi parcheggi, il decisore politico nel breve periodo può usare appunto la leva della tariffa di parcheggio per bilanciare domanda e offerta. Anche in questo caso il problema risiede comunque nel calcolo di una *giusta* tariffa di parcheggio. Vickrey (1954) suggerì che il prezzo del parcheggio deve essere calcolato in modo tale che sia sempre disponibile uno stallone per coloro che sono disposti a pagare, suggerendo una percentuale pari al 15% di stalli liberi a tutte le ore del giorno. Inoltre, ha sostenuto che non si deve a priori fissare un prezzo minimo del parcheggio, poiché, anche se con tariffa nulla un parcheggio non raggiunge una percentuale di occupazione dell'85%, non ha senso applicare un *pricing*. Le idee di Vickrey sono state ulteriormente sviluppate da Shoup (2004, 2006, 2007), il quale propone che la tariffa di parcheggio ottima può essere trovata in modo iterativo attraverso un incremento/diminuzione del prezzo iniziale, fino a ottenere un coefficiente medio

di occupazione dell'85%, con eventuali variazioni tariffarie per fasce orarie giornaliere.

Un sistema che risponde a questo tipo di modello è stato implementato nel 2010 in alcune zone urbane di San Francisco, chiamato *SF park*, in cui sono stati installati sensori di parcheggio su 8.200 stalli su strada. Utilizzando i dati di occupazione provenienti dai sensori di parcheggio, le tariffe vengono regolate non più di una volta al mese. Questi adeguamenti tariffari sono molto piccoli (\$0,25 - \$0,50 per ora) e si applicano anche ai parcheggi fuori dalla carreggiata. La variazione tariffaria non avviene solo nell'arco della giornata ma anche rispetto ai giorni della settimana. L'approccio di Shoup è stato applicato anche alla città di Zurigo attraverso uno studio che ha permesso di indagare gli effetti che questo modello di ottimizzazione delle tariffe ha in altri contesti urbani e per valutare se il metodo è in grado di cogliere gli aspetti rilevanti del problema in questione (Waraich *et al.*, 2012). Il modello, inoltre, è stato integrato nel software gratuito di simulazione del traffico *MATSim* (Multi-Agent Transport Simulation), che utilizza un processo iterativo che si basa su un algoritmo co-evolutivo. Questo studio ha dato buoni risultati, dimostrando che il modello cattura con successo gli aspetti rilevanti delle preferenze di parcheggio degli utenti.

Negli anni sono stati proposti moltissimi altri modelli *agent-based* di cui un accurato stato dell'arte è stato ricostruito da Benenson e Torrens (2004). Gli approcci tradizionali allo studio dei parcheggi aggregano i singoli utenti sotto il gruppo *utenti medi*, i quali reagiscono in media e in un ambiente non spaziale (D'Acerno *et al.*, 2006; Lam e Li, 2006). Benenson e Martens (2008) propongono un modello che segue ogni singolo pilota e può esaminare quindi la varietà di comportamenti nella fase di parcheggio derivanti ad esempio dalla conoscenza della zona, dalle abitudini e dalla disponibilità a pagare. Gli utenti, infatti, si comportano in conseguenza al numero di stalli disponibili, che a sua volta varia in relazione al numero di automobilisti che entrano ed escono dall'area di studio. Viene evidenziata, inoltre, la fondamentale importanza di avere una visione disaggregata del parcheggio che consente di me-

glio analizzare in che modo le politiche di sosta influenzano i parametri chiave, come il tempo di ricerca e di percorrenza a piedi, soprattutto nelle città moderne con la loro eterogeneità di offerta e di domanda di parcheggio. Un modello simile è stato proposto da Thompson e Richardson (1998), anche se la simulazione del comportamento di un singolo utente è fatta all'interno di un ambiente con parametri costanti, a differenza del modello di Benenson e Martens (2008), che è in grado di analizzare le dinamiche collettive del sistema di utenti in un ambiente spaziale realistico, simulando l'impatto sul comportamento di ogni singolo conducente nella situazione del parcheggio che varia continuamente a causa dei conducenti stessi. Questo modello è stato usato per studiare parcheggi residenziali nelle ore serali, che differiscono molto, per preferenze e obiettivi degli utenti, dai parcheggi per non residenti (Hensher e King, 2001; Martens, 2005; Voith, 1998). Infatti, i residenti alla fine della giornata vogliono trovare parcheggio preferibilmente nelle vicinanze della propria abitazione, a differenza dei pendolari che possono scegliere un parcheggio anche in prossimità della destinazione, per evitare il problema del parcheggio, o addirittura scegliere una diversa modalità di trasporto (D'Acerno *et al.*, 2006; Kelly e Clinch, 2006; Hess, 2001). Gli utenti con modalità di spostamento *asistemica*, che si spostano per scopi ricreativi o di piacere, hanno ancora più opzioni di scelta, in quanto possono cambiare sia la loro destinazione sia il loro modo di trasporto in funzione dei problemi di parcheggio (Shiftan e Burd-Eden, 2001). Un altro aspetto interessante del lavoro di Benenson *et al.* (2008) sta nel fatto che il modello è stato sviluppato come applicazione ArcGIS, e data l'elevata risoluzione sia spaziale sia temporale, gli ha consentito di lavorare con un numero praticamente illimitato di utenti. Inoltre, l'uso del software Gis (Geographic information system) gli ha permesso di salvare facilmente i risultati dei vari scenari per lo sviluppo di successive elaborazioni.

All'interno di questo sintetico report sullo stato dell'arte il tema del *pricing* è stato affrontato sotto diversi punti di vista. Come è emerso, la ricerca della tariffa ottima di parcheggio è stata maggiormente approfondita, vista

l'idea di utilizzare questa come strumento per la limitazione degli accessi veicolari privati in area urbana. La domanda che potrebbe nascere spontanea alla fine di questo excursus è: qual è la migliore politica di *pricing*? A questa domanda non c'è una risposta univoca poiché essa dipende dagli obiettivi dei decisori politici e dei cittadini che possono essere vari e molto differenti: garantire l'accessibilità, il flusso veicolare, minimizzare il discomfort nel trovare parcheggio, massimizzare il turn-over nelle aree di sosta, ridurre al minimo l'uso dei mezzi privati, ecc.

In questo contesto, la politica di *parking pricing* può essere vista come uno strumento e non un obiettivo. Al fine di sviluppare una politica di parcheggio che può aiutare a raggiungere gli obiettivi desiderati, pianificatori e decisori hanno bisogno di uno strumento che li aiuti generare delle possibili alternative e a valutarle, e questo lavoro di tesi vuole dare un contributo in tal senso.

1.3 Schemi di *pricing*

Le politiche di *pricing* incontrano solitamente delle forti resistenze sia da parte dei cittadini, che le vivono come un'ulteriore tassa, sia da parte dei politici, che temono di come la popolazione possa reagire. Per tali motivi è necessaria una buona progettazione, assistita da strumenti affidabili che possano trasformare il tutto in un successo. A tal fine è bene innanzitutto fare una classificazione delle politiche di *pricing* di cui esiste una vasta nomenclatura, per poi passare, nei paragrafi successivi, ad analizzare alcuni casi applicativi.

Una prima grande distinzione tra le politiche di *pricing* può essere fatta tra *parking pricing* e *road pricing*. La prima riguarda la tariffazione della sosta, e quindi il pagamento per l'occupazione di uno stallone, la seconda il pagamento per l'attraversamento di un asse viario o un'area. Infatti, per quan-

to riguarda il *road pricing* in ambito urbano, questo a sua volta ha una classificazione più articolata a seconda di cosa la tariffazione interessa, e si ha:

- *Area pricing*: accesso a un'area a traffico limitato con tariffa proporzionale al tempo di permanenza all'interno dell'area stessa, per diverse categorie di veicoli (classe, emissioni inquinanti, ecc.), fascia oraria, ecc., controllata attraverso telecamere o sistemi tipo telepass ai portali d'ingresso. Solitamente la tariffa non è commisurata al numero di accessi giornalieri come nel caso del *cordon pricing*.
- *Cordon pricing*: attraversamento di un cordone e tariffa forfettaria applicata al varco di accesso, in base a categoria del veicolo (classe, emissioni inquinanti, ecc.), fascia oraria, ecc., anche questa controllata attraverso telecamere o sistemi tipo telepass ai portali d'ingresso. In particolare, si parla di *single cordon pricing* se ci si riferisce all'attraversamento di un singolo cordone o *multiple cordon pricing* se si è in presenza di più cordoni.
- *Toll pricing*: attraversamento di un arco o una sequenza di archi della rete con tariffa che può essere indipendente dalla lunghezza dello spostamento e dal momento in cui avviene (*fixed tolls*), funzione della lunghezza dello spostamento (*distance-based tolls*) o funzione della fascia oraria in cui avviene lo spostamento (*time-dependent tolls*). In questo caso il monitoraggio può avvenire attraverso telecamere o sistemi tipo telepass installati agli estremi degli archi, o sistemi di localizzazione tipo GPS/GPRS.

In alcuni casi si parla anche di *congestion pricing* o *congestion charging* quando lo scopo dell'applicazione della politica di *road pricing* è la riduzione dei livelli di traffico sulla rete.

Le politiche prima illustrate hanno trovato applicazione in tante città del mondo, in tempi e modalità molto differenti tra loro. Il primo sistema di *road pricing* e nello specifico di *cordon pricing* del mondo, e anche il più longevo, è stato introdotto nel 1975 nella città di Singapore, al fine di ridurre la

congestione e l'inquinamento da essa provocato e di migliorare, di conseguenza, la qualità della vita all'interno della città.

Anche la città di Stoccolma nel 2006 ha iniziato la sperimentazione di uno schema di *cordon pricing* accompagnato da una politica di potenziamento del trasporto pubblico. Nel settembre dello stesso anno con un referendum la popolazione si è espressa in favore dello schema rendendolo permanente.

A partire dal 1986 anche la Norvegia cominciò ad adottare politiche di *pricing* nelle tre più grandi città del paese (Bergen, Oslo e Trondheim) con schemi di *pricing* noti come *Toll Rings*.

Nel 2003 a Londra si è adottata una politica di *area pricing*, con l'obiettivo di ridurre i volumi di traffico circolante e in ingresso, e oggi è il modello di *Congestion Charging* più noto al mondo.

Nel gennaio 2008 anche la città di Milano si è dotata di uno schema di *pricing* noto come *Ecopass*, che ha delle similitudini con quello adottato a Londra.

Infine, nel 2010 a San Francisco è partito un progetto pilota di *parking pricing* chiamato *SF park*, che attraverso un monitoraggio in tempo reale degli stalli disponibili calcola, di mese in mese, la tariffa di parcheggio ottima.

Nei sottoparagrafi seguenti verranno approfonditi i casi qui richiamati esaminando le politiche tariffarie applicate, le strategie di gestione adottate, l'inquadramento legislativo, gli eventuali problemi emersi durante l'implementazione dei provvedimenti di *pricing* e alcuni parametri di operatività.

1.3.1 Electronic Road pricing di Singapore

Nel 1975 a Singapore, al fine di ridurre i livelli di traffico, e quindi ridurre l'inquinamento e migliorare le condizioni di vivibilità all'interno dell'area urbana, è stato progettato e introdotto il primo schema di *road pricing*, che

inizialmente prevedeva permessi cartacei validi solo per le ore di punta mattutine, *Area Licensing Scheme* (ALS). Nel 1994 il periodo di tariffazione è stato esteso anche alle ore di punta pomeridiane con l'introduzione di una tariffazione differenziale per le varie fasce orarie, in modo da limitare i fenomeni di congestione nell'intorno dei periodi di punta. Nel 1998 il sistema cartaceo viene completamente automatizzato e sostituito dall'attuale *Electronic Road pricing* (ERP), che si basa sul principio *pay as you use*, riuscendo a modulare la tariffa in funzione della fascia oraria e per tipologia di veicolo, in modo che esse siano sempre funzione dei livelli di traffico raggiunti all'interno della rete. Con tale tecnologia, nel momento in cui il veicolo passa sotto un portale elettronico, attraverso un sistema di rilevamento automatico e scambio di informazioni con le unità di bordo, *Dedicated Short Range Communication* (DSRC), avviene l'addebito del pedaggio direttamente su delle *smart card* prepagate. Queste carte possono essere ricaricate in punti automatici dislocati presso banche, stazioni di servizio e uffici postali e sono utilizzabili anche per altre tipologie di pagamento all'interno dell'area urbana. Gli utenti non abituali, turisti o visitatori occasionali, possono affittare le unità di bordo in punti di distribuzione posti fuori dai varchi. Il monitoraggio e il sanzionamento avvengono con apposite telecamere in grado di registrare la targa di coloro che transitano senza essere dotati di unità di bordo o a velocità elevata.

Per far variare le tariffe in funzione della fascia oraria viene utilizzato il cosiddetto *shoulder pricing*, che permette di incrementare e diminuire gradualmente i pedaggi ogni mezz'ora prima e dopo il picco, per scoraggiare gli automobilisti ad accelerare o rallentare con lo scopo di pagare un pedaggio minore.

Allo stato attuale lo schema di *pricing* è dotato di 45 portali di cui 28 formano il cordone attorno alla così chiamata *Restricted Zone*, e cioè l'area centrale in cui è stata definita la zona a traffico limitato (per una superficie pari a circa 7 km²), e 17 sono posizionati sulle più importanti arterie di accesso (segmenti autostradali e strade di scorrimento). Il pedaggio al cordone

è attivo dalle 7:30 alle 19:00 con accesso libero dalle 10:00 alle 12:00, mentre sulle altre strade è valido solo nella fascia oraria di punta mattutina che va dalle 7:30 alle 9:30.

In tutti questi anni di funzionamento del sistema si è avuta la possibilità di avere a disposizione una grande mole di dati che hanno permesso di poter valutare le reazioni degli utenti al *pricing*. Si è notato, infatti, che pur mantenendo livelli tariffari molto bassi, gli utenti sono molto sensibili ai pedaggi. Secondo le tariffe in vigore dal 3 agosto 2009, il massimo pedaggio per un'automobile su un'autostrada può arrivare a poco più di 1,90 €, mentre all'interno della zona a traffico limitato, se l'attraversamento del cordone avviene in un giorno feriale, si può arrivare al massimo a circa 1,44 €, che corrisponde alla tariffa oraria di parcheggio in centro città. Per ciò che riguarda il traffico commerciale sono previste tariffe ridotte per i veicoli leggeri, mentre esse sono crescenti per i veicoli pesanti e i minibus fino ad arrivare al caso di veicoli molto pesanti e autobus.

Le velocità dei flussi di traffico sono continuamente monitorate dalla *Land Transport Authority* (agenzia dei trasporti) che ricalcola le tariffe ogni tre mesi al fine di mantenere le velocità all'interno di un intervallo prestabilito. In particolare, per le autostrade, l'intervallo delle velocità viene mantenuto tra i 45 e i 65 km/h, mentre per le strade di scorrimento fra i 20 e i 30 km/h.

Con l'introduzione dell'ERP nel 1998 si è dato un segnale importante agli utenti, facendo passare il messaggio che il sistema di *pricing* non ha come fine quello di tassare ulteriormente la popolazione, ma quello di migliorare la qualità di vita urbana. Infatti, per rafforzare questo concetto, all'applicazione della tariffazione automatica è stata attuata una riduzione del 30% delle tasse di registro per le auto dotate delle unità di bordo.

Inoltre, il fatto di essere passati da uno schema di *area pricing* a uno di tipo *cordone pricing*, che colpisce i singoli attraversamenti del cordone invece che la mobilità giornaliera, ha scoraggiato quegli utenti che effettuano più accessi al giorno. Questo ha avuto sicuramente un forte impatto sull'area

coinvolta ed è stato importante sia dal punto di vista della riduzione del traffico sia da quello del miglioramento della vivibilità.

Lo schema di Singapore pur essendo un *cordon pricing* ha le potenzialità, a livello tecnologico, di evolversi in un sistema *link based*, cioè uno schema che prevede una tariffazione differenziale su ogni arco della rete.

1.3.2 Congestion Tax di Stoccolma

Nel 2002, a seguito delle elezioni nazionali, il governo Svedese, in contrasto con la politica locale, ha deciso di introdurre uno schema di *road pricing* nel centro di Stoccolma per un periodo di prova, modificando la legislazione vigente. Il progetto originale prevedeva una sperimentazione di 14 mesi, a partire dal giugno 2005. La gara per la fornitura dell'apparecchiatura hardware e software per la gestione del sistema fu vinta da IBM, ma un ricorso fatto da una delle società non vincitrici, la Combitech, generò ritardi nell'avvio del progetto riducendo la sperimentazione a 7 mesi con inizio il 3 gennaio 2006.

Prima del periodo di prova (*full scale trial*), per capire la posizione dei cittadini nei confronti del *road pricing*, sono stati effettuati dei sondaggi telefonici, da cui è emerso che l'attitudine degli utenti verso il sistema di tariffazione varia con la distribuzione modale. In particolare, si è visto che gli utenti che già usufruiscono del sistema di trasporto pubblico sono più favorevoli all'istituzione di una politica di *road pricing*, mentre gli utenti che fanno uso del trasporto privato sono in generale più ostili. Nello stesso periodo è stata avviata una campagna di potenziamento del trasporto pubblico locale, che ha portato all'introduzione di 16 nuove linee e 197 nuovi autobus, al fine di aumentare le alternative modali a disposizione dei pendolari diretti verso il centro della città nelle ore di punta. Inoltre, dove possibile, è stata aumentata la frequenza degli autobus esistenti, della metropolitana e dei treni.

Il 17 settembre 2006 i cittadini, attraverso un referendum, sono stati chiamati a decidere se sospendere il *road pricing* o se adottarlo in maniera definitiva. L'esito del referendum è stato positivo con il 51,3% di cittadini a favore, rendendo la *Congestion Tax* attiva definitivamente dall'agosto 2007.

Il sistema di *pricing* adottato è di tipo *cordon pricing* con un solo cordone circolare di raggio 3 km, che copre il 90% del centro urbano in cui risiede il 96% della popolazione. Il sistema di tipo ERP è composto da 18 portali elettronici, posti ai varchi d'ingresso al cordone. Il riconoscimento dei veicoli ai varchi avviene attraverso unità di bordo o lettura della targa per quei mezzi che non ne sono dotati. Il pagamento del pedaggio avviene a seguito di un report mensile sui passaggi inviato dalla *Swedish Transport Agency*, che il proprietario del veicolo è tenuto a pagare entro un mese dalla notifica, pena una sanzione pari a circa 48,28 €. Quindi, a differenza del caso di Singapore e delle applicazioni Norvegesi dove il pagamento avviene istantaneamente al momento del passaggio, nel caso di Stoccolma il pagamento è differito. L'applicazione della tariffa al passaggio del cordone è applicata solo ai veicoli registrati in Svezia da lunedì al venerdì dalle 6:30 alle 18:29. Tutti i veicoli esteri invece sono esenti come anche i veicoli di soccorso, militari, quelli destinati a persone disabili, le auto diplomatiche, i taxi, gli autobus, i motocicli e i veicoli alimentati a metano ed elettrici. L'applicazione della tariffa cessa nei giorni festivi e nel mese di luglio. La tariffa è differenziata per fascia oraria assumendo il valore massimo, poco meno di 2 €, nell'ora di punta mattutina (7:30-8:29) e pomeridiana (16:00-19:29). Per tale motivo, sotto ogni portale un display informa gli utenti sul valore corrente della tariffa.

Gli investimenti richiesti per avviare la fase di sperimentazione del sistema sono stati pari a circa 100 milioni di euro, a fronte di un ricavo totale di circa 38 milioni di euro. Ma a regime, a fronte un costo di esercizio annuo di circa 21 milioni di euro, i ricavi previsti sono pari a 81 milioni di euro.

L'obiettivo principale iniziale dello schema di *pricing* adottato a Stoccolma era la riduzione del 10-15% del traffico nelle ore di punta con conse-

guente riduzione delle emissioni di biossido di carbonio, ossido di azoto e particolato, al fine di un miglioramento della qualità ambientale complessiva. Tutto ciò attraverso l'induzione di uno *split modale* orientato verso il trasporto pubblico, che parallelamente ha subito un deciso rafforzamento. Nel periodo di sperimentazione però si è assistito a una riduzione dei veicoli all'interno del cordone del 22%, ben superiore del valore previsto. Altra particolarità rilevata durante tale periodo è che una riduzione maggiore si è registrata durante l'ora di punta pomeridiana (-23%) rispetto a quella mattutina (-18%), mostrando la maggiore flessibilità nella scelta dell'orario di rientro a casa da lavoro rispetto allo spostamento inverso.

1.3.3 Toll Rings Norvegesi

A differenza dei due schemi visti in precedenza, il cui scopo principale è quello di governare la domanda di mobilità privata, in Norvegia lo schema di *pricing* adottato ha come obiettivo quello di reperire fondi per finanziare la realizzazione di nuove infrastrutture.

Le città interessate da quest'intervento sono Bergen, Oslo e Trondheim e lo schema adottato è quello del *toll pricing*.

La prima città ad adottare il sistema fu Bergen che negli anni '70 è stata interessata da elevati livelli di congestione, con conseguente aumento di incidenti e inquinamento. Nel 1983 fu così redatto un programma di riassetto dei trasporti, che oltre al potenziamento del trasporto pubblico, prevedeva la costruzione di nuove infrastrutture, quali strade e parcheggi. Il programma era molto ambizioso e i costi necessari erano tali che con i soli fondi governativi sarebbero stati necessari 30 anni per la sua realizzazione.

Nel 1986 si decise, quindi, di adottare uno schema di *pricing* chiamato *Toll Ring*, i cui proventi sarebbero stati destinati a finanziare le opere previste nel programma di riassetto. La tecnologia adottata prevedeva inizialmente un'interfaccia attiva, che richiedeva la fermata dei veicoli, con pagamento

manuale. A partire dal febbraio 2004 è entrato in funzione *Q-Free Autopass*, un sistema elettronico per la riscossione dei pedaggi che identifica i veicoli attraverso un'unità montata a bordo. I varchi complessivi d'accesso sono 9 dislocati nelle vie di accesso principale attorno al centro storico che interessa il 10% circa dei cittadini di Bergen.

Esiste solo un'unica tariffa pari a circa 1,78 € per le automobili e 3,56 € per i mezzi pesanti, per la fascia oraria 6:00-22.00 dei giorni feriali. Sono tuttavia disponibili degli abbonamenti mensili, semestrali o annuali a costo ridotto. La struttura tariffaria è stata definita in modo da soddisfare il fabbisogno di risorse per i nuovi investimenti attraverso previsioni sul traffico medio giornaliero. Gli accessi illegali all'area sono monitorati a campione attraverso un sistema di lettura delle targhe con telecamere.

L'investimento iniziale nel 1986 è stato di 1,8 milioni di euro, con costi operativi annuali di circa 1,7 milioni di euro, pari a circa il 20% delle entrate. Di quest'ultime l'85% sono destinate a interventi in infrastrutture stradali e il 15% al finanziamento di un fondo speciale, il cui impiego è deciso di volta in volta dalle autorità politiche.

L'introduzione del sistema di *pricing* ha dato gli effetti desiderati sotto il profilo delle opere da finanziare, ma l'impatto sul traffico è stato praticamente nullo. Infatti, a fronte di una riduzione del 6-7% degli accessi al centro nei primi anni, la creazione di nuove infrastrutture ha fatto registrare negli anni successivi un incremento di circa il 16% dei veicoli circolanti. A tale scopo è stata necessaria l'introduzione di una politica di *parking pricing* che prevede l'incremento delle tariffe di sosta da 10 a 20 volte in più rispetto ai pedaggi per l'accesso al centro.

Per lo stesso scopo e con modalità simili, nel 1990, anche la città di Oslo ha adottato il *Toll Ring*. Anche in questo caso il pagamento nelle 19 stazioni è di tipo automatico senza fermata o manuale (carta prepagata o monete) e crea un cordone che interessa un'area molto ampia, che coinvolge il 55% della popolazione. La tariffa base è unica per tutta la fascia oraria di funzionamento e pari a circa 2,38 € per passaggio. Anche in questo caso sono di-

sponibili abbonamenti a costo ridotto, che danno diritto a un numero illimitato d'accessi per il periodo previsto.

I costi d'investimento sono stati circa 30 milioni di euro, mentre i ricavi per il primo anno circa 90 milioni di euro, con un rapporto costi-ricavi del 33%. Nel 2004 i ricavi hanno raggiunto i 140 milioni di euro, e attualmente i costi di esercizio rappresentano solo il 10% dei ricavi.

Infine, nel 1991, anche la città di Trondheim ha introdotto il *Toll Ring* che ha terminato la sua operatività il 31 dicembre 2005. Il sistema aveva 12 stazioni a cordone e copriva un'area in cui risiedeva il 40% della popolazione. Il pagamento avveniva in maniera assolutamente automatica, con tecnologia basata su unità di bordo e addebito su conto corrente, ma con possibilità di pagare con carte prepagate con fermata e in due stazioni anche manualmente al personale addetto.

Rispetto ai due casi visti prima, in questo caso le tariffe risultavano variabili nell'arco della giornata, tra ore di punta e di morbida, e della settimana, tra giorni feriali e giorni festivi. Il periodo di funzionamento era tra le 6:00 e le 18:00 con una tariffa media pari a 1,50 € per passaggio per le auto e 3 € per i mezzi pesanti. I costi d'investimento iniziali del sistema, pari a circa 7 milioni di euro, sono stati recuperati nell'arco di sei mesi, invece a regime i costi d'esercizio annuali sono risultati inferiori al 10% delle entrate, grazie all'elevata automatizzazione del sistema.

1.3.4 Congestion Charging di Londra

Nel febbraio del 2003 nella zona centrale di Londra è stato introdotto lo schema di *pricing*, che a oggi risulta il più famoso al mondo. In particolare, si tratta di una *congestion charge* avente essenzialmente quattro scopi: ridurre il traffico, incrementare in modo radicale il servizio di trasporto pubblico di superficie, diminuire i tempi giornalieri di spostamento in auto e aumentare l'efficienza della distribuzione delle merci in città. Oltre a questi obiettivi

principali si voleva inoltre incrementare la mobilità ciclo-pedonale e diminuire l'incidentalità. Gli effetti sul traffico urbano generati dall'introduzione della *congestion charge* sono stati accuratamente monitorati (*Congestion Charging Monitoring Programme*) e pubblicati in un report annuale pubblicamente accessibile (*TfL Annual Monitoring Report*).

Lo schema iniziale del 2003 interessava l'area centrale, interna all'*Inner Ring Road*, coprendo circa 21 km². All'interno vi risiedono circa 200.000 persone e vi lavorano poco più di 1 milione. Per l'accesso era previsto il pagamento di 5 £ per tutti i veicoli che entravano, uscivano, si muovevano o parcheggiavano all'interno dell'area centrale della città, per essere in seguito aumentata a 8 £. Il pedaggio, attivo dalle 7:00 alle 18:00 dal lunedì al venerdì, nel 2004 è stato esteso fino alle 18:30, per poi essere ripristinato nuovamente alle 18:00 nel febbraio 2007, contestualmente all'allargamento verso ovest della *charging zone*.

Attualmente la sua superficie interessata dal *pricing* è di 41 km², coinvolgendo 430.000 residenti e più di 1.200.000 lavoratori.

Il pagamento della tassa consente di entrare e uscire dall'area un numero illimitato di volte al giorno. La tassa di accesso si applica solo ai mezzi privati con quattro o più ruote, escludendo quindi i ciclomotori.

Il pagamento della tassa di accesso deve essere effettuato almeno il giorno prima dell'ingresso, oppure entro lo stesso giorno pagando una sovrattassa di 2 £, viceversa si va incontro a una multa superiore ai 50 £. Il pagamento può avvenire online, tramite sms, telefonicamente, per posta o presso alcuni altri punti dislocati per la città. Esistono forme di pagamento mensili o annuali, che prevedono degli sconti, e per residenti che hanno una tariffa ridotta del 90%. I mezzi dei servizi pubblici, i veicoli dei disabili, gli autoveicoli elettrici, ibridi e alimentati con GPL o gas naturale hanno un'esenzione totale per l'accesso all'area.

Il controllo avviene con un sistema di telecamere installate ai varchi di ingresso e di uscita dalla *charging zone* e al suo interno, che sfruttano il sistema di riconoscimento automatico delle targhe *Automatic Number Plate*

Recognition (ANPR). In caso di infrazione, viene identificato il trasgressore e avviata la procedura di notifica della multa.

Il *Transport for London*, ha accompagnato lo schema di *pricing* con un consistente potenziamento del trasporto pubblico su gomma, che ha interessato un aumento del 23% degli autobus entranti nell'area, l'istituzione di nuove linee, di corsie preferenziali e l'aumento delle frequenze. Anche in questo caso, per favorire l'uso dei mezzi pubblici sono state introdotte tariffe differenziate in funzione degli orari ed esenzioni ad esempio per studenti con età inferiore ai 18 anni.

Un grande investimento è stato fatto anche rispetto alla ciclabilità, prevedendo la realizzazione di circa 900 km di piste ciclabili e la distribuzione delle mappe delle stesse per la maggior fruizione. Sul fronte pedonalità, invece, nel 2004 è stato approvato un piano diretto a migliorare l'accessibilità pedonale delle varie aree della città.

Secondo stime del *Transport for London* dell'aprile 2006 gli effetti indotti dall'attivazione dello schema di *pricing* sono consistenti: la congestione all'interno dell'area è diminuita del 30%, i livelli di traffico si sono ridotti del 18% con una diminuzione di auto del 30%. Parallelamente gli spostamenti in autobus e taxi sono aumentati del 20%, grazie all'affidabilità del trasporto pubblico e ai tempi di attesa e di percorrenza diminuiti notevolmente.

Anche sul fronte delle emissioni inquinanti si è avuto un grande miglioramento, basti pensare che secondo l'archivio del *London Atmospheric Emission Inventory* (L.A.E.I.) l'introduzione del pedaggio ha avuto come effetto una riduzione del 16% delle emissioni di CO₂ all'interno dell'area.

Questa riduzione è stata aiutata dall'introduzione nel 2008 della *Low Emission Zone* (LEZ), un programma di tariffazione dei mezzi maggiormente inquinanti esteso all'intera area della *Greater London*. La LEZ è attiva tutti i giorni dell'anno, inclusi festivi e prefestivi 24 ore su 24, e interessa gli autocarri, autobus e grandi furgoni di vecchia produzione con motore diesel che non rispondono agli standard *Euro 4*. Per tali mezzi è prevista una tassazione pari a 200 £/giorno per accedere all'area.

Il totale investito per la nascita della *congestion charge* si aggira intorno ai 162 milioni di sterline, spesi per le misure di gestione del traffico, le campagne di informazione e la messa in esercizio del sistema, ma l'obiettivo del governo inglese è ancora più ambizioso. Infatti, vorrebbe adottare un sistema tecnologico in grado di trasformare il sistema in *link based*, e cioè in grado di applicare una tariffa per ogni chilometro percorso da ogni veicolo, modulata in funzione del periodo della giornata, del tipo di strada e del contesto territoriale.

1.3.5 Ecopass di Milano

A causa dell'elevato volume di traffico privato che quotidianamente invadeva il centro cittadino, con evidenti ricadute anche di tipo ambientale, la città di Milano fu costretta ad affrontare il problema non più rimandabile nel tempo. Un primo tentativo per affrontare tale tematica fu fatto nel 1995 con la previsione di vaste aree di sosta a pagamento e solo successivamente, nel 1999, si cominciò a discutere di ZTL. Ma solo nel 2008, a seguito di uno studio condotto nel 2002 dall'Agenzia Milanese Mobilità e Ambiente (AMA) e pubblicato nel 2006, si è adottato un sistema sperimentale di *road pricing* denominato *Ecopass*, che regola l'accesso veicolare motorizzato privato nella zona del centro (la Cerchia dei Bastioni).

In modo analogo a Londra, gli obiettivi dell'amministrazione milanese erano la riduzione dell'inquinamento, tutelare la salute dei cittadini e il miglioramento della vivibilità urbana. In particolare, si voleva raggiungere una riduzione del 30% delle polveri sottili e del 10% delle auto all'interno dell'area sottoposta al provvedimento. *Ecopass* è stato inserito all'interno di un programma più ampio di pianificazione dei trasporti e di salvaguardia ambientale, che ha previsto inoltre il potenziamento del trasporto pubblico, l'estensione della sosta regolamentata, la realizzazione di nuove piste cicla-

bili, l'aumento delle corsie preferenziali per i mezzi pubblici, l'aumento delle zone verdi e altre iniziative volte a migliorare l'efficienza energetica.

La base normativa a cui si rifà il sistema *Ecopass* è la *Direttiva Europea 2004/35* sulla responsabilità ambientale in materia di prevenzione e riparazione del danno ambientale, basata sul principio *chi inquina paga* (art. 1).

Inizialmente il sistema prevedeva l'accesso all'area attraverso *Telepass*, ipotesi sostituita in fase di implementazione dalle telecamere con sistema ANPR, già presenti per il controllo delle corsie preferenziali del Tpl nei 43 varchi individuati.

La zona a traffico limitato della Cerchia dei Bastioni copre una superficie di 7 km² e ha una popolazione residente di circa 76.000 persone. Una volta entrati nell'area, il pagamento del pedaggio dava diritto a un numero illimitato di accessi nell'intera giornata dalle 7:30 alle 19:30, dal lunedì al venerdì.

Nel sistema *Ecopass*, a differenza di altri sistemi di *pricing*, le tariffe sono differenziate a seconda della classe *Euro* a cui appartengono (secondo la Normativa Europea), all'alimentazione, alla presenza di filtri antiparticolato omologati e al tipo di trasporto a cui il veicolo è adibito (merci o persone). Invece, i veicoli ecologici alimentati a GPL, metano e i veicoli elettrici e ibridi sono esenti, come anche i mezzi di trasporto pubblico, i mezzi di soccorso e di tutte le forze armate, i veicoli destinati a disabili, i ciclomotori e i motocicli, i veicoli con targa estera in cui non è in vigore il sistema di classificazione *Euro* e i veicoli commerciali adibiti in via esclusiva e permanente al trasporto di merci alimentari altamente deperibili a temperature controllate dalle 10:00 alle 16:00. Tutti gli altri veicoli pagano una tariffa di 2, 5 o 10 € a seconda se appartengono alla classe *Euro* 3, 4 o 5.

Il ticket può essere attivato in anticipo, il giorno stesso o entro il giorno dopo l'ingresso nella ZTL e può essere giornaliero, multiplo o sottoforma di abbonamento con diverse modalità di pagamento: card prepagata, on-line, tramite SMS, direttamente agli sportelli bancari o con addebito sul conto corrente. Se non si attiva il ticket entro il giorno successivo alla data di ac-

cesso o se si attiva per una classe di inquinamento inferiore a quella di appartenenza del proprio veicolo, scatta una sanzione amministrativa che prevede una multa fino 285 €.

I dati raccolti nel 2008 mostrano una riduzione media annuale del traffico all'interno dell'area *Ecopass* del 16,4% e del 3,4% al di fuori, rispetto ai dati del 2007, prima dell'adozione del sistema. Inoltre, si registra una riduzione media dell'indice di congestione del 4,7%, un aumento della velocità media di deflusso veicolare nell'ora di punta mattutina del 4%, un incremento della velocità commerciale del trasporto pubblico di superficie del 6,7% con un aumento dei passeggeri del 5,7%, corrispondente a circa 35 milioni di passeggeri/anno. Dal punto di vista ambientale, invece, si è osservata una riduzione media delle emissioni atmosferiche di PM10 da traffico stradale del 19%.

Il 12 e 13 giugno 2011 i cittadini milanesi sono stati chiamati a rispondere a un referendum, in cui il 79,1% dei votanti ha risposto positivamente al quesito numero 1, che prevedeva un piano di interventi per potenziare il trasporto pubblico e la mobilità pulita alternativa all'auto, attraverso l'estensione a tutti gli autoveicoli (esclusi quelli a emissione zero) e l'allargamento progressivo fino alla cerchia filoviaria del sistema di accesso a pagamento, con l'obiettivo di dimezzare il traffico e le emissioni inquinanti".

Per rispettare la volontà dei cittadini il 16 gennaio 2012 il sistema *Ecopass* è stato sostituito dall'*Area C*, che a sua volta è stata sospesa nel mese di luglio 2012, a causa di un ricorso presso il Consiglio di Stato, per successivamente rientrare in funzione il 17 settembre 2012.

Gli obiettivi dell'*Area C* analogamente a quelli dell'*Ecopass* sono quelli di migliorare le condizioni di vita per chi vive, lavora, studia e visita la città, attraverso la riduzione del traffico all'interno della Cerchia dei Bastioni, il miglioramento del trasporto pubblico e investimenti destinati alla mobilità sostenibile con gli incassi provenienti dal *pricing*.

L'*Area C* è attiva nei giorni di lunedì, martedì, mercoledì e venerdì, dalle 7:30 alle 19:30, e i giovedì dalle 7:30 alle 18:00. La tariffa giornaliera è unica

per tutti i veicoli a cui è permesso l'accesso e pari a 5 €. Infatti, in questo nuovo schema si ha il divieto di accesso all'area per tutti i veicoli diesel *Euro* 0, 1, 2, 3, i veicoli a benzina *Euro* 0 e i veicoli di lunghezza superiore a 7 metri. L'accesso invece rimane sempre gratuito per i veicoli elettrici, ciclomotori e motocicli e per i veicoli ibridi, bifuel, alimentati a metano e GPL.

Per entrare nell'*Area C* è necessario attivare un titolo d'ingresso entro la mezzanotte del giorno successivo oppure un titolo di ingresso da 30 € entro la mezzanotte del settimo giorno successivo all'accesso all'area.

Oltre alle modalità di pagamento del pedaggio viste in precedenza, è stata introdotta la modalità on-line sul sito ufficiale del Comune di Milano anche tramite sistema *PayPal*.

Sin da subito il nuovo sistema di *pricing* ha fatto registrare un'ulteriore riduzione del 30% del traffico all'interno dell'area nelle ore in cui il sistema è attivo. Inoltre, se si guarda l'intera area milanese, nel primo semestre 2012, si era registrata una riduzione media del traffico rispetto allo stesso periodo del 2011 pari al 6,9%, che sale al 7,6% durante la fascia oraria in cui è attiva l'*Area C*. La riduzione della congestione ha da subito dato i suoi benefici facendo registrare un calo della presenza di inquinanti pari mediamente al 20%, l'aumento della velocità commerciale dei mezzi pubblici di superficie del 6% e la riduzione del numero di incidenti stradali pari al 28%.

Se si fa riferimento ai dati relativi al primo semestre 2013, nei giorni e ore di applicazione dell'*Area C*, si è registrata un aumento degli ingressi giornalieri del 6% rispetto allo stesso periodo del 2012, ma una riduzione del traffico del 28,3% rispetto al primo semestre 2011, precedente all'entrata in vigore dell'*Area C*.

1.3.6 SFpark

Nel novembre del 2008, il Consiglio d'Amministrazione della SFMTA (*San Francisco Municipal Transport Agency*), attraverso una norma, ha dato

il via a un progetto pilota di *parking pricing* denominato *SFpark*. L'obiettivo principale di tale progetto è quello di ottimizzare l'utilizzo delle aree di sosta esistenti, per migliorare le condizioni di vivibilità all'interno della città.

L'area pilota su cui è stato sperimentato *SFpark* comprende otto quartieri della città: Civic Center, Hayes Valley, The Financial District, SoMa/Mission Bay, Fisherman's Wharf, Mission, Fillmore e Marina. All'interno di questa sono stati installati sensori *wireless* su ogni stallo presente, per il rilevamento dello stato di occupazione dello stesso da parte dei veicoli. In particolare sono stati interessati 7 mila stalli su strada, su un totale di 28 mila presenti nella città, e altri 12.250 distribuiti in 15 garage di proprietà del comune e gestiti dalla SFMTA, su un totale di 20.

L'installazione dei sensori è terminata a fine del 2010 e da subito il sistema ha iniziato la fase di rilevamento dello stato di occupazione degli stalli, permettendo nell'aprile del 2011 di poter stilare un primo report.

Il sistema *SFpark* si basa sul principio che il prezzo del parcheggio deve essere calcolato in modo tale che sia sempre disponibile uno stallo per coloro che sono disposti a pagare (Vickrey, 1954; Shoup, 2004, 2006, 2007). Seguendo tale teoria le tariffe di parcheggio calcolate dal sistema sono tali da garantire il 15% di stalli liberi in ogni isolato e parcheggio in cui è attivo *SFpark*. Grazie ai rilevamenti fatti nel primo trimestre del 2011 sono state calcolate delle tariffe per ogni zona che sono entrate in vigore a maggio dello stesso anno. A partire da questa condizione, il sistema, conoscendo lo stato di occupazione degli stalli in tempo reale, provvede ad aggiornare le tariffe ogni mese in maniera differenziata per zona, fascia oraria e giorno della settimana. La disponibilità di stalli liberi è resa visibile in tempo reale anche agli utenti attraverso applicazioni per *smartphone*, che potranno dirigersi verso zone con disponibilità di stalli più alta e magari con tariffe più basse.

Questo consente di trovare velocemente parcheggio eliminando il traffico parassita con importanti risvolti in termini di congestione veicolare, aumento della velocità commerciale e affidabilità dei mezzi pubblici di superfi-

cie, maggiore sicurezza per pedoni e ciclisti, minor numero di incidenti stradali e in generale maggiore vivibilità urbana.

Le tariffe di sosta variano da 0,25 \$ a 6 \$ all'ora; in caso di eventi speciali, quali eventi sportivi o manifestazioni, il prezzo orario è più elevato e variabile di volta in volta.

Operativamente, una volta che l'utente ha parcheggiato, può decidere di pagare la tariffa o attraverso parcometri installati sui marciapiedi oppure con *smartphone* attraverso il sistema *PayByPhone*.

I fondi per finanziare il progetto arrivano principalmente dai 19,8 milioni di dollari concessi dall' *U.S. Department of Transportation's Urban Program*. Infatti, la SFMTA non considera *SFpark* come uno strumento per aumentare le entrate comunali ma come una strategia per aumentare il benessere dei cittadini e quindi con scopi simili a schemi di *road pricing* come quello di Londra e Milano.

Aspetto importante di questo sistema è che genera la disponibilità di nuovi spazi di sosta senza costruire nuovi parcheggi, sfruttando soltanto la leva della tariffa di parcheggio. È proprio quest'ultima che riesce a ridistribuire la domanda in funzione dell'offerta di sosta disponibile, indirizzandola verso parcheggi più periferici o verso i garage, inducendo l'utenza a spostarsi a orari diversi o addirittura inducendoli verso l'uso di modalità di trasporto alternative.

Un ruolo importante che consente a *SFpark* di raggiungere gli obiettivi prefissati è dato dall'utilizzo della sensoristica e delle tecnologie a essa associate, che consentono all'utente di consultare in tempo reale la disponibilità di stalli e la loro tariffa, aiutandoli a fare scelte consapevoli su quando, se e dove guidare.

Il 30 dicembre 2013 il progetto pilota si è concluso con lo spegnimento dei singoli sensori di parcheggio, corrispondente alla fine della vita utile delle batterie di alimentazione integrate nei sensori. In primavera del 2014, grazie ai dati raccolti in questi anni di adozione del sistema, sarà pubblicato un report con i risultati finali ottenuti da *SFpark*. Questo sarà un valido

strumento di supporto all'Amministrazione nel prendere nuove scelte sull'implementazione del sistema e sull'espansione su zone della città finora non raggiunte. Nel frattempo, anche se non sarà più disponibile l'informazione sui singoli stalli disponibili, l'utente potrà consultare, per ogni zona, il tasso di occupazione degli stalli calcolato dai parcometri o dagli altri sistemi di pagamento. Il sistema tariffario che rimarrà in vigore terrà conto delle serie storiche di dati raccolti per periodo, giorno della settimana e fascia oraria.

1.3.7 Differenze tra i sistemi di pricing

Le politiche di *pricing* viste in precedenza si differenziano oltre che per il tipo di schema utilizzato e per le tecnologie adottate per la gestione, anche per gli obiettivi. Nelle tre città Norvegesi, infatti, l'unico obiettivo che le amministrazioni volevano raggiungere era quello di trovare nuove forme di finanziamento per la realizzazione di nuove infrastrutture di trasporto, a differenza di tutti gli altri in cui il principale obiettivo da raggiungere è la riduzione della congestione tramite lo spostamento della domanda di mobilità dall'auto privata al trasporto pubblico e il miglioramento della vivibilità urbana.

Per tutte le politiche di *pricing* emerge che un tema molto delicato da affrontare è l'accettazione da parte dei cittadini e in generale degli utenti, che in definitiva condiziona la buona riuscita dell'applicazione del sistema. Infatti, l'esperienza di Stoccolma mostra come può rivelarsi utile l'impiego di un periodo di sperimentazione accompagnato da una politica di potenziamento del TPL, prima della definitiva entrata in vigore del *road pricing*. Il sistema introdotto nella capitale Svedese presenta molte analogie con la strategia adottata a Londra. In entrambi lo schema di tassazione è stato introdotto per l'urgente bisogno di ridurre gli elevati livelli di congestione e in entrambi il

TPL, già presente e con prestazioni notevoli, è stato potenziato parallelamente all'entrata in vigore del provvedimento.

I *Toll Rings* norvegesi, invece, oltre ad essere i sistemi più longevi dopo quello di Singapore, sono i più avanzati da un punto di vista tecnologico, il che gli ha permesso di avere un basso rapporto tra costi di gestione e ricavi da traffico, che si aggira intorno al 10%, rispetto al 26% registrato a Stoccolma. Questo è in linea con la necessità da parte delle Amministrazioni norvegesi di massimizzare i ricavi derivanti dalla tariffazione. Questo spunto risulta interessante, poiché mette in evidenza che, oltre al calcolo delle tariffe risulta importante anche la scelta tecnologica, che ha una sua forte incidenza sia sui costi d'investimento sia su quelli di gestione.

Riguardo alla struttura tariffaria dall'analisi dei vari sistemi potrebbe nascere il dilemma se è più giusto il principio *chi inquina paga* adottato a Milano o quello *pay as you drive* usato a Londra. Anche in questo caso la risposta non è facile, infatti, nel caso milanese le misure adottate hanno prodotto effetti positivi in termini di riduzione del traffico e dell'inquinamento ma, simultaneamente, hanno generato una variazione del parco veicolare a favore dei veicoli meno inquinati esenti dal pedaggio. Nel caso londinese, invece, si è registrata una riduzione drastica di veicoli, rispettando un altro principio: un veicolo quando circola non solo inquina, ma riduce lo spazio ad altre componenti del traffico come pedoni e ciclisti.

1.4 Il sistema proposto

Nei paragrafi precedenti si è cercato di analizzare, attraverso lo stato dell'arte e le *best practices*, i vantaggi e i problemi legati all'adozione di uno schema di *pricing*. Oltre al tema di tipo modellistico e metodologico, sempre complesso nell'ambito dei trasporti, la problematica più rilevante ai fini dell'adozione di uno schema da parte delle amministrazione è quella legata ai costi d'investimenti e di esercizio. Il tema legato ai costi è uno degli aspetti

che ha accompagnato questo studio, al fine di trovare una soluzione che oltre a essere funzionale per gli obiettivi prefissati vuole essere parimenti sostenibile da un punto di vista economico.

Approfondendo tutti gli schemi analizzati con le rispettive varianti possibili, si è giunti a formulare un nuovo modello che ha le caratteristiche di uno schema di *parking pricing*, ma con potenzialità tali da influire anche sulla mobilità all'interno dell'area interessata, perseguendo gli stessi obiettivi e ottenendo gli stessi risultati di una ZTL. Tale esito si ottiene mettendo a sistema un opportuno schema di circolazione all'interno dell'area interessata, con un controllo e una gestione intelligente del sistema di parcheggio all'interno dell'area stessa; il tutto opportunamente progettato, simulato e integrato.

1.4.1 La circolazione a stanze

Per far in modo che un sistema di *parking pricing* riesca a perseguire le stesse finalità di un *road pricing* è indispensabile eliminare il *traffico di attraversamento* nella zona sottoposta al provvedimento. Per definizione, il *traffico di attraversamento* è quello che utilizza le infrastrutture presenti all'interno di una determinata zona per raggiungere un luogo terzo, quindi, è una componente di traffico che si può indirizzare verso assi esterni all'area presa in esame. Tale risultato può essere raggiunto attraverso la realizzazione, all'interno dell'area, di *stanze di circolazione* create con il ridisegno dei sensi di circolazione tali da non consentire, o perlomeno scoraggiare, a chi entra in una stanza di passare a quella limitrofa.

Una possibile soluzione potrebbe essere quella di creare un doppio senso di circolazione nella viabilità a cordone dell'area su cui intervenire, in modo da consentire l'accesso o l'uscita dalla stanza. Invece, nella viabilità principale interna all'area che suddivide le varie *stanze di circolazione* è opportuno assegnare un unico senso di marcia, per consentire o la sola entrata

o la sola uscita dalle *stanze*. Nella figura seguente si riporta un esempio di schema della viabilità principale e a cordone in un'area divisa in quattro *stanze di circolazione*. In questo esempio, la viabilità principale interna consente solo l'uscita dalle stanze e di raggiungere il cordone, eliminando di fatto il traffico di attraversamento tra le varie zone. Inoltre, i quattro assi principali interni, come si può notare, sono stati disconnessi tra loro attraverso la creazione di un'isola pedonale.

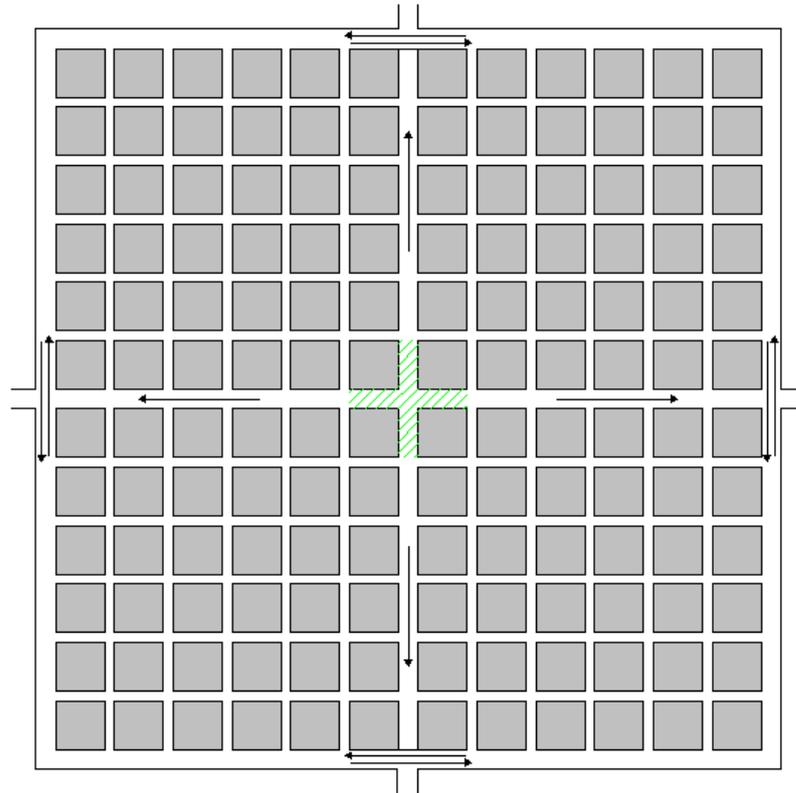


Figura 1.1 - Schema per la creazione delle stanze di circolazione

Nella pratica è molto difficile replicare lo schema riportato nell'esempio in modo integrale, per tale motivo questo vuole essere solo uno spunto, che lascia il dovuto approfondimento a ogni professionista, che di caso in caso adotterà le scelte progettuali migliori per raggiungere gli obiettivi prefissati.

A sua volta, all'interno di ogni *stanza* si propone di adottare, per quanto possibile, la cosiddetta *circolazione a stanze*, della quale si parla per la prima volta nella Circolare del Ministero dei Lavori Pubblici n° 2575 dell'8 agosto 1986 (detta Nicolazzi), in cui viene delineato quello che diverrà nel 1995 il Piano Urbano del Traffico.

Il legislatore, nel capitolo dedicato alla progettazione della circolazione, fornisce utili suggerimenti sulla progettazione degli schemi di circolazione veicolare e ricorda che il dimensionamento della rete e le qualificazioni funzionali delle strade principali sono delle scelte che vanno fatte in fase di progetto preliminare. Inoltre, lo schema di circolazione veicolare deve individuare la distinzione dei sensi unici e dei doppi sensi, le manovre consentite sulle intersezioni e, dove previsti (ad esempio zone pedonali corsie riservate), i divieti di transito.

Infine, riguardo agli aspetti principali della progettazione di uno schema di circolazione veicolare, la scelta di sensi unici o doppi sulla viabilità principale deve essere fatta in funzione:

- dell'introduzione di opportune strategie, al fine di deviare il traffico dalle zone da proteggere;
- della conseguente eventuale necessità di deviazione su strade di servizio, appartenenti alla rete locale che, per assolvere a tale funzione, possono essere utilizzate a senso unico, e in questo caso le strade di servizio entrano a far parte della rete principale.

Invece, nei riguardi della viabilità secondaria, la scelta dei sensi di marcia va fatta in seguito:

- alla verifica di congruenza sullo schema di circolazione delle rete, per evitare percorsi alternativi (by-pass) sulla rete locale;
- all'ottimizzazione della capacità di sosta sui singoli tronchi della rete locale;
- alla facilitazione di ricerca di spazi di sosta.

La circolare *Nicolazzi*, a tal proposito riporta diversi esempi di schemi di circolazione tra cui quello a *stanze*, che attraverso l'impiego di sensi unici contrapposti su entrambe le strade che convergono a un'intersezione.

In linea generale, questo tipo di circolazione spezza la continuità monodirezionale delle viabilità che si interseca generando agli incroci solo traiettorie che confluiscono o defluiscono. Ciò comporta un'inevitabile e lieve allungamento degli itinerari a tutto vantaggio della sicurezza e della fluidificazione del traffico, oltre che un minor tempo di ricerca del parcheggio, limitando la generazione di *traffico parassita*, cioè quello che si crea in fase di ricerca di uno stallone per la sosta.

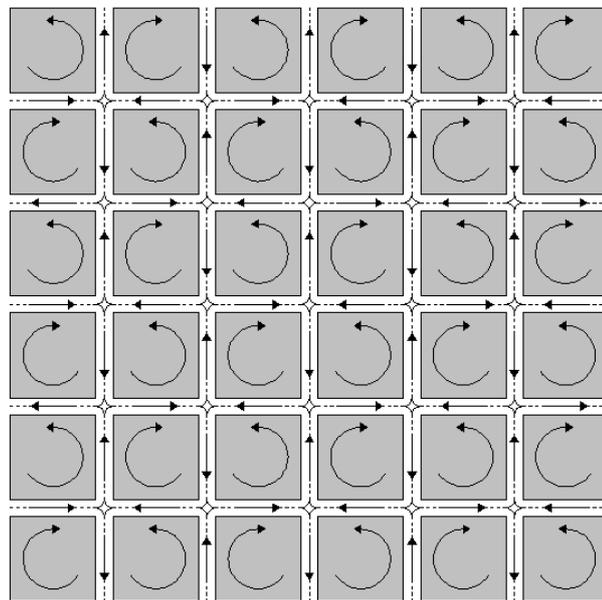


Figura 1.2 - Schema di circolazione a stanze

In definitiva, l'obiettivo è quello di creare all'interno dell'area in cui applicare lo schema di *pricing* delle *stanze di circolazione* al cui interno sia adottato una circolazione a stanze.

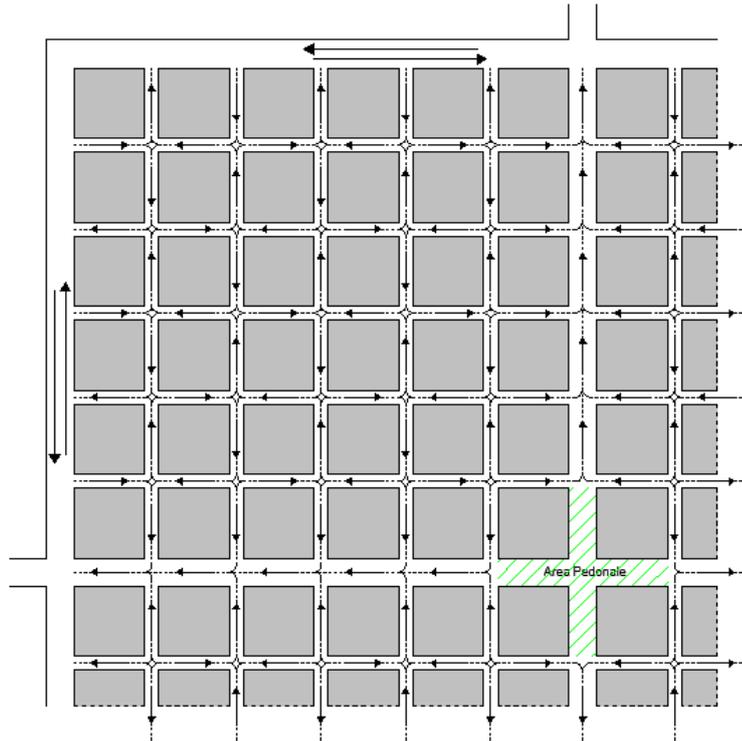


Figura 1.3 - Particolare dello schema di circolazione proposto

In questo modo, chi entra in una *stanza* deve avere come unico obiettivo quello avere come destinazione un punto all'interno della *stanza* stessa e quindi, una volta arrivato, parcheggiare. È proprio durante la sosta che si applica la tariffazione, che tiene conto anche del fatto che si è all'interno di una zona a traffico limitato. La tariffazione varierà, oltre che da *stanza* a *stanza*, anche in funzione della fascia oraria (di punta o di morbida), dei giorni della settimana e di altre variabili che le amministrazioni possono decidere di mettere in gioco (ad es., classe *Euro* di appartenenza del veicolo). L'aspetto relativo al calcolo della tariffa ottima di parcheggio verrà approfondito nel secondo capitolo, in cui viene proposto un modello.

1.4.2 L'architettura del sistema

In questa nuova concezione di mitigazione degli accessi, diventa cruciale il monitoraggio degli stalli di parcheggio, che è lo strumento attraverso il quale si raggiunge l'obiettivo principale di creare una zona a traffico limitato e indirettamente avere un controllo più efficace sulla sosta.

A tale fine si è pensato a un'architettura del sistema semplice, economica e con un'infrastruttura tecnologica poco invasiva. Una volta individuate le aree di sosta all'interno della zona oggetto dell'intervento, sia esse su strada sia fuori dalla carreggiata, verrà installata una rete di *sensori wireless* (uno per ogni stallo) che consentirà di avere un monitoraggio in tempo reale sullo stato di occupazione degli stalli stessi.

Il sistema, fondamentalmente, è composto da tre elementi:

- Nodo sensore;
- Tag veicolare;
- Gateway.

Il *nodo sensore* ha la funzione di riconoscere l'occupazione dello stallo e, se l'automezzo è dotato di identificativo *Tag veicolare*, il nodo è in grado di comunicare al sistema centrale tale interrogazione, permettendo così di riconoscere l'identità dell'occupante del singolo stallo.

Il sensore è controllato da una CPU in grado di effettuare le letture del campo magnetico terrestre e di gestire le comunicazioni con gli altri sensori e il Tag. Il nodo può essere alimentato con una batteria a sua volta ricaricata da un pannellino fotovoltaico in silicio amorfo posto sulla faccia superiore del marker, anch'esso carrabile, che garantisce una durata di vita superiore ai 5 anni.

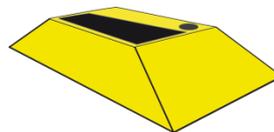


Figura 1.4 - Nodo sensore

Il *Tag veicolare* è un semplicissimo *tag* (o transponder) a radiofrequenza di tipo passivo, che viene posizionato nel parabrezza all'interno dell'automezzo e ha la funzione di identificare il proprietario del veicolo in sosta, in questo modo si può, oltre a individuare l'utente, conoscere la categoria a cui appartiene il veicolo e le autorizzazioni necessarie per occupare lo stallo; ad esempio, gli stalli riservati ai disabili o per il carico e lo scarico merci. Inoltre, il *tag* può essere posseduto dai residenti o da utenti abbonati. Tutti gli altri utenti che non posseggono il *tag*, una volta occupato lo stallo e prima che esso venga dichiarato occupato illegalmente, hanno un lasso di tempo prestabilito (10 minuti ad esempio) per effettuare il pagamento attraverso diverse modalità: applicativo per *smartphone*, sms con la comunicazione del numero di stallo occupato e il conseguente pagamento attraverso il credito telefonico, schede prepagate utilizzabili attraverso risponditore automatico telefonico (IVR - *Interactive voice response*), ecc.

Il *Gateway* o *nodo sink* è il nodo che riceve le informazioni provenienti dalla rete di sensori ed è in grado di trasmettere le informazioni ricevute a un server centrale, tramite rete tipo GSM/GPRS, MAN (Metropolitan Area Network), WAN (Wide Area Network) o a *onde convogliate* sfruttando la rete elettrica della pubblica illuminazione.

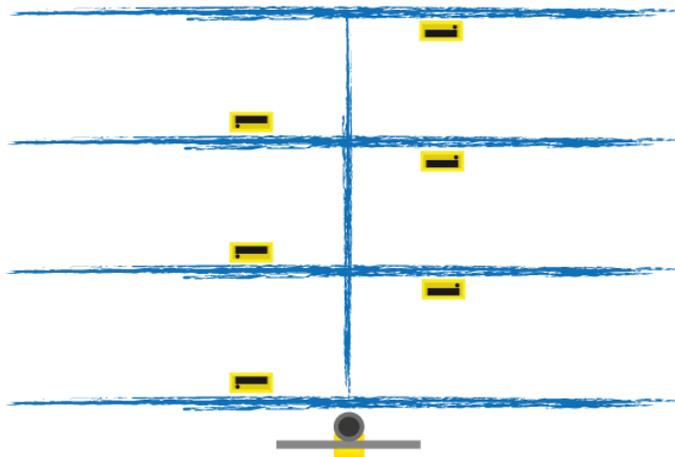


Figura 1.5 - Disposizione sensori negli stalli e nodo sink

Il sistema siffatto è un sistema molto espandibile, basti pensare di aggiungere alla rete altri tipologie di sensori (rilevatori di dati ambientali, meteorologici, ecc.) che trasmettono i dati tutti alla stessa centrale di controllo per le diverse elaborazioni.

Per completezza è bene approfondire i due aspetti tecnologici di maggior importanza utilizzati all'interno di questo sistema: i Tag e la rete di sensori wireless.

1.4.3 I Tag RFID

L'RFID (*Radio Frequency Identification*) è una tecnologia per lo scambio dati automatica tramite onde radio, applicabile in molti ambiti. Un sistema RFID è composto da almeno due elementi, il *transponder* e il *reader*. Il *transponder* o *tag* è un dispositivo elettronico composto, nella forma più semplice, da un chip e da un avvolgimento elicoidale montato su un substrato che li sostiene. Il chip (grande pochi millimetri) è la parte intelligente costituita da una memoria non volatile e un codice unico, il quale viene trasmesso tramite la spira risonante, che funge da antenna, all'apparato lettore che leggerà i dati ricevuti o li aggiornerà.



Figura 1.6 - Tag RFID

Il *reader* è il mezzo di comunicazione tra il mondo esterno e il mondo dei *transponder* e ha la capacità di interrogare individualmente i *tag*, inviare e ricevere dati e interfacciarsi con i sistemi informativi esistenti.

Un *reader* è normalmente è composto da due elementi:

- l'unità di controllo, che è un microcalcolatore con un sistema operativo che permette in tempo reale di gestire le interfacce con le antenne, l'interrogazione dei *tag* che entrano nel campo d'azione di un'antenna, le collisioni tra i messaggi di risposta dei *tag* e l'interfaccia con i sistemi informativi aziendali;
- le antenne, che sono il vero mezzo di comunicazione fra il *reader* e i *tag*. I *transponder* infatti per essere attivati devono entrare nel campo elettromagnetico generato da una antenna.

Le tecnologie RFID sono basate sulla propagazione radio o elettromagnetica. L'informazione gestita può essere il semplice riconoscimento di presenza/assenza o, nei sistemi più evoluti, sofisticate operazioni di programmazione in linea nella memoria dei *transponder*. A queste tecnologie sono state riservate diverse bande di frequenza:

- basse frequenze (*Low Frequency* - LF), inferiori a 135 KHz, in particolare due: 125 KHz e 134 KHz;
- alte frequenze (*High Frequency* - HF), di cui ne viene usata solo una da 13.56 MHz;
- frequenze ultra alte (*Ultra High Frequency* - UHF), di cui solo due vengono usate, quella da 433 MHz e la banda che va da 800 a 960 MHz;
- microonde, di cui solo quella da 2.45 GHz è ancora utilizzata.

Ogni frequenza ha caratteristiche sostanzialmente diverse sotto il profilo fisico: parametri di comunicazione (distanza, velocità di trasmissione, ecc.) e di ambiente di funzionamento (presenza di metalli, di liquidi, attività elettromagnetica, ecc.).

Vi sono quindi due diversi tipi di funzionamento, a seconda del tipo di frequenza utilizzato:

- LF e HF: il tipo di accoppiamento fra lettore e *tag* è di tipo elettromagnetico con forte prevalenza della componente magnetica, ossia della trasmissione per via induttiva. Quando il *transponder* entra nel campo

d'azione del lettore, assorbe energia elettromagnetica dal lettore stesso, che viene convertita in energia elettrica che va a caricare un condensatore la cui energia viene utilizzata per trasmettere allo stesso lettore il proprio codice di identificazione.

- UHF e microonde: l'accoppiamento fra lettore e tag è di tipo elettromagnetico con forte prevalenza della componente elettrica. Il lettore emette un segnale, che viene ricevuto dal transponder che si attiva a trasmettere l'informazione in esso contenuta. Si tratta di un fenomeno di riflessione, simile a quello che governa i sistemi radar.

Riguardo le modalità di alimentazione i *transponder* si possono classificare come *passivi*, *semipassivi* e *attivi*. I *tag passivi* vengono alimentati dal segnale elettromagnetico emesso dal lettore in uno dei due modi visti in precedenza, e richiedono un'elevata potenza del segnale (nell'ordine di qualche watt). I *tag attivi* invece possiedono una fonte di alimentazione propria, utilizzata sia per alimentare il *chip* ed eventuali apparati ausiliari (sensori) sia per trasmettere. Questi tipi di *transponder*, inoltre, hanno la capacità di trasmettere senza essere interrogati dal *reader*. Infine, i *tag semipassivi* sono anch'essi dotati di una piccola batteria, ma quest'ultima serve solo per alimentare il *chip* e gli apparati ausiliari, il trasmettitore viene alimentato, come nei *tag passivi*, per induzione.

Oltre che in termini di frequenza, potenza di funzionamento e tipo di alimentazione, i *tag* si possono distinguere in base al tipo di memoria. La memoria può variare, a seconda dei modelli, da qualche decina a qualche migliaio di *byte* e possono essere di sola lettura o di lettura e scrittura.

Le memorie di sola lettura *ROM (Read Only Memory)* sono normalmente configurate dal produttore del componente con un numero limitato di informazioni, sono poco costose e hanno una vita utile molto lunga.

Un tipo di memoria intermedio è la *WROM (Write Once Read Memory)* che permette all'utente di scrivere una sola volta nella memoria senza poterne successivamente cancellare o modificare il contenuto. Questa funzionalità è utile perché permette all'utente di personalizzare le informazioni

contenute in memoria, senza doverlo richiedere al produttore del *chip*.

Infine, le memorie *RAM* (*Random Access Memory*) ed *EEPROM* (*Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory*) permettono di scrivere e leggere senza limiti. Le memorie *RAM* sono impiegate da tempo in tante applicazioni elettroniche e permettono di raggiungere grandi densità di dati memorizzati a fronte di costi molto contenuti. La loro unica limitazione è che necessitano di una fonte di alimentazione permanente per mantenere i dati in memoria. Le memorie *EEPROM*, invece, hanno il vantaggio di richiedere una fonte di alimentazione solamente durante le operazioni di lettura e scrittura. I produttori dichiarano che le *EEPROM* possono mantenere i dati in memoria senza alimentazione per almeno 10 anni.

L'uso di questo tipo di memoria è quindi la soluzione più adeguata per i *tag passivi* da installare nei veicoli e quindi per poter contenere quella piccola quantità di dati che consente d'identificare in modo univoco un veicolo e/o un'utente.

1.4.1 Le reti di sensori

Le reti di sensori senza filo *WNS* (*Wireless Sensor Networks*), sono particolari reti caratterizzate da un elevato numero di dispositivi elettronici, detti *nod*i, che grazie ai progressi tecnologici raggiunti nel campo della microelettronica-meccanica, nella comunicazione *wireless* e nell'elettronica digitale, permettono di integrare in un unico blocco di silicio sensori in grado di rilevare grandezze fisiche e di svolgere piccole elaborazioni sui dati raccolti.

In letteratura è possibile trovare riferimenti alle reti di sensori come casi particolari di reti *ad hoc* chiamate *hybrid ad hoc networks*, anche se in generale gli algoritmi e i protocolli impiegati nelle reti *ad hoc* tradizionali non sono compatibili con le WSN.

Quindi, è bene porre l'attenzione sulle principali differenze fra le reti di sensori e le reti ad-hoc tradizionali, infatti, in una rete di sensori:

- il numero di nodi che la compongono può essere di alcuni ordini di grandezza maggiore rispetto al numero di nodi di una rete *ad hoc*;
- i nodi sono disposti con un'elevata densità;
- i nodi possono essere soggetti a guasti;
- la topologia può mutare frequentemente a causa di guasti ai nodi;
- i nodi utilizzano un paradigma di comunicazione *boardcast* (cioè la trasmissione di informazioni da un sistema trasmittente a un insieme di sistemi riceventi non è definito a priori), mentre la maggior parte delle reti *ad hoc* hanno un funzionamento di tipo punto-punto;
- i nodi hanno limitazioni in fatto di alimentazione, di capacità di elaborazione e di memoria;
- dato l'elevato numero di nodi, solitamente, non tutti possiedono un identificatore globale come, ad esempio, l'indirizzo IP nei computer;
- i nodi necessitano di una stretta integrazione con le attività di rilevamento.

Una rete di sensori è quindi un insieme di dispositivi posti in prossimità o all'interno dell'area in cui si intende rilevare un determinato fenomeno. I sensori vengono prodotti in massa con costi di produzione trascurabili e sono caratterizzati da peso e dimensioni molto ridotti. Ogni sensore, in genere, ha una riserva di energia limitata e non rinnovabile e, dopo essere messo in opera, deve essere in grado di lavorare senza la supervisione dell'uomo. Per tale motivo questi dispositivi devono mantenere consumi molto bassi, in modo da avere un ciclo di vita che sia il più lungo possibile. Il consumo energetico di un sensore è sostanzialmente dovuto a tre fattori:

- *sensing*: la potenza necessaria per effettuare il campionamento o le misurazioni, il che dipende dalla natura dell'applicazione;
- *data processing*: l'energia spesa per elaborare i dati è molto piccola se confrontata con l'energia necessaria per la comunicazione;
- *communication*: dei tre fattori è quello che necessita della maggiore

quantità di energia poiché comprende sia la trasmissione sia la ricezione dei dati, i cui costi energetici si possono ritenere sostanzialmente uguali.

In una rete ogni sensore ha il ruolo sia di generare sia di ricevere informazioni, quindi, la perdita di alcuni nodi può provocare significativi cambiamenti topologici che possono richiedere la riprogettazione della rete o del *routing*. A seconda dell'applicazione, per ottenere una maggior quantità possibile di dati, occorre procedere a una massiccia distribuzione dei sensori in modo da avere densità che possono arrivare fino a 20 nodi/m².

A seconda di come lavora la rete si può parlare di *reti centralizzate*, se tutte le comunicazioni sono dirette verso un unico nodo che elabora le informazioni raccolte, o di *reti distribuite*, se i nodi hanno sufficienti capacità per elaborare autonomamente i dati prima dell'instradamento. In entrambi i casi, le informazioni viaggiano all'interno della rete attraverso un *routing multi hop* da un generico nodo fino al *sink*. Quest'ultimo è il nodo dedicato alla raccolta dei dati provenienti dai vari sensori, a cui può essere collegato direttamente un elaboratore oppure un'interfaccia che lo mette in comunicazione con altre reti come internet, ad esempio. Attraverso il percorso inverso, invece, è l'utente, che mediante applicazioni di gestione della rete, è in grado di inviare comandi a ogni nodo della *WSN*.

Indipendentemente della piattaforma hardware utilizzata dal produttore, un nodo wireless è sempre costituito da quattro unità fondamentali: l'unità di *sensing*, un trasmettitore per la comunicazione e lo scambio dei dati, un'unità di elaborazione della grandezza misurata e un sistema di alimentazione autonomo.

L'unità di *sensing* è il vero e proprio sensore, cioè il dispositivo incaricato di trasformare la grandezza fisica misurata in un segnale elettrico che possa essere elaborato. Un nodo può disporre di più sensori, anche di grandezze fisiche diverse, che sono però strettamente legate alla specifica applicazione del nodo. Nel caso dello studio in esame, ad esempio, il nodo sarà dotato di un sensore che rileva la variazione di campo magnetico generata

dall'auto parcheggiata sullo stallo.

Il *ricetrasmittitore wireless* è l'unità che connette il nodo alla rete e solitamente è il componente che consuma più energia. Per questo motivo è indispensabile che il trasmettitore resti attivo solo per il tempo strettamente necessario per la comunicazione. Il collegamento *wireless* è il grande vantaggio presentato dai nodi sensori, infatti, risulterebbe impensabile mettere in comunicazione via cavo grandi quantità di nodi posizionati in una vasta area geografica.

L'unità *computazionale* permette di dotare il nodo della capacità di elaborare i dati raccolti e di gestire le comunicazioni, ad esempio modificando il comportamento della rete senza di fatto modificarne l'architettura.

Infine, *sistema di alimentazione* è il componente più importante di un nodo sensore, data l'impossibilità di usufruire della rete di distribuzione. In passato l'unica soluzione al problema energetico era l'uso di pile elettrochimiche, il cui sviluppo tecnologico non ha subito notevoli evoluzioni negli ultimi anni. Oggi l'evoluzione tecnologica permette di poter usufruire di particolari celle fotovoltaiche, il cui processo di produzione è brevettato col nome *DSSC (Dye-Sensitized Solar Cell)*. In modo sintetico e semplificato, le celle *DSSC* sono dei dispositivi elettrochimici, costituiti da molecole capaci di assorbire la luce, ancorate su nano-particelle semiconduttive di diossido di titanio (TiO₂), in grado di generare energia elettrica dalla luce solare. Questa tecnologia consente di avere una resa energetica molto alta, indipendentemente dall'incidenza dei raggi solari sulle superfici colpite dalla luce e l'efficienza non diminuisce nel tempo, anzi in certi casi, a causa della cristallizzazione del prodotto applicato, questa può addirittura aumentare. L'impiego di tale tecnologia nelle reti di sensori permette di risolvere il problema del consumo energetico, in quanto associando una cella *DSSC* a ogni nodo è possibile ricaricare le batterie dei sensori, allungandone il ciclo di vita.

Avendo chiarito le parti e le funzioni fondamentali di un sensore, si ritorna a parlare di reti di sensori e in particolare della loro classificazione in

relazione alla struttura topologica. In particolare si possono distinguere tre diversi gruppi di rete:

- a *stella*;
- a *mesh* (o *peer to peer*);
- ad *albero*.

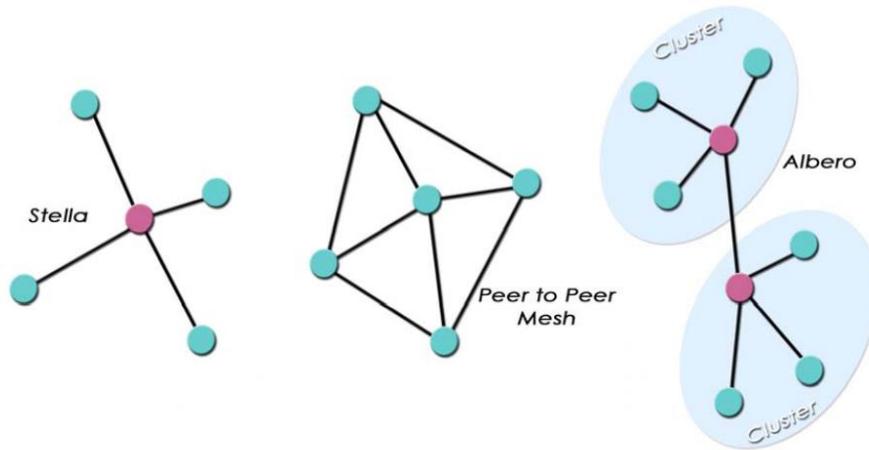


Figura 1.6 - Classificazione delle reti in funzioni della topologia

Le *reti a stella* sono caratterizzate dalla presenza di un nodo centrale detto *coordinatore* a cui gli altri nodi della rete fanno riferimento. Questo implica che affinché due nodi possano comunicare fra loro è necessario che prima comunichino con il *coordinatore* della rete. Questa struttura topologica risulta essere quella più semplice da implementare e consente l'utilizzo di protocolli poco onerosi da un punto di vista computazionale. Generalmente il *coordinatore* di una *rete a stella* può anche avere funzione di *bridge* verso altri sistemi di connessione.

Le *reti a mesh* o *peer to peer* superano in termini di funzionalità quelle a *stella*. In queste reti il *nodo coordinatore* non è essenziale, in quanto ogni dispositivo è in grado di connettersi con tutti gli altri nodi della rete. In questo modo è possibile creare dei percorsi ridondanti, che da un lato aumentano l'affidabilità della rete in caso di guasto, ma dall'altro richiedono l'impiego di algoritmi di *routing* più complessi.

Nelle *reti ad albero*, invece, si ha la presenza di diversi *cluster*, costituiti da gruppi di nodi, che possono interconnettersi in modo simile a come avviene la diramazione delle foglie su un albero. Ciascun *cluster* è dotato di un *nodo principale*, che rappresenta il punto di accesso per la sottorete in questione. Il vantaggio di questa topologia rispetto alle reti *peer to peer* consiste nella riduzione dei percorsi di comunicazione possibili, che di conseguenza consente lo sviluppo di sistemi di gestione meno complessi.

Qualunque sia la topologia della rete scelta, in generale, il funzionamento della rete prevede che un utente specifica al *nodo sink* le informazioni di cui ha bisogno. A sua volta esso genera una interrogazione che viene immessa in rete. A questo punto, una o più risposte vengono inviate dai *nodi sensori* al *nodo sink*, che le raccoglie e le elabora prima di fornirle all'utente.

Da questa illustrazione sembrerebbe che la cosa più immediata sarebbe quella di lasciare al *sink* il compito di riunire tutte le informazioni provenienti dai nodi sensori e successivamente di elaborarle. In realtà questa soluzione risulta impraticabile per due ordini di motivi:

- le conferme di corretta ricezione delle informazioni, cosiddetti segnali di *Acknowledge*, che il *sink* è costretto a inviare a tutti i nodi che hanno risposto all'interrogazione, rappresentano un collo di bottiglia nel caso in cui si prevedono incrementi futuri del numero di nodi collegati al *sink*;
- usando un sistema di comunicazione tra i nodi *wireless*, alcuni di essi posizionati lontano dal *sink* potrebbero non essere in grado di comunicare direttamente con quest'ultimo a causa della limitata potenza di trasmissione.

Quindi, è bene modellare le *WNS* non come un database distribuito in cui tutti i nodi sono passivi, ma bensì come un insieme di nodi in grado di collaborare fra loro e dove ognuno di essi ha capacità attive programmabili. Questo permette a tutti i nodi di coordinarsi tra loro per eseguire il compito assegnato, rendendo i nodi sensori attivi e autonomi.

L'area all'interno della quale vengono disposti i nodi sensori viene detta *area di sensing*. Il nodo *sink* attraverso la sua antenna dovrà essere capace di illuminare tutta l'*area di sensing*, in modo da poter comunicare con tutti i nodi della rete. Gli algoritmi e i protocolli utilizzati nelle WSN, inoltre posseggono capacità auto organizzative, questo consente di non dover determinare a priori né la posizione né il numero di sensori, rendendo il sistema molto flessibile. I sensori, conoscendo le caratteristiche di trasmissione del *sink* e sfruttando il suo segnale di illuminazione, possono effettuare un autoapprendimento di posizione, che risulta essere una delle loro caratteristiche più importanti. Vista la scarsa disponibilità energetica di cui si dispone, è necessario cercare di ottimizzare al meglio gli algoritmi che permettono al sensore di conoscere la propria posizione, riducendo al minimo il suo tempo di apprendimento.

Data la flessibilità e la facilità di installazione, le applicazioni di una rete di sensori sono svariate e condizionano la natura dei nodi stessi, che possono essere dotati di sensori totalmente diversi. È possibile misurare una vasta gamma di grandezze fisiche come l'umidità, la pressione, la temperatura, il suono, l'intensità luminosa, le dimensioni di un oggetto, campi magnetici, la presenza di oggetti in movimento e la loro accelerazione, ecc. Grazie alle loro ridotte dimensioni, si adattano bene a essere impiegati in ambienti ostili o inaccessibili. Inoltre, il loro numero elevato permette di monitorare con facilità tali grandezze fisiche in aree relativamente estese.

Oggi le reti di sensori sono utilizzate in molti ambiti, come per esempio l'ambiente, la medicina, la domotica, per applicazioni militari e commerciali.

Dal momento che i nodi hanno un costo ridotto e possono essere impiegati su qualsiasi area con alti livelli di densità, la distruzione di alcuni di essi in seguito a un'azione ostile o vandalistica non influisce sul funzionamento globale della rete.

1.5 Conclusioni

Riassumendo, il funzionamento del sistema proposto è semplice: migliaia di parcheggi dotati di *sensori wireless* nella pavimentazione, che raccolgono istante per istante le informazioni sulla disponibilità di posti liberi, con le relative autorizzazioni, e le trasmettono al sistema centrale. A questo punto le informazioni vengono utilizzate in modo differente:

- dalla *centrale di controllo*, che ha la visione complessiva sullo stato di occupazione degli stalli e quindi ha i dati necessari per modificare i piani di tariffazione attraverso appositi modelli;
- dagli *accertatori*, ai quali attraverso dispositivi *tablet* viene segnalata la posizione degli stalli occupati illegalmente, così da poter intervenire tempestivamente, in modo efficace e senza dispendio di forze;
- dagli *utenti*, che attraverso *app* per *smartphone* e *tablet* potranno individuare gli stalli liberi, con la relativa tariffa, e quindi il percorso più breve per raggiungerli.

Il sistema proposto presenta diversi vantaggi sia per gli utenti sia per le amministrazioni locali che saranno chiamate a gestirlo. Per quanto riguarda gli utenti, questi avranno l'opportunità di sapere in modo semplice e veloce dove c'è maggior probabilità di trovare parcheggio e a quale tariffa. Questo riduce notevolmente i tempi di ricerca del parcheggio eliminando il *traffico parassita* e riducendo gli impatti sull'ambiente. Le amministrazioni invece, a seguito di un investimento iniziale, potranno usufruire di un sistema che con la stessa infrastruttura riesce a governare sia la problematica della sosta sia il controllo degli accessi veicolari in aree sottoposte a restrizioni. Inoltre, la tecnologia utilizzata per implementare tale sistema riduce al minimo il numero di persone coinvolte nella gestione anche nella fase di controllo, per cui gli accertatori potranno dirigersi direttamente nei punti in cui il sistema individua l'infrazione.

Una soluzione di questo tipo, introducendo opportunamente le tariffe di sosta all'interno della varie *stanze* e parcheggi, permette di scaricare le aree

che si vogliono liberare dai mezzi privati. Ciò richiede però che le tariffe vengano rimodulate periodicamente, come nel caso di *SFpark*, per evitare che il fenomeno della congestione si sposti semplicemente su altre zone.

Fra gli altri vantaggi, il risparmio economico è forse il più importante. Infatti, un sistema siffatto ha dei costi di impianto sensibilmente contenuti, dato il basso costo dei singoli sensori. Tra le voci di costi più gravose vi è quella relativa alla configurazione del sistema centrale, che si occupa della raccolta dei dati e della comunicazione delle informazioni ai cittadini e al personale addetto al controllo. Proprio grazie alla snellezza della infrastruttura anche i costi di gestione, a parte quelli relativi al personale della sede operativa e di quello addetto al controllo, sono fortemente limitati alla sola manutenzione, ordinaria e straordinaria del sistema.

Infine, un altro punto a favore di questo schema è l'efficienza, infatti, anche se un *nodo sensore* dovesse danneggiarsi si viene a perdere soltanto l'informazione riguardante quello stallo poiché il sistema è in grado di autoconfigurarsi facendo a meno di quel nodo nelle operazioni di instradamento delle informazioni.

Questo schema, come d'altronde tutte le politiche di *pricing*, ha come grande problema quello relativo all'accettabilità da parte dei cittadini. Per tale motivo è bene far precedere l'attuazione dello schema con un periodo di prova accompagnato da campagne di informazione e di sensibilizzazione, durante il quale creare un rapporto sereno tra utente e sistema.

CAPITOLO 2

L'OTTIMIZZAZIONE DELLA TARIFFA DI SOSTA PER LA RESTRIZIONE DEGLI ACCESSI

In questo capitolo verrà illustrata la procedura adottata per la determinazione e l'ottimizzazione della tariffa di parcheggio, come soluzione sostitutiva alle politiche attuali di pricing all'interno delle aree a traffico limitato. Tale modello matematico viene integrato da regole di buona progettazione e, attraverso l'utilizzo di software open source, viene proposta una soluzione facile e veloce al problema in esame.

2.1 Premessa metodologica

Una volta chiarito l'aspetto tecnologico che consente di monitorare e gestire gli accessi nell'area sottoposta a restrizioni, è importante illustrare il modello messo a punto per progettare, simulare e valutare gli scenari ipotizzati.

Come ampiamente discusso nel capitolo precedente, negli anni la comunità scientifica ha prodotto tanti studi sui metodi di ottimizzazione delle tariffe, dai quali si è partiti per giungere al modello proposto discusso nel proseguo di questo capitolo.

Dato l'elevato numero delle variabili in gioco nei problemi di ottimizzazione tariffaria, si ricorre frequentemente ad *algoritmi euristici* come l'algoritmo proposto da D'Acerno *et al.* (2006), che consente di trovare le

tariffe ottime di parcheggio per ogni coppia OD. L'algoritmo di soluzione meta-euristica che propone si articola nelle seguenti fasi:

- fase 1 = ottimizzazione esaustiva monodimensionale;
- fase 2 = definizione della soluzione iniziale;
- fase 3 = ottimizzazione attraverso la ricerca di intorno;
- fase 4 = *stop test* o definizione di una nuova soluzione iniziale.

Nella fase 1 si esegue una ricerca monodimensionale esaustiva rispetto a ciascuna variabile del modello, mentre le altre sono supposte costanti. Nella fase 2 viene scelta la soluzione iniziale, assegnando a ciascuna variabile il valore ottimo individuato nella fase precedente. A partire dal punto individuato, l'algoritmo ricerca l'ottimo locale nell'intorno della soluzione corrente. Nella fase 4, si esegue lo *stop test* e cioè si va a verificare se il valore ottimo trovato è uguale a quello trovato, e in questo caso si arresta l'algoritmo, viceversa il nuovo valore si assume come soluzione iniziale e ripete le fasi 3 e 4.

Già Vickrey nel 1954 si occupò di tariffe, e in particolare suggerì che il prezzo del parcheggio deve essere calcolato in modo tale che sia sempre disponibile uno stallo per coloro che sono disposti a pagare, suggerendo una percentuale pari al 15% di stalli liberi a tutte le ore del giorno. Tale concetto fu ulteriormente sviluppato da Shoup (2004, 2006, 2007), il quale propone che la tariffa di parcheggio ottima può essere trovata in modo iterativo attraverso un incremento/diminuzione del prezzo iniziale, fino a ottenere un coefficiente medio di occupazione dell'85%, con eventuali variazioni tariffarie per fasce orarie giornaliere. Principio che poi fu applicato nel 2010 a San Francisco (*SF park*) dando ottimi risultati.

Il modello presentato in questo lavoro è stato formulato partendo proprio dai concetti espressi in questi lavori, cercando di aggiungere un tassello a questo complesso filone di ricerca. Si vuole proporre un modello innovativo sia dal punto di vista infrastrutturale e gestionale, come ampiamente discusso nel primo capitolo, sia dal punto di vista modellistico, attraverso un approccio semplice e veloce.

A tale scopo sono stati utilizzati software gratuiti e *open source*, ottenendo sia una riduzione dei costi, per coloro che vorranno approcciarsi in tale ambito, sia per mostrare la facilità di utilizzo e le potenzialità molte volte nascoste da un'interfaccia utente poco *user-friendly* o addirittura dalla mancanza della stessa. In particolare, è stato utilizzato il foglio di calcolo *Calc* di *OpenOffice* per il *data entry* e l'elaborazione dei dati, il software di assegnazione *AxE* (*Assegnazione per Esperti*) realizzato dal Prof. Giorgio Salerno e *QGIS* (*Quantum GIS*) per la costruzione del grafo stradale e per le elaborazioni grafiche dei risultati ottenuti dalle assegnazioni.

Come in tutti gli studi sulla mobilità si è seguito il seguente schema:

- individuazione dell'area di studio;
- suddivisione in zone dell'area di studio (zonizzazione);
- definizione del modello di offerta del sistema di trasporto;
- stima (tramite indagini o modelli) della domanda di trasporto che interessa l'area di studio (matrici OD);
- simulazione dell'interazione domanda/offerta (calcolo dei flussi di traffico sulle diverse componenti del sistema).

Per verificare la correttezza degli *step* metodologici, si è condotta un'applicazione sulla città di Palermo, che verrà illustrata nel successivo capitolo. A seguire verranno riportate le varie fasi della metodologia adottata e illustrati i software utilizzati.

2.2 Analisi territoriale: delimitazione e zonizzazione

L'analisi territoriale ha lo scopo di individuare e descrivere le caratteristiche di un territorio e le variabili che ne influenzano lo sviluppo. È quindi contemporaneamente un'analisi statica e dinamica. In generale, le componenti di rilievo per un'analisi territoriale sono:

- l'ambiente naturale, vale a dire la conformazione geografica, la struttura ecologica, ecc.;

- il sistema antropico, cioè gli aspetti demografici, sociali, economici, il tessuto abitativo, ecc.;
- il sistema infrastrutturale, cioè la distribuzione dei servizi, dei sistemi di trasporto, i servizi tecnologici, ecc.

L'analisi territoriale è per sua natura uno strumento di supporto alla decisione, serve infatti a comprendere:

- come governare lo sviluppo del territorio;
- quali sono le risorse disponibili e come utilizzarle;
- quali sono gli strumenti idonei;
- quali relazioni vi sono fra gli elementi del territorio;
- quali sono le potenzialità e le criticità del territorio;
- come salvaguardare tutti gli aspetti rilevanti.

Per quanto riguarda le diverse componenti del sistema sociale ed economico, esse interagiscono strettamente fra loro. È noto che per valutare la dinamica di tali sistemi e intervenire su di essi in modo sensato è bene, innanzitutto, rendersi conto delle interazioni che avvengono al loro interno e con l'ambiente circostante.

In generale, il buon senso e l'esperienza sono fondamentali nell'impostare lo studio e interpretare i suoi risultati, ma non sono sufficienti. Questo è particolarmente vero per gli interventi sul sistema della mobilità, che è forse fra i più complessi e sensibili alle influenze degli altri sistemi presenti sullo stesso territorio. Si tratta di intervenire su sistemi complessi: con numerose e forti non linearità, cioè effetti non proporzionali alle loro cause; con numerosi cicli di retroazione, cioè fenomeni che influiscono sulle proprie cause, talvolta generando reazioni a catena; e con fenomeni intrinsecamente aleatori, cioè variabili che fluttuano in modo almeno parzialmente imprevedibile.

In questa situazione, non è possibile prevedere in modo semplice le conseguenze degli interventi progettati: aprire una via può accrescere la congestione del traffico; modificare l'offerta di trasporto in un'area può influire pesantemente su aree lontane; localizzare aree commerciali o direzio-

nali in un punto piuttosto che in un altro può alterare fortemente le caratteristiche della domanda di trasporto.

Da ciò è facile intuire che le scelte nel campo della mobilità richiedono molte informazioni, il più possibile complete e aggiornate, strumenti concettuali e modelli raffinati, per cogliere la complessità del sistema che si sta esaminando, e strumenti informatici adeguati a trattare questa mole di dati fra loro correlati.

Il funzionamento quotidiano, l'utilità sociale e le potenzialità di successo per un sistema di trasporto sono fortemente influenzate dal contesto in cui esso opera. Basti pensare anzitutto alla conformazione geografica del territorio e alla struttura della rete stradale, quindi, alla presenza di sistemi di trasporto concorrenti. Infine, alla distribuzione e alle caratteristiche della popolazione, alle sue esigenze e abitudini di spostamento, alla sua sensibilità nei confronti delle tariffe e della qualità di un servizio. Poiché questi aspetti sono strettamente correlati, il progetto di un sistema di trasporto richiede molte informazioni per giungere a una scelta ragionata.

Le informazioni necessarie, benché di natura molto eterogenea, sono per lo più intrinsecamente legate al territorio su cui il sistema deve operare. Quindi, la pianificazione nei trasporti prende le mosse da una fase approfondita di analisi territoriale. L'ambito di tale analisi dipende dal progetto che si intende realizzare. Secondo che si tratti di ristrutturare l'intero sistema di mobilità di un'area o semplicemente di introdurre in esso un nuovo sistema, la natura, l'entità e l'accuratezza dei dati necessari cambiano sensibilmente.

Uno schema per fasi successive, quindi, è utile a organizzare lo studio, ma verrà generalmente ripercorso più volte per raffinare progressivamente l'analisi.

2.2.1 Delimitazione dell'area e delle fasce temporali

Si tratta di delimitare l'area geografica interessata dallo studio e all'interno della quale si suppone che si concentrino i suoi effetti. Il confine dell'area viene definito *cordone*. Tutto quanto si trova al di fuori del cordone costituisce l'ambiente esterno, del quale non interessano la struttura e le caratteristiche, ma solo le relazioni con l'area di studio.

Nel caso di una zona a traffico limitato, l'area di studio coincide, in genere, con l'area delimitata all'interno della quale è applicato il *pricing*. Alla delimitazione dell'area di studio è opportuno ricondurre anche la scelta dell'orizzonte temporale, cioè dei periodi durante la giornata o dei giorni della settimana o durante l'anno nei quali il servizio ha specifiche differenti. È chiaro che un territorio esprime caratteristiche molto diverse nei giorni feriali rispetto ai giorni festivi. Analogamente, nelle ore notturne, la situazione sarà ben diversa che nelle ore diurne e tra quest'ultime ci sarà una differenza tra le varie parti della giornata.

La scelta dell'area e delle fasce orarie rilevanti per lo studio deriva dalle esigenze di mobilità della zona dove si vuole intervenire. Per evitare di esporre l'opera di pianificazione a un fallimento, l'area e le fasce orarie devono essere tali da riuscire a raggiungere l'effetto desiderato. Queste considerazioni vengono svolte a livello di dettaglio nell'analisi della domanda e dell'offerta, ma in effetti esse motivano già e influenzano la precedente fase di analisi del territorio in termini di osservazione svolta a grandi linee.

2.2.2 Zonizzazione

Per modellare il sistema di trasporto e il sistema socio-economico con cui esso interagisce, è spesso utile discretizzare l'area in esame, cioè dividerla in zone più piccole, trasformandola così da un'estensione continua di terreno a un insieme limitato di un determinato numero di zone.

Il risultato concreto della zonizzazione è di rappresentare tutte le origini e le destinazioni degli spostamenti di una zona con un singolo punto, detto *centroide*. Questo distingue immediatamente gli spostamenti che hanno luogo nel territorio in:

- spostamenti *intrazonali*, cioè che avvengono all'interno delle singole zone;
- spostamenti *interzonali*, cioè che avvengono fra una zona e l'altra.

L'idea di fondo della zonizzazione, relativamente agli studi sulla mobilità, è che gli spostamenti all'interno delle singole zone non siano significativi ai fini dello studio, quindi i cosiddetti spostamenti *intrazonali* vengono trascurati.

Un elevato numero di zone porta a una rappresentazione più precisa, e a una minor incidenza degli spostamenti intrazonali, ma anche a un maggior onere di schematizzazione, di disaggregazione dei dati e di simulazione.

Ovviamente, la dimensione delle zone dipende dalla scala con la quale si vuole condurre lo studio: possono essere interi comuni o circondari, nel caso di studi su aree nazionali, regionali o provinciali, mentre si possono ridurre a pochi isolati nel caso di studi su singoli comuni o quartieri, come nel caso in questione.

Il criterio teorico da seguire nel condurre una zonizzazione è di individuare porzioni di territorio per le quali la concentrazione in un solo punto appare un'ipotesi accettabile. Quindi, anche questa fase è strettamente legata alle successive fasi di descrizione della domanda e dell'offerta di trasporto. Il livello di dettaglio, infatti, dipende dalla capillarità dei sistemi di trasporto che si considerano.

La stessa area ammette in generale diverse possibili zonizzazioni, secondo l'applicazione che si sta considerando. Esistono però alcune regole generali da tener presenti:

- i confini tra le zone corrono lungo i separatori fisici del territorio, siano essi naturali (come i fiumi) o artificiali (come canali, linee ferroviarie, ecc.);

- i confini rispettano le unità territoriali amministrative (sezioni censuarie comunali, provinciali, ecc.), anche per il semplice motivo che, in genere, i dati sono disponibili su quella scala;
- diverse regioni dell'area in esame possono essere ripartite con dettaglio diverso: le aree più vicine a elementi rilevanti del sistema di trasporto o del tessuto urbano vanno suddivise in modo più fitto;
- è opportuno aggregare porzioni di territorio omogenee rispetto alle attività insediate, alle infrastrutture di trasporto, all'accessibilità.

Per il tema in esame si può partire da una zonizzazione che ha come elementi di riferimento le *sezioni censuarie ISTAT* (*Istituto Nazionale di Statistica*) o un'aggregazione delle stesse, per le quali esiste già una grande quantità di dati rilevati durante i censimenti.

2.3 Modellazione dell'offerta di trasporto

Questa fase consiste nel tradurre in forma matematica tutti gli elementi che caratterizzano il sistema di trasporto analizzato. Sia per questa fase sia per quella precedente di zonizzazione, vengono in aiuto i *software* GIS, di cui si parlerà alla fine di questo paragrafo.

In un primo stadio della modellizzazione si separano le informazioni rilevanti da quelle superflue, scegliendo successivamente solo gli elementi più significativi. Si dovrà operare una selezione delle infrastrutture e dei servizi presenti nell'area di studio che svolgono una funzione rilevante di collegamento fra le diverse zone in cui è suddivisa l'area. Solitamente, nel caso delle reti stradali, non tutte le infrastrutture svolgono una funzione di collegamento importante.

La *rete di base* dipende dalle finalità per le quali si costruisce il modello, dalla zonizzazione e dalle modalità di trasporto considerate, in altre parole, se si considera un sistema mono o multimodale.

I dati sono dapprima descritti con linguaggio naturale in un modello spaziale e, successivamente, tradotti in un modello concettuale. Questa tappa della modellizzazione è completamente indipendente dal sistema informatico e avviene grazie a formalismi che descrivono la struttura dei dati (geometria, topologia, attributi e relazioni tra le diverse entità) in maniera univoca e consistente. Successivamente, per integrare i dati in un GIS bisogna tradurre i risultati del modello concettuale in un modello logico.

L'elemento che sta alla base della modellazione di qualsiasi sistema di trasporto, sia esso stradale sia ferroviario, è il *grafo*, di cui si parlerà nel sottoparagrafo successivo.

2.3.1 Il grafo

Il *grafo* è un oggetto matematico astratto, che però si può visualizzare come un insieme di punti collegati fra loro da un insieme di linee. In termini più formali, i punti vengono definiti *nodi* e le linee *archi*. Ogni arco lega due nodi, che sono i suoi estremi, mentre un nodo può essere l'estremo di un numero qualsiasi di archi. Per convenzione, spesso, si indicano i nodi con lettere minuscole dell'alfabeto, mentre gli archi sono indicati dalla coppia dei nodi estremi racchiusi fra parentesi tonde. Si avranno così, per esempio, i nodi i e j e l'arco (i, j) .

In questa trattazione assumono un ruolo importante i *grafi orientati*, cioè quelli nei quali l'ordine fra i nodi estremi che individuano un arco è significativo. In questi grafi, l'arco (i, j) è altra cosa rispetto all'arco (j, i) . Nelle rappresentazioni grafiche, l'orientamento di un arco è in genere rappresentato con una freccia.

I grafi sono comunemente usati in matematica ogni volta che occorre rappresentare relazioni fra oggetti. Passando alle applicazioni sul campo dei trasporti, il grafo può essere usato in diversi momenti e per rappresentare diversi elementi. L'applicazione più immediata riguarda la rete stradale o quella del trasporto pubblico. In questo caso, infatti, è naturale rappresenta-

re come nodi le località (piazze, incroci, le fermate del servizio, ecc.) e come archi i tratti di strada che le collegano.

In particolare, i nodi rappresentativi di intersezioni sono detti *nodi reali*, per distinguerli dai nodi *centroidi*, cioè da quei nodi baricentrici rispetto a una zona e nei quali si pensano concentrate le emissioni e le attrazioni degli spostamenti. Di conseguenza, gli archi rappresentativi di tratti di strada sono detti *archi reali*. I nodi reali sono numerati progressivamente a partire da numeri successivi a quelli utilizzati per i *centroidi*.

I nodi *centroidi* sono collegati alla rete di trasporto tramite archi fittizi detti *archi connettori*, rappresentativi degli spostamenti che avvengono per raggiungere la rete di base a partire dal luogo reale di origine dello spostamento.

Si definisce *cammino* o *percorso* una sequenza di archi, ciascuno adiacente al successivo, in modo che il suo secondo estremo coincida con il primo di quest'ultimo, e al precedente, in modo che il suo primo estremo coincida col secondo di quest'ultimo.

E' molto frequente nelle applicazioni che ai nodi e agli archi si associno delle informazioni; si parla allora di *grafi pesati*. Un esempio naturale di peso associato agli archi di una rete stradale è il tempo di trasferimento lungo il tronco viario rappresentato dall'arco stesso, oppure la sua lunghezza, o ancora, il costo derivante da una specifica funzione. Più in generale, a ogni arco è possibile associarvi tutti gli oneri supportati da chi lo percorre.

Inoltre, ogni arco viene classificato secondo delle tipologie, o categorie predefinite, nelle quali a ogni parametro corrispondono valori di riferimento diversi per ogni categoria di strada. In particolare, i parametri a cui si è interessati sono: il *numero di corsie* della strada per senso di marcia e la *larghezza della carreggiata*, o meglio la larghezza della parte di carreggiata riservata al traffico stradale.

Un altro parametro interessante è il *tempo di percorrenza ad arco scarico*, che dipende dalla *lunghezza* e dalla *categoria* di appartenenza dell'arco stesso, dalla quale dipende anche la *velocità* limite. Analogamente, la *capaci-*

tà massima dell'arco, cioè il massimo flusso di veicoli che può sopportare, dipende dal numero di corsie e dalla categoria.

Una rete stradale non è un oggetto statico, con proprietà assegnate una volta per tutte, ma un sistema dinamico, le cui caratteristiche variano drasticamente di ora in ora, o di giorno in giorno, secondo l'entità e la natura del carico a cui è sottoposta. Di conseguenza, il grafo che la descrive non sarà semplicemente un grafo pesato con informazioni ai nodi e agli archi statiche, descritte da singoli valori numerici, ma un *grafo tempovariante*, nel quale le informazioni associate ai nodi e agli archi sono funzioni del tempo.

È chiaro che, com'è un'approssimazione assegnare un valore ben determinato di velocità di percorrenza a un arco, così è ancora un'approssimazione assegnarvi un valore di velocità per ogni istante della giornata. Quest'ultima è probabilmente un'approssimazione migliore, perché permette di tener conto di fenomeni macroscopici, come le variazioni di traffico dalle ore di morbida a quelle di punta e viceversa, però è anche un'approssimazione più rischiosa, dato che può indurre una falsa sicurezza nel valore dei dati. Il principio fondamentale da tener presente è che le informazioni ricavate dalla fase di analisi sono sempre indicative e dipendono fortemente da eventi casuali. Il modello che ne deriva va inteso come un utile riferimento ideale. Allo stesso modo, anche le soluzioni che si ricavano vanno intese come un riferimento da adattare alle condizioni pratiche. Questo è un principio generale nella modellistica e nell'ottimizzazione applicata. In generale, è buona norma tarare il modello affinché descriva le condizioni di funzionamento critiche, in modo da garantire al servizio un margine di robustezza agli imprevisti.

Il modo più semplice per passare da un valore costante di una grandezza a una funzione del tempo è quello di assumerla costante a tratti. Si tratta di dividere l'orizzonte temporale in intervalli detti *fasce orarie*, durante le quali tutte le grandezze in gioco sono costanti. Da una fascia all'altra, invece, tali grandezze possono cambiare.

2.3.2 Le funzioni di costo

Come già accennato, a ogni arco di un grafo rappresentativo di un sistema di trasporto è attribuita una caratteristica quantitativa. Tale caratteristica può rappresentare il *costo generalizzato* sostenuto dall'utente per percorrere quell'arco o una aliquota dello stesso costo (ad esempio il solo tempo di percorrenza). Tale caratteristica può essere:

- una *costante*: in questo caso si parla di *costo* dell'arco;
- una *funzione* del numero di utenti sull'arco: in questo caso si parla di *funzione di costo* dell'arco.

Gli archi cui è attribuito un costo indipendente dal flusso di utenti sono detti *non congestionati*; viceversa, sono detti *congestionati* gli archi a cui è attribuita una funzione di costo. La funzione di costo di un arco è definita come "la relazione matematica che lega il costo medio di trasporto ai flussi che lo influenzano e alle caratteristiche fisiche e funzionali del collegamento rappresentato dall'arco stesso".

Per le reti di *trasporto privato*, in generale, si assume che il costo associato a un arco sia pari solo al tempo impiegato per percorrerlo. Per gli *archi connettori* si assume che tale tempo t_a sia indipendente dal flusso e pari al rapporto tra la lunghezza dell'arco L_a e la velocità media di percorrenza v_a :

$$t_a = \frac{L_a}{v_a} \quad (2.1)$$

Anche gli archi reali che definiscono i sistemi di trasporto collettivi, in genere, sono rappresentati da modelli di rete non congestionata; cioè si ipotizza che il tempo di percorrenza su un arco sia indipendente dal numero di passeggeri che percorrono l'arco stesso.

Per quanto riguarda gli archi reali del sistema di trasporto privato, invece, il software di assegnazione AxE prevede l'applicazione di diverse funzioni di costo:

- funzioni polinomiali *PLN*;
- funzioni del *Bureau of Public Roads BPR*;

- funzione di *Davidson DVD*.

La *funzione PLN* effettua il calcolo di una polinomiale di qualsiasi grado. I parametri da inserire nel foglio di calcolo del software rappresentano i coefficienti dei termini in ordine decrescente di grado. Ad esempio, la scrittura "*PLN 2 1 0 5*", indica la funzione:

$$2x^3 + x^2 + 5 \quad (2.2)$$

Come caso particolare di polinomiale, si ottiene una funzione costante con l'inserimento di un singolo parametro. Questo consente di associare un costo costante agli archi non congestionati.

La funzione del *BPR* è ben nota nell'ambito dei trasporti ed è descritta in molti testi (Sheffi Y., 1985). La sua espressione per archi urbani è la seguente:

$$t_i = \frac{l_i}{V_{0i}} \left[1 + \alpha \left(\frac{f_i}{C_i} \right)^\beta \right] \quad (2.3)$$

dove:

l_i = lunghezza dell'arco i -esimo;

V_{0i} = velocità a vuoto dell'arco i -esimo;

f_i = flusso sull'arco i -esimo;

C_i = capacità dell'arco i -esimo;

α e β = parametri caratteristici della curva di deflusso associata.

Va ricordato però, che C_i deve essere interpretata più come un parametro analitico, che determina la forma della funzione dell'arco, che come stima della capacità fisica della strada. Nella versione originale della funzione, i due parametri α e β hanno un valore fisso pari, rispettivamente, a 0,15 e 4, ma è possibile utilizzarli anche come parametri di calibrazione e, quindi, avere valori differenti al variare del tipo di arco.

Infine, la funzione di *DVD*, asintotica alla capacità, è così descritta:

$$t_i = \frac{l_i}{V_{0i}} \left[1 + J \left(\frac{f_i}{c_i - f_i} \right) \right] \quad (2.4)$$

dove le variabili assumono lo stesso valore visto per la BPR e l'andamento del parametro *J* è riportato nella Figura 2.1.

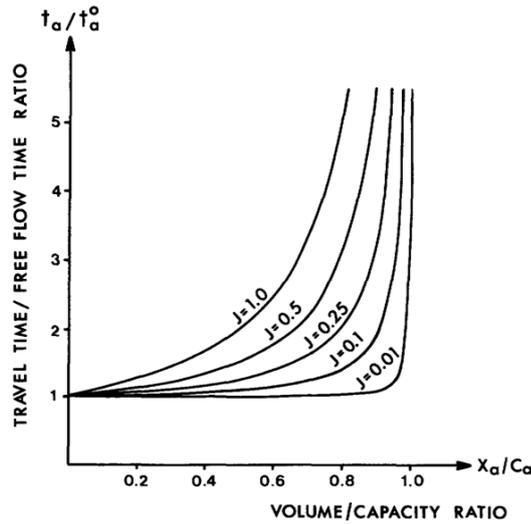


Figura 2.1 - Andamento della funzione di Davidson

Il software AxE è comunque in continua fase di miglioramento e implementazione, quindi, è possibile proporre al team di sviluppo l'inserimento di qualsiasi funzione di costo. Per completezza di esposizione, si riporta un'altra funzione di costo molto diffusa, la *DOHERTY*, che considera un modello disaggregato secondo il quale il tempo di percorrenza di un arco si divide in due aliquote, tempo di *run* t_r e tempo di *attesa* t_a , ossia:

$$t = t_r + t_a \quad (2.5)$$

Le formule per il calcolo del tempo di *run* e di *attesa* differiscono a seconda che si tratti di arco urbano o extraurbano; per gli archi urbani il tempo di *run* si può scrivere come nella (2.6).

$$t_{ri} = 3,6 \frac{I_i}{V_i} \quad (2.6)$$

$$V_i = V_{0i} - a \left(\frac{f_i}{L_{ui}} \right)^2 \quad (2.7)$$

dove:

V_{0i} = velocità a vuoto (km/h);

$a = 0,0001$;

f_i = flusso (veic/h);

L_{ui} = larghezza utile dell'arco (m).

Il tempo di attesa, invece, è pari a:

$$t_{ai} = A + \frac{0,55 \cdot 3600}{C_i} * \frac{X}{1-X} \quad (X \leq 0,95) \quad (2.8)$$

$$t_{ai} = \alpha + \beta \cdot X \quad (X > 0,95) \quad (2.9)$$

dove:

$A = 0,5(1 - \mu)^2 * c$, essendo μ il rapporto tra il tempo di verde effettivo e tempo di ciclo $[(v+2)/c]$;

c = tempo di ciclo (sec);

C_i = capacità dell'arco (veic/h);

X = rapporto tra flusso e capacità (f_i/C_i);

$$\alpha = \left. t_{ai} \right|_{X=0,95} - \frac{209 \cdot 3600}{C_i}$$

$$\beta = \frac{220 \cdot 3600}{C_i}$$

Infine, si riporta una possibile formula empirica per il calcolo della velocità in ambito urbano:

$$V_a(f_a) = 31,1 + 2,8 \cdot L_{ua} - 1,2 \cdot P_a - 12,8 \cdot T_{a2} - 10,4 \cdot D_a - 1,4 \cdot INT + \\ - (0,000053 + 0,000123X) \left(\frac{f_a}{L_{ua}} \right)^2 \quad (2.10)$$

dove:

L_{ua} = larghezza utile dell'arco (m);

P_a = pendenza media (%);

T_a = grado di tortuosità della strada in scala [0,1];

D_a = grado di disturbo della circolazione stradale in scala [0,1];

X = vale 0 se è possibile il sorpasso, 1 altrimenti.

2.3.3 La modellazione della sosta

Per il tema in oggetto, una volta individuata l'area su cui intervenire si passa alla modellazione della rete viaria con gli elementi appena descritti. In questa fase è importante lavorare sui sensi di marcia della rete viaria principale, per creare le *stanze di circolazione*, e su quella secondaria per realizzare la cosiddetta *circolazione a stanze*. Come già espresso in precedenza, in questo modo si elimina il *traffico di attraversamento* e quello *parassita*, riducendo drasticamente i tempi di ricerca del parcheggio.

All'interno della singola zona potranno individuarsi aree di sosta con tariffa differente, ad esempio, in funzione della distanza rispetto ai gate d'ingresso all'area, del pregio storico e artistico, dell'attrattività, ecc. Per evitare di parcellizzare l'area in troppe zone, e creare confusione nell'utente, si dovrà cercare di individuare un numero limitato di zone tariffarie, il cui valore può cambiare nel corso della giornata e/o della settimana.

Sia le aree a parcheggio sia gli stalli su strada, dal punto di vista modellistico, possono essere rappresentati con un arco. In particolare, gli stalli su strada limitrofi o appartenenti allo stesso isolato possono raggrupparsi ed essere rappresentati da un unico arco, in modo da semplificare il più possibile il modello. In modo analogo, anche le aree e le infrastrutture destinate a parcheggio possono essere rappresentate da un arco.

Per la modellazione dell'offerta di trasporto, come già anticipato, si è utilizzato il software QGIS, che si è rivelato un valido sostituto dei software

specialistici. Per ogni arco della rete, corrispondente a un *record* del database QGIS, si deve indicare il *nodo origine*, il *nodo destinazione*, la *lunghezza* dell'arco, la *velocità a vuoto* V_0 , la *capacità* e la *tipologia* di arco (di rete, connettore, parcheggio, TPL). Il software AxE, usato per l'assegnazione, non riconosce in automatico la tipologia di arco, quindi, è necessaria una maggior cura nella fase modellazione e nella scelta della funzione di costo associata all'arco stesso. Detto ciò, la modellazione di un'area di sosta si concretizza attraverso un arco, con costo costante e pari alla tariffa associata, collegato da un lato con un arco reale della rete stradale, attraverso un *arco di accesso al parcheggio*, e dall'altro con il *centroide* della zona in cui ricade l'area di sosta, con un arco fittizio¹.

Se ad esempio si è in presenza di parcheggi scambiatori, in cui si pensa che l'utenza possa lasciare il veicolo e raggiungere la zona di destinazione con *shuttle bus* (servizio navetta), la modellazione è un po' differente. Infatti, con queste ipotesi, l'arco parcheggio deve essere collegato ai *centroidi* delle zone attraverso degli archi il cui costo è somma delle seguenti aliquote: tempo di attesa, di salita, di percorrenza, di discesa e tempo a piedi per raggiungere il centroide dalla fermata.

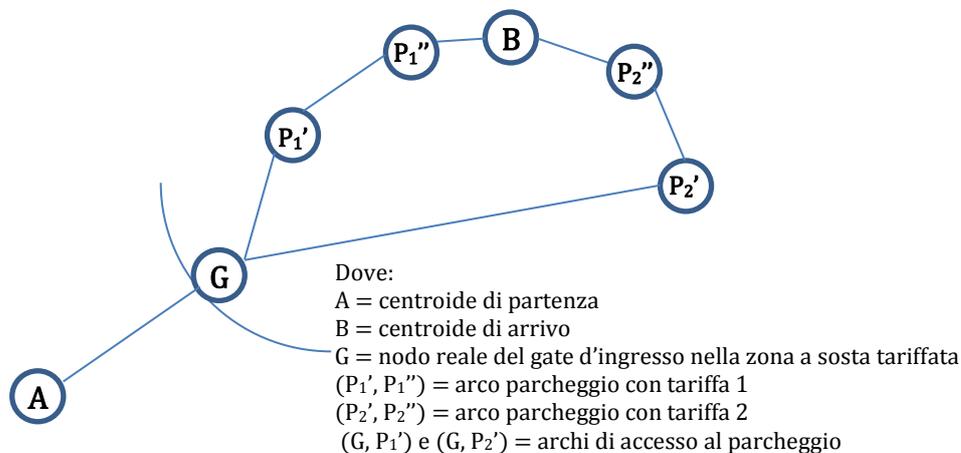


Figura 2.2 - Modellazione delle aree di sosta

¹ AxE non riconosce il tipo di arco in automatico, quindi, quest'arco fittizio deve essere di costo molto elevato, per evitare l'attraversamento del nodo centroide da parte di flusso diretto verso altre zone, e assunto costante per tutti i collegamenti, in modo da sottrarlo facilmente nel calcolo dei tempi per ogni coppia OD.

È importante sottolineare che la funzione di costo associata all'arco parcheggio è una polinomiale con valore costante pari alla tariffa di sosta. Da ciò, emerge immediatamente che non si tiene conto della congestione del parcheggio e del costo che questa provoca all'utente in termini di tempo e disagio nella ricerca del parcheggio. Ciò è assolutamente vero, ma nel modello proposto si è voluto internalizzare la sovrasaturazione del parcheggio all'interno della tariffa di sosta. In altre parole, essendo lo scopo di questo studio quello di trovare una tariffa ottimale di parcheggio che in generale produce una riduzione del carico di sosta in una determinata area, non inserire nell'arco parcheggio una funzione che tenga conto del livello di saturazione consente di controllare meglio questo fenomeno, facendolo dipendere dalla sola variazione tariffaria. Inoltre, come si vedrà più avanti, avendo inserito nella funzione obiettivo il vincolo di rispetto di una certa percentuale di stalli liberi all'interno di ogni singola area, le configurazioni che risulteranno ammissibili garantiranno la riduzione dei tempi di ricerca del parcheggio e la certezza che l'utente possa trovare uno stallone libero, eliminando in tal modo il traffico parassita. Se, invece, nell'arco parcheggio si inserisse una funzione in cui il costo dell'arco tiene conto anche del grado di saturazione (Migliore, 2002), allora, si verrebbe a perdere la dipendenza diretta tra il carico sul parcheggio e la tariffa, rendendo il tutto più difficile da governare. Questo si verificherebbe poiché la distribuzione dell'utenza tra i vari parcheggi a disposizione (che dovrebbe essere influenzata dalla sola tariffa di sosta attribuita al parcheggio) dipenderebbe anche dal livello di congestione presente.

2.3.4 QuantumGIS

QuantumGIS o usualmente chiamato *QGIS* è un sistema informativo geografico a codice aperto (*open source*). Il progetto nasce nel maggio 2002 ed è stato ospitato su *SourceForge* (piattaforma per lo sviluppo software in

modo collaborativo) nel giugno dello stesso anno. QGIS gira attualmente su molte piattaforme Unix, su Windows e OSX. Ciò fa sì che QGIS appaia comodo nell'uso e piacevole e semplice da usare nell'interfaccia grafica *GUI* (*Graphical User Interface*). L'obiettivo iniziale era quello di fornire un visualizzatore di dati GIS, ma attualmente QGIS ha oltrepassato questo punto nel suo sviluppo ed è usato da molti per il loro lavoro quotidiano nel campo GIS, supportando un considerevole numero di formati *raster* e *vettoriali*.

Rispetto ad altri software GIS esso è di minore dimensione e a parità di operazioni necessita di una quantità di *RAM* (*Random Access Memory*) inferiore, rendendolo più performante. Altro vantaggio sta nell'aver a disposizione il codice sorgente, il che permette agli sviluppatori di modificarlo per rispondere a specifiche esigenze e/o per aumentare le funzionalità e la compatibilità attraverso *Plugin* opportunamente compilati.

Fondamentalmente QGIS viene utilizzato per creare, visualizzare, interrogare e analizzare dati geospaziali, i quali riportano informazioni inerenti la posizione geografica di un oggetto, che spesso implica l'uso di coordinate geografiche, quali valori di latitudine e longitudine.

I dati che più interessano, ai fini del presente studio, sono quelli vettoriali, che altro non sono che un modo per descrivere una posizione utilizzando un insieme di coordinate. Questo consente di costruire grafi georiferiti, usando come base un'immagine *raster* dell'area che si vuole studiare.

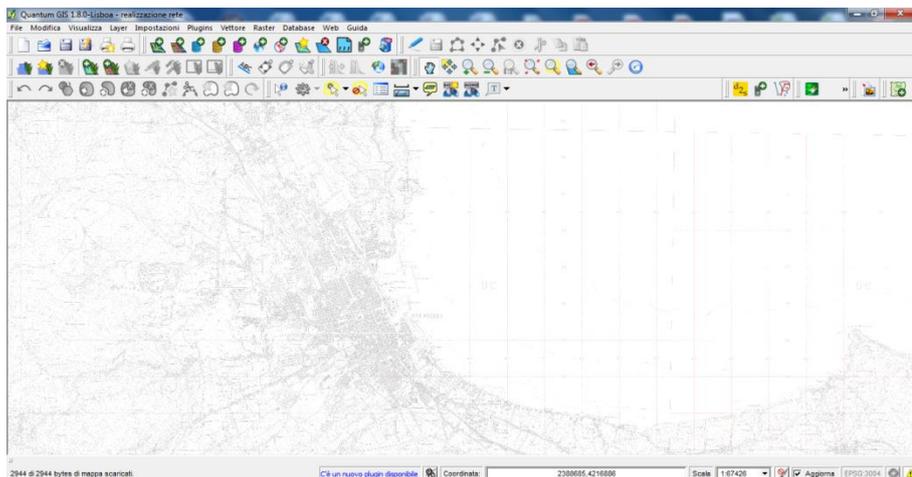


Figura 2.3 - Interfaccia grafica QGIS

Avendo come guida il *raster* georiferito dell'area in cui si vuole costruire il grafo, si comincia con il disegnare gli archi della rete e a compilare il relativo database, in cui per ogni *record* (arco) si devono valorizzare i campi relativi al nodo origine, destinazione, lunghezza (che viene calcolata in automatico dal software), capacità, velocità a vuoto V_0 e la tipologia di arco (di rete, connettore, parcheggio, TPL) a ognuno dei quali corrisponde una diversa funzione di costo.

2.4 La domanda di trasporto

Affinché un nuovo *servizio* abbia successo, è necessario effettuare un'attenta analisi della domanda che esso potrebbe avere, per stabilire a quali esigenze sia più opportuno cercare di rispondere. L'analisi della domanda consiste nell'individuare le caratteristiche principali degli spostamenti che hanno o potrebbero aver luogo in un'area e i fattori che li influenzano. Lo scopo è anche quello di stimare la disponibilità di chi non si sposta a farlo e di chi si sposta a modificare i propri comportamenti, scegliendo orari, percorsi, ma soprattutto modi di trasporto diversi. Per quanto riguarda l'entità della domanda di mobilità, a priori non si vuole né ridurla né accrescerla, ma essenzialmente si tratta di indirizzare gli spostamenti in modo più razionale. Il mezzo privato è lontano dall'essere la soluzione più efficiente, non solo dal punto di vista ecologico ed energetico, ma spesso anche dal punto di vista del singolo utente.

Da quanto detto, s'intuisce che l'accuratezza e la precisione dell'analisi della domanda sono elementi essenziali per il successo del progetto. Offrire al pubblico un nuovo sistema di trasporto o modificarne uno esistente, senza un'adeguata analisi, porta infatti a correre diversi rischi. Un primo rischio concerne l'entità della domanda, in relazione alle dimensioni del sistema di trasporto. Da un lato, fornire un servizio per il quale non c'è domanda è perfettamente inutile. Ma prevedere a priori la domanda che un servizio avrà

non è sempre facile, poiché sono sottili le caratteristiche che inducono gli individui a decidere se un servizio soddisfa o meno le proprie esigenze.

Un rischio analogo concerne le caratteristiche della domanda, in relazione alla qualità del servizio. Da un lato è inutile fornire servizi di qualità elevatissima se non sono richiesti; dall'altro, è dannoso fornire servizi di qualità mediocre, anche a costi e tariffe molto ridotti. Ovviamente, l'aspetto qualitativo è legato a quello delle tariffe e alla presenza nell'area di servizi alternativi, con caratteristiche di qualità e di prezzo differenti.

Data la complessità, un'analisi della domanda si concentra sempre su alcuni aspetti, trascurandone di necessità altri. Occorre che la scelta degli aspetti da trascurare sia compiuta in modo accurato e che sia chiaro quali sono gli aspetti principali rispetto a cui si può compiere questo sezionamento della domanda.

Si proverà a definire il concetto di *spostamento* e a passare in rassegna gli aspetti più rilevanti che influenzano gli spostamenti in un'area data. Con *spostamento* si intende l'atto di recarsi da un luogo di origine in un altro di destinazione per svolgervi una o più attività. Quest'ultima è detta anche motivo dello spostamento ed è un aspetto fondamentale, senza il quale esso non avverrebbe. Salvo casi limitati, infatti, ci si sposta per andare a lavoro, a scuola, a fare spese, ecc. Spesso, uno spostamento fa parte di un viaggio, o di una catena di spostamenti, consecutivi l'uno all'altro e compiuti usando diversi mezzi o modi di trasporto.

Poiché sono gli individui che si spostano, avrà particolare interesse lo studio dei meccanismi in base ai quali questi decidono se muoversi, quando farlo, dove andare e in che modo. Quindi, la domanda di trasporto, con le sue caratteristiche, deriva dalla struttura territoriale di un'area, cioè dalle caratteristiche demografiche e socio-economiche, dalla distribuzione delle abitazioni e delle attività industriali, commerciali, ricreative, ecc.

Ovviamente, la domanda di trasporto è fortemente influenzata dall'offerta di trasporto disponibile. I due aspetti, quello territoriale e quello dell'offerta, interagiscono in modo sinergico. Quest'ultimo aspetto, infatti,

non solo può modificare la distribuzione degli spostamenti tra le destinazioni, tra le fasce orarie e tra i mezzi disponibili, ma può persino modificare il numero di spostamenti, inducendo gli individui a rinunciarvi, se il costo, il tempo e la scomodità dello spostamento sono eccessivi. D'altra parte, la sensibilità degli individui alle caratteristiche dell'offerta cambia molto con la struttura territoriale. Aree più ricche sono probabilmente meno sensibili alle tariffe dei diversi modi di trasporto e più alla loro qualità e flessibilità. Se i servizi che attraggono pubblico sono concentrati in zone ristrette, gli spostamenti non potranno che convergere in tali zone, indipendentemente dalle caratteristiche dei mezzi di trasporto disponibili. Infine, l'età e il reddito degli abitanti influisce sul numero, sulla destinazione e sulla distribuzione nel tempo dei loro spostamenti, in un modo che è impossibile controllare completamente agendo solo sull'offerta.

La definizione della domanda di trasporto nello spazio è forse il suo aspetto fondamentale. Come già visto, l'analisi territoriale suddivide l'area in esame in un numero finito di zone e lo stesso avviene per l'ambiente esterno. Ogni spostamento può quindi essere associato a una zona di *origine* e una zona di *destinazione*, e il complesso degli spostamenti può essere descritto da una matrice *origine-destinazione* (OD).

Una *matrice OD* non è altro che una tabella con tante righe e tante colonne quante sono le zone in cui è stata suddivisa l'area in esame e l'ambiente esterno. Con Φ_{od} si intende l'elemento della riga o e della colonna d . Esso indica il numero di spostamenti che hanno origine nella zona o e destinazione nella zona d .

Ovviamente, bisogna sempre specificare a quale intervallo di tempo si riferiscono i dati all'interno della matrice. Inoltre, è anche frequente il caso in cui la matrice non descrive tutti gli spostamenti che hanno luogo nell'area in un dato periodo di tempo, ma solo alcuni, come ad esempio, quelli dovuti a un certo motivo o che impiegano un certo modo di trasporto.

In base alla distinzione tra zone interne ed esterne all'area in esame, la matrice OD si divide in sottomatrici, che rappresentano rispettivamente:

- *spostamenti interni* quando la zona di origine e quella di destinazione sono entrambe zone interne all'area; in particolare:
- *spostamenti intrazonali* quando la zona di origine e quella di destinazione coincidono (elementi sulla diagonale);
- *spostamenti interzonali* quando la zona di origine e quella di destinazione non coincidono;
- *spostamenti di scambio* quando solo una fra le zone di origine e di destinazione è interna all'area;
- *spostamenti di attraversamento* quando la zona di origine e quella di destinazione sono entrambe esterne all'area.

O\D	1	2	·	D _j	·	·	·	D _n
1	Spostamenti Interni				Spostamenti di Scambio (interni-esterni)			
2								
·								
·								
O _i								
·	Spostamenti di Scambio (esterni-interni)				Spostamenti di Attraversamento			
·								
·								
·								
O _n								

Figura 2.4 - Matrice origine-destinazione

Un'altra informazione importante fornita dalle matrici OD sono i valori aggregati per righe o per colonne. La somma degli elementi della riga o rappresenta il totale degli spostamenti che hanno origine nella zona o , ovvero il flusso generato dalla zona.

$$\phi_o = \sum_{d=1}^n \phi_{od} \quad (2.11)$$

La somma degli elementi della colonna d rappresenta il totale degli spostamenti che hanno destinazione nella zona d , ovvero il flusso attratto dalla zona.

$$\phi_d = \sum_{o=1}^n \phi_{od} \quad (2.12)$$

Da quanto detto, è chiaro che l'analisi della domanda si propone di costruire matrici OD relative alle varie fasce orarie, ai motivi dello spostamento, per i vari modi di trasporto, ecc. Rimane da stabilire con quali mezzi si ottenga in pratica questo risultato.

In generale, gli approcci che permettono di ottenere questo risultato e che presentano vantaggi e svantaggi complementari, sono essenzialmente due:

- approccio *descrittivo*, che consiste nel rilevare la domanda attuale con tutte le sue caratteristiche;
- approccio *comportamentale*, che consente di simulare il più fedelmente possibile la domanda attuale e i meccanismi che la regolano, in modo da poter stimare con una certa precisione la sua reazione a modifiche dell'offerta di trasporto.

Sulla base degli strumenti utilizzati da questi due approcci si parla spesso, per l'approccio *descrittivo*, di indagini *Revealed Preferences* o *indagini RP*, invece per l'approccio *comportamentale* di indagini *Stated Preferences* o *indagini SP*. Le prime consistono nel registrare sul campo le scelte degli individui, assumendo, ovviamente, che corrispondano alle loro preferenze. Invece, le *indagini SP* consistono nell'interrogare gli individui sulle scelte ipotetiche che compirebbero in determinate situazioni, in modo da formulare un modello matematico del procedimento di scelta, che risponda come gli individui stessi e possa essere usato per prevedere le loro scelte, non solo in situazioni diverse da quella attuale, ma anche in situazioni diverse da quelle prospettate agli individui.

L'utilità dei due approcci dipende dal contesto. Se si considera, come nel caso in esame, di assoggettare a *pricing* un'area del centro urbano finora non soggetta a nessun tipo di regolamentazione, non essendo ben nota a priori l'utenza diviene fondamentale conoscere la domanda potenziale e determinare gli aspetti a cui essa è più sensibile. Questo richiede strumenti di analisi della domanda che pongano al centro le scelte individuali e la disponibilità al cambiamento, quindi, un approccio comportamentale può essere molto più adeguato.

Dal punto di vista matematico la domanda di mobilità, è una funzione che pone in relazione la distribuzione e la tipologia di attività sul territorio ATT , le caratteristiche socio-economiche dei residenti SE e le caratteristiche del sistema dell'offerta di trasporto T . Il modello di domanda si può esprimere come:

$$d = f(ATT, SE, T) \quad (2.13)$$

dove d rappresenta la domanda di trasporto sul territorio.

Per modellare la domanda di trasporto si ipotizza che ogni spostamento sia il risultato di una serie di scelte effettuate dall'utente del sistema. Si considerano in genere quattro *dimensioni* di scelta:

1. effettuare o meno lo spostamento;
2. la destinazione dello spostamento;
3. il modo di trasporto;
4. il percorso.

Per motivi di trattabilità analitica si fattorializza il modello di stima della domanda nel prodotto di quattro sottomodelli, ciascuno relativo a una sola dimensione di scelta; il modello così ottenuto è detto modello a *quattro stadi*:

$$d_{od}(s, m, k) = d_o(s) \cdot p(d/os) \cdot p(m/ods) \cdot p(k/mods) \quad (2.14)$$

dove:

$d_o(s)$ = *modello di emissione*, numero di spostamenti emessi dall'origine o per lo scopo s ;

$p(d/os)$ = *modello di distribuzione*, aliquota di spostamenti che si reca alla destinazione d per il motivo s ;

$p(m/ods)$ = *modello di scelta modale*, aliquota di spostamenti che usa il modo m per recarsi in d per il motivo s ;

$p(k/mods)$ = *modello di assegnazione*, aliquota di spostamenti che utilizza il percorso k relativo al modo m per recarsi in d per il motivo s .

In generale, nel modello a *quattro stadi*, il sottomodello di *emissione* è tipicamente di tipo descrittivo, invece, i sottomodelli di *distribuzione*, *scelta modale* e di *assegnazione* sono *comportamentali*.

2.4.1 L'approccio descrittivo

Solitamente l'approccio *descrittivo* si utilizza per i modelli di *emissione*. Per dare un breve cenno su tale metodo, si immagini di avere un'area composta da N zone. Ogni zona i ha una popolazione π_i nota e una distanza d_{ij} da ciascuna altra zona j , nota anch'essa. Ovviamente, si tratta di valori medi, dato che le zone non sono dei punti, ma hanno un'estensione.

L'intervallo di tempo che si vuole descrivere viene convenzionalmente diviso in F fasce orarie, durante le quali si assume che tutte le caratteristiche rilevanti per il modello rimangano costanti: i tempi di viaggio sulla rete stradale, le tariffe dei mezzi, le caratteristiche dei servizi e sulla popolazione, ecc. Bisogna anche fissare i K motivi dello spostamento, che possono essere ad esempio: lavoro, studio, svago, ecc. A queste categorie sono legati degli indici statistici b_{kl} , detti *indici di emissione*, che stabiliscono per ogni motivo k e per ogni fascia oraria l , ma eventualmente anche per ogni categoria di utenti, il numero medio di spostamenti che un individuo compie. Si noti che questi indici possono anche essere maggiori di 1, nel caso in cui molte persone compiano più spostamenti per lo stesso motivo durante una fascia oraria. Quest'ultimo è un caso raro, a meno che le fasce orarie siano piuttosto larghe e il motivo forte, ad esempio: molte persone si recano sul posto di lavoro due

volte al giorno, perché tornano a casa all'ora di pranzo. Gli indici di emissione solitamente vengono stimati attraverso *indagini RP* sulle abitudini degli individui che abitano l'area in esame.

Quindi, il modello di *emissione* può essere formalizzato nel seguente modo:

$$g_{ikl} = \pi_i \cdot b_{kl} \quad (2.15)$$

dove π_i è la popolazione e b_{kl} è l'*indice di emissione* per la zona i -esima.

2.4.2 L'approccio comportamentale

I modelli comportamentali più utilizzati per la simulazione della domanda di trasporto sono quelli che appartengono alla famiglia dei *modelli a utilità casuale*. Questi si basano sull'ipotesi che l'utente sia un decisore razionale e che effettui le sue scelte massimizzando l'utilità che egli associa a ogni alternativa; inoltre, per una serie di cause di diverso tipo, non è possibile prevedere con esattezza la scelta che egli farà, ma soltanto calcolare la *probabilità* che egli faccia una determinata scelta.

La prima ipotesi che sta alla base del *modello a utilità casuale* è che il generico utente i , nell'effettuare la propria scelta, consideri tutte le alternative a sua disposizione, che appartengono al suo *insieme di scelta* I_i ; tale insieme di scelta può essere diverso da utente a utente. Altra ipotesi è che l'utente i associ a ogni alternativa del suo insieme di scelta un valore di utilità percepita U_j e scelga l'alternativa con la massima utilità; tale utilità risulta una funzione degli attributi che caratterizzano l'alternativa stessa x_{kj} e di alcuni parametri da stimare β_k . Gli attributi x_{kj} che caratterizzano l'alternativa possono essere distinti in più classi:

- attributi di *livello di servizio*, che sono quelli propri del sistema di trasporto (tempi, costi, comfort, ecc.);

- attributi del *sistema delle attività*, che sono quelli che dipendono dall'uso del territorio dell'area di studio (numero di negozi, numero di scuole in una zona, ecc.);
- attributi *socio-economici*, che sono quelli propri dell'utente o del gruppo familiare cui appartiene (possessione di patente, numero di autovetture possedute in famiglia, ecc.)

Si possono distinguere, inoltre, *attributi generici* e *attributi specifici* per ogni alternativa: i primi sono presenti in tutte le alternative nella stessa forma e con lo stesso peso, mentre i secondi sono presenti solo in alcune alternative oppure sono valutati in modo diverso per ogni alternativa.

Ultima ipotesi dei *modelli a utilità casuale* è che l'*utilità*, che il generico utente i associa a ogni alternativa, è una variabile aleatoria, in quanto essa non è perfettamente nota all'analista, né per quanto riguarda la forma funzionale né per quanto riguarda il suo valore esatto. Ciò dipende sia dai limiti propri della modellizzazione sia dalle caratteristiche stesse dell'utente, le cui scelte e le cui valutazioni possono subire modifiche difficilmente modellizzabili. Infatti, utenti con le stesse caratteristiche, e quindi con lo stesso vettore di attributi nell'utilità, possono avere gusti diversi o percepire diversamente l'alternativa, oppure possono valutare soggettivamente in modo diverso alcuni attributi, per cui le loro scelte saranno piuttosto varie nonostante l'apparente omogeneità. Inoltre, alcuni attributi considerati dall'utente nel compiere la scelta possono non essere stati inclusi dall'analista, oppure inclusi solo in modo approssimato (in alcuni casi ciò è dovuto all'impossibilità di misurare quantitativamente alcuni attributi, quali il comfort o la sicurezza stradale).

Avendo fatto queste premesse si può passare a definire l'utilità U_{ij} , che si può scomporre in due aliquote: la prima, detta *utilità sistematica* o utilità media, indicata con V_{ij} , è costante per tutti gli utenti con lo stesso vettore di attributi, e la seconda è un *residuo aleatorio* ε_j .

$$U_{ij} = V_{ij}(X_{ij}) + \varepsilon_j \quad (2.16)$$

Per quanto riguarda la forma funzionale per l'utilità sistematica, quella più utilizzata è di tipo lineare.

$$V_j^i = \sum_k \beta_k X_{kj}^i \quad (2.17)$$

dove:

X_{kj}^i = k -esimo attributo della j -esima alternativa per l'utente i ;

β_k = parametri da stimare.

L'introduzione del residuo aleatorio nell'utilità U_j tiene conto del fatto che l'utente ha una personale percezione dell'alternativa e le sue scelte avvengono in modo non perfettamente prevedibile dall'analista, per cui è possibile solo calcolare la probabilità che egli faccia una determinata scelta.

In base alle ipotesi fatte, la probabilità che l'utente i scelga l'alternativa j , tra tutte quelle appartenenti al suo insieme di scelta I_i , è pari alla probabilità che l'utilità percepita dell'alternativa j sia la maggiore tra le utilità percepite associate alle altre alternative diverse da j , e cioè che:

$$p^i(j) = \text{Prob} \left[U_j^i > U_k^i \right] \quad \forall k \neq j \quad j, k \in I_i \quad (2.18)$$

ovvero:

$$p^i(j) = \text{Prob} \left[V_j^i - V_k^i > \varepsilon_k^i - \varepsilon_j^i \right] \quad \forall k \neq j \quad j, k \in I_i \quad (2.19)$$

Da ciò si evince che la probabilità di scelta di un alternativa è una funzione dei valori delle utilità sistematiche di tutte le alternative concorrenti. L'espressione di tale probabilità dipende dalla legge di distribuzione dei residui aleatori. Uno dei modelli di utilità casuale più diffusi è il modello *Logit multinomiale* adottato nella fase distributiva e in quella di scelta modale, nel quale il residuo aleatorio segue una distribuzione di *Weibull-Gumbel*.

$$p^i(j) = \frac{e^{V_j^i}}{\sum_j e^{V_j^i}} \quad (2.20)$$

Nel caso del modello di *distribuzione*, il *Logit multinomiale* può scriversi come nella 2.21.

$$a_{ijkl} = \frac{s_{jkl} \exp(-\beta_k \cdot d_{ij})}{\sum_{r=1}^{|M|} s_{rkl} \exp(-\beta_k \cdot d_{ij})} \quad (2.21)$$

dove:

a_{ijkl} = *indice di distribuzione* per il motivo k e la fascia l ;

d_{ij} = distanza tra le zone;

β_k = parametri da stimare;

s_{jkl} = *dimensione complessiva dei servizi* della zona j .

L'espressione 2.22 misura la dimensione complessiva dei servizi che rispondono a un certo motivo in una certa zona e fascia oraria.

$$s_{jkl} = \sum_{p \in S_{jk}} s'_p \frac{\max[\min(f_l, b) - \max(f_{l-1}, a)]}{f_l - f_{l-1}} \quad (2.22)$$

dove:

s'_p = dimensione di un singolo servizio;

s_{jk} = dimensione dell'insieme dei servizi che rispondono al motivo k e

Si tratta di sommare le dimensioni dei singoli servizi moltiplicate per un fattore (compreso fra 0 e 1) che dice quanta parte della fascia l , che va da f_{l-1} a f_l , ricade nell'orario di apertura $[a;b]$.

A questo punto si può formulare una stima degli spostamenti sull'area, ma senza specificare i mezzi usati per compierli. Si procede quindi descrivendo, con un secondo modello *Logit multinomiale*, la scelta del modo di trasporto, e cioè un modello di *scelta modale*, che verrà illustrato nel sottoparagrafo seguente.

2.4.3 Il modello di scelta modale

Il modello di scelta modale del tipo *Logit multinomiale* prende le proprie mosse con la determinazione, per ogni coppia OD, delle utilità sistematiche V_m associate al modo di trasporto m come combinazione lineare dei k attributi:

$$V_m = \sum_k \beta_k \cdot X_{km} \quad (2.23)$$

dove X_{km} sono gli attributi e β_k i coefficienti degli attributi delle utilità che sono frutto di calibrazione.

Su questo tema, in un lavoro precedente (Migliore *et al.*, 2013) è stato calibrato un modello *Logit multinomiale* per la città di Palermo, nel quale, rispetto alle formulazioni classiche, si prevede la possibilità di introdurre variabili socio-economiche e/o psicometriche.

Questa formulazione, a titolo d'esempio, avendo ipotizzato la presenza di due modalità di trasporto (auto e autobus), può essere esplicitata nel seguente modo:

$$V_{car} = \beta_{time} \cdot t_{car} + \beta_{parking} \cdot t_{parking} + \beta_{cost} \cdot C_{car} + \beta_{ASAcar} \cdot ASA_{car} \quad (2.24)$$

$$V_{bus} = \beta_{time} \cdot t_{bus} + \beta_{cost} \cdot C_{bus} + \beta_{ASAbus} \cdot ASA_{bus} + \beta_{HG-Worker} \cdot HG + \beta_{Discomfort} \cdot D \quad (2.25)$$

dove gli attributi hanno il seguente significato:

- t_{car} e t_{bus} sono rispettivamente i tempi di percorrenza in auto e autobus; in particolare t_{bus} è comprensivo del tempo a piedi, di attesa e di percorrenza sull'autobus;
- $t_{parking}$ è il tempo medio di ricerca del parcheggio stimato in base alla zona interessata;
- C_{car} è il costo dello spostamento con l'auto contenente anche il costo di parcheggio;
- ASA_{car} e ASA_{bus} esprimono rispettivamente l'*attributo specifico di alternativa* dell'auto e dell'autobus;
- C_{bus} è il costo del biglietto dell'autobus;

- β sono i coefficienti degli attributi delle utilità che sono frutto di calibrazione.

Per la calibrazione del modello, nel caso di Palermo, si è condotta una campagna di indagini, nella quale sono stati somministrati 1.200 questionari del tipo *Stated Preference* che hanno consentito di stimare tutti i coefficienti delle variabili e degli attributi specifici di alternativa, ottenendo una buona significatività statistica dei parametri.

Come già anticipato, per migliorare il potere esplicativo del modello di scelta modale è stato inserito un *indicatore socio-economico* degli intervistati e un *indicatore psicometrico*, per stimare i tratti psicologici derivanti dalle risposte alle domande del sondaggio sui singoli atteggiamenti e percezioni; in particolare:

- *HG* è un attributo socio-economico che tiene conto se il lavoratore ha un reddito medio-alto, e in questo caso vale 1, 0 negli altri casi;
- *D (Discomfort/Dirt)* è un attributo di percezione del disagio e del grado di pulizia che caratterizza i veicoli pubblici (affollati, non sempre dotati di aria condizionata, sporchi, ecc.).

Il modello di scelta modale proposto da Migliore *et al.* (2003) rispetto ai modelli usualmente utilizzati riesce a esplorare l'impatto che le *variabili latenti*, rispecchiando le preferenze degli utenti, hanno sul processo decisionale di ogni singolo individuo per ciò che riguarda la scelta della modalità di trasporto.

A questo punto, si passa al calcolo della probabilità che l'utente che si reca dall'origine o alla destinazione d per il motivo s scelga il modo di trasporto m :

$$p(m/ods) = \frac{e^{V_m}}{\sum_m e^{V_m}} \quad (2.26)$$

Esplicitando la 2.26 per il caso in esame, si può scrivere:

$$p_{car} = \frac{e^{V_{car}}}{e^{V_{car}} + e^{V_{bus}}} \quad (2.27)$$

$$p_{bus} = \frac{e^{V_{bus}}}{e^{V_{car}} + e^{V_{bus}}} \quad (2.28)$$

Infine, si calcola il numero di utenti che utilizzano ogni singolo modo di trasporto in relazione alla domanda totale di spostamenti:

$$d_{car} = d_{od,tot} \cdot p_{car} \quad (2.29)$$

$$d_{bus} = d_{od,tot} \cdot p_{bus} \quad (2.30)$$

dove ovviamente si deve verificare che:

$$d_{car} + d_{bus} = d_{od,tot} \quad e \quad p_{car} + p_{bus} = 1 \quad (2.31)$$

Alla fine di questo processo, si otterranno le matrici OD per ciascun motivo, per le varie modalità di trasporto e per le varie fasce orarie.

2.5 L'interazione domanda/offerta

A partire dalle matrici OD, si possono compiere diverse osservazioni ed elaborazioni; tra queste, la più importante è quella di assegnare la domanda di trasporto al grafo. Infatti, i *modelli di assegnazione* consentono di calcolare i *flussi veicolari* sulla rete di trasporto in funzione dei costi di percorso, note le caratteristiche della domanda di trasporto (matrici OD) e le caratteristiche dell'offerta di trasporto (grafo della rete). Tali modelli sono anche detti d'*interazione domanda/offerta* e sono di tipo *comportamentale*.

Nel caso in esame la fase di assegnazione è stata realizzata attraverso il programma AxE, nel quale si è scelto di utilizzare un algoritmo di assegnazione *DUE (Deterministic User Equilibrium)*. Prima di passare a illustrare le caratteristiche e le fasi operative del programma è bene dare un breve cenno sugli algoritmi di assegnazione utilizzati.

2.5.1. Il problema dell'assegnazione

Lo scopo di un *algoritmo di assegnazione* è quello di determinare il flusso su ogni singolo arco della rete, sia essa relativa al trasporto pubblico sia privato. Ogni individuo, infatti, per andare dal nodo origine o al nodo di destinazione d sceglierà un percorso differente a seconda dell'influenza di alcune variabili. In generale, si assume che le variabili che influenzano la scelta del percorso siano sostanzialmente degli attributi di livello di servizio di segno negativo, ovvero dei costi (tempo di percorrenza, costo monetario, ecc.). Per tale motivo in tali modelli si fa riferimento non più a un'*utilità percepita* U_k ma a un *costo percepito* C^k relativo al percorso k . Tale costo percepito può essere espresso come:

$$C^k = C_k + \varepsilon_k \quad (2.32)$$

dove C_k è il costo medio percepito.

Il flusso di veicoli sul percorso k è dato dalla seguente relazione:

$$F_k = p_{k,od} d_{od} \quad (2.33)$$

dove:

d_{od} = flusso di domanda (veic/h) tra l'origine o e la destinazione d ;

$p_{k,od}$ = probabilità che gli utenti, che devono muoversi da o a d scelgano il percorso k ;

k = generico percorso che connette la coppia OD;

F_k = flusso di veicoli sul percorso k (veic/h).

Il flusso f_i sull'arco i è pari alla somma dei flussi di percorso F_k che hanno quell'arco in comune:

$$f_i = \sum_k a_{ik} F_k = \sum_{od} \sum_k a_{ik} p_{k,od} d_{od} \quad (2.34)$$

dove:

$a_{ik} = 1$, se l'arco i appartiene al percorso k ;

$a_{ik} = 0$, se l'arco i non appartiene al percorso k .

La sommatoria estesa a tutte le coppie OD è necessaria, in quanto un arco può appartenere anche a percorsi che connettono coppie OD differenti.

Il modello di assegnazione può essere rappresentato in maniera sintetica con una rappresentazione matriciale/vettoriale come segue.

$$\underline{F} = \underline{P} \underline{d} \quad (2.35)$$

$$\underline{f} = \underline{A} \underline{F} = \underline{A} \underline{P} \underline{d} \quad (2.36)$$

dove:

$\underline{F} (n_p \times 1)$ = vettore dei flussi di percorso;

$\underline{f} (n_a \times 1)$ = vettore dei flussi di arco;

$\underline{d} (n_{od} \times 1)$ = vettore di domanda di trasporto;

$\underline{A} (n_a \times n_p)$ = matrice d'incidenza archi/percorsi;

$\underline{P} (n_p \times n_{od})$ = matrice delle probabilità di scelta del percorso;

n_a = numero degli archi;

n_p = numero di percorsi;

n_{od} = numero di coppie OD.

A ogni arco e a ogni percorso di una rete di trasporto è associato un costo. In generale, si indica con C_k il costo del generico percorso k e con c_i il costo del generico arco i . In modo analogo, i costi di percorso e di arco possono essere anch'essi ordinati in vettori:

$\underline{C} (n_p \times 1)$ = vettori dei costi di percorso;

$\underline{c} (n_a \times 1)$ = vettori dei costi di arco.

Il costo del generico percorso k è dato dalla somma dei costi degli archi che lo compongono:

$$C_k = \sum_i a_{ik} c_i \quad (2.37)$$

dove a_{ik} assume gli stessi valori visti prima.

Ricordando la definizione della matrice d'incidenza archi/percorsi data in precedenza, il vettore dei costi di percorso si può scrivere:

$$\underline{C} = \underline{A}^T \underline{c} \quad (2.38)$$

dove \underline{A}^T è la trasposta della matrice d'incidenza.

La probabilità di scelta del percorso $p_{k,od}$ è funzione della somma di tutti i costi di percorso C_k che connettono la coppia OD, e si può scrivere come:

$$p_{k,od} = p_{k,od}(\underline{C}) \quad (2.39)$$

Riferendosi all'intera matrice delle probabilità di scelta del percorso, si ha:

$$\underline{P} = \underline{P}(\underline{C}) \quad (2.40)$$

e pertanto:

$$\underline{F} = \underline{P}(\underline{C})\underline{d} \quad (2.41)$$

$$\underline{f} = \underline{AP}(\underline{C})\underline{d} = \underline{AP}(\underline{A}^T \underline{c})\underline{d} \quad (2.42)$$

Queste due relazioni legano tra loro i flussi di percorso \underline{F} ai costi di percorso \underline{C} e i flussi di arco \underline{f} ai costi di arco \underline{c} . Esse rappresentano i modelli di assegnazione nel caso di *reti non congestionate*, e cioè con costi sugli archi indipendenti dai flussi e, pertanto, costanti.

Per le reti congestionate, invece, il costo su un arco dipende dal flusso sull'arco stesso:

$$\underline{c} = \underline{c}(\underline{f}) \quad (2.43)$$

In questo caso, si viene a creare una dipendenza circolare tra costi e flussi: i flussi sulla rete dipendono dai costi e i costi, a loro volta, dipendono dai flussi. Il problema che si pone è quello di trovare un vettore dei flussi, detto vettore dei *flussi di equilibrio* \underline{f}^* o \underline{F}^* , che sia consistente con i corrispondenti costi \underline{c} o \underline{C} .

$$\underline{F}^* = \underline{P}(\underline{C}(\underline{F}^*))\underline{d} \quad (2.44)$$

$$\underline{f}^* = \underline{AP}(\underline{A}^T \underline{c}(\underline{f}^*))\underline{d} \quad (2.45)$$

Gli algoritmi risolutivi del problema sono numerosi e sono differenti a seconda delle ipotesi alla base del modello di scelta del percorso. In particolare, è possibile distinguere modelli di scelta *deterministici*, in cui l'utilità percepita è considerata deterministica e gli utenti scelgono solo percorsi di massima utilità sistematica, e modelli di scelta *probabilistici* (o stocastici), in cui l'utilità percepita è considerata una variabile aleatoria e gli utenti possono scegliere anche itinerari non di massima utilità sistematica.

Inoltre, rispetto alle reti congestionate si possono fare anche ipotesi sulle dimensioni di scelta elastiche rispetto alla congestione. In particolare, si possono distinguere modelli a *domanda rigida* e modelli a *domanda elastica*. Nel primo caso si assume che la scelta del percorso è l'unica dimensione elastica alle variazioni dei costi dovuti alla congestione, nel secondo caso si assume che la domanda sia elastica su alcune dimensioni di scelta superiori, quali la scelta del modo e/o della destinazione.

In base a queste considerazioni, l'algoritmo di assegnazione scelto per lo studio in questione è il *DUE*, che sarà illustrato in seguito all'algoritmo *ToN* (*Tutto o Niente*), che è necessario per l'avvio di molti algoritmi tra cui il *DUE* stesso. Infine, sarà illustrato brevemente l'algoritmo per il calcolo degli *ipercammini minimi*, utile per l'assegnazione nel caso di trasporto pubblico.

2.5.2. L'algoritmo di assegnazione ToN

Il più elementare tra i modelli di assegnazione è quello di utilità deterministica *ToN*, meglio conosciuto come *Tutto o Niente*. Esso può essere visto come un caso particolare di un modello di utilità casuale nel quale la varianza dei residui ε_k è assunta nulla:

$$C^k = C_k \tag{2.46}$$

Con quest'assegnazione, per ciascuna coppia OD, si computa l'itinerario di minimo costo dopo aver pesato il grafo, ipotizzando che sugli archi le velocità di percorrenza rimangano costanti e non influenzate dalla presenza di flusso veicolare. Identificato, dunque, l'itinerario di minimo costo, si assegna allo stesso tutta la domanda corrispondente alla coppia OD.

Di algoritmi per il calcolo dei percorsi minimi, in letteratura, ne esistono diversi ma il più diffuso è l'algoritmo di *Floyd-Warshall*, sia per le informazioni sul percorso minimo che fornisce, che per la sua notevole semplicità. Esso determina tutti i percorsi minimi da ogni nodo a ogni altro nodo della rete. Come *input* l'algoritmo richiede la matrice dei costi degli archi del grafo, ovvero una tabella che contiene, per ogni coppia di nodi (i,j) , il costo dell'arco corrispondente o un costo infinito, nel caso in cui non esiste un arco dal nodo i al nodo j . Quest'ultimo caso sta proprio a indicare che i due nodi non sono direttamente collegati, ma in alcuni casi è possibile collegarli indirettamente attraverso un percorso che passa da altri nodi. In generale, i metodi per la ricerca del cammino minimo si basano sullo studio dei collegamenti attraverso nodi intermedi detti *pivot*.

Supponendo di conoscere i costi dei singoli archi, ciò che si vuole ottenere è la matrice dei percorsi minimi, tra ogni coppia di nodi, e la serie di nodi e, quindi, di archi attraversati per andare dal nodo iniziale a quello finale.

Inizialmente, la matrice dei percorsi minimi viene rappresentata introducendo, per ogni coppia di nodi direttamente collegati, i costi degli archi diretti, invece, in corrispondenza dei nodi non direttamente collegati si immette un valore infinito. Alla fine, l'algoritmo produce:

- la matrice dei percorsi minimi \underline{M} , che contiene per ogni coppia di nodi (i,j) il costo m_{ij} del percorso minimo dal nodo i al nodo j ;
- la matrice dei nodi di provenienza \underline{P} , che contiene per ogni coppia di nodi (i,j) l'ultimo nodo p_{ij} del percorso minimo dal nodo i al nodo j .

Quindi, una volta ottenuto il percorso di minimo costo tra tutte le coppie OD non resta che assegnare agli stessi l'intera domanda di trasporto.

2.5.3. L'algoritmo di assegnazione DUE

L'obiettivo dell'*assegnazione deterministica* è la determinazione del valore di flusso veicolare su ciascun arco del grafo tenendo conto, a differenza della *Tutto o Niente*, della congestione presente sull'arco.

In particolare, ciò che si deve risolvere è il problema di *punto fisso* su citato, e per far ciò si può utilizzare l'algoritmo di *Frank-Wolf*, di cui a seguire si riportano i vari *step*.

step 1: si pone il contatore $k=1$. Si avvia l'algoritmo con un'assegnazione ToN della matrice OD al grafo, ipotizzando il grafo non congestionato. Si ottiene un valore di flusso su ciascun arco, ovvero il vettore \underline{f}^{k-1} ;

step 2: tramite le funzioni di costo si ottiene per ciascun arco del grafo il valore corrispondente di costo, ovvero il vettore $\underline{c}(f_{k-1})$;

step 3: si effettua un'assegnazione ToN della matrice OD al grafo, ipotizzando su ciascun arco un costo pari a quello determinato allo *step 2*. Si ottiene così un valore di flusso per ciascun arco del grafo, ovvero il vettore \underline{y} , detto *vettore dei flussi di appoggio*;

step 4: (stop test) sugli archi più significativi che identificano l'insieme A , ove il valore di flusso supera un valore soglia minimo si effettua lo *stop test*:

$$\frac{|y_a - f_a^{k-1}|}{f_a^{k-1}} \leq \varepsilon \quad \forall a \in A \quad (2.47)$$

se questa condizione è verificata allora l'algoritmo viene stoppato, altrimenti:

$$f_a^k = f_a^{k-1} \cdot (1 - \mu) + \mu \cdot y_a \quad (2.48)$$

dove il valore di μ , compreso tra 0 e 1, è determinato in modo tale da minimizzare la seguente funzione:

$$\sum_a c_a [(1 - \mu) \cdot f_a^{k-1} + \mu \cdot y_a] \quad (2.49)$$

determinato dunque il vettore \underline{f}_{ak} , si pone il contatore $k=k+1$ e si torna allo *step 2* fino a quando su tutti gli archi significativi non sia

verificato lo *stop test*, ovvero, così come previsto dai software specialistici, fino a quando non si raggiunge un limite di iterazioni prefissate.

2.5.4. L'ipercammino di minimo costo

In questo sottoparagrafo sono descritte le ipotesi comportamentali e i modelli di scelta del percorso utilizzati nel caso di servizi di trasporto discontinui (comportamento misto adattivo-preventivo) facendo riferimento alle reti di trasporto collettivo ad elevata frequenza e bassa regolarità tali da giustificare una rappresentazione per linee. Come per tutti i modelli comportamentali la specificazione completa di un modello di scelta del percorso si articola in tre fasi:

- la definizione delle alternative di scelta;
- l'individuazione dell'insieme delle possibili alternative;
- la definizione del modello di scelta fra le alternative possibili che, a sua volta, implica la definizione degli attributi e dell'utilità sistematica delle alternative oltre alla forma funzionale del modello di scelta.

In una rete di servizi di trasporto collettivo a frequenza elevata, le alternative di scelta non possono essere ottenute per analogia con il caso dei servizi continui, in quanto non è realistico assumere che l'utente consideri come alternative soltanto i singoli percorsi sulla rete rappresentativa dei servizi per linee. L'ipotesi di partenza per la definizione delle alternative di scelta è che l'utente che intraprende uno spostamento in un sistema di trasporto collettivo a elevata frequenza, non possiede all'inizio dello spostamento tutte le informazioni necessarie per poter decidere completamente il suo spostamento. Ad esempio, non è in grado di prevedere con esattezza il suo istante di arrivo alle varie fermate e/o l'effettivo orario di passaggio dei veicoli delle diverse linee che effettuano servizio a ciascuna fermata. In queste

condizioni l'utente non sceglie un predeterminato percorso, ma piuttosto una *strategia di viaggio*, che gli consente di ottenere il costo medio dello spostamento che egli giudica minore.

Si configurano, dunque, due tipologie di comportamento di scelta: comportamento di scelta *preventivo* e *adattivo*.

Il *comportamento di scelta preventivo* è quello che l'utente adotta prima di iniziare il viaggio, confrontando le possibili strategie alternative e scegliendone una sulla base delle caratteristiche o attributi attesi.

Il *comportamento di scelta adattivo* è quello che l'utente segue durante il viaggio adattandosi, come si è detto, a eventi casuali o non prevedibili. Il tipo di comportamento di scelta adattivo e l'insieme delle alternative a cui si applica definiscono una strategia di viaggio.

Se si ipotizza che l'arrivo degli utenti e dei veicoli alle fermate siano completamente casuali e che i passaggi delle varie linee appartenenti a L_i sia equidistante nel tempo, la probabilità di salire sulla linea l , appartenente all'insieme delle linee attrattive alla fermata i , può essere espressa come:

$$\Pr \left[l / i, L_i \right] = \varphi_l / \sum_{n \in L_i} \varphi_n \quad (2.50)$$

dove φ_l rappresenta la frequenza (numero di passaggi/unità di tempo) della linea l .

Sotto le ipotesi di *comportamento adattivo* descritte, una strategia di viaggio può essere rappresentata sul grafo della rete dei servizi di trasporto collettivo come un sottografo detto *ipercammino*, in cui i percorsi sono definiti *ipercammini semplici*. Strategie che includono scelte adattive a una o più fermate possono essere rappresentate come l'unione di più *ipercammini semplici* che, per quanto detto in precedenza, devono essere tali che solo da nodi fermata (o nodi di diversione) possono uscire più archi. Tali sottografi prendono il nome di *ipercammini composti*.

A ogni nodo di diversione i di un ipercammino h quindi corrisponderà un insieme L_{ih} di linee attrattive appartenenti all'ipercammino considerato. Agli archi di salita l , che collegano il nodo di diversione i con i nodi j delle li-

nee che appartengono a L_{ih} , è possibile associare una *probabilità di diversione* $\eta_{l,h}$, ovvero la probabilità di utilizzare la linea corrispondente al nodo j all'interno dell'ipercammino h , per gli eventi casuali che determinano la scelta adattiva:

$$\eta_{l,h} = p \left[l = (i, j) / i, L_{ih} \right] = \varphi_l / \sum_{n \in L_{ih}} \varphi_n \quad (2.51)$$

Convenzionalmente, si assegna una probabilità di diversione uguale a 1 agli archi non di salita appartenenti all'ipercammino e una probabilità nulla agli archi non appartenenti all'ipercammino.

Sulla base delle probabilità di diversione $\eta_{l,h}$ è possibile calcolare la probabilità q_{kh} di seguire il percorso k all'interno dell'ipercammino h , che è pari al prodotto delle probabilità di diversione per tutti gli archi l che appartengono al percorso k :

$$q_{kh} = \prod_{l \in k} \eta_{l,h} \quad (2.52)$$

Tale probabilità vale ovviamente 1 se il percorso k coincide con l'ipercammino (semplice) h .

È, inoltre, possibile calcolare le probabilità $b_{l,h}$ di attraversare un singolo arco l dell'ipercammino h , come la somma delle probabilità di seguire uno dei percorsi k appartenenti all'ipercammino h e che comprendono l'arco l :

$$b_{l,h} = \sum_{k: l \in k} q_{kh} = \sum_k a_{lk} q_{kh} \quad (2.53)$$

dove a_{lk} è il generico elemento della matrice di incidenza archi percorsi, che vale 1 se l'arco l appartiene al percorso k e 0 altrimenti.

In definitiva, l'utente che sceglie una certa strategia, ovvero un ipercammino che la rappresenta, non conosce in generale prima di iniziare lo spostamento quale percorso, e quindi quali linee e quali archi utilizzerà, in quanto questo dipende da eventi aleatori quali la successione di arrivi dei veicoli alle fermate.

Una volta definite le alternative di scelta (strategie o ipercammini), è possibile trattare il problema dell'insieme di tali alternative (insieme di scelta) che l'utente prende in considerazione. La *definizione dell'insieme dei percorsi ammissibili*, ovvero delle alternative di scelta, è particolarmente rilevante per la dimensione di scelta del percorso, dove la complessità topologica della rete può dar luogo a decine o centinaia di percorsi che collegano una coppia OD. L'insieme dei percorsi ammissibili I_{odm} che collegano la coppia di *centroidi* OD sulla rete del modo m , andrebbe definito secondo un modello comportamentale che rappresenti la percezione degli utenti, fornendo la probabilità di ciascun percorso di appartenere all'insieme delle alternative percepite da un generico utente di categoria i . Nella prassi, tuttavia, si ricorre ad approcci euristici che possono essere classificati in due tipologie:

- l'approccio *esaustivo*, che considera ammissibili tutte le strategie, ovvero gli ipercammini che le rappresentano, esistenti sulla rete in esame;
- l'approccio *selettivo*, che considera ammissibili solo gli ipercammini fra quelli topologicamente ammissibili sulla base del soddisfacimento di alcune regole euristiche.

In generale, può dirsi che l'*approccio esaustivo* è tipicamente associato a un'*enumerazione implicita* degli ipercammini, invece, l'approccio selettivo di solito prevede l'*enumerazione esplicita* di percorsi fra ciascuna coppia OD. Nelle applicazioni l'approccio prevalentemente utilizzato è quello *esaustivo* con *enumerazione implicita*, data la complessità di calcolo connessa all'enumerazione esplicita degli ipercammini.

Anche nel caso di reti di servizi discontinui, si assume che per ciascun ipercammino h , appartenente all'insieme I_{odm} degli ipercammini, che collegano la coppia OD sulla rete del modo collettivo m , l'utilità percepita U_h abbia un'utilità sistematica V_h negativa pari al costo medio G_h :

$$U_h = V_h + \varepsilon_h = -G_h + \varepsilon_h \quad \forall h \in I_{odm} \quad (2.54)$$

Il costo medio dell'ipercammino G_h può essere espresso come la somma di una parte *additiva* G_h^{ADD} e di una *non additiva* G_h^{NA} , che in questo caso, a differenza dei costi di percorso, è sempre presente.

$$G_h = G_h^{ADD} + G_h^{NA} \quad (2.55)$$

Il costo additivo G_h^{ADD} è la somma dei costi generalizzati di attraversamento degli archi dell'ipercammino: tempo a bordo, di salita, di discesa e tempo a piedi. Invece, il costo non additivo è esprimibile come somma dei costi di attesa W_h , nonché degli eventuali ulteriori costi non additivi, ovvero non associabili a singoli archi N_h .

$$G_h^{ADD} = \beta_b T_{bh} + \beta_s T_{sh} + \beta_d T_{dh} + \beta_p T_p \quad (2.56)$$

$$G_h^{NA} = \beta_w W_h + \beta_N N_h \quad (2.57)$$

dove β sono i rispettivi coefficienti.

Il costo medio di attesa W_h connesso all'ipercammino h può essere calcolato a partire dai tempi di attesa w_{lh} associati a ciascun arco di attesa, che possono essere espressi come segue se l è un arco di diversione, viceversa vale 0:

$$w_{lh} = \theta / \sum_{n \in L_{lh}} \varphi_{in} \quad (2.58)$$

$$W_h = \sum_{l \in h} w_{lh} \quad (2.59)$$

dove:

i = nodo di diversione da cui parte l'arco l ;

L_{lh} = insieme delle linee attrattive appartenenti all'ipercammino h ;

n = generico arco di diversione che esce da i ovvero la generica linea nell'ipercammino h ;

θ = parametro che assume valori compresi nell'intervallo $0,5 \div 1$ in funzione dell'ipotesi sulla legge degli arrivi degli utenti e dei veicoli.

Infine, per quanto riguarda il modello di scelta fra le alternative disponibili, questo può essere espresso in forma generale come la probabilità $p_H[h]$ che l'ipercammino h sia quello di massima utilità percepita:

$$p_H[h] = p_r \left[-G_h + \varepsilon_h \geq -G_{h'} + \varepsilon_{h'} \right] \quad \forall h', h \in I_{odm} \quad (2.60)$$

Anche nel caso del modello di scelta degli ipercammini si possono seguire due approcci: quello di *utilità deterministica*, che assegna tutta la domanda all'ipercammino di minimo costo generalizzato, e i modelli di *utilità casuale*, tipicamente *Logit* e *Probit*.

Nel caso di reti di trasporto collettivo, l'uso di modelli di utilità casuale di tipo *Logit* è poco accettabile per quegli ipercammini che possono comprendere una gran quantità di linee in comune, poiché non è ammissibile l'ipotesi d'indipendenza delle alternative irrilevanti, che è alla base dei modelli *Logit*.

Infine, una volta calcolate le probabilità di scelta degli ipercammini, è possibile ottenere la probabilità di utilizzare un determinato percorso k (2.61).

$$p^i[k / odm] = \sum_h q_{kh} p_H[h] \quad (2.61)$$

Condizione necessaria e sufficiente affinché un ipercammino di destinazione s sia l'ipercammino di minimo costo, è che per ogni nodo i dell'ipercammino si verifichino le seguenti condizioni:

$$c_i \leq c_j + c_{ij} \quad \forall (i, j) \in X_{i+} \quad \text{se } i \notin B \quad (2.62)$$

$$c_i \leq \left(\sum_{j \in X'_{i+}} \varphi_{ij} c_j + 1 \right) / \sum_{j \in X'_{i+}} \varphi_{ij} \quad \forall (i, j) \in X_{i+} \quad \text{se } i \in B \quad (2.63)$$

dove:

c_i e c_j = costi necessari per raggiungere la destinazione s dai nodi i e j con l'ipercammino da loro uscente;

c_{ij} = costo costante dell'arco (i, j) ;

φ_{ij} = frequenza associata all'arco di attesa/salita (i,j) ;

B = insieme dei nodi fermata;

X_{i+} = insieme dei nodi collegati al nodo i -esimo da archi uscenti dal nodo i -esimo ed entranti nel nodo j -esimo.

Essendo ϕ_i la frequenza associata al nodo fermata i si può scrivere:

$$1 / \sum_{j \in X_{i+}} \varphi_{ij} = 1 / \phi_i \quad (2.64)$$

e quindi:

$$\sum_{j \in X_{i+}} c_j \left(\varphi_{ij} / \sum_{j \in X_{i+}} \varphi_{ij} \right) \quad (2.65)$$

Quest'ultima esprime il tempo medio di percorrenza, ottenuto come media pesata dei tempi di percorrenza dei vari percorsi dalla fermata i alla destinazione j , in cui il peso è dato dalla frequenza delle linee relative ai singoli percorsi rispetto alla frequenza cumulata.

Per procedere alla descrizione dell'algoritmo è necessario introdurre la definizione di *albero di ipercammini* o *iperalbero*, inteso come *insieme di ipercammini tale che vi sia un solo ipercammino da ciascun nodo del grafo alla destinazione comune*.

A ogni iterazione dell'algoritmo viene esaminato un nodo j della rete e per tutti gli archi appartenenti alla stella in entrata si esamina l'appartenenza del primo nodo i all'insieme dei nodi fermata B .

Nel caso che i non appartenga a B e l'arco (i,j) non soddisfa la (2.62) l'ipercammino sin qui seguito per raggiungere i viene sostituito con quello formato dall'ipercammino fino a j e dall'arco (i,j) , e il costo di i viene aggiornato ponendo:

$$c_i = c_j + c_{ij} \quad (2.66)$$

Invece, nel caso che i appartenga a B , si distinguono due casi:

- i è stato raggiunto per la prima volta;
- i è già stato raggiunto almeno una volta.

Se i viene raggiunto per la prima volta, si pone la frequenza cumulata del nodo $\phi_i = \phi_{ij}$ e l'ipercammino costruito sino a j viene connesso con l'arco (i,j) , inserendo il nodo j in X'_{i+} ed aggiornando il costo:

$$c_i = c_j + \frac{1}{\phi_{ij}} \quad (2.67)$$

Nel caso in cui i sia stato già raggiunto si pone:

$$\phi_i = \phi_i + \phi_{ij} \quad (2.68)$$

e si verifica se l'arco (i,j) non soddisfi la (2.63). In questo caso l'ipercammino da i viene integrato tramite l'arco (i,j) con quello che si diparte da j . Si pone, quindi, $X'_{i+} = X^0_{i+}$ e il costo viene aggiornato:

$$c_i^{(IT)} = c_i^{(IT-1)} + \left[c_j^* - c_i^{(IT-1)} \right] \frac{\phi_{ij}^*}{\phi_i^{(IT)}} \quad (2.69)$$

Si sono introdotti per comodità gli apici (IT) e $(IT-1)$ per indicare l'iterazione corrente (IT) e la precedente $(IT-1)$. Inoltre, si sono indicati con c_j^* e ϕ_{ij}^* rispettivamente il costo e la frequenza da inserire nell'iterazione IT .

In particolare, si deve notare che se risulta $c_j^{(IT-1)} > c_j^*$ bisogna connettere, senza fare alcuna verifica, l'ipercammino che si diparte da j tramite l'arco (i,j) . Dalla (2.69) si può ricavare che essendo il termine tra parentesi minore di zero ne seguirà che sarà certamente $c_i^{(IT)} \leq c_i^{(IT-1)}$.

Alla fine di ogni iterazione i nodi per i quali è stato corretto il percorso e il costo vengono posti in una lista detta *serbatoio*, dalla quale viene estratto il nodo da esaminare nell'iterazione successiva.

Per quanto riguarda il calcolo dei flussi, nel quadro dei modelli deterministici di assegnazione su rete non congestionata, nei quali la domanda viene assegnata solo ai percorsi di minimo costo (ToN), è necessario scrivere dei passi di calcolo adeguati, per il fatto che nell'ipercammino la domanda va distribuita sugli archi di diversione proporzionalmente alle frequenze delle linee a cui si accede.

L'algoritmo di calcolo dei flussi parte dalla costruzione di una lista L con i nodi dell'*ipergrafo* di destinazione s posizionati in ordine decrescente di costo; successivamente per ogni nodo j estratto dalla testa della lista viene calcolato il flusso che lo attraversa: dato dalla somma dei flussi presenti sugli archi entranti nel nodo j e dell'eventuale aliquota di domanda in origine dal nodo stesso e diretta alla destinazione s . Tale flusso viene distribuito sugli archi uscenti dal nodo j , tenendo conto che se il nodo j non è un nodo fermata si ha un solo arco per la definizione di ipercammino e quindi va assegnato tutto il flusso. Mentre se il nodo j è un nodo fermata, occorre ripartire il flusso sugli archi uscenti da j in funzione delle frequenze delle linee. L'algoritmo si arresta quando sono stati estratti tutti i nodi della lista L .

2.5.5. Il software AxE

Il programma *AxE* (*Assegnazione per Esperti*) nasce dall'esigenza di poter disporre di un semplice strumento per facilitare le fasi di analisi e progettazione delle reti di trasporto. In particolare, consente di assegnare attraverso diversi algoritmi, la matrice OD al grafo. Il software, distribuito gratuitamente, è stato sviluppato dal Prof. Giorgio Salerno, docente presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università di Firenze, e dai suoi collaboratori. Esistono due versioni equivalenti del programma, una per la piattaforma *Windows* e una per *Macintosh*. Il linguaggio di programmazione utilizzato per lo sviluppo è l'*APL* (*A Programming Language*) nella versione *AplX* della *MicroApl*.

Il programma non è dotato di una propria interfaccia grafica ma, sia per il *data entry* sia per la visualizzazione dei risultati, viene utilizzato un qualsiasi foglio di calcolo (Calc, Excel, ecc.) e il meccanismo del *copia e incolla* sugli appunti del sistema.

Il software, come già anticipato, consente l'utilizzo di diversi algoritmi di assegnazione, quali:

- TN, assegnazione Tutto o Niente;
- TND, assegnazione Tutto o Niente dinamica;
- IPER, assegnazione al trasporto collettivo a frequenza;
- ALQ, assegnazione per aliquote, con e senza controllo di capacità;
- FW, assegnazione d'equilibrio;
- DIAL, assegnazione aleatoria.

L'esecuzione del programma è di tipo *batch*, ovvero si preparano i dati indipendentemente dal programma che poi viene lanciato in un secondo momento e l'elaborazione avviene senza interazioni con l'utente. Per l'immissione dei dati si può utilizzare qualsiasi foglio elettronico, con la sola accortezza di mantenere alcune regole di siglatura e di posizione dei dati, che garantiscono la corretta lettura da parte di AxE. Infatti, il programma inizialmente cercherà le cosiddette *parole chiave*, cioè quelle che iniziano con il simbolo >, che indicano il tipo di dato che da quel punto in poi leggerà, come:

- >ALGORITMO
- >GRAFO
- >F (flussi)
- >OD

Per ciascuna di esse AxE individuerà la zona del foglio in cui leggere quel tipo di dato, a partire dalla cella sottostante a quella della parola chiave e fino a incontrare in basso una riga vuota ed a destra una colonna vuota.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	AxE: Algoritmo FW (equilibrio deterministico)												
2	Adattamento da Sheffi, "Urban...", fig. 5.1, p. 114 e tab. 5.4 p. 120												
3	>ALGORITMO												
4	FW	0	50										
5													
6	>GRAFO												
7		1	3 BPR	10	2	0	0					0	54
8		1	4 BPR	20	4	0	0						
9		1	5 BPR	25	3	0	0						
10		2	1 PLN	1		0	0						
11		3	2 PLN	0		0	0						
12		4	2 PLN	0		0	0						
13		5	2 PLN	0		0	0						
14													
15													

Figura 2.5 - Impostazione dati per AxE

Sotto la cella >ALGORITMO va specificato il tipo di algoritmo che si vuole utilizzare attraverso le sigle prima riportate. Nelle celle accanto alla sigla dell'algoritmo vanno riportati i parametri che si vogliono impostare; ad esempio, nel caso di un algoritmo all'equilibrio (FW) si deve riportare la precisione che si vuole ottenere e il numero massimo d'iterazioni. Infatti, l'algoritmo si arresta quando raggiunge la precisione fissata, ma se ciò non si dovrebbe verificare, l'arresto avviene una volta raggiunto il numero di iterazioni impostate.

Sotto la cella >GRAFO si comincia inserendo nelle prime due colonne rispettivamente il nodo iniziale e finale degli archi, seguono il tipo di funzione di costo associata all'arco e i parametri che la contraddistinguono. In particolare, per la funzione di costo *PLN* vanno inserite in ogni colonna i coefficienti dei termini in ordine decrescente di grado, invece, nella funzione del *BPR* vanno inseriti due parametri: il *tempo a vuoto* dell'arco t_{a0} e la *capacità* dell'arco c_a .

Sotto la cella >F può essere inserito un flusso precaricato, che non viene sommato ai flussi finali, e nella colonna adiacente, inizialmente vuota, sono riportati i flussi a seguito dell'assegnazione.

Infine, sotto la cella >OD viene riportata la matrice OD, che può essere scritta anche in forma di lista inserendo la sigla >ODL.

Una volta preparati i dati, si procede nel selezionare la parte del foglio di calcolo che va dalla cella più in alto a sinistra (>ALGORITMO) fino alla cella più in basso a destra che consente di includere tutti i dati immessi. A questo punto, attraverso il comando *copia*, i dati verranno immessi negli appunti del sistema e da qui prelevati da AxE una volta avviato.

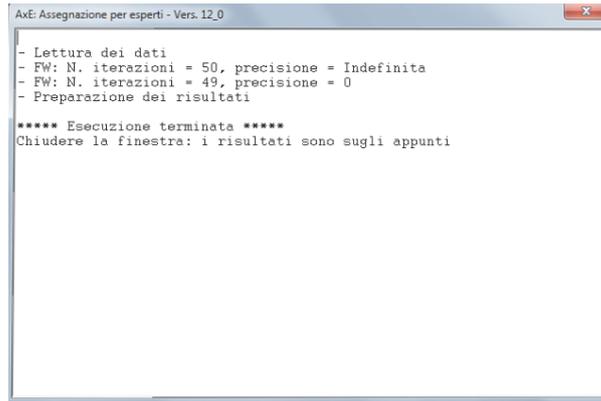


Figura 2.6 - Schermata di fine elaborazione di AxE

Una volta terminata la fase di assegnazione da parte del programma, i risultati vengono messi nuovamente negli appunti del sistema e, quindi, basta *incollarli* su un foglio di calcolo, nel quale verranno visualizzati con la stessa impostazione con cui sono stati immessi. In questo caso, nella seconda colonna dei flussi risulteranno i valori dei flussi di ogni singolo arco a seguito dell'assegnazione effettuata.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M
1	AxE: Algoritmo FW (equilibrio deterministico)												
2	Adattamento da Sheffi, "Urban...", fig. 5.1, p. 114 e tab. 5.4 p. 120												
3	>ALGORITMO												
4	FW	0	50										
5													
6	>GRAFO												
7	1	3 BPR	10	2	0	14		0	54				
8	1	4 BPR	20	4	0	23							
9	1	5 BPR	25	3	0	17							
10	2	1 PLN	1		0	0							
11	3	2 PLN	0		0	14							
12	4	2 PLN	0		0	23							
13	5	2 PLN	0		0	17							
14													
15													

Figura 2.7 - Output dati di AxE

AxE è a oggi ancora in fase di ulteriore sviluppo e ottimizzazione, infatti, per lo studio in questione è stata sviluppata una nuova *release* che, oltre alle funzioni già possedute nelle precedenti versioni, consente di avere la matrice dei tempi sugli archi per ogni iterazione e sui percorsi di minimo costo finali.

2.6 Il modello di progettazione

Si riprendono adesso le considerazioni fatte nei paragrafi precedenti con l'intento di costruire un modello matematico del sistema che consenta di rappresentarlo e, quindi, di passare alla fase di progettazione.

L'utilità pratica di un modello matematico è quella di avere a disposizione un mezzo che consente di concentrarsi su alcuni elementi significativi del problema, comprenderne meglio le interazioni e ottenere indicazioni forti per progettare o gestire un sistema di trasporto reale.

Impostare analiticamente un problema di progettazione dell'offerta di trasporto, così chiamato *Supply Design* o *Network Design*, ha l'obiettivo di trovare il valore *ottimo* delle variabili decisionali che caratterizzano il problema. I problemi di progettazione nel campo dei trasporti possono assumere un grado di complessità molto elevato dato dal numero di variabili in gioco e da tutte le combinazioni di alternative confrontabili. Per il caso in esame, si pensi alle innumerevoli soluzioni di piani tariffari che possano risultare ammissibili per una stessa zonizzazione. In questo modo, senza un opportuno strumento, diventa difficile confrontare tra le soluzioni ammissibili quella che meglio soddisfa gli obiettivi e i vincoli di progetto.

I modelli di progettazione seguono un approccio *what to*, cioè forniscono indicazioni su *cosa fare* e, quindi, come intervenire sull'offerta per ottimizzare certi obiettivi rispettando alcuni vincoli. Invece, il modello di assegnazione, visto in precedenza, segue un approccio *what ife* cioè risponde alla domanda *che succede se*. Infatti, essi simulano il funzionamento di un determinato sistema, valutandone le risposte agli interventi effettuati, e possono considerarsi una parte del modello di progettazione.

Si può ben capire che la semplificazione e la generalizzazione del problema, al fine di poterlo tradurre in un modello, conduce automaticamente alla perdita di alcune informazioni. Infatti, la complessità dei problemi molto spesso obbliga all'accorpamento di variabili e dati che consentono di trovare

la configurazione ottima in tempi ragionevoli, pur esplorando un notevole numero di possibili alternative.

Tenendo conto di tutto ciò si può costruire un modello matematico che nel suo complesso è utile sia in fase di progettazione sia di gestione del servizio.

Nel seguito, ci si concentra sulla formalizzazione di un problema generico, che sarà la base da cui partire per adattarlo a casi specifici. Si suppone di:

- avere una rete stradale nota, ricostruita sulla base dell'analisi del territorio e, quindi, il grafo stradale;
- avere la rete del trasporto pubblico nota e, quindi, il grafo corrispettivo;
- conoscere le caratteristiche e i parametri di esercizio dei servizi di trasporto pubblico esistenti;
- aver determinato le matrici OD relative al mezzo privato e ai sistemi di trasporto pubblico, in base all'analisi della domanda.

Queste informazioni vengono fuse in un oggetto matematico che consentirà di passare alla fase di progettazione.

In generale, la fase di progettazione consiste nell'ipotizzare alcuni interventi sull'offerta, simularne il funzionamento, verificarne la compatibilità tecnica e infine valutarne la *convenienza*. È evidente che per individuare la soluzione al problema di progetto è necessario poter valutare le risposte del sistema (domanda, flussi, prestazioni) agli interventi da progettare e, quindi, disporre di un modello di simulazione, che consente di prevedere le reazioni della domanda. Inoltre, il problema di progettazione solitamente viene espresso come un problema di ottimizzazione di una funzione obiettivo sottoposta a vincoli, le cui soluzioni vengono utilizzate come condizione di partenza per elaborazioni successive.

Nello studio in questione, il problema è quello di determinare una tariffa da applicare alle aree di sosta all'interno di un'area urbana, nella quale si è deciso di limitare gli accessi. Per riprendere il concetto, una volta individua-

ta l'area su cui intervenire, le ipotesi di buona progettazione, che stanno alla base di questa proposta, sono:

- modifica del piano viario per la creazione della cosiddetta *circolazione a stanze*, che consente di velocizzare la ricerca del parcheggio e, attraverso la creazione delle cosiddette *stanze di circolazione*, eliminare il traffico di attraversamento;
- garantire attraverso la *leva* della tariffa di sosta una certa percentuale di stalli liberi, eliminando in tal modo il *traffico parassita*.

Nei sottoparagrafi successivi verrà approfondito il problema della progettazione, approfondendo il tema della funzione obiettivo e degli algoritmi risolutivi.

2.6.1 La funzione obiettivo

In generale, il problema di progettazione viene espresso come un problema di ottimizzazione di una *funzione obiettivo* sottoposta a *vincoli*.

Per lo studio in questione, gli interventi da progettare e le variabili di progetto che li identificano possono essere distinti in interventi sulle prestazioni del trasporto pubblico locale (frequenze delle linee del trasporto collettivo) e interventi sulle tariffe di sosta.

Il modello di progettazione proposto è formulato come un problema di ottimizzazione vincolata, in cui alcuni obiettivi sono rappresentati sotto forma di vincoli. Oltre al vincolo di coerenza tra domanda e offerta, viene posto il vincolo secondo il quale le tariffe di sosta siano positive e che all'interno dell'area d'intervento ci sia una percentuale di stalli liberi superiore a una certa percentuale. Quest'ultimo vincolo ha un significato molto importante in quanto, la verifica dello stesso dà all'utente la certezza di riuscire a parcheggiare all'interno dell'area e in più assicura un buon margine di sicurezza rispetto alla saturazione delle aree di sosta.

La funzione obiettivo è di tipo mista, ovvero una combinazione di obiettivi sociali e aziendali, in analogia all'analisi benefici-costi, alcuni dei quali devono essere minimizzati altri massimizzati.

Come già anticipato, il modello di progettazione include un sotto-modello, *modello di simulazione*, che simula il comportamento del sistema domanda-offerta in corrispondenza dei valori assunti dalle variabili di progetto, sotto l'ipotesi di domanda elastica. Quest'ultima ipotesi è molto importante per lo studio in esame, poiché l'obiettivo non vuole essere quello di agire in modo isolato sul *pricing* per fare cassa, ma attraverso la leva del prezzo si vuole indurre l'utente a cambiare le proprie abitudini di mobilità.

Il modello di progettazione dell'offerta può, in generale, essere formulato come un modello di ottimizzazione vincolata nel quale si vuole ottimizzare una funzione obiettivo $w(\cdot)$, che in generale dipende dalle variabili di progettazione \underline{x} e dai flussi sugli archi della rete \underline{f} sottoposta a vincoli di diverso tipo che, a loro volta, sono funzione dei parametri di progettazione e dei flussi. I flussi sugli archi risultanti dal sotto-modello di assegnazione possono essere espressi in funzione della domanda \underline{d} della topologia della rete \underline{A} (matrice d'incidenza archi-percorsi) e dalle probabilità di scelta del percorso \underline{P} . In generale, sia la topologia della rete sia la probabilità di scelta del percorso dipendono dalla configurazione dell'offerta attraverso le funzioni di costo degli archi. La domanda dipende dalle prestazioni dell'offerta e, quindi, dal vettore delle variabili di progetto, dato che si assume che la domanda sia elastica. Quindi, il modello di progettazione dell'offerta può essere formulato nel seguente modo:

$$\underline{x}^* = \arg_x \max(\min) w(\underline{x}, \underline{f}^*) \quad (2.70)$$

sotto i vincoli:

$$\underline{f}^* = \underline{A}(\underline{x}) \underline{P} \left[\underline{x}, \underline{C}(\underline{f}^*, \underline{x}) \right] \underline{d} \left[\underline{C}(\underline{f}^*, \underline{x}) \right] \quad (2.71)$$

$$\underline{x}, \underline{f}^* \in E \quad (2.72)$$

$$\underline{x}, \underline{f}^* \in T \quad (2.73)$$

Dove l'equazione (2.71) rappresenta il vincolo di coerenza fra offerta, prestazioni, domanda e flussi; l'equazione (2.72) individua l'insieme dei parametri di offerta che soddisfano i *vincoli esterni* e la (2.73) esprime il sistema dei *vincoli tecnici*.

Si parla di *vincoli esterni* quando quest'ultimi sono rappresentativi di alcuni obiettivi espressi sotto forma di vincoli. Invece, si chiamano *vincoli tecnici* quelli relativi a condizioni di funzionalità del sistema, come ad esempio soglie prefissate di rapporti flussi/capacità o parametri minimi d'esercizio. Infine, i vincoli relativi alle condizioni di coerenza fra domanda, flussi, variabili di progetto e prestazioni del sistema altro non sono che una rappresentazione del modello di simulazione.

Le notazioni $\underline{A}(x)$ e $\underline{P}[x, C]$ indicano che nel caso di variabili di progetto che influenzano la topologia della rete, sia la matrice d'incidenza archi-percorsi sia i percorsi alternativi e, quindi, la matrice delle probabilità di scelta del percorso, dipendono dal valore delle variabili di progetto.

La funzione obiettivo può assumere diverse forme in relazione all'ottica sotto la quale si progettano gli interventi: sociale, aziendale, ecc. Nel caso di ottimizzazione *multiobiettivo* si pone come funzione obiettivo una misura dell'utilità o del costo complessivo, solitamente espresso come una combinazione lineare di due o più funzioni obiettivo.

Un ultimo aspetto generale riguarda gli algoritmi risolutivi dei modelli di progettazione, che possono essere specificati in modo diverso. Si tratta, in generale, di modelli non lineari a vincoli non lineari e per queste ragioni si fa ricorso prevalentemente ad algoritmi approssimati, che in molti casi forniscono risultati soddisfacenti.

Nel caso in questione, in cui il modello d'interesse è quello relativo alla progettazione delle tariffe di parcheggio, le tariffe possono generalmente essere rappresentate come variabili continue p_i (variabili di progetto), la cui specificazione dipenderà dalla *struttura tariffaria* ipotizzata, ovvero da come si pensa di applicare il prezzo. Se si ipotizzano tariffe costanti, perlomeno per fascia oraria e/o per giorno della settimana, le componenti p_i del vettore

\underline{p} possono essere associate agli archi della rete rappresentativi delle aree di sosta. Relativamente alle finalità della progettazione, che possono essere molto diverse tra loro, se l'obiettivo del prezzo è sostanzialmente quello di far cambiare le abitudini di mobilità degli utenti, facendogli abbandonare il mezzo privato a vantaggio di sistemi di trasporto collettivo, migliorando parallelamente l'efficienza del sistema complessivo, il *prezzo ottimale* viene detto *prezzo di efficienza*.

Come già anticipato, per gli scopi in questione, è utile se non necessario, considerare la domanda di mobilità elastica. Per affrontare il problema in questo modo è indispensabile considerare la domanda OD per il modo auto d_{od}^A come elastica, ad esempio rispetto alla ripartizione modale:

$$d_{od}^A(s_{od}^A(\underline{p}^A, \underline{f}^A), s_{od}^B) \quad (2.74)$$

dove A e B rappresentano due modi di trasporto (ad esempio auto e autobus), s_{od}^A e s_{od}^B sono i valori dei costi generalizzati relativi alla coppia OD dei due modi di trasporto o delle soddisfazioni rispetto alla scelta del percorso, che a loro volta dipendono dai costi di percorso \underline{C}^A e \underline{C}^B . Si è, inoltre, ipotizzato che solo i costi relativi alla rete stradale siano dipendenti dal vettore dei flussi \underline{f}^A oltre che dai prezzi di progetto \underline{p}^A . In questo caso può essere significativo imporre degli ulteriori vincoli al problema, come ad esempio richiedere che i flussi sugli archi stradali risultino inferiori di una aliquota prefissata ai corrispondenti valori di capacità.

Particolarizzando il tutto per il problema in esame, e considerando i due modi di trasporto (auto e autobus), il prezzo di *efficienza*, o *prezzo ottimale*, può essere stimato attraverso la massimizzazione della funzione obiettivo (2.75).

$$f.o. = S + I - C + E \quad (2.75)$$

che in maniera più esplicita può essere scritta:

$$f.o. = \text{Surplus}_{\text{utenti}} + \text{Incassi}_{\text{pricing}} + \text{Incassi}_{\text{bus}} - \text{Costi}_{\text{gestione}} + \text{Esterneità}$$

sotto i vincoli:

$$\underline{p} \geq 0 \quad (2.76)$$

$$\underline{Stalli}^{liberi} \geq L \quad (2.77)$$

$$\underline{f}^* = \underline{\underline{AP}}(\underline{C}^{car}(\underline{p}, \underline{f}^*)) \underline{d}^{car}(\underline{C}^{car}(\underline{p}, \underline{f}^*), \underline{C}^{bus}) \quad (2.78)$$

dove:

$S = surplus\ dell'utente$, espresso come prodotto tra la domanda totale d_{od} e la variazione di soddisfazione tra lo scenario progettuale e quello iniziale, diviso per il coefficiente β_{cost} che consente di esprimere il surplus in €;

$I = incassi$ relativi alla tariffa di parcheggio CP dell'area sottoposta a pricing e al biglietto dell'autobus, pagato dalla domanda che per effetto del pricing si trasferisce dal mezzo privato al mezzo pubblico;

$C = costi\ di\ gestione$ stimati pari a:

$$C_{gestione} = 4 \cdot N_{bus} \cdot 10 \quad (2.79)$$

avendo stimato 4€ il costo per ogni km/h di velocità che in un ora genera un autobus con una velocità commerciale di 10 km/h;

$E = riduzione\ dell'esternalità$ dovuta al trasferimento di un'aliquota di domanda dal modo auto al modo autobus stimata pari a (Amoroso S. *et al.*, 2012; European Environment Agency, 2005; Migliore M. *et al.*, 2013):

$$E = 0,11 \cdot OD_{newpass_bus} \cdot km_{bus} \quad (2.80)$$

Infine, i tre vincoli indicano rispettivamente che la tariffa dei parcheggi e degli autobus deve essere positiva, che la percentuale di stalli liberi deve essere maggiore uguale a un certo valore prestabilito (es. 15-30%), mentre l'ultimo vincolo è quello di interazione fra domanda e offerta.

Il vincolo sulla percentuale di stalli liberi ha ripercussioni significative sull'ottimizzazione del modello. Come suggerito da precedenti studi, la percentuale di stalli liberi non deve essere inferiore al 15% (Vickrey, 1954) ma nemmeno troppo elevata, poiché lo spazio urbano ha un grande valore che

non va sprecato. Con questo valore minimo del 15% è stato dimostrato che può essere eliminato il *traffico parassita*, ma per lo scopo di questo lavoro, questa parametro vuole essere strumentale, insieme alla tariffa, per limitare gli accessi in area urbana con mezzi privati da parte dei non residenti. Per tali ragioni e per motivi legati a livelli di dettaglio nella zonizzazione non troppo elevati (interi quartieri e non singoli isolati), a tale valore possono essere assegnati valori maggiori che, inoltre, garantiscono un maggior margine di sicurezza rispetto alla saturazione. Resta inteso che tale percentuale, a seguito dei risultati delle simulazioni e degli obiettivi del decisore, può essere variata per meglio adattarsi alle condizioni locali.

In definitiva, la funzione obiettivo può essere scritta nel seguente modo:

$$f.o. = \frac{1}{\beta_{cost}} \sum_{od} d_{od} \left[\ln \left(e^{V_{car}} + e^{V_{bus}} \right)_{pricing} - \ln \left(e^{V_{car}} + e^{V_{bus}} \right)_0 \right] + \quad (2.81)$$

$$+ CP \cdot OD_{car_park} + \text{biglietto}_{bus} \cdot OD_{newpass_bus} +$$

$$-4 \cdot N_{bus} \cdot 10 + 0,11 \cdot OD_{newpass_bus} \cdot km_{bus}$$

2.6.2 Metodo per la risoluzione del problema

Come già detto, il problema di progetto può essere trattato in tanti modi, tra cui il più comune è quello dell'ottimizzazione di una funzione obiettivo sottoposta a vincoli. In molti casi, questa modellazione è di tipo non lineare a vincoli non lineari, oppure con proprietà matematiche tali da non esistere *algoritmi esatti*, ovvero algoritmi che conducono ad una soluzione esatta con un ottimo globale. Per tali ragioni si parlerà di *Algoritmica* ed *Euristica*. L'*Algoritmica* è un metodo di risoluzione di problemi che poggia su un insieme finito di regole ben definite chiamato *Algoritmo* e che conduce alla soluzione del problema. Invece, l'*Euristica* è un approccio alla risoluzione di problemi che attiene a metodi che si affidano a regole empiriche generali,

che poggiano sul buon senso e che si ritiene possano condurre alla soluzione del problema. Quest'ultimo approccio è applicabile quando il problema è:

- confuso (non definibile in maniera chiara);
- complesso (non scomponibile in maniera precisa);
- esteso (non delimitabile in maniera netta).

Ai fini *ingegneristici* gli *algoritmi euristici* possono condurre a risultati molto soddisfacenti, poiché l'obiettivo non è risolvere un puro problema matematico. Al tal fine è necessario partire da una configurazione tecnica iniziale molto buona, attraverso le regole di buona progettazione, prima richiamate, molto spesso difficili da tradurre in termini di obiettivi e vincoli. Pur questo, quando si è in presenza di reti a scala reale e a sistemi articolati, anche gli algoritmi euristici hanno una certa complessità. Questo è il caso di sistemi in cui sono presenti più modalità di trasporto, che per semplicità vengono affrontati in modo parziale attraverso modelli di progettazione indipendenti per ogni singolo sistema.

Per il problema in esame, tutta la fase di determinazione delle matrici OD, di scelta modale e di assegnazione, può essere affrontata con un approccio algoritmico; invece, la determinazione della tariffa ottimale di parcheggio viene risolta attraverso un'*euristica*, che qui di seguito verrà illustrata. In questo caso siamo di fronte a un metodo misto *Algoritmico-Euristico*.

Il tutto parte da uno scenario di riferimento, rispetto al quale si potranno fare confronti e si potrà calcolare la funzione obiettivo degli scenari via via creati. Infatti, quello che si vuole studiare è la risposta della domanda di mobilità sull'area in esame a seguito dell'introduzione, e della successiva variazione, del costo di parcheggio, che implica un costo aggiuntivo sugli spostamenti che convergono nell'area. Tale costo aggiuntivo produce la variazione di tutti i parametri del modello di ripartizione modale, e di conseguenza della ripartizione modale stessa, e in particolare dei tempi di percorrenza su auto t_{car} , dei tempi di ricerca del parcheggio $t_{parking}$, delle distanze percorse in auto $dist$ e infine anche dei tempi di percorrenza sull'autobus t_{bus} , per effetto di un possibile potenziamento del TPL. A questo punto, avendo le ma-

trici OD, sia per il modo auto sia autobus, derivanti dalla ripartizione modale dello scenario di riferimento, e avendo introdotto o variato le tariffe di parcheggio, si passa all'assegnazione delle stesse al grafo. Da qui si avranno i nuovi valori dei parametri t_{car} , $dist$, $t_{parking}$ e t_{bus} . Con questi nuovi parametri si riefettuano le ripartizioni modali. A questo punto è possibile calcolare la f.o. (funzione obiettivo) e verificare il rispetto dei vincoli.

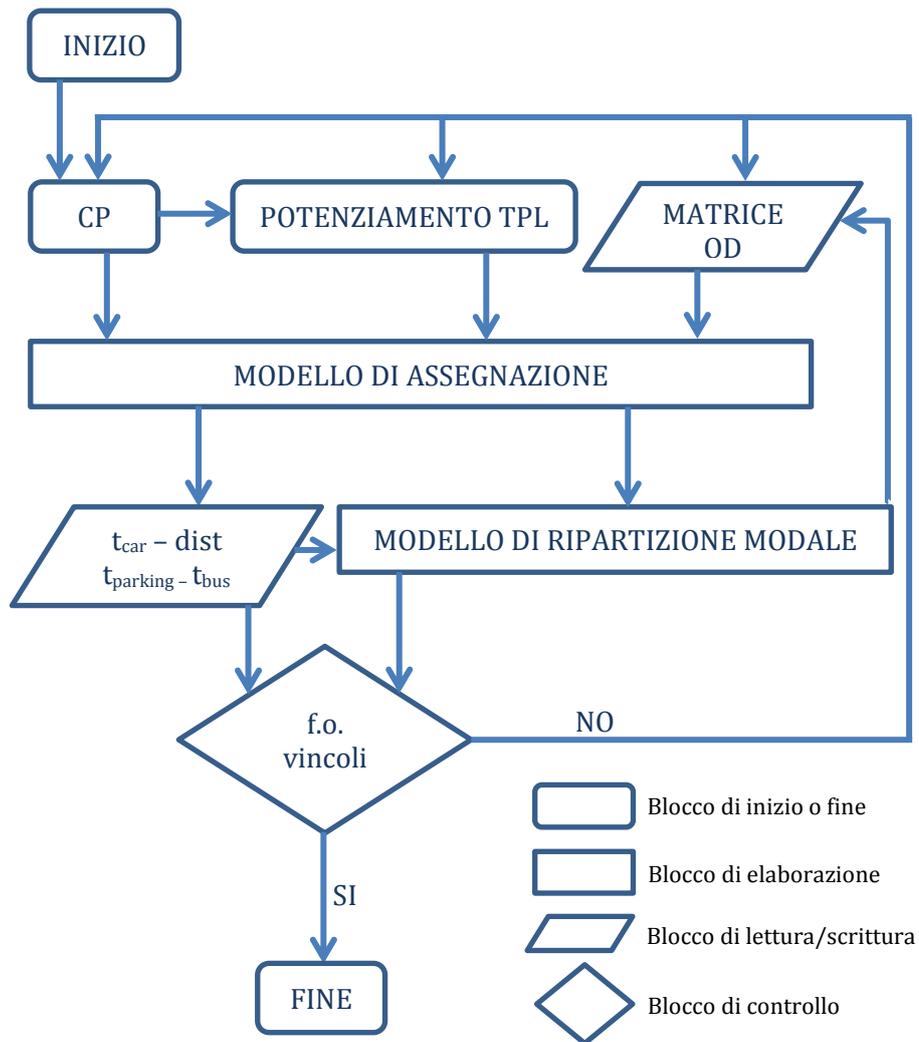


Figura 2.8 - Diagramma di flusso dell'euristica

Se i vincoli non sono rispettati allora si deve ripetere il procedimento prima visto, variando le tariffe di parcheggio, potenziando il TPL, assegnando le matrici OD provenienti dallo scenario precedente e seguendo lo stesso *iter* fino al calcolo della f.o.

Se, invece, i vincoli vengono verificati per la prima volta, si procede comunque con un'ulteriore iterazione, per verificare se il valore della f.o. cresce o decresce. Alla fine l'obiettivo è quello di assumere come ottimale lo scenario che tra quelli ammissibili fa registrare il maggiore valore della f.o.

L'euristica appena trattata può essere sintetizzata attraverso il diagramma di flusso riportato in Figura 2.8.

Nelle varie iterazioni si può procedere a incrementare o diminuire le tariffe delle singole aree di sosta e parcheggi di 0,25€ o 0,5€, a seconda della percentuale di riempimento o saturazione. Si procede in questo modo fino a trovare una configurazione tale da far verificare i tre vincoli sopra descritti e ottenere il massimo valore della f.o.

2.7 Conclusioni

Il metodo ha dimostrato che in modo molto semplice e relativamente veloce si riesce a ottenere una proposta di rimodulazione dei piani tariffari della sosta che rende il centro urbano non più soffocato dal traffico veicolare privato, ottenendo gli stessi effetti di uno schema di *road pricing*. Inoltre, l'aspetto tecnologico permette di rimodulare l'area sottoposta a vincolo in modo abbastanza economico e immediato, riuscendo nel tempo, attraverso la leva del costo, a far cambiare le abitudini di mobilità dei cittadini. Infine, si ritiene di sottolineare che tutta la parte di progettazione e simulazione è stata assistita da software gratuiti e *open source*, quindi, senza nessun aggravio di costi per quelle strutture o per quegli Enti che vorrebbero pianificare in modo ottimale la mobilità all'interno delle loro città.

CAPITOLO 3

L'APPLICAZIONE SULLA CITTA' DI PALERMO

In questo capitolo verrà illustrata, attraverso un'applicazione, la procedura vista nel capitolo precedente per la determinazione e l'ottimizzazione della tariffa di parcheggio, come soluzione sostitutiva a un sistema di road pricing. Dopo aver descritto e analizzato il territorio del comune di Palermo, su cui si vuole applicare il metodo, si passa all'esecuzione dei singoli passi che consentono di giungere alla soluzione ottimale. Inoltre, si avrà l'opportunità di mettere in evidenza i vantaggi e la semplicità di utilizzo dei software gratuiti e open source adottati.

3.1 Premessa

Nel capitolo precedente è stato illustrato un metodo per la progettazione di un sistema basato sul *parking pricing*, come sostitutivo di un sistema di *road pricing*. Il metodo qui applicato e testato sulla città di Palermo ben si adatta a qualsiasi tipo di territorio e a qualunque variante si voglia introdurre. Di volta in volta, quindi, a seconda della situazione che si presenta, il metodo può essere modificato e implementato per renderlo più aderente allo scopo che si vuole perseguire e al contesto in cui si vuole applicare. In questa lavoro di ricerca si è cercato di tener conto del maggior numero di aspetti possibili del problema trattato, ma si è consapevoli che essi non rappresentano la totalità dei possibili fattori in gioco. Il presente studio, oltre a proporre un nuovo modo di concepire e gestire le zone a traffico limitato, ha lo sco-

po di mettere in luce la robustezza e la funzionalità della piattaforma metodologica che qui viene presentata.

Per facilitare la comprensione del metodo si eseguiranno le fasi nella stessa sequenza di come sono state illustrate nel secondo capitolo; si procederà, quindi, col seguente schema:

1. individuazione dell'area di studio;
2. suddivisione in zone dell'area di studio (zonizzazione);
3. definizione del modello di offerta del sistema di trasporto (grafo);
4. stima della domanda di trasporto che interessa l'area di studio (matrici OD);
5. simulazione dell'interazione domanda/offerta (assegnazione);
6. calcolo della funzione obiettivo e individuazione della soluzione ottima.

3.2 La città di Palermo

Nelle aree urbane italiane, ci si confronta da tempo con una realtà caratterizzata da una duplice dinamica: da un lato i centri cittadini presentano un'alta concentrazione di funzioni, di luoghi attrattivi e sempre meno cittadini residenti; dall'altro vi è una notevole dispersione residenziale nei comuni esterni alle grandi città, caratterizzati da un'ampia offerta di nuova edilizia abitativa a prezzi più accessibili. Ciò ha finito per perpetuare e aggravare un modello di mobilità incardinato sull'uso del mezzo di trasporto individuale, con effetti penalizzanti sia in termini ambientali sia di efficienza, il cui relativo costo è il deterioramento della vivibilità delle aree urbane. Questa dinamica si registra anche nella città di Palermo e per studiarla in maniera più approfondita è necessario individuare i poli di maggiore attrazione presenti nel centro cittadino, l'offerta di trasporti disponibile e la domanda di mobilità. Questa prima analisi consentirà, inoltre, di individuare l'area di studio su cui poi applicare il metodo prima descritto.

3.2.1 Il contesto territoriale di riferimento

La città di Palermo si affaccia sulla costa nord-occidentale della Sicilia, si estende su 158,88 kmq e conta 656.829 abitanti (Istat, 2012); s'inserisce in un'area urbana metropolitana che comprende altri 26 comuni, con una popolazione complessiva di 1.038.938 abitanti (Istat, 2012). Dall'analisi demografica emerge che a Palermo dal 1981 a oggi la popolazione è diminuita del 6,4% a vantaggio dei comuni dell'area metropolitana. Se si fa riferimento al dato del 2012, la popolazione residente risulta di poco superiore a quella che si registrava nel 1971.

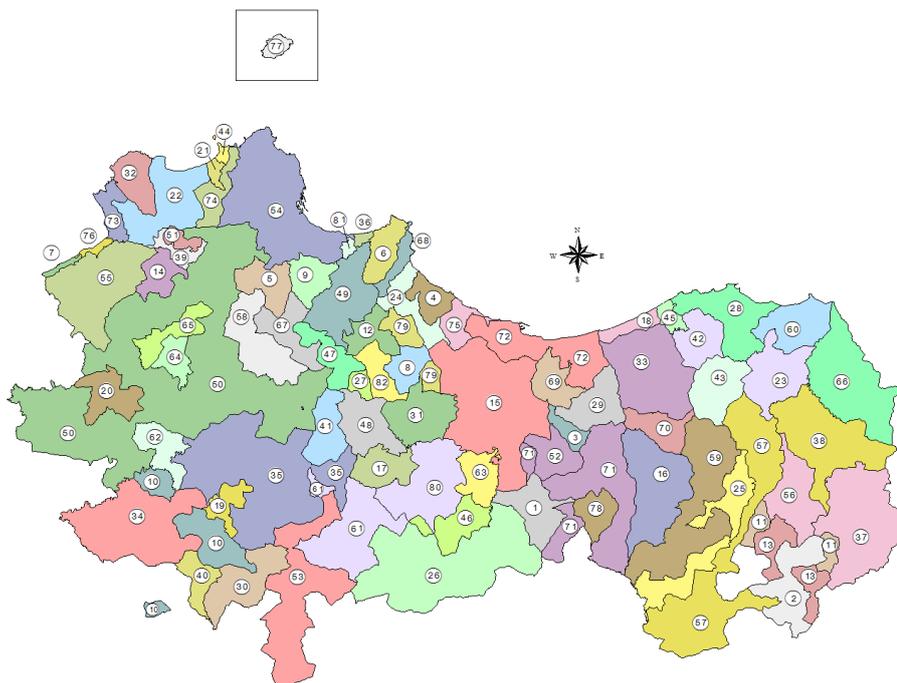


Figura 3.1 - Provincia di Palermo (n.54 - comune di Palermo)

Questo nuovo schema demografico crea subito un grande problema, che se non governato rischia di mandare al collasso il sistema infrastrutturale che consente l'entrata e l'uscita dalla città. Infatti, se a questo spostamento di domanda di mobilità, dalla città ai comuni limitrofi e viceversa, non segue un adeguamento dell'offerta di trasporto pubblico, la necessità di raggiungere il

capoluogo per motivi di studio o di lavoro genererà forti flussi di traffico privato, che andranno ad aumentare qualora il trend continuasse a essere lo stesso.

Come mostrano i dati sugli spostamenti sistematici Istat del 2001, circa 323.000 individui ogni mattina per motivi di studio e di lavoro raggiungono Palermo, contro gli 8.500 che dalla città si spostano verso gli altri comuni. Il dato degli ingressi a Palermo va poi sommato agli spostamenti generati all'interno della città stessa, che sono circa 284.000, per un totale di persone che si muovono all'interno dell'area cittadina pari a 607.000. Considerando che i residenti a Palermo sono all'incirca 650.000, i dati prima mostrati fanno emergere che si ha un numero di persone che si muovono pari circa a quello dei residenti. Inoltre, se per i ragionamenti prima esposti si considera che la maggior parte di questi si sposta con mezzo privato e che il *coefficiente medio di occupazione del veicolo* è di 1,3 (PUT, 2009), allora si ha un enorme numero di veicoli che ogni giorno invadono la rete stradale palermitana rendendola invivibile.

3.2.2 I poli di attrazione

Per individuare i poli di attrazione all'interno del tessuto urbano della città di Palermo sono stati georiferiti, sul sistema di coordinate geografiche, tutti gli edifici pubblici e privati più importanti in termini di presenze giornaliere (PUT, 2009). A partire dal database contenente gli indirizzi e il numero di presenze giornaliere per ogni Ente, questi sono stati georiferiti sulla cartografia, attraverso il software QGIS, per avere una migliore lettura sulla loro collocazione spaziale.

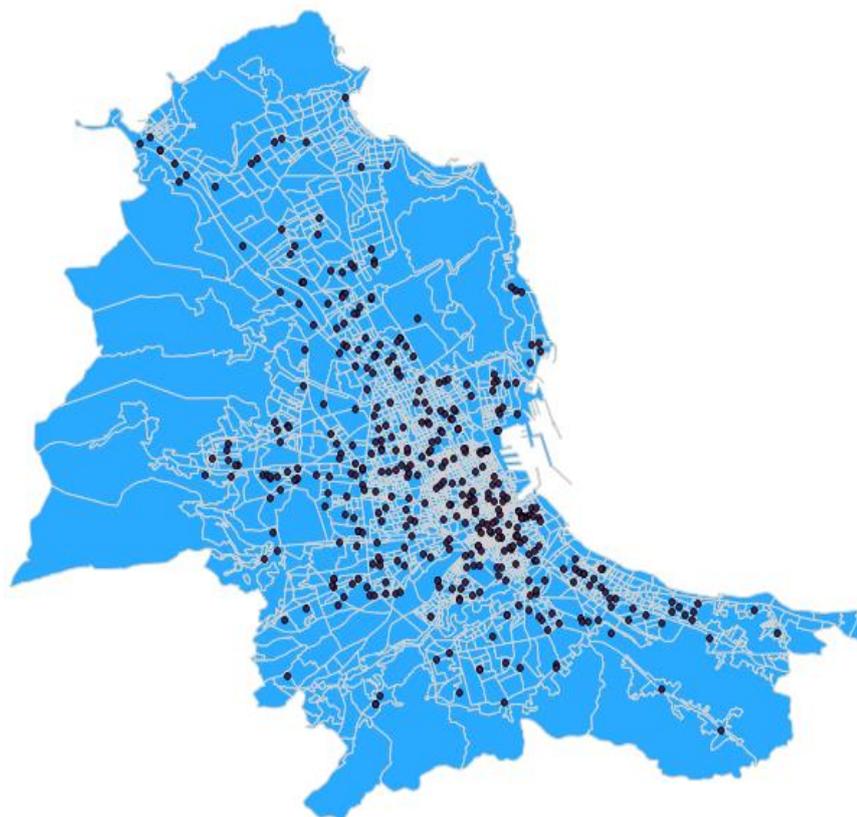


Figura 3.2 - I poli attrattori di Palermo

Per avere un dato facilmente utilizzabile, sia per la fase di analisi sia da un punto di vista modellistico, è stata effettuata un'intersezione tra i poli georiferiti e le sezioni censuarie Istat, in modo da assegnare ogni polo alla sezione censuaria su cui ricade.

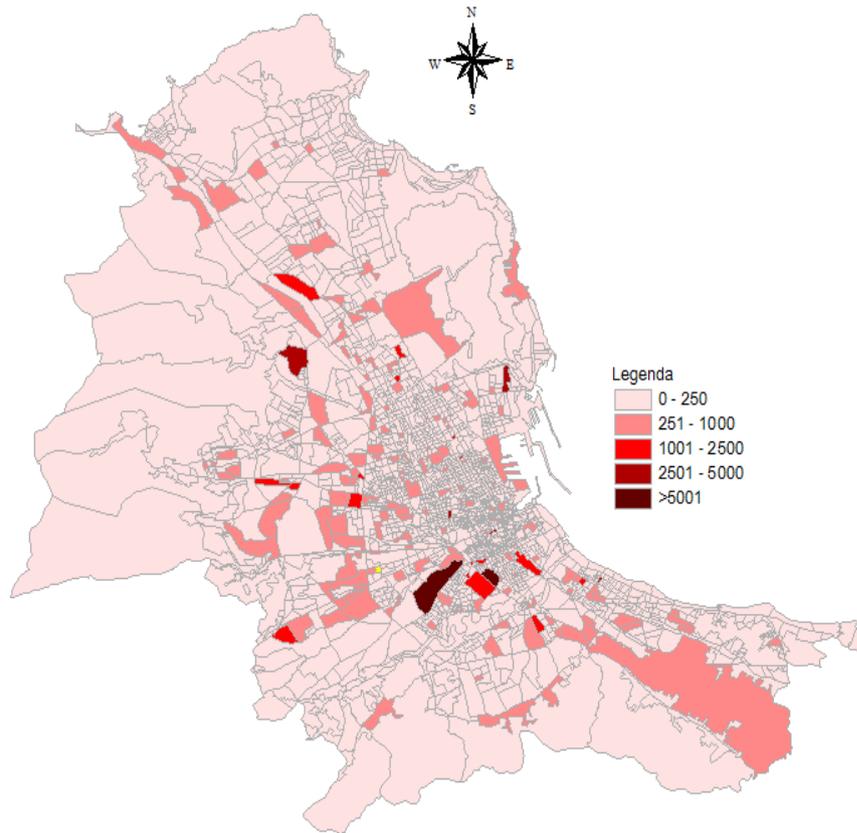


Figura 3.3 - Sezioni censuarie classificate per numero di presenze

Per avere un'idea più chiara dei luoghi di maggiore attrazione della città, è stata eseguita un'ulteriore elaborazione, nella quale i poli sono rappresentati con circonferenze di diametro proporzionale al numero di presenze. Dove per *presenze giornaliere* si intende il numero di persone che in modo sistematico, per motivi di studio o di lavoro, ogni giorno raggiungono un determinato polo.

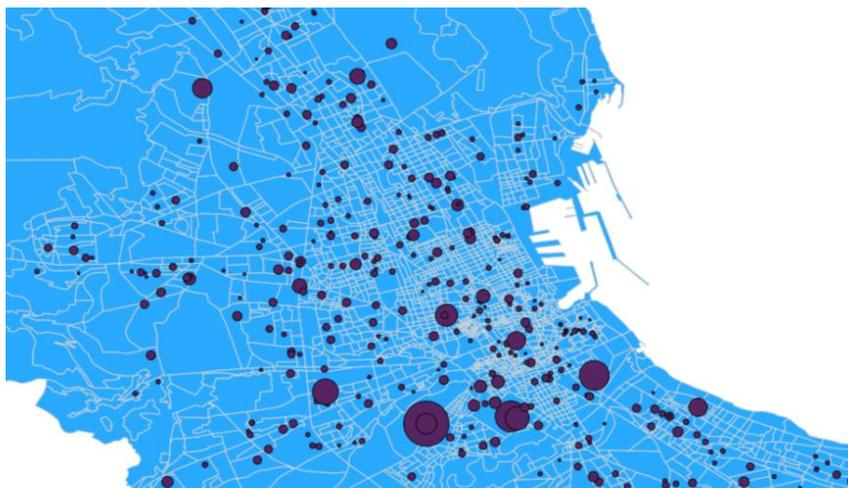


Figura 3.4 - Poli attrattori per numero di presenze giornaliere

Nella rappresentazione in Figura 3.4 vengono messi in evidenza i poli, e quindi le zone, interessate da una maggiore gravitazione e sulle quali conviene concentrare le fasi di analisi. Si registra un numero di circa 193.000 presenze giornaliere, di cui quasi il 25% rappresentato dai sei poli numericamente più rilevanti:

1. Polo Universitario - Viale delle Scienze (17.000 presenze);
2. A.O. Universitaria P. Giaccone (8.000 presenze);
3. Polo Universitario - Via Archirafi (7.400 presenze);
4. AUSL6 (5.500 presenze);
5. P.O. Civico E. Benfratelli (4.694 presenze);
6. Tribunale/Uffici Giudiziari (4.124 presenze).

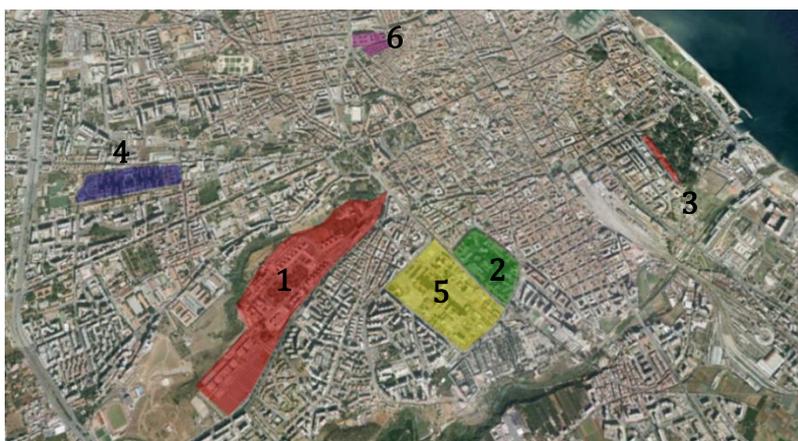


Figura 3.5 - Poli di maggiore attrazione

Come si può evincere dall'immagine in Figura 3.5, i poli di maggiore attrazione risultano tutti concentrati nella zona sud-est della città, in un'area non molto vasta, il che mette a dura prova quotidianamente la rete viaria a servizio degli stessi. Oltre a questo problema di tipo localizzato, che può essere risolto attraverso un'operazione di rafforzamento infrastrutturale e dell'offerta dei sistemi di trasporto collettivi mirato, si registra una forte presenza di importanti poli di attrazione distribuiti all'interno del centro urbano. Se dal punto di vista della pianificazione territoriale si potrebbe pensare a una riorganizzazione delle funzioni della città, come strategia di lungo periodo, nel medio-breve periodo si può agire sul miglioramento e sull'efficientamento dell'offerta di trasporto a servizio del centro urbano.

3.3 L'area di studio e la zonizzazione

A questo punto, passo fondamentale è la delimitazione dell'area di studio e la zonizzazione, che consentiranno di avviare le fasi successive e di analizzare più in dettaglio le dinamiche d'interesse.

Dopo un'attenta analisi territoriale, di cui nel paragrafo precedente è stata riportata una breve sintesi, si prosegue lo studio con un grado di dettaglio maggiore. In particolare, visto lo scopo di questo lavoro, l'analisi viene concentrata nel nucleo urbano di Palermo. Per far ciò, si è scelto di assumere come elementi base per la zonizzazione le *zone di traffico* individuate per il *PUT (Piano Urbano del Traffico)* del 2009, in modo da avere a disposizione dati e per facilitare i confronti con le previsioni del piano stesso.

Con queste premesse, nel territorio comunale vengono individuate 200 *zone di traffico*, che altro non sono che aggregazioni di particelle censuarie Istat. Prendendo in considerazione la matrice OD del PUT del 2009, relativa al modo di trasporto *auto*, di cui si parlerà più avanti, è stata elaborata una mappa in QGIS che mette in evidenza le zone di traffico con maggiore attrazione nell'ora di punta (Figura 3.6).

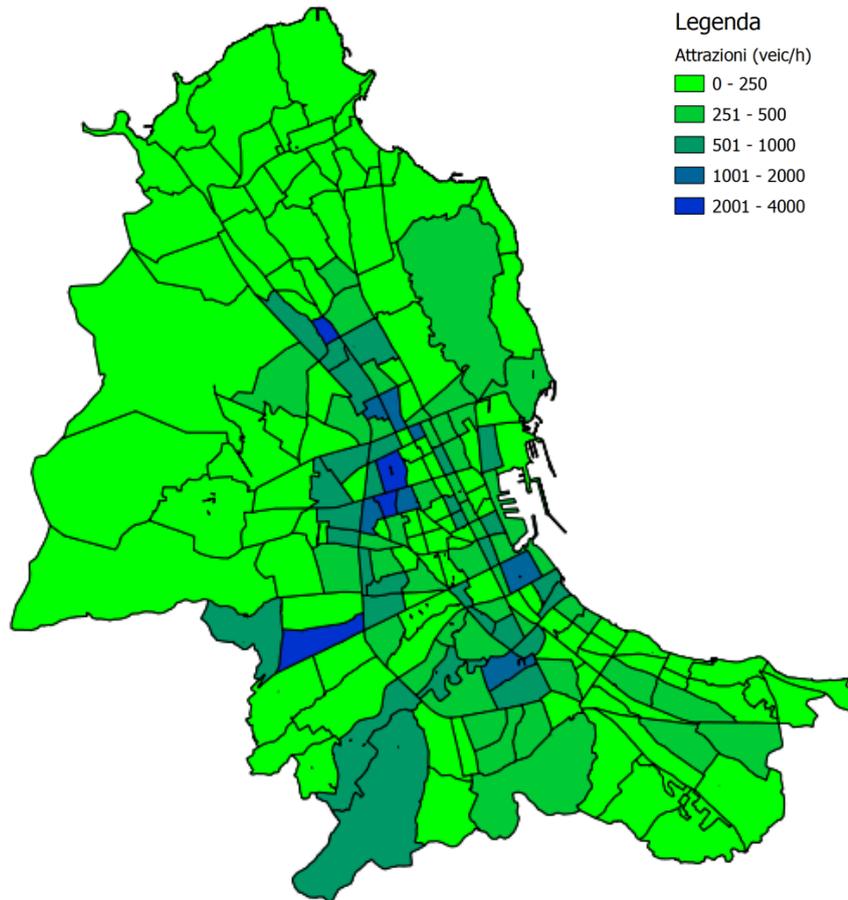


Figura 3.6 - Domanda attratta nell'ora di punta

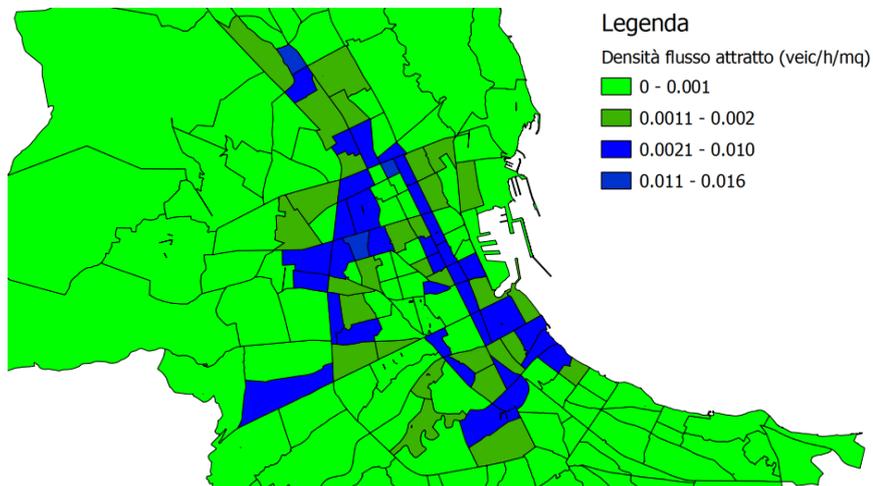


Figura 3.7 - Densità di flusso attratto nell'ora di punta

Inoltre, per ogni zona è stata calcolata la densità di *flusso attratto*, come rapporto tra il flusso attratto e la superficie della zona di traffico (Figura 3.7). Questo ha permesso di tener conto della dimensione delle zone, che dalla periferia al centro diventano sempre più piccole.

L'analisi così condotta ha facilitato l'individuazione dell'area di studio, in cui oltre al flusso attratto si è tenuto conto anche della rete viaria esistente, dei centri di aggregazione sociale, delle aree pedonali esistenti e in progetto e dell'interesse storico, artistico, architettonico, ambientale e turistico dei luoghi.

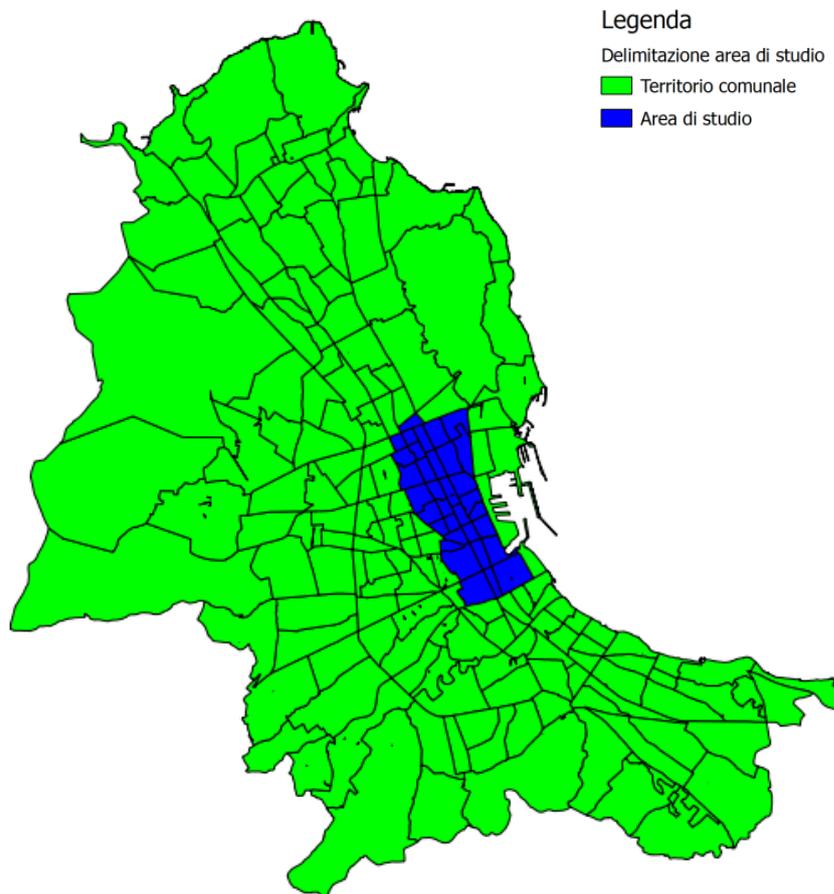


Figura 3.8 - Delimitazione area di studio

L'area di studio individuata è quella che si vorrà assoggettare alla nuova modalità di limitazione e controllo degli accessi attraverso l'adozione di un

opportuno schema *parking pricing*. Quest'area oltre a inglobare quelle che il PUT 2009 chiama *ZTL1* e *ZTL2*, mantenendo lo stesso perimetro, si spinge nella zona nord-ovest della città fino a Piazza Vittorio Veneto.

L'area individuata è delimitata da un doppio anello viario che consente di accedere all'area stessa in diversi punti e garantisce il regolare deflusso veicolare di attraversamento in entrambe le direzioni di marcia.

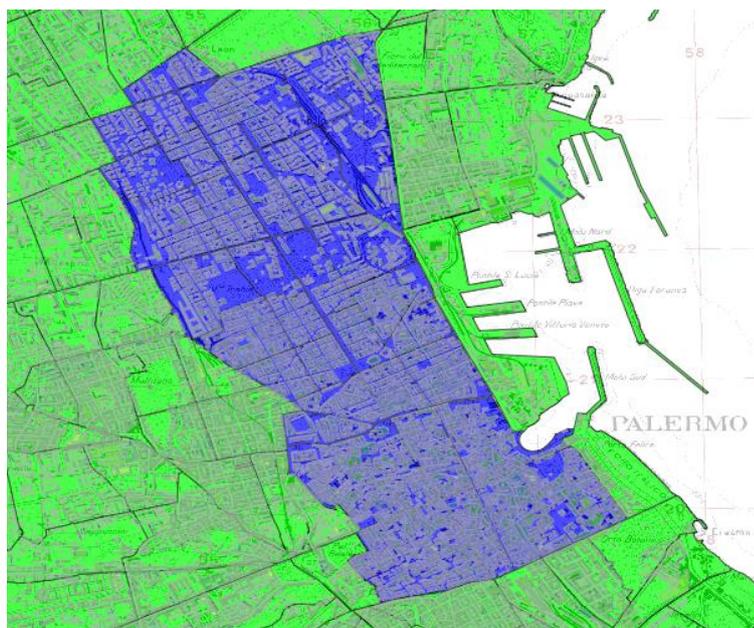


Figura 3.9 - Dettaglio area di studio

3.4 L'offerta di trasporto

Individuata l'area di studio, è necessario passare all'analisi dell'offerta di trasporto, con particolare riguardo a tutti i sistemi e servizi presenti nell'area in esame o che hanno relazioni con essa.

Oltre alla rete viaria principale, verrà analizzato il sistema dei parcheggi, per quanto riguarda il sistema di trasporto privato, per poi passare all'analisi dei servizi di trasporto collettivo esistenti.

3.4.1 La rete viaria

La rete viaria del centro urbano di Palermo è composta essenzialmente da una *viabilità principale*, con assi ortogonali tra di loro che collegano la città in direzione nord-sud ed est-ovest, e da una *viabilità secondaria*. Di quest'ultima fanno parte le *strade urbane locali*, avente la funzione di accessibilità locale negli ambiti interni alla maglia viaria principale, molto spesso di dimensioni tali da consentire la sola sosta su un lato e un senso unico di marcia.

Gli assi principali sono strade di *quartiere* o *interquartiere* con funzione di *distribuzione* e *penetrazione*, molto spesso con limitazioni sulla sosta e a unico senso di marcia. Quest'ultimi sono stati individuati all'interno della rete palermitana e i più importanti, ricadenti nell'area di studio, sono stati riportati nella tabella sottostante, classificandoli in funzione della direzione del collegamento che attuano.

Tabella 3.1 - Viabilità principale

<i>Collegamento nord-sud</i>	<i>Collegamento est-ovest</i>
via Roma	corso Tukory
via Maqueda	via Vittorio Emanuele
via Ruggero Settimo	via Cavour
via Libertà	via Mariano Stabile
via Francesco Crispi	via Emerico Amari
via Isidoro Carini	via Dante Alighieri
via Marchese di Villabianca	via Emanuele Notarbartolo
via Sampolo	via Duca della Verdura
via Giuseppe Sciuti	viale Lazio

La rete viaria principale insieme al sistema dei parcheggi, che verrà illustrato nel sottoparagrafo successivo, saranno oggetto della modellazione dell'offerta di trasporto privato, che si tradurrà nel *grafo stradale*.

3.4.2 Il sistema dei parcheggi

A causa del forte flusso pendolare quotidianamente in ingresso in città e allo sbilanciamento modale che privilegia il mezzo privato, si registra un'elevata domanda di sosta, che la struttura urbanistica non è certamente in grado di soddisfare con la sola occupazione degli spazi disponibili sulla sede stradale. Allo stato attuale, all'interno dell'area urbana di Palermo si possono contare 24 parcheggi per un totale di circa 7.200 posti auto.

Tabella 3.2 - Parcheggi esistenti

<i>N.</i>	<i>Parcheggio</i>	<i>Posti auto</i>	<i>Classifica</i>	<i>Tipologia</i>
1	Mondello - Mongibello/Pindaro	225	operativo	a raso
2	Sferracavallo - via Schillaci	154	interscambio	a raso
3	Mondello - via Saline	65	sostitutivo	a raso
4	Mondello - via Galatea	291	operativo	a raso
5	Via Fattori	147	operativo	a raso
6	Viale Francia	864	interscambio	a raso
7	Via Belgio	329	operativo	a raso
8	Piazzale De Gasperi Nord	52	sostitutivo	a raso
9	Piazzale De Gasperi Sud	57	sostitutivo	a raso
10	Piazzale Giotto	1655	interscambio	a raso
11	Stazione Notarbartolo - Via Di Maria	138	interscambio	a raso
12	Piazza Unità d'Italia	44	sostitutivo	a raso
13	Via Rutelli Ovest	60	sostitutivo	a raso
14	Piazzale Ungheria	173	sostitutivo	a raso
15	Via degli Emiri	690	interscambio	a raso
16	Via Serradifalco	84	operativo	a raso
17	Via Zisa	30	operativo	a raso
18	Piazza Vittorio Emanuele Orlando	700	sostitutivo	sotterraneo
19	Via Spinuzza	110	sostitutivo	a raso
20	Via Libero Grassi	205	operativo	a raso
21	Via Paulsen	118	operativo	a raso
22	Università - Via E. Basile	928	interscambio	a raso
23	Via dell'Antilope	49	operativo	a raso
24	Via dell'Antilope - Baglio Bonta	38	operativo	a raso

Riguardo alla classificazione dei parcheggi, in accordo con il vigente Piano Urbano Parcheggi della città di Palermo, è possibile inquadrare tipologicamente, dal punto di vista funzionale, tutti i parcheggi in tre grandi categorie:

- *parcheggi di interscambio* (o scambiatori), aventi la funzione di trasferire il traffico di penetrazione diretto verso le centralità urbane su linee di forza del sistema di trasporto pubblico;
- *parcheggi sostitutivi*, finalizzati a soddisfare la domanda di parcheggio che deriva dai provvedimenti di allontanamento della sosta dalla viabilità principale urbana, finalizzati a favorire la fluidità del traffico veicolare e in particolar modo dei mezzi del trasporto collettivo;
- *parcheggi operativi* (ossia di relazione), a sostegno della domanda di sosta generata da poli di attrazione, quali le attrezzature e i servizi pubblici.

Anche in questo caso i parcheggi sono stati mappati per meglio determinare le relazioni tra questi e i sistemi di trasporto.

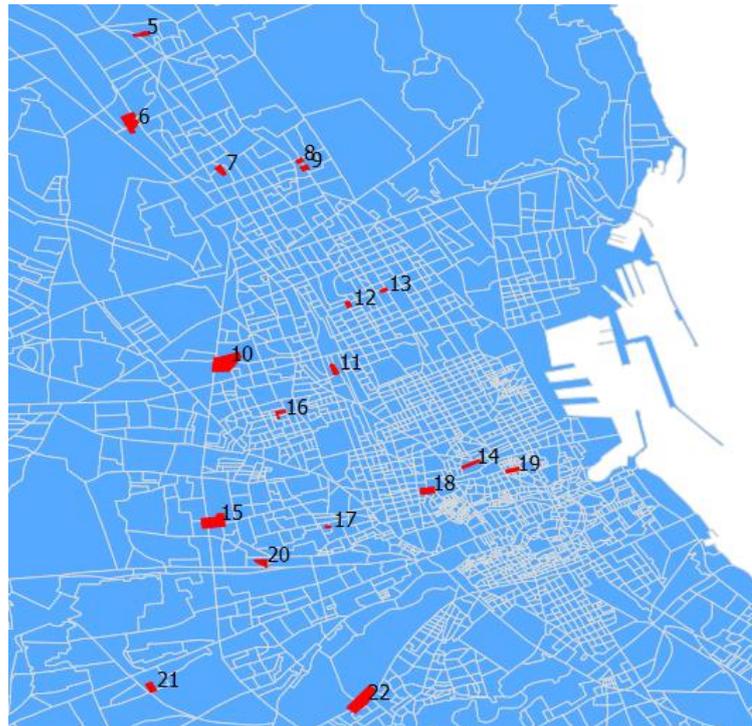


Figura 3.10 - Parcheggi della zona centrale della città

Gli ultimi parcheggi realizzati, quello di *Piazza Vittorio Emanuele Orlando* (Tribunale) e di *via degli Emiri*, rivestono un ruolo strategico nel sistema della sosta in quanto:

- quello di *Piazza Vittorio Emanuele Orlando* (n.18) è un'infrastruttura multipiano sotterranea, localizzata al margine del centro storico che, con la sua ampia disponibilità di stalli contribuisce a dare risposta alla domanda di sosta generata dalla zona centrale della città;
- quello denominato *via degli Emiri* (n.15) è ubicato al margine della circonvallazione ed entra, quindi, a far parte del sistema dei parcheggi a corona della città densa, che opportunamente attrezzati con specifici nodi del trasporto pubblico, sono chiamati a svolgere il fondamentale ruolo di parcheggi d'interscambio modale.

Nella zona centrale della città sono presenti diversi parcheggi con funzioni e dimensioni differenti che, pur essendo posizionati in punti strategici, non assolvono a pieno la loro funzione, o perché sottodimensionati o perché non integrati in modo efficace con i sistemi di trasporto pubblico esistenti. Per citare un caso tra tutti, il parcheggio di *via E. Basile* (n.22), posto a poca distanza da viale Regione Siciliana e dalla cittadella universitaria di viale delle Scienze, risulta quasi inutilizzato a causa della scarsa integrazione con servizi di trasporto a frequenza elevata verso i poli di maggiore attrazione della città.

Per quanto concerne le dimensioni, i parcheggi con una più grande disponibilità di stalli per le auto sono i parcheggi d'interscambio, posti alle porte d'ingresso della città nelle vicinanze di viale Regione Siciliana, come può notarsi dalla Figura 3.11. Oltre al parcheggio *Basile*, prima citato, anche quelli di *via degli Emiri*, *Piazzale Giotto* e *viale Francia* sono sottoutilizzati per gli stessi motivi detti prima.

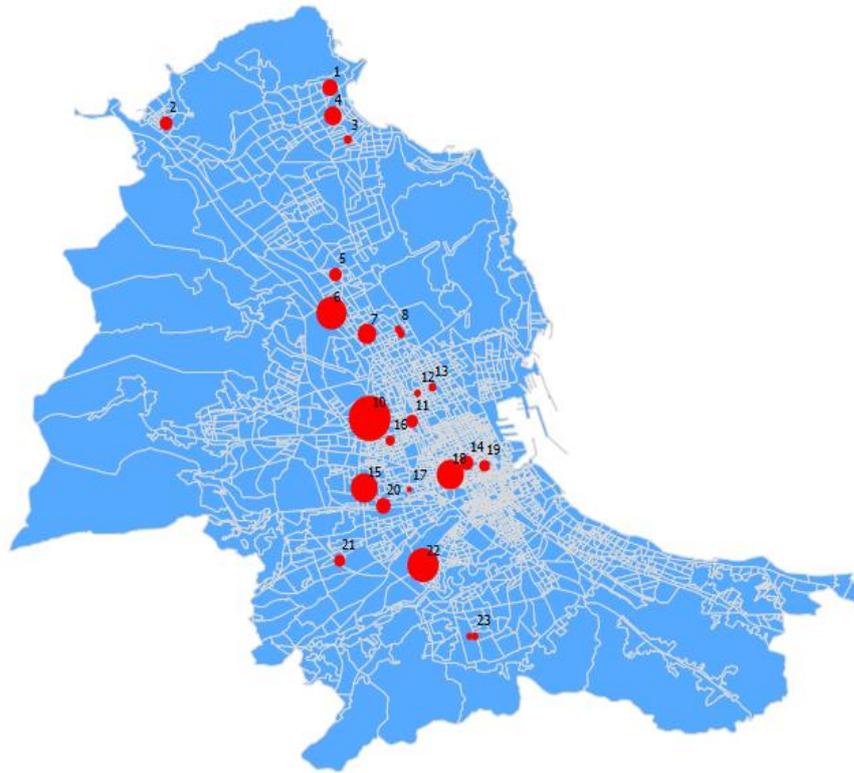


Figura 3.11 - Dimensione parcheggi esistenti

Visto tutto ciò, prima di pensare alla progettazione e alla realizzazione di nuovi parcheggi, bisogna riorganizzare quelli esistenti affidando loro una funzione ben specifica. Inoltre, considerando che difficilmente si riuscirà ad avere un'offerta di stalli tale da soddisfare la domanda di sosta, occorre ricorrere a politiche di controllo delle modalità di soddisfacimento della domanda di mobilità, ove un ruolo fondamentale deve essere attribuito:

- alla funzionalizzazione di parcheggi d'interscambio ai margini del centro abitato più denso;
- all'attuazione di politiche di tariffazione della sosta, onde concretizzare una reale riduzione della domanda di mobilità motorizzata individuale.

Oltre alla capacità parcheggi è stata valutata l'offerta di sosta su strada. Per far questo si è proceduto con una ricognizione degli stalli presenti

all'interno della rete viaria ricadente all'interno dell'area di studio, i cui valori sono riportati nella Tabella 3.3.

Tabella 3.3 - Stalli su strada nell'area di studio

<i>Zona</i>	<i>N° stalli</i>	<i>Residenti</i>	<i>Auto residenti</i>	<i>Sosta diurna residenti</i>	<i>Stalli liberi</i>
1	530	2234	670	402	128
2	360	2949	885	531	0
3	1300	4939	1482	889	411
4	430	1437	431	259	171
5	1200	6194	1858	1115	85
6	1050	4887	1466	880	170
7	590	1374	412	247	343
8	620	1137	341	205	415
9	720	918	275	165	555
10	985	4123	1237	742	243
21	730	2204	661	397	333
22	660	1288	386	232	428
23	700	1682	505	303	397
24	730	2231	669	402	328
38	1250	5570	1671	1003	247
39	790	1688	506	304	486
40	530	1342	403	242	288
41	1050	4539	1362	817	233
55	860	3195	959	575	285
56	390	870	261	157	233
57	690	1960	588	353	337
77	415	4721	1416	850	0
78	259	3194	958	575	0
79	256	3164	949	570	0
80	473	6391	1917	1150	0
81	516	1058	317	190	326
108	259	2101	630	378	0
109	158	2295	689	413	0
110	243	3088	926	556	0
111	402	6171	1851	1111	0
112	472	3478	1043	626	0
131	166	1630	489	293	0
132	152	744	223	152	0
133	246	3923	1177	706	0

Attraverso rilevamenti a campione, all'interno dell'area di studio, si è stimato un coefficiente medio di possesso dell'auto pari a 0,3, ottenuto come rapporto tra il numero di auto in sosta durante le ore notturne e la popolazione residente. Questo ha consentito di calcolare, per ogni *zona di traffico*, il numero di automobili possedute dai residenti. A questo punto basta fare un bilancio tra il numero di auto e stalli disponibili per far emergere che in molte zone il numero di veicoli e di gran lunga superiore all'offerta di sosta. In questo caso si intuisce che c'è la presenza di un certo numero di autorimesse e box privati, che permettono di soddisfare la domanda di sosta o almeno di ricovero notturno. Si è passati, quindi, a calcolare la domanda di sosta diurna dei residenti per ogni zona, che si è stimata mediamente pari al 60% delle auto possedute dai residenti (dato che proviene da osservazioni a campione nelle zone durante l'ora di punta mattutina). In questo modo è possibile calcolare l'offerta di stalli disponibili per ogni zona, la cui sintesi è riportata nella seguente Tabella 3.3. In via cautelativa, nelle zone dove la domanda di sosta diurna dei residente è superiore al numero di stalli, si è considerata un'offerta di stalli nulla, anche se in realtà parte dei residenti potrebbero possedere posti auto in box o autorimesse e, quindi, una percentuale di stalli su strada verrebbe comunque liberata.

Nell'area in esame, su 20.182 stalli presenti soltanto 6.462 sono disponibili ad accogliere i veicoli che provengono dall'esterno. Quest'ultimi vengono stimati, secondo la matrice OD_{auto} del PUT 2009 in 13.136, quindi, più del doppio rispetto alla disponibilità di stalli liberi su strada. All'offerta vanno però sommati gli stalli presenti nelle aree di sosta all'interno delle singole zone, che sono altri 1.225, come può evincersi dalla Tabella 3.4.

Tabella 3.4 - Aree di sosta interne all'area di studio

<i>Area di sosta</i>	<i>N° stalli</i>	<i>Zone servite</i>
Stazione Notarbartolo - Via Di Maria	138	55
Piazza Unità d'Italia	44	109
Via Rutelli Ovest	60	79
Piazzale Ungheria	173	8
Piazza Vittorio Emanuele Orlando	700	6-7
Via Spinuzza	110	1

Anche gli stalli della aree di sosta non sono sufficienti a soddisfare la domanda di parcheggio, per questo motivo si è deciso di sfruttare meglio i parcheggi di interscambio che si trovano a margine dell'area di studio. Per aumentare l'attrattività di questi parcheggi, oggi in totale disuso, si ipotizza di collegarli, con le zone di traffico interne all'area di studio, attraverso degli *shuttle bus* dedicati.

Tabella 3.5 - Parcheggi d'interscambio collegati all'area di studio

<i>Area di sosta</i>	<i>N° stalli</i>	<i>Zone servite</i>
Piazzale Giotto	1655	77-78-79-80-81-108-109-110-111-112-113-133-131-132-55-56-40-57
Via degli Emiri	690	7-8-9-10-21-22-23-24
Università - Via E. Basile	928	3-4-5-6-1-2
Porto	150	55-56-57-40-38-39-41
Via Belgio	329	131-108-109-110-132-133

I parcheggi d'interscambio individuati hanno una disponibilità di stalli pari a 3.752 che sommati a quelli ricadenti all'interno dell'area di studio danno un totale di 11.439. Confrontando questo dato con gli utenti che nell'ora di punta vogliono raggiungere e parcheggiare nell'area di studio, ci si accorge che ancora una volta l'offerta di sosta non riesce a soddisfare la domanda. Quindi, nel breve periodo, è necessario agire in modo da riuscire a spostare un'aliquota di domanda verso altre modalità di trasporto. Quest'argomento verrà trattato approfonditamente più avanti ed è uno dei criteri su cui è imperniato il metodo proposto.

3.4.3 Il grafo stradale

Dopo aver esaminato l'offerta di trasporto privato e aver delimitato il perimetro entro il quale si desidera limitare gli accessi, si passa alla modellazione della rete attraverso la costruzione del *grafo*. Contestualmente a questa fase, all'interno e a cordone dell'area delimitata, è stato ridisegnato il

piano viario in modo da individuare le *stanze di circolazione*, e cioè le aree all'interno delle quali la circolazione è a *stanze* ed è tale da non consentire il passaggio da una stanza all'altra. Ciò, come già anticipato, rende più veloce la ricerca del parcheggio e al contempo elimina il traffico di attraversamento. Nell'individuazione delle *stanze* si è cercato di tener conto delle zone di traffico, compatibilmente con il sistema viario esistente.



Figura 3.12 - Grafo della città di Palermo

Per ogni arco della rete, corrispondente a un *record* del database *Gis*, è stato indicato il nodo origine, il nodo destinazione, la lunghezza dell'arco, la velocità a vuoto V_0 , la capacità e la tipologia di arco (di rete, connettore, parcheggio, TPL) a ognuno dei quali corrisponde una diversa funzione di costo. La numerazione dei nodi è avvenuta partendo dai *nodi centroidi* e a seguire tutti gli altri. In particolare, per la rete di Palermo sono stati individuati 200 *centroidi* interni al territorio comunale, coincidenti con le zone di traffico, e

13 *centroidi* esterni, che rappresentano le località che si trovano al di fuori dell'area comunale e con le quali si hanno interazioni di mobilità.

Approfondito lo studio del piano viario attuale, si è proceduto con la variazione dei sensi di circolazione, all'interno e a cordone dell'area delimitata, con lo scopo di rispettare i due obiettivi visti in precedenza. A cordone si è realizzato un doppio anello di circolazione che consente il flusso veicolare in entrambe le direzioni. All'interno dell'area, invece, a ogni asse è stato assegnato un solo verso di marcia, tale da creare con gli assi intersecati una cosiddetta *circolazione a stanze*, eliminando i punti di conflitto e annullando le intersezioni semaforizzate. Nella Figura 3.13 vengono indicati i sensi di circolazione per ogni asse interno all'area, che per semplicità sono stati indicati con i punti cardinali.

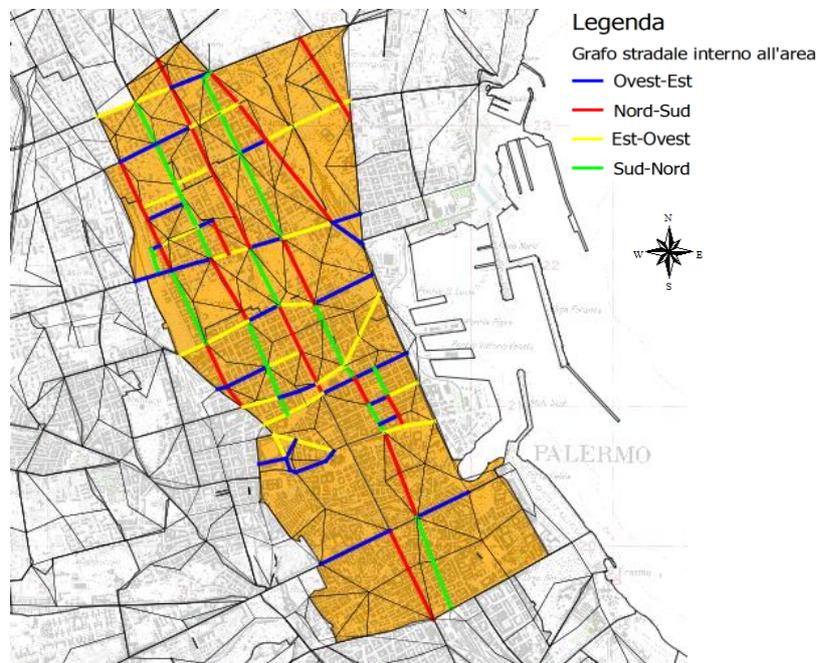


Figura 3.13 - Grafo nell'area di studio con circolazione a stanze

Da notare che gli assi di via Ruggero Settimo, via Maqueda, via Cavour e Piazza Giuseppe Verdi, vengono inibiti al traffico privato, creando una grande area ciclo-pedonale che disconnette la città nella quattro direzioni (Figura 3.14). Inoltre, si viene a creare un *centro commerciale naturale* che resti-

tuirebbe al centro storico palermitano la sua funzione di polo turistico, artistico, culturale e commerciale non più soffocato dallo smog e dal traffico.

Questa passeggiata, lunga più di un chilometro, consentirebbe un maggiore sviluppo delle attività commerciali e ricettive presenti o che nasceranno lungo l'asse, che oggi soffrono dell'apertura dei grandi centri commerciali fuori città, preferiti per la facilità di accesso e di parcheggio. Con l'assenza del traffico veicolare anche la fruizione turistica del centro storico avrà i suoi benefici, sviluppando sistemi di visita con mezzi ecologici e alternativi (bici, *segway*, veicoli elettrici, ecc.).



Figura 3.14 - Area pedonale nel centro storico

Dato che il grafo deve essere importato nel software di assegnazione AxE, il quale non riconosce in automatico la tipologia di arco, è necessaria una maggior cura nella fase modellazione. Inoltre, per ogni tipo di arco deve essere associata una funzione di costo. In questo lavoro si è assegnata la funzione di costo *BPR* (*Bureau of Public Roads*) agli archi di rete e la *PLN* (*polinomiale*) a tutti gli altri, anche se in quest'ultimo caso per ogni tipo di arco il costo associato assume un significato diverso per le varie tipologie.

Per quanto riguarda il sistema della sosta, sia gli stalli su strada sia i parcheggi, sono stati modellati attraverso un arco, con costo costante e pari alla tariffa oraria associata, collegato da un lato con un arco reale della rete stradale, attraverso un *arco di accesso al parcheggio*, e dall'altro con il *centroide* della zona in cui ricade l'area di sosta, con un arco *fittizio*¹.

Per i parcheggi scambiatori è stata adottata la stessa modellazione, soltanto che, avendo ipotizzato la presenza di *shuttle bus* che collegano il parcheggio con le destinazioni, l'arco parcheggio è collegato ai *centroidi* delle zone attraverso degli archi il cui costo è somma delle seguenti aliquote: tempo di attesa, di salita, di percorrenza, di discesa e tempo a piedi per raggiungere il centroide dalla fermata.

3.4.4 Il trasporto pubblico locale

Così come nelle altre città europee, anche a Palermo nell'ultimo ventennio si è registrato un lieve *split modale* a favore del trasporto pubblico, anche se la scelta preponderante rimane l'auto privata. Questa scelta è motivata anche dall'inadeguatezza dei servizi di trasporto collettivo. Per rendere conto di ciò, verranno analizzati sinteticamente i sistemi di trasporto pubblico locale su gomma e su ferro, in esercizio o in fase di realizzazione, definendo in modo più completo questa prima parte di analisi dell'offerta di trasporto della città.

Per quanto riguarda il sistema su ferro, nel 2002 è stato approvato il *Piano Integrato del Trasporto Pubblico di Massa a guida vincolata* della città di Palermo, che propone essenzialmente 4 interventi fondamentali:

- il *raddoppio del passante ferroviario* da Brancaccio all'aeroporto di Punta Raisi;

¹ AxE non riconosce il tipo di arco in automatico, quindi, quest'arco fittizio deve essere di costo molto elevato, per evitare l'attraversamento del nodo centroide da parte di flusso diretto verso altre zone, e assunto costante per tutti i collegamenti, in modo da sottrarlo facilmente nel calcolo dei tempi per ogni coppia OD.

- un *anello ferroviario sotterraneo*, in corrispondenza dell'area urbana con maggiore densità di servizi pubblici e commerciali;
- tre linee di *tram*, per collegare le periferie con il centro;
- una linea di *metropolitana leggera automatica* che attraversa la città dallo svincolo di via Oreto a Tommaso Natale – Partanna Mondello.

Obiettivo del *Piano Integrato* è la creazione di un sistema di mobilità collettiva più capillare ed efficiente, con stazioni e nodi d'interscambio che rendano agevoli sia gli spostamenti nel centro urbano sia i collegamenti con le principali zone periferiche.

Unitamente alle linee di forza del trasporto su rotaia, sono stati individuati anche dei parcheggi in corrispondenza dei principali punti d'interscambio, con i quali s'intende contribuire a ridurre il traffico di veicoli privati in città, con benefici effetti sui livelli dell'inquinamento atmosferico.

Ad eccezione della *metropolitana leggera automatica*, che dovrebbe essere finanziata dalla Regione Sicilia con fondi del *Comitato Interministeriale per la Programmazione Economica (Cipe)*, e i cui tempi di cantierizzazione sono ancora incerti, allo stato attuale le altre tre opere presentano diversi cantieri all'interno della città, con interferenze in parte rilevanti sul sistema della viabilità urbana. Per tale ragione, poiché questo studio vuole dare una soluzione da realizzarsi nel breve-medio periodo, non si è tenuto conto di questi sistemi ancora non operativi. L'unico sistema di trasporto pubblico su cui la città di Palermo a oggi può contare è quello su gomma, gestito dall'azienda a capitale pubblico *AMAT (Azienda Municipalizzata Auto Trasporti)*.

Oltre al servizio urbano nella città, l'Azienda collega alcuni comuni contigui dell'area metropolitana come: Isola delle Femmine, Villabate e Monreale. La flotta degli autobus può contare su diverse tipologie di mezzi, differenziati sia per dimensioni sia per tipologia di alimentazione. A tal proposito, AMAT nel tempo ha acquistato mezzi a sempre più basso impatto ambientale, quali bus alimentati a metano e i cosiddetti ibridi (alimentazione elettrica/gasolio). Il servizio è prevalentemente in sede promiscua, solo in alcuni

tratti sono presenti delle corsie riservate. L'estensione della rete urbana è di 332 Km, se si aggiungono le zone extraurbane si arriva a 340 Km, ed è articolata in 90 linee. Le corsie preferenziali hanno un'estensione di 33,82 Km (il 10,2% della rete totale), la percorrenza chilometrica annua programmata è di 23 milioni di Km e il numero annuo di passeggeri trasportati è circa di 80 milioni. Le coincidenze tra le molteplici linee sono favorite dalla possibilità di interscambiare in 7 diversi nodi della rete:

1. Stazione Centrale;
2. Parcheggio Basile (ex Indipendenza);
3. Emiri;
4. Giotto/Lennon;
5. De Gasperi/Stadio;
6. Politeama/Croci;
7. Sturzo.

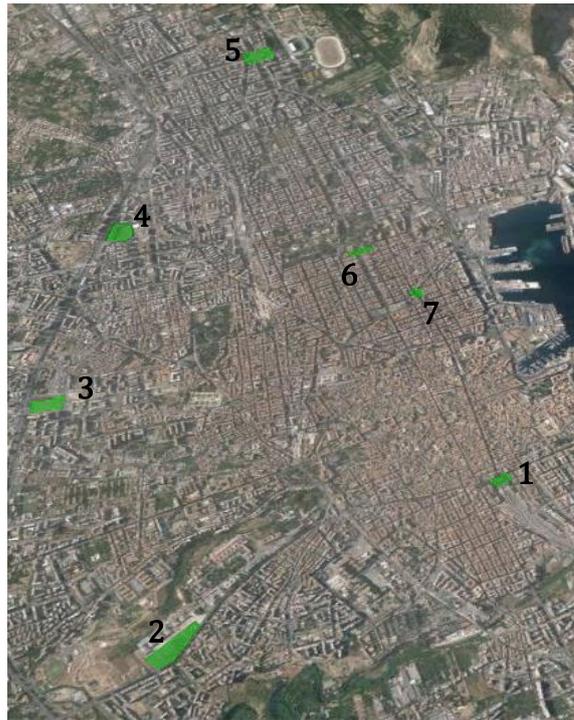


Figura 3.15 - Punti d'interscambio TPL

La frequenza e la velocità commerciale variano linea per linea. La frequenza media registrata è di circa 25 minuti con una velocità commerciale media di 16,60 Km/h (AMAT, 2013), valori questi che non permettono al trasporto pubblico di essere competitivo con il trasporto privato. È, quindi, prioritaria una profonda ristrutturazione delle linee, che consenta una maggiore integrazione tra i sistemi su ferro prima descritti, una razionalizzazione delle percorrenze e l'incremento di tratte in corsia riservata.

In questo lavoro non si è proceduto a costruire il grafo del TPL a causa della mancanza dei dati necessari. Questa fase, infatti, necessita della conoscenza dei parametri d'esercizio e dei percorsi di tutte le linee esistenti, che a causa di una fase di riorganizzazione del servizio e di informatizzazione non sono stati resi disponibili da parte di AMAT. Per evitare di lavorare su una rete incompleta con un grande grado di approssimazione, si è scelto di adottare un metodo semplificato che può condurre a risultati non troppo distanti dai valori restituiti dalla fase di assegnazione.

Per tenere conto dell'elasticità della domanda nella fase di ripartizione modale si è utilizzata la matrice dei tempi relativa al TPL, ricavata dalle elaborazioni per il PUT 2009. Gli interventi di rafforzamento del TPL su alcune linee di forza nei vari scenari sono stati realizzati agendo sul tempo di collegamento, come si vedrà più avanti.

3.5 La matrice OD

Una volta terminata la fase di modellazione dell'offerta si passa alla determinazione della domanda con la costruzione della matrice OD.

In questo studio, i dati utilizzati per le analisi e le simulazioni dei flussi di traffico, relativi agli spostamenti casa-lavoro nell'ora di punta 7,30-8,30, derivano dalla matrice OD utilizzata per il PUT 2009. Questa a sua volta provengono dalla matrice OD del PUT 1997. Infatti, nella redazione di questo piano fu sviluppata un'estesa campagna di indagini (su strada, presso gli au-

tomobilisti in transito e sugli utenti del trasporto collettivo extraurbano, ecc.), finalizzata a definire nei suoi elementi qualitativi e quantitativi, attraverso i conteggi di flusso veicolare, il sistema della domanda di mobilità.

Le indagini fornirono i dati di base per l'analisi qualitativa dei fenomeni, nonché per la stima delle matrici OD degli spostamenti sui modi di trasporto *auto privata* e *mezzo pubblico collettivo*, nelle fasce orarie di punta 8,00-9,00 e 17,00-18,00 della giornata feriale tipo. La stima della matrice OD degli spostamenti interni fu ottenuta combinando le informazioni desunte dalle interviste a domicilio con quelle ricavate dall'indagine al cordone interno (a ridosso della circonvallazione) e tramite i conteggi di traffico. Successivamente tale matrice è stata aggiornata per la redazione del PUT 2009 attraverso una nuova campagna di rilevamenti. I rilievi di traffico sono stati effettuati in punti di importanza strategica; in particolare, è stata monitorata l'intera circonvallazione di viale Regione Siciliana rilevando sia i flussi di attraversamento longitudinale che trasversale. All'interno della città, invece, sono stati rilevati i flussi in ben 103 sezioni. Quindi, la matrice OD relativa agli spostamenti degli autoveicoli è stata calibrata con i flussi rilevati in occasione di questa nuova campagna. A questa si è aggiunto il flusso dei motoveicoli, ricavando così la matrice in veicoli equivalenti. Si è infine tenuto conto del traffico di veicoli pesanti, indicando il flusso aggiuntivo associato ad ogni singolo arco, anch'esso stimato sulla base della campagna di rilevamenti effettuata sui mezzi pesanti, e in particolare si è calcolato un valore di veicoli equivalenti pari a 2 autoveicoli per mezzo pesante in ambito urbano e 2,5 autoveicoli per mezzo pesante lungo la circonvallazione. Si è quindi calcolata una percentuale di ripartizione pari al 6% del flusso degli autoveicoli sulla rete urbana, al 12% sul tratto di circonvallazione centrale e pari al 30% nei tratti di circonvallazione esterni.

Dall'analisi di questi dati emerge un quadro macroscopico della mobilità nella città di Palermo. In particolare, ogni giorno il sistema urbano di Palermo è interessato da un flusso di autovetture pari a 898.352, di cui 69.104 nell'ora di punta. Di quest'ultimi, 56.910 effettuano spostamenti interni alla

città e rappresentano, dunque, la mobilità interna dei residenti; i restanti 12.194 sono relativi agli spostamenti di scambio e di attraversamento del centro urbano.

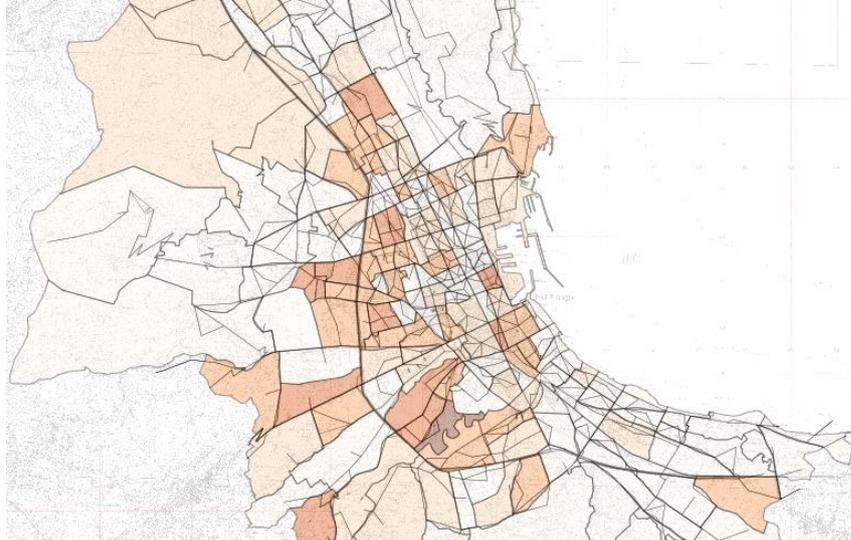


Figura 3.16 - Flusso di auto in uscita dalle zone nell'ora di punta

Per quanto concerne il trasporto pubblico urbano su gomma, questo è interessato da un volume di domanda pari a circa 19.230 durante l'ora di punta mattutina nell'ambito degli spostamenti interni al territorio comunale.

Infine, si è stimato che il numero medio di passeggeri a bordo delle auto, il cosiddetto *coefficiente di occupazione*, è pari a 1,3. Quindi, dalla matrice OD_{auto} (veic/h) e dalla matrice OD_{bus} (pass/h) nell'ora di punta, relative al PUT 2009, si può calcolare la domanda totale (pass/h) che è pari a:

$$d_{od,tot} = 1,3 \cdot d_{od,car} + d_{od,bus} \quad (3.1)$$

A questo punto si hanno le tre matrici OD che consentono di descrivere la domanda di mobilità nell'area palermitana e, quindi, si può passare alla fase di progettazione.

3.6 Lo scenario progettuale

Quello che si vuole studiare in questa fase è la risposta della domanda di mobilità, sull'intera area palermitana, alla variazione della tariffa oraria di parcheggio nell'area di studio. All'interno di quest'area, allo stato attuale, il sistema della sosta è regolato dalle zone blu, con tariffa variabile da zona in zona con una media di 1 euro. Inoltre, non sono presenti limitazione di accesso ai veicoli privati, né di tipo spaziali né temporali, e il sistema di trasporto pubblico locale su gomma ha le caratteristiche di esercizio descritte in precedenza. La distribuzione modale degli spostamenti è nettamente a favore del mezzo privato con una percentuale dell'82% rispetto al 18% del mezzo pubblico.

Questo appena descritto è lo scenario di riferimento i cui flussi sulla rete, o meglio il grado di saturazione della stessa, sono riportati nella Figura 3.17. A partire da questa situazione iniziale si avvierà l'*euristica*, che segue lo schema descritto dal diagramma di flusso riportato nel secondo capitolo. Dallo schema si evince che la variazione, a ogni iterazione, del costo del parcheggio *CP* implica la rideterminazione di una serie di parametri attraverso la fase di assegnazione e conseguentemente della ripartizione modale.

Le varie iterazioni sono state effettuate facendo variare (aumentando o diminuendo) di 0,25 €, 0,50 € o 1 € la tariffa di ogni singola area di sosta, sia su strada sia nei parcheggi, in funzione del carico. Relativamente alla sosta su strada, ogni *zona di traffico* è stata trattata in modo indipendente, in modo da avere un risultato finale più preciso e in modo da effettuare un accorpamento più omogeneo, in un numero limitato di *zone tariffarie*, nella configurazione finale.

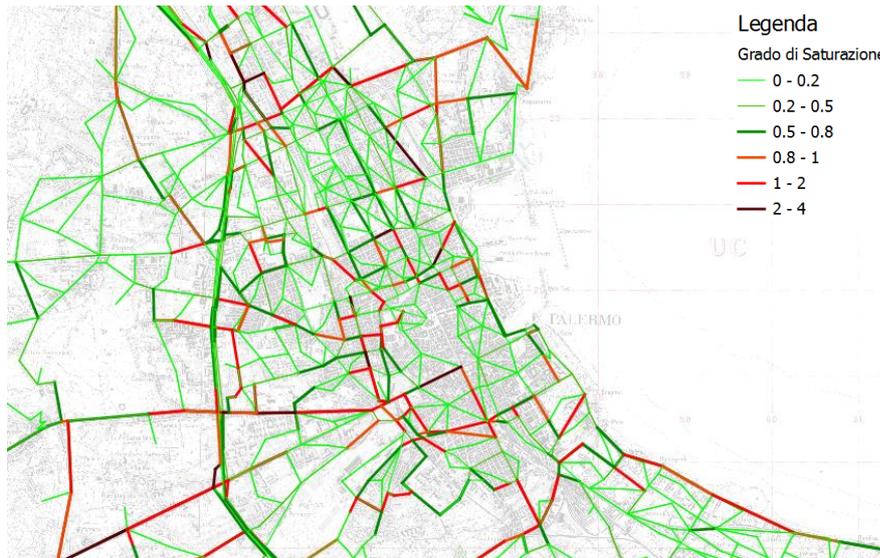


Figura 3.17 - Grado di saturazione sulla rete nello scenario progettuale di riferimento

3.7 L'euristica

L'*euristica* è stata avviata con l'introduzione della prima variazione di tariffa e nello specifico, non conoscendo la risposta della domanda a questa variazione, si è aumentato di 1 € il costo della sosta in quasi tutte le zone. A questo punto è stato possibile procedere alla fase di assegnazione della domanda all'offerta di trasporto attraverso il software AxE.

Come già illustrato, per il data *entry* di AxE è possibile usare un qualsiasi foglio di calcolo. La formattazione non ha nessuna rilevanza, ma per la lettura dei dati da parte dell'applicativo è necessario seguire alcune regole di posizionamento dei dati all'interno del foglio, illustrate nel capitolo precedente.

Per questo studio si è utilizzato un algoritmo all'equilibrio deterministico *DUE*, che in AxE è stato siglato con *FW* ed è caratterizzato da due valori che indicano rispettivamente la precisione che si vuole raggiungere (0,1) e il numero di iterazioni massime (10). In questo caso, se l'algoritmo non raggiunge la precisione fissata si arresta comunque alla decima iterazione.

Relativamente al grafo, esso è descritto dai vari archi della rete, per ognuno dei quali è riportato il nodo origine, destinazione e il tipo di funzione di costo associata con i relativi parametri. Nel caso di funzione *BPR* viene riportato sia il tempo di percorrenza dell'arco a flusso nullo t_0 sia la capacità dell'arco stesso, invece, nel caso di funzione *PLN* viene riportato soltanto il tempo di percorrenza a flusso nullo t_0 o un valore di costo fisso che si vuole associare all'arco.

In questa applicazione si è scelto di utilizzare un'impostazione della matrice OD in lista *>ODL*, e cioè per ogni riga viene riportato il nodo origine, destinazione e il valore della domanda di mobilità.

Facendo riferimento alla Figura 3.18, si può notare che non è stato inserito nessun flusso precaricato (colonna G) e che nella colonna adiacente (colonna H) sono presenti valori nulli, poiché tale colonna conterrà i flussi a seguito dell'assegnazione.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	AxE: Algoritmo FW (equilibrio deterministico)											
2	Adattamento da Sheffi, "Urban...", fig. 5.1, p. 114 e tab. 5.4 p. 120											
3	>ALGORITMO											
4	FW	0,100	10									
5	>GRAFO											
6							>F			>ODL		
788	319	330	BPR	0,690	3937,000	0	0	0	26	49	1	
789	319	1728	PLN	0,414		0	0	0	26	50	1	
790	319	1729	PLN	0,414		0	0	0	26	51	1	
791	320	319	BPR	0,309	4200,000	0	0	0	26	52	1	
792	320	321	BPR	0,360	735,000	0	0	0	26	71	1	
793	321	320	BPR	0,240	735,000	0	0	0	26	80	1	
794	321	1285	BPR	0,240	1312,000	0	0	0	26	86	2,962	
795	321	1552	PLN	0,400		0	0	0	26	104	1	
796	321	1728	PLN	0,240		0	0	0	26	112	1	
797	322	321	BPR	0,600	1750,000	0	0	0	26	117	41,802	
798	322	368	BPR	0,409	1181,000	0	0	0	26	119	14,419	
799	322	1728	PLN	0,462		0	0	0	26	120	13,019	
800	323	322	BPR	0,106	1838,000	0	0	0	26	125	1	
801	323	324	BPR	0,120	1400,000	0	0	0	26	129	1	
802	324	322	BPR	0,767	1180,000	0	0	0	26	139	33,579	
803	324	323	BPR	0,690	1050,000	0	0	0	26	146	1	

Figura 3.18 - Schermata per l'input dati di AxE

Impostato il foglio con i dati d'ingresso, si può passare facilmente alla fase di assegnazione selezionando la zona del foglio contenete tutti i dati da leggere e copiandoli negli appunti del sistema attraverso il comando *copia*. Quindi, si può lanciare l'applicativo, che in automatico effettuerà la lettura

dei dati presenti negli appunti ed eseguirà le iterazioni dell'algoritmo, fino a trovare una soluzione con la precisione impostata o una volta raggiunto il numero massimo di iterazioni fissate.

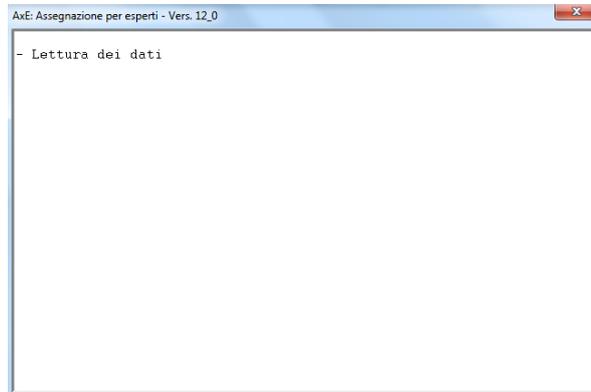


Figura 3.19 - Lettura dei dati da parte di AxE

Trovata la soluzione, il programma copia i dati di *output* negli appunti del sistema, e quindi basta, attraverso il comando *incolla*, inserirli in un nuovo foglio o sovrascriverli nel foglio di *input*, come mostra la Figura 3.20.

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	AxE: Algoritmo FW (equilibrio deterministico)											
2	Adattamento da Sheffi, "Urban...", fig. 5.1, p. 114 e tab. 5.4 p. 120											
3	>ALGORITMO											
4	FW	0,100	10									
5												
6	>GRAFO					>F		>ODL				
7		1	1792 PLN		1000,000	0	211,591	1	18	31,154		
8		2	1793 PLN		1000,000	0	478,586	1	22	92,146		
9		3	1794 PLN		1000,000	0	977,809	1	64	1		
10		4	1795 PLN		1000,000	0	1221,244	1	90	1		
11		5	1796 PLN		1000,000	0	335,598	1	91	1		
12		6	1797 PLN		1000,000	0	386,227	1	92	1		
13		7	1798 PLN		1000,000	0	104,14	1	107	46,35		
14		8	1799 PLN		1000,000	0	146,336	1	144	1		
15		9	1800 PLN		1000,000	0	65,613	1	145	1		
16		10	1801 PLN		1000,000	0	1427,346	1	149	1		
17		11	1545 PLN		1000,000	0	322,584	1	150	1		
18		12	1546 PLN		1000,000	0	100,878	1	159	1		
19		13	1547 PLN		1000,000	0	114,23	1	165	1		
20		14	1548 PLN		1000,000	0	571,529	1	166	1		
21		15	1549 PLN		1000,000	0	798,853	1	172	1		
22		16	1550 PLN		1000,000	0	110,983	1	195	1		

Figura 3.20 - Schermata dell'output dati di AxE

Come si può notare dalla Figura 3.20, rispetto alla schermata di *input* (Figura 3.18) l'unica cosa che cambia è la *colonna H*, che a seguito dell'assegnazione risulta riempita dai flussi su ogni arco.

AxE, inoltre, permette di salvare la matrice dei tempi e delle distanze dell'ultima iterazione e quindi per ogni coppia OD si ha la possibilità di conoscere il valore del tempo t_{car} e la distanza $dist$.

A questo punto si passa al calcolo delle utilità sistematiche V_m , per i diversi modi di trasporto, per la ripartizione modale. Il modello di scelta modale utilizzato è del tipo *Logit multinomiale*. Quindi, per ogni coppia OD si procede alla determinazione delle utilità sistematiche V_{car} e V_{bus} , associate rispettivamente al modo di trasporto auto e autobus, come combinazione lineare di k attributi:

$$V_{car} = \beta_{time} \cdot t_{car} + \beta_{parking} \cdot t_{parking} + \beta_{cost} \cdot C_{car} + \beta_{ASAcar} \cdot ASA_{car} \quad (3.2)$$

$$V_{bus} = \beta_{time} \cdot t_{bus} + \beta_{cost} \cdot C_{bus} + \beta_{ASAbus} \cdot ASA_{bus} + \beta_{HG-Worker} \cdot HG + \beta_{Discomfort} \cdot D \quad (3.3)$$

dove gli attributi hanno il seguente significato:

- t_{car} = tempi di percorrenza in auto ricavati dalla matrice dei tempi del processo di assegnazione;
- t_{bus} = tempi di percorrenza in autobus, comprensivo del tempo a piedi *T-Walk* e di attesa alla fermata *T-Wait*, ricavati dalla matrice dei tempi del TPL del PUT 2009;
- $t_{parking}$ = tempo medio di ricerca del parcheggio stimato pari a 10 minuti e uguale per tutte le zone;
- C_{car} = costo dello spostamento con l'auto contenente, oltre il costo del carburante, anche il costo di parcheggio;
- C_{bus} = costo del biglietto dell'autobus;
- ASA_{car} e ASA_{bus} = esprimono rispettivamente l'*attributo specifico di alternativa* dell'auto e dell'autobus;
- HG = attributo socio-economico, che tiene conto se il lavoratore ha un reddito medio-alto, e in questo caso vale 1, 0 negli altri casi;
- D = attributo psicometrico di percezione del disagio e del grado di pulizia che caratterizza i veicoli pubblici (affollati, non sempre dota-

ti di aria condizionata, sporchi), che assume valore 4,12 per gli utenti con reddito medio-alto e valore 3,85 per gli altri;

- β = coefficienti degli attributi delle utilità, che sono frutto di calibrazione.

Tabella 3.6 - Schema del modello di scelta modale

<i>Alt.</i> \ <i>Coeff.</i>	ASA_{bus}	ASA_{car}	β_{t-walk}	β_{t-wait}	β_{time}	$\beta_{parking}$	β_{cost}	$\beta_{HG-worker}$	$\beta_{discomfort}$
<i>Car</i>	0	1	$T-Walk$ (min.)	0	t_{car} (min.)	$t_{parking}$ (min.)	$Cost$ (€)	0	0
<i>Bus</i>	1	0	$T-Walk$ (min.)	$T-Wait$ (min.)	t_{bus} (min.)	0	$Cost$ (€)	0/1	1=5

Sulla base delle variabili riportate nella Tabella 3.6, in un lavoro precedente (Migliore *et al.*, 2013) è stato calibrato un modello *Logit multinomiale* che ha consentito di stimare tutti i coefficienti delle variabili e degli attributi specifici di alternativa. Per far ciò si è condotta una campagna di indagini, nella quale sono stati somministrati 1.200 questionari del tipo *Stated Preference*. Per migliorare il potere esplicativo del modello di scelta modale è stato inserito un indicatore socio-economico degli intervistati e un indicatore psicometrico, per stimare i tratti psicologici derivanti dalle risposte alle domande del sondaggio sui singoli atteggiamenti e percezioni.

Tabella 3.7 - Coefficienti degli attributi di utilità

<i>Coefficienti</i>	<i>Valore</i>	<i>t-test</i>	<i>p-value</i>
ASA_{Bus}	-0,551	-1,45	0,15
β_{t-walk}	-0,0207	-2,40	0,02
β_{t-wait}	-0,0132	-0,75	0,45
β_{time}	-0,0196	-3,40	0,00
$\beta_{parking}$	-0,0362	-1,97	0,05
β_{cost}	-0,218	-2,73	0,01
$\beta_{HG-worker}$	-1,36	-6,26	0,00
$\beta_{discomfort}$	-0,153	-2,44	0,01

Final log likelihood = -459,259

$\rho^2 = 0,582$

Adjusted $\rho^2 = 0,574$

Il modello così ottenuto è caratterizzato da una buona significatività statistica dei parametri, come si notare dalla Tabella 3.7.

I segni negativi della variabile socio-economica sottolineano che il trasporto pubblico è meno attraente per imprenditori, manager, professionisti e in generale per tutte le persone con reddito medio-alto. Invece, l'indicatore psicometrico implica la seguente considerazione comportamentale: il trasporto pubblico è meno competitivo per gli utenti che attribuiscono maggiore importanza al disagio e alla pulizia dei veicoli del trasporto pubblico.

Quindi, si passa al calcolo della probabilità che l'utente, che si reca dall'origine o alla destinazione d per il motivo s , scelga il modo di trasporto *auto* o *bus*:

$$p_{car} = \frac{e^{V_{car}}}{e^{V_{car}} + e^{V_{bus}}} \quad (3.4)$$

$$p_{bus} = \frac{e^{V_{bus}}}{e^{V_{car}} + e^{V_{bus}}} \quad (3.5)$$

Infine, si calcola il numero di utenti che utilizzano il modo *auto* e *bus* sulla domanda totale di spostamenti come:

$$d_{car} = d_{od,tot} \cdot p_{car} \quad (3.6)$$

$$d_{bus} = d_{od,tot} \cdot p_{bus} \quad (3.7)$$

dove ovviamente si deve verificare che:

$$d_{car} + d_{bus} = d_{od,tot} \text{ e } p_{car} + p_{bus} = 1 \quad (3.8)$$

Alla fine di questo processo, si hanno le nuove matrici OD per le due modalità di trasporto. Si passa, quindi, al calcolo della funzione obiettivo e alla verifica dei vincoli che si è scelto di imporle, che in maniera esplicita possono essere scritti:

$$f.o. = \text{Surplus}_{utenti} + \text{Incassi}_{pricing} + \text{Incassi}_{bus} - \text{Costi}_{gestione} + \text{Esterneità} \quad (3.9)$$

sotto i vincoli:

$$\underline{p} \geq 0 \quad (3.10)$$

$$\underline{Stalli}^{liberi} \geq L \quad (3.11)$$

$$\underline{f}^* = \underline{AP}(\underline{C}^{car}(\underline{p}, \underline{f}^*)) \underline{d}^{car}(\underline{C}^{car}(\underline{p}, \underline{f}^*), \underline{C}^{bus}) \quad (3.12)$$

dove:

- $S = surplus\ dell'utente$, espresso come prodotto tra la domanda totale d_{od} e la variazione di soddisfazione tra l'iterazione attuale e lo scenario progettuale di riferimento, diviso per il coefficiente β_{cost} che consente di esprimere il surplus in euro;
- $I = incassi$ relativi alla tariffa di parcheggio CP dell'area sottoposta a *pricing* e al biglietto dell'autobus, pagato dalla nuova domanda che per effetto del *pricing* si trasferisce dal mezzo privato al mezzo pubblico;
- $C = costi\ di\ gestione$ stimati pari a:

$$C_{gestione} = 4 \cdot N_{bus} \cdot 10 \quad (3.13)$$

avendo stimato 4 € il costo per ogni km/h di velocità che in un ora genera un autobus con una velocità commerciale pari a 10 km/h;

- $E = riduzione\ dell'esternalità$ dovuta al trasferimento di un'aliquota di domanda dal modo auto al modo bus stimata pari a:

$$E = 0,11 \cdot OD_{newpass_bus} \cdot km_{bus} \quad (3.14)$$

Quindi, la funzione obiettivo può essere scritta come:

$$f.o. = \frac{1}{\beta_{cost}} \sum_{od} d_{od} \left[\ln \left(e^{V_{car}} + e^{V_{bus}} \right)_{iterazione_n} - \ln \left(e^{V_{car}} + e^{V_{bus}} \right)_0 \right] + \quad (3.15)$$

$$+ CP \cdot OD_{auto_park} + biglietto_{bus} \cdot OD_{newpass_bus} +$$

$$- 4 \cdot N_{bus} \cdot 10 + 0,11 \cdot OD_{newpass_bus} \cdot km_{bus}$$

I tre vincoli indicano rispettivamente che la tariffa dei parcheggi e degli autobus deve essere positiva, che la percentuale di stalli liberi deve essere maggiore uguale a L , che in questo studio è stata assunta pari al 30%, mentre l'ultimo vincolo è quello di interazione fra domanda e offerta.

Il vincolo sulla percentuale di stalli liberi ha un significato molto importante in quanto, la verifica dello stesso dà all'utente la certezza di riuscire a parcheggiare all'interno dell'area e in più si ha un buon margine di sicurezza rispetto alla saturazione delle aree di sosta. Questa percentuale di stalli liberi non deve essere inferiore al 15% (Vickrey, 1954) ma nemmeno troppo alta, poiché lo spazio urbano ha un grande valore che non va sprecato. Con questo valore minimo del 15% è stato dimostrato che viene eliminato il *traffico parassita*, ma per lo scopo di questo lavoro, questa parametro vuole essere strumentale, insieme alla tariffa, per limitare gli accessi in area urbana con mezzi privati da parte dei non residenti. Inoltre, per tener conto della zonizzazione, che non è scesa a dettaglio dell'isolato ma di zone di traffico più ampie, e del fatto che molte zone presentano un offerta nulla di sosta per i non residenti, si è fissata una percentuale di stalli liberi pari al 30%. Questo valore, consente, inoltre, di avere un maggior margine di sicurezza nei riguardi della saturazione rispetto a quello proposto da Vickrey. Resta inteso che tale percentuale, a seguito dei risultati delle simulazioni e degli obiettivi del decisore, può essere variata per meglio adattarsi alle condizioni locali.

Infine, come si può notare, la funzione obiettivo è di tipo mista, ovvero una combinazione di obiettivi sociali e aziendali, in analogia all'analisi benefici-costi, alcuni dei quali devono essere minimizzati altri massimizzati.

A questo punto si è giunti alla fine di un'iterazione e per capire se continuare o meno bisogna controllare in primo luogo la verifica dei vincoli e se questa è confermata si passa a valutare il valore della funzione obiettivo. Lo scopo è quello di avere una funzione obiettivo con valore massimo e la verifica simultanea dei vincoli. Per far questo, non si può stabilire a priori quante iterazioni sono necessarie affinché il sistema converga a una soluzione otti-

male, ma è indubbio che la cura nello stabilire le variazioni tariffarie consentite di convergere più velocemente alla soluzione.

3.8 Le iterazioni

Nella prima batteria di iterazioni, oltre a far variare le tariffe della aree di sosta, si è previsto il rafforzamento dei collegamenti con *shuttle bus* tra i parcheggi d'interscambio e le zone interne all'area di studio, in modo da rendere più attrattiva questa modalità di spostamento. Il resto del servizio di TPL attuale non è stato variato, come anche non sono stati previsti ulteriori interventi sulla mobilità privata.

Si sono eseguite 12 iterazioni, il cui progetto delle tariffe di sosta, impostate all'inizio di ogni iterazione, è quello riportato nella Tabella 3.8, dove in grigio sono evidenziate le aree di sosta interne all'area e con una tonalità più scura i parcheggi d'interscambio.

Tabella 3.8 - Variazione tariffaria nella prima batteria

Zone-Park \ Iterazioni	Tariffe (€)												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1	2	3	4	3,5	4	3,5	4	4	4	4	3	3,5
2	1	2	3	4	4	4	3,5	4	4	4	4	3	3,5
3	1	2	3	4	3,5	3	3,5	3	3,5	3,25	3,25	3	3,5
4	1	2	3	4	3,5	3	3,5	3	3,5	3,25	3,25	3	3,5
5	1	2	3	4	3,5	3	3,5	3	3	2,75	3	3	3,3
6	1	2	2	3	3,5	3	2,5	2,5	3	2,75	3	2,5	2,5
7	1	1	1	1	1	1	2,5	2,5	2,5	2,25	2,25	2,5	2,5
8	1	1	1	1	1	1	3	3	3	2,75	2,5	2,5	2,5
9	1	1	1	1	1	1	3	3	3	2,75	2,5	3	3,5
10	1	2	3	4	3,5	3	3	3	3	2,75	3	3	3,5
21	1	1	1	1	1	1	2,5	3	2,5	2,25	2	2,5	2,5
22	1	2	3	4	3,5	3	3,5	3,5	4	3,75	4	2,5	2,5
23	1	2	2	2	2	1,5	2,5	2,5	3	3,25	3,25	2,5	2,5
24	1	1	1	1	1	1	2,5	2	2	2	2	2,5	2,5
38	1	1	1	1	1	1	3	3	3	3	3	2,5	2,5
39	1	2	3	4	3,5	3	3	3	3	3	3	2,5	2,5
40	1	2	3	3	2,5	2	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5	2,5
41	1	1	1	1	1	1	2,5	2,5	2,5	2,5	2	2,5	2,5

Segue Tabella

55	1	1	2	3	2,5	2	3	2,5	2,5	2,25	2,25	2,5	2,5
56	1	1	1	2	2,5	1,5	3	2,5	2,5	2,25	2	2,5	2,5
57	1	1	1	1	1	1	2,5	2	2	1,5	1,25	2,5	2,5
77	1	2	3	3	2,5	3	3	2,5	2,5	2,75	3	3,5	3,5
78	1	2	3	3	2,5	3	3	2,5	3	3	3	3,5	3,5
79	1	2	3	4	3,5	3	3	3,5	3	3,25	3,5	3,5	3,5
80	1	2	3	4	3,5	3	3	3,5	3	3,25	3,5	3,5	3,5
81	1	1	1	1	1	1	2	2	2	1,5	1,25	2	2
108	1	2	2	3	2,5	3	3	3,5	3,5	3,5	3,75	3,5	3,5
109	1	2	2	3	2,5	3	3	3,5	3,5	3,5	3,75	3,5	3,5
110	1	2	2	3	2,5	3	3	3,5	4	4	4	3,5	3,5
111	1	2	3	4	4	3	3	3,5	4	4	4	3,5	3,5
112	1	2	3	4	3,5	3	3	3,5	3,5	3,75	4	3,5	3,5
131	1	2	3	3	3,5	3	3	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5
132	1	2	3	4	5	3	3	3,5	4	4	4	3,5	3,5
133	1	2	3	4	5	3	3	3,5	4	4	4	3,5	3,5
Piazza V.E. Orlando	1	1	2	2	2	1,5	2	2,5	2,5	2,75	2,75	2,5	2,5
Piazzale Ungheria	1	1	2	2	2,5	2	3	3	3	3	3	3	3
Via Spinuzza	1	2	3	4	4,5	4	4	4	4	4	4	3	3,5
Staz. Notarbartolo	1	2	2	3	2,5	2	3	2,5	2,5	2,25	2,25	2,5	2,5
Piazza U. d'Italia	1	1	2	2	2,5	3	3	2,5	3	3,25	3,25	3,5	3,5
Via Rutelli Ovest	1	2	3	3	2,5	3	3	3,5	3,5	3,25	3,5	3,5	3,5
Piazzale Giotto	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Via degli Emiri	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Porto	1	1	2	2	2	2,5	2,5	2,5	2,5	3	2,75	2	2
Via E. Basile	1	1	1	1	1	1,5	1	1	1	1	1	1	1
Via Belgio	1	1	1	2	2	2,5	2	2	2	2	2	2	2

Avviata la fase di assegnazione si ottiene il vettore dei flussi sui singoli archi della rete e le matrici dei tempi e delle distanze per ogni coppia OD, che consentono di ricavare t_{car} e $dist$.

Quindi, è possibile passare al calcolo delle utilità sistematiche per i due modi di trasporto V_{car} e V_{bus} e alle relative ripartizioni modali, che consentono di trovare le nuove matrici da utilizzare per l'iterazione successiva. Dalle ripartizioni modali riportate nel diagramma in Figura 3.21, si può notare che oltre al modo *auto* e *bus* viene riportata la modalità *park and ride*, relativa a tutti quegli utenti che si recano al parcheggio di interscambio in auto e da lì raggiungono la propria destinazione con gli *shuttle bus*.

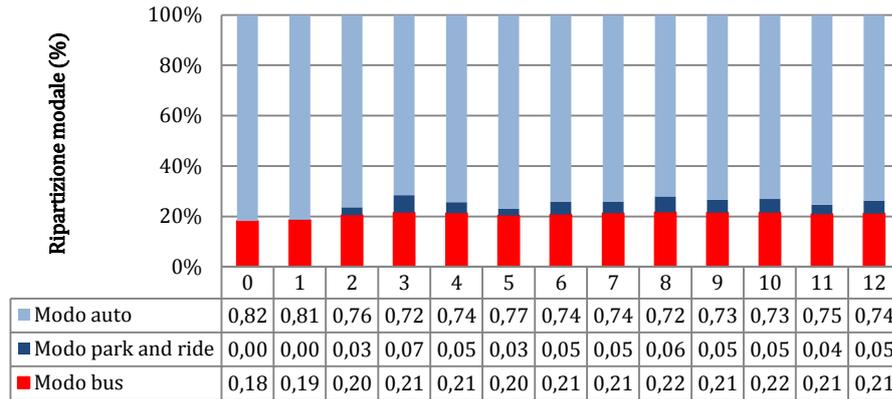


Figura 3.21 - Ripartizione modale nella prima batteria

È possibile, inoltre, calcolare il *coefficiente di occupazione* delle aree di sosta, che è necessario ai fini della verifica del vincolo della funzione obiettivo relativo alla percentuale di stalli liberi. In questa prima batteria tale percentuale è stata riferita all'intera area di studio.

Tabella 3.9 - Coefficiente di occupazione aree di sosta nella prima batteria

Zone-Park	Iterazioni												
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	1,45	1,58	1,56	0,25	1,90	0,50	2,31	0,19	0,18	0,18	0,18	0,82	0,59
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	3,57	3,03	1,93	0,00	0,11	1,61	0,18	1,55	0,18	0,79	0,75	1,53	0,11
4	2,56	2,39	1,91	0,00	0,02	1,43	0,04	1,10	0,04	0,22	0,21	0,95	0,04
5	2,62	3,62	1,26	0,00	0,00	1,61	0,00	0,18	0,19	1,16	0,20	0,17	0,00
6	1,07	0,00	1,81	0,00	0,00	0,00	0,00	1,61	0,00	1,42	0,00	1,26	1,44
7	0,01	0,00	0,64	0,63	0,55	0,64	0,00	0,01	0,00	0,47	0,53	0,00	0,00
8	0,51	0,59	0,64	0,64	0,54	0,64	0,09	0,07	0,05	0,32	0,47	0,50	0,50
9	0,73	0,65	0,73	0,73	0,56	0,74	0,28	0,24	0,18	0,27	0,40	0,20	0,00
10	2,77	2,40	1,18	0,00	0,07	0,57	0,63	0,62	0,63	1,10	0,66	0,60	0,11
21	0,40	0,49	0,53	0,54	0,42	0,54	0,54	0,49	0,37	0,37	0,44	0,46	0,42
22	2,04	1,98	1,83	0,00	0,00	1,26	1,30	1,24	0,00	1,00	0,09	1,31	1,87
23	1,04	0,74	0,86	0,85	0,63	0,88	0,98	0,90	0,78	0,62	0,50	0,63	0,79
24	0,11	0,17	0,19	0,19	0,16	0,19	0,19	0,18	0,17	0,17	0,17	0,17	0,15
38	0,42	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68	0,68
39	1,45	1,21	1,12	0,00	0,46	0,80	0,91	0,91	0,91	0,91	0,91	0,89	1,02
40	1,62	1,59	0,35	0,00	0,48	1,31	0,91	0,87	0,80	0,76	0,76	0,73	0,74
41	0,30	0,26	0,27	0,28	0,23	0,28	0,28	0,26	0,23	0,23	0,23	0,25	0,23
55	0,72	1,56	1,14	0,00	0,00	0,97	0,00	0,06	0,06	0,57	0,59	0,00	0,00
56	0,70	0,99	1,08	1,04	0,16	0,86	0,00	0,20	0,18	0,37	0,84	0,20	0,18
57	0,45	0,42	0,47	0,47	0,37	0,47	0,34	0,42	0,39	0,39	0,43	0,32	0,24
77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

Segue Tabella

78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
81	0,30	0,27	0,29	0,29	0,23	0,29	0,29	0,28	0,25	0,25	0,27	0,28	0,25
108	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
109	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
110	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
111	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
112	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
131	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
132	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
133	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Piazza V.E. Orlando	0,70	1,32	0,61	0,95	0,66	0,84	1,25	0,80	1,08	0,52	0,82	0,72	0,76
Piazzale Ungheria	0,40	1,62	0,30	1,49	0,20	1,33	0,26	0,80	0,89	0,89	0,84	0,82	0,87
Via Spinuzza	4,77	3,90	4,03	1,96	0,00	2,51	0,00	1,52	1,48	1,42	1,42	2,20	2,77
Staz. Notarbartolo	1,04	0,00	1,17	0,00	0,00	0,51	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Piazza U. d'Italia	0,32	2,91	0,29	2,72	0,20	0,22	0,19	2,21	2,19	1,82	1,62	0,16	0,16
Via Rutelli Ovest	4,12	2,95	0,00	0,00	0,84	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Piazzale Giotto	0,00	0,00	0,82	1,30	0,85	0,72	1,21	1,23	1,19	1,15	1,09	1,24	1,24
Via degli Emiri	0,00	0,00	0,37	0,68	0,42	0,42	1,19	1,19	1,38	0,94	1,09	0,72	1,03
Porto	0,00	1,17	0,66	7,42	3,40	0,81	0,86	0,81	2,60	0,29	1,81	0,00	0,00
Via E. Basile	0,00	0,00	0,70	2,20	1,44	0,76	1,80	1,14	2,03	1,64	1,71	0,79	1,93
Via Belgio	0,00	0,00	1,42	1,56	1,63	0,00	0,04	0,28	1,67	1,72	1,51	0,41	0,42
Coeff. Occ. Globale	1,71	1,57	1,18	0,51	0,41	0,93	0,72	0,75	0,47	0,61	0,55	0,70	0,63

Con i dati ottenuti finora si può procedere al calcolo della funzione obiettivo e alla verifica dei vincoli a cui essa è sottoposta. Se i vincoli non vengono rispettati, si procede a una nuova iterazione con la matrice OD proveniente dal modello di ripartizione modale dell'iterazione precedente. Se, invece, i vincoli vengono verificati, si prosegue comunque con ulteriori iterazioni fino a quando non si trova la funzione obiettivo con il valore massimo.

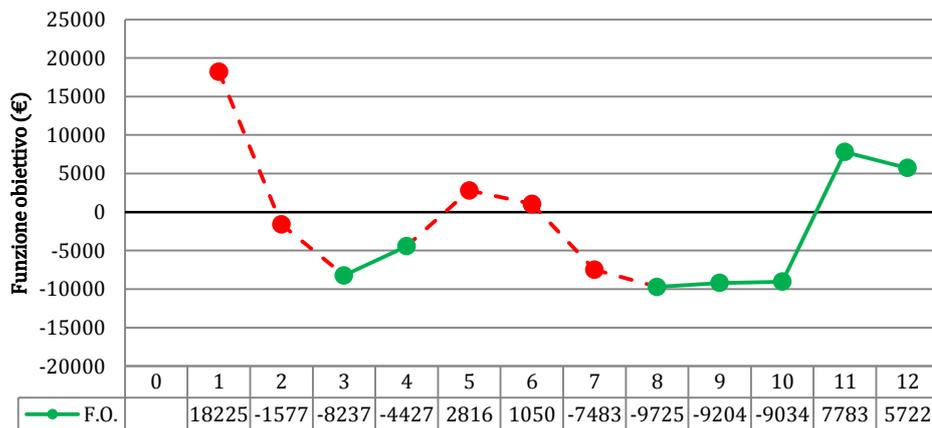


Figura 3.22 - Diagramma della funzione obiettivo nella prima batteria

Come si può notare, inizialmente la funzione obiettivo ha un valore positivo molto elevato, ma non rispetta il vincolo della percentuale di posti liberi, facendo registrare una forte sovrasaturazione della aree di sosta e il non utilizzo dei parcheggi d'interscambio. Man mano che si cominciano a far crescere le tariffe all'interno dell'area di studio e parallelamente si migliorano i collegamenti *shuttle* con i parcheggi di interscambio, si assiste a una picchiata del valore della funzione obiettivo che arriva a valori negativi molto alti. Continuando in tal modo si registra una ripresa nel momento in cui si ottiene un buon bilanciamento tra tariffe e competitività dei parcheggi scambiatori. Nel diagramma in Figura 3.22 in rosso vengono segnate le iterazioni che non rispettano i vincoli della *f.o.* e in verde quelle che li rispettano. Da ciò emerge che l'iterazione n.11, rispetto a quelle in cui i vincoli vengono verificati (ammissibili), ha il maggior valore della funzione obiettivo. In essa, infatti, il coefficiente di occupazione della sosta dell'intera area è pari a 0,70 e quindi con una percentuale di stalli liberi del 30%, invece, il coefficiente di ripartizione del mezzo bus è pari a 0,21, che cresce a 0,25 se si considera anche la modalità park and ride.

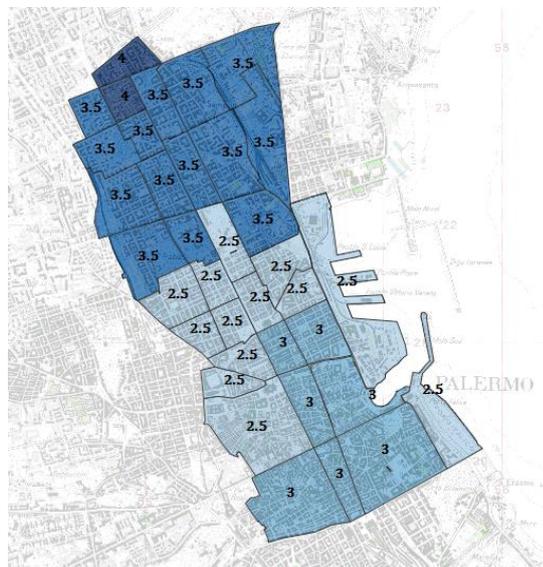


Figura 3.23 - Zone tariffarie della 11ª iterazione (tariffe in euro)

Se a questo punto si analizzano i flussi sulla rete, relativi all'iterazione n.11, e in particolare il grado di saturazione dei singoli archi, quale rapporto tra flusso e capacità, si può notare la presenza di tantissimi archi con valori prossimi all'unità o addirittura superiori, sia all'interno dell'area di studio che intorno alla stessa, come si può notare dalla Figura 3.24.

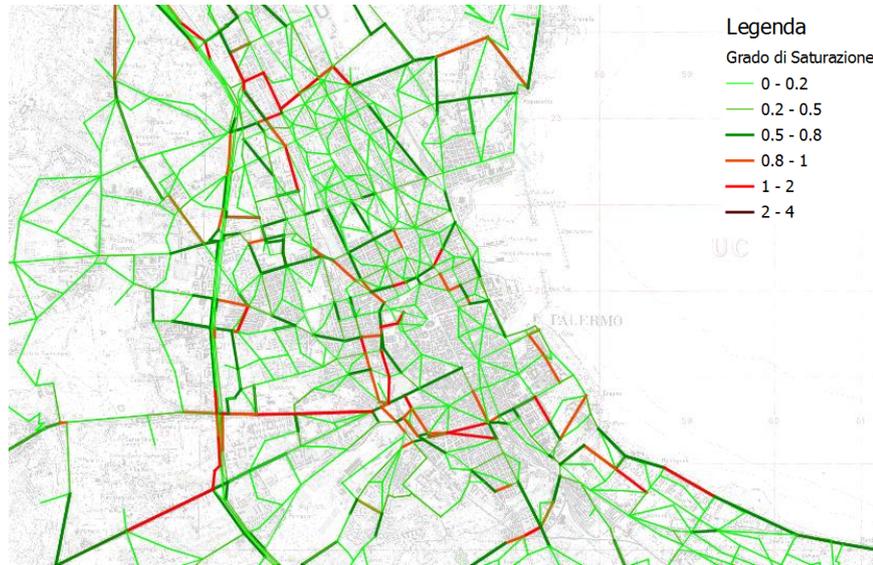


Figura 3.24 - Grado di saturazione sulla rete alla 11^a iterazione della prima batteria

È importante ricordare che non si è agito sul sistema di trasporto pubblico locale, cosa che ha limitato lo *split di domanda* tra il modo *auto* e il modo *bus*. Per tener conto di ciò e per provare a ottenere un valore della funzione obiettivo maggiore, si è passati a un'altra batteria di iterazioni.

In questo caso, sono stati, inoltre, adottati interventi volti alla fluidificazione del traffico nelle arterie a cordone dell'area di studio, per migliorare le condizioni del flusso di attraversamento. Tali interventi, ottenuti attraverso una riorganizzazione delle intersezioni e/o una razionalizzazione delle sezioni stradali, attraverso l'introduzione di divieti di sosta e di fermata dove questo è possibile, sono volti essenzialmente all'aumento della capacità degli archi. Parallelamente a ciò, si è lavorato nel rafforzare proporzionalmente il TPL. Questa operazione, che avrebbe previsto l'assegnazione della matrice

OD_{bus} con l'algoritmo degli *ipercammini minimi*, per mezzo del quale si determinano i nuovi t_{bus} , in questo lavoro è stata semplificata a causa della mancanza dei dati necessari a costruire il grafo del TPL. Questa fase, infatti, necessita della conoscenza dei parametri di esercizio e dei percorsi di tutte le linee esistenti, che a causa di una fase di riorganizzazione del servizio e di informatizzazione non sono stati resi disponibili da parte di AMAT.

Quindi, dopo aver individuato le coppie OD con un numero di spostamenti totali consistenti, si è proceduto a incrementare il numero di mezzi sulle linee che collegano tali coppie, ricavando il corrispondente valore del tempo attraverso la seguente formula:

$$TG = n_{bus} \cdot i \quad (3.16)$$

dove:

- $TG = tempo\ di\ giro$, della singola linea, espresso in minuti;
- $n_{bus} = numero\ bus$ totali a seguito del potenziamento;
- $i = intertempo$ tra le corse della singola linea.

Conoscendo gli intertempi delle linee che si desidera potenziare e agendo solo sul numero di autobus che si vogliono inserire sulle tratte, si calcola il tempo di giro e quindi il tempo di collegamento tra le coppie OD individuate. Questo è sicuramente un approccio semplificato, ma per i fini dello studio in questione dà l'idea di come varia lo *split modale* e di conseguenza il valore della funzione obiettivo con il rafforzamento del TPL.

Come già visto per la batteria d'iterazioni precedente, anche in questo caso il primo passo è stato quello di far variare le tariffe delle aree di sosta nelle varie zone, come mostra la Tabella 3.10.

Tabella 3.10 - Variazione tariffaria nella seconda batteria

Zone-Park	Iterazioni		Tariffe (€)					
	0	1	2	3	4	5	6	
1	1	2	3	3,5	3,5	3,5	3,5	
2	1	2	3	3,5	3,5	3,5	3,5	
3	1	2	3	3,5	3,5	3,25	3	
4	1	2	3	3,5	3,5	3,25	3	
5	1	2	3	3,5	3,5	2,75	2,75	
6	1	1	1	2	2	2	2	
7	1	1	1	2	2	2	2	
8	1	1	1	2	2	2	2	
9	1	2	3	3,5	3,5	3,5	3,5	
10	1	2	3	3,5	3,5	3,5	3,5	
21	1	2	2,5	3	2,5	2,5	3	
22	1	2	2,5	3	2,5	2,5	3	
23	1	1	1	2	2	2	2	
24	1	1	1	2	2	2	2	
38	1	2	2,5	3	2,5	2,5	3	
39	1	2	2,5	3	2,5	2,5	3	
40	1	1	1	2	2	2	2	
41	1	1	1	2	2	2	2	
55	1	2	2,5	3	2,5	2,5	3	
56	1	2	2,5	3	2,5	2,5	3	
57	1	1	1	2	2	2	2	
77	1	2	3	3,5	3,5	3,5	3,5	
78	1	2	3	3,5	3,5	3,5	3,5	
79	1	2	3	3,5	3,5	3,5	3,5	
80	1	2	3	3,5	3,5	3,5	3,5	
81	1	2	3	3,5	3,5	3,5	3,5	
108	1	2	3	3,5	3,5	3,5	3,5	
109	1	2	3	3,5	3,5	3,5	3,5	
110	1	2	3	3,5	3,5	3,5	3,5	
111	1	2	3	3,5	3,5	3,5	3,5	
112	1	2	3	3,5	3,5	3,5	3,5	
131	1	2	3	3,5	3,5	3,5	3,5	
132	1	2	3	3,5	3,5	3,5	3,5	
133	1	2	3	3,5	3,5	3,5	3,5	
Piazza V.E. Orlando	1	1	1	2	2	2	2	
Piazzale Ungheria	1	2	2,5	3	2,5	2,5	3	
Via Spinuzza	1	2	2	3,5	3,5	3,5	3,5	
Staz. Notarbartolo	1	2	2,5	3	2,5	2,5	3	
Piazza U. d'Italia	1	2	3	3,5	3,5	3,5	3,5	
Via Rutelli Ovest	1	2	3	3,5	3,5	3,5	3,5	
Piazzale Giotto	1	1	1	1	1	1	1	
Via degli Emiri	1	1	1	1	1	1	1	
Porto	1	1	1	1	2	1,5	1,5	
Via E. Basile	1	1	1	1	1	1	1	
Via Belgio	1	1	1	1	2	1,5	2	

Quindi, è possibile passare al calcolo delle utilità sistematiche per i due modi di trasporto V_{car} e V_{bus} e alle relative ripartizioni modali, che consentono di trovare le nuove matrici da utilizzare per l'iterazione successiva.

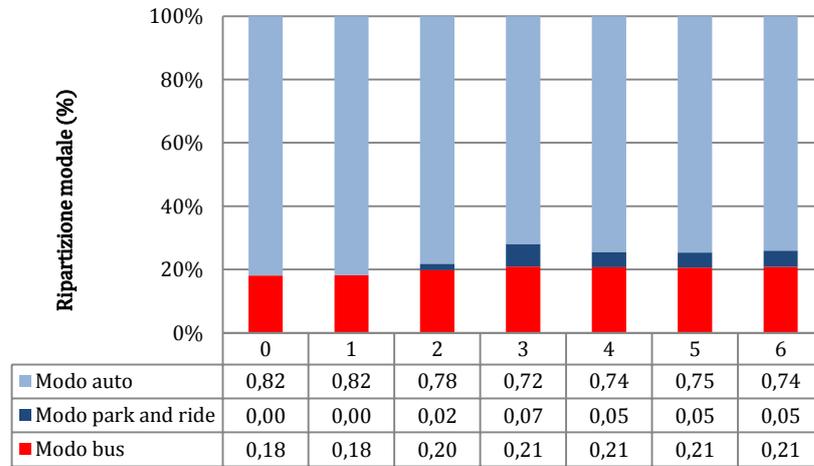


Figura 3.25 - Ripartizione modale nella seconda batteria

Rispetto alla prima batteria, oltre a valutare la percentuale di stalli liberi sull'intera area, si è deciso di estendere, anche se in modo non rigido, tale vincolo anche alle macrozone interne all'area di studio. In particolare, l'area è stata suddivisa in sei macrozone formate dalle zone di traffico limitrofe, in funzione di caratteristiche comuni o funzionali. In ognuna di queste si è cercato di fare in modo che il *coefficiente di occupazione degli stalli* si aggirasse intorno allo 0,7 e che nell'intera area si verificasse la percentuale media del 30% di stalli disponibili.

Questa ulteriore condizione è stata possibile grazie al potenziamento del TPL che è riuscito a sottrarre domanda al mezzo privato e, quindi, di sosta.

Tabella 3.11 – Coefficiente di occupazione aree di sosta nella seconda batteria

<i>Zone-Park</i> \ <i>Iterazioni</i>	0	1	2	3	4	5	6
1	1,45	1,58	0,00	1,17	0,43	3,05	0,53
2	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
3	3,57	3,03	1,97	0,56	0,03	0,58	1,54
4	2,56	2,39	1,95	0,04	0,01	0,03	0,92
5	2,62	3,62	2,20	0,00	0,00	1,00	1,09
6	1,07	1,58	1,81	1,72	1,44	1,50	1,50
7	0,01	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
8	0,51	0,59	0,60	0,64	0,57	0,56	0,56
9	0,73	0,65	0,44	0,00	0,00	0,00	0,00
10	2,77	2,40	2,23	0,37	0,00	0,33	0,10
21	0,40	0,49	0,46	0,00	0,38	0,42	0,23
22	2,04	2,21	2,14	0,00	1,81	1,88	0,00
23	1,04	0,92	1,09	1,08	0,89	0,89	0,89
24	0,11	0,17	0,20	0,01	0,17	0,17	0,17
38	0,42	0,68	0,68	0,39	0,68	0,68	0,67
39	1,45	1,21	1,30	0,40	0,93	1,02	0,90
40	1,62	1,59	1,82	1,81	1,47	1,47	1,47
41	0,30	0,26	0,29	0,28	0,25	0,25	0,25
55	0,72	1,00	0,93	0,00	0,00	0,00	0,00
56	0,70	0,99	0,74	0,00	0,10	0,18	0,00
57	0,45	0,42	0,49	0,46	0,39	0,38	0,38
77	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
78	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
79	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
80	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
81	0,30	0,27	0,27	0,02	0,00	0,00	0,00
108	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
109	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
110	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
111	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
112	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
131	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
132	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
133	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Piazza V.E. Orlando</i>	0,70	0,93	1,02	1,03	0,90	0,87	0,87
<i>Piazzale Ungheria</i>	0,40	0,32	1,23	0,32	1,10	0,99	0,99
<i>Via Spinuzza</i>	4,77	3,90	5,32	3,34	2,39	0,00	2,48
<i>Staz. Notarbartolo</i>	1,04	1,17	0,76	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Piazza U. d'Italia</i>	0,32	0,26	0,10	0,00	0,08	0,00	0,18
<i>Via Rutelli Ovest</i>	4,12	3,73	0,21	0,00	0,00	0,00	0,00
<i>Piazzale Giotto</i>	0,00	0,00	0,49	1,18	1,13	1,16	1,19
<i>Via degli Emiri</i>	0,00	0,00	0,32	0,89	0,95	0,86	0,94
<i>Porto</i>	0,00	0,00	0,55	9,24	0,00	0,00	6,20
<i>Via E. Basile</i>	0,00	0,00	0,61	1,51	1,85	1,30	0,99
<i>Via Belgio</i>	0,00	0,00	0,62	3,43	0,42	1,77	0,46
Coeff. Occ. Globale	1,71	1,60	1,37	0,51	0,66	0,69	0,66

Le iterazioni che in linea di massima verificano il vincolo della percentuale di stalli liberi sono la n.3, 4, 5 e 6. Come si può notare dal diagramma sottostante, inizialmente la funzione obiettivo ha un valore positivo molto elevato, causato dai due interventi introdotti rispetto alla condizione iniziale di riferimento: potenziamento del TPL e interventi di fluidificazione. Dopo una prima picchiata della funzione obiettivo, a causa dell'incremento delle tariffe di parcheggio, si registra una ripresa, raggiungendo un massimo relativo in corrispondenza della quinta iterazione, per poi riscendere nuovamente. Per tali ragioni la configurazione ottimale è quella relativa all'iterazione n.5. per la quale si registra un coefficiente di ripartizione del mezzo *bus* pari a 0,21 che cresce a 0,26 se si considera anche la modalità *park and ride*.

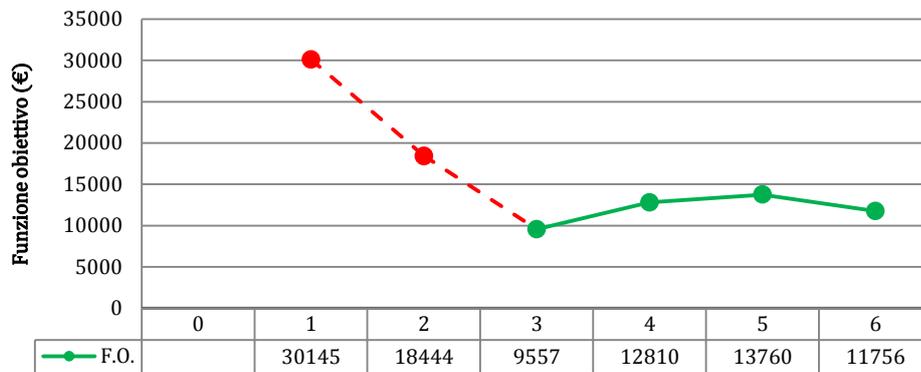


Figura 3.26 - Diagramma della funzione obiettivo della seconda batteria

Come fatto per la batteria precedente, nella Figura 3.27 si possono visualizzare i flussi sulla rete relativi all'iterazione n.5 e in particolare il grado di saturazione dei singoli archi.

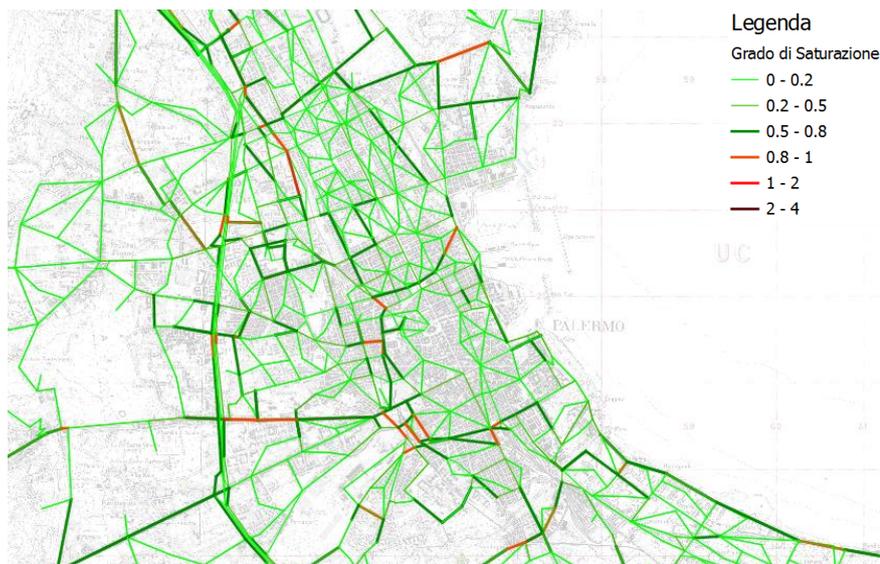


Figura 3.27 - Grado di saturazione sulla rete alla 5^a iterazione della seconda batteria

Si può notare facilmente che, grazie ai due interventi su esposti, il numero di archi che raggiungono la saturazione sono diminuiti notevolmente, rendendo la rete meno soffocata dal traffico veicolare privato.

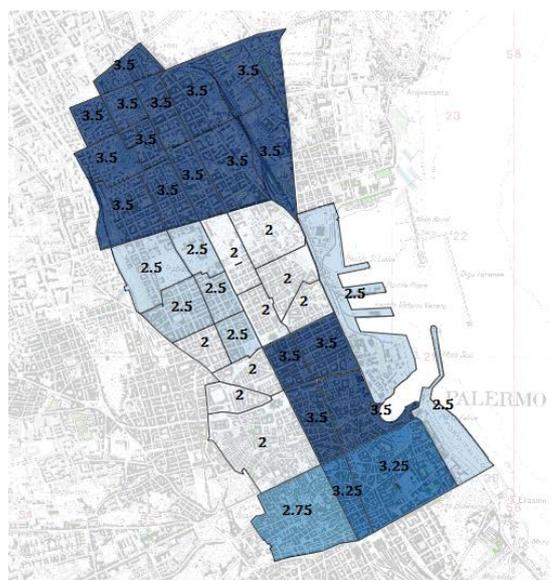


Figura 3.28 - Zone tariffarie della 5^a iterazione (tariffe in euro)

Da notare, inoltre, che questo ha permesso un abbassamento e una migliore razionalizzazione delle tariffe di sosta all'interno dell'area, con una migliore individuazione delle zone tariffarie a vantaggio della fruizione da parte dei cittadini.

CONCLUSIONI

L'obiettivo principale di tale studio è stato quello di proporre soluzioni alternative e innovative al sempre più complesso problema della mobilità urbana. Partendo da un'analisi dello stato dell'arte in letteratura e da un approfondimento sulle *best practices* internazionali in materia di *parking pricing* e *road pricing*, si è tentato di proporre un nuovo modo di intendere le zone a traffico limitato, sia dal punto di vista della loro pianificazione sia dal punto di vista tecnologico e gestionale. L'applicazione condotta nel terzo capitolo si è rivelata molto utile per mettere maggiormente in evidenza limiti e pregi del metodo proposto e i possibili sviluppi futuri.

Sicuramente, la semplicità del metodo e l'utilizzo di software gratuiti e *open source* sono le caratteristiche che emergono maggiormente. Queste hanno, inoltre, un ruolo importante nel governo dei vari passaggi metodologici e lo rendono facilmente adattabile alle condizioni che di volta in volta ci si trova ad affrontare.

Entrando nel merito dell'applicazione da un punto di vista tecnico-progettuale, attraverso le due batterie di simulazioni si è voluto mostrare come una scelta strategica e/o progettuale possa incidere notevolmente sullo *split modale* e sulla funzione obiettivo, conducendo a due soluzioni abbastanza differenti tra loro. È importante sottolineare che affinché il metodo utilizzato conduca a buoni risultati, è necessario avere un modello di domanda calibrato opportunamente e che tenga conto degli aspetti principali sui quali si intende agire (TPL, *pricing*, ecc.). Puntare sul *pricing* per innalzare la sostenibilità del sistema, significa adoperare il *cash-flow* derivante dal *pricing* per finanziare delle alternative di trasporto che inducano l'utente all'uso del TPL e del *park and ride*. Inoltre, un maggior dettaglio e attenzione nella fase di modellazione dell'offerta di trasporto, sia in termini di rete stradale sia di aree di sosta, porta sicuramente a valori più precisi e accurati.

Ruolo importante è giocato certamente dalle regole di buona progettazione (come ad esempio la modifica del piano viario nel caso in esame), le quali molto spesso sono difficili da tradurre in termini di obiettivi e di vincoli. Partire da una configurazione tecnica iniziale accurata, permette al metodo di convergere a una soluzione ottimale in maniera più rapida e il più vicina possibile alla realtà.

Inoltre, se utilizzato in fase operativa, cioè con i dati provenienti dai rilevamenti sulle aree sottoposte a tale provvedimento, il metodo proposto potrebbe restituire risultati più accurati. Consentirebbe, infatti, di calibrare il modello di domanda in modo più preciso e di meglio descrivere il comportamento degli utenti alla variazione della tariffa.

Introdurre opportunamente le tariffe di sosta all'interno delle varie aree deputate a tale scopo permette di decongestionare le zone che si vogliono liberare dai mezzi privati; ciò richiede, tuttavia, che le tariffe vengano modulate periodicamente, come nel caso di *SF park*, per evitare che il fenomeno della congestione si sposti semplicemente su altre zone.

Un altro aspetto che è utile sottolineare, riguarda i diversi scenari ricavabili dalle simulazioni. Nell'applicazione effettuata, le simulazioni sono state condotte nell'ora di punta mattutina, sarebbe tuttavia auspicabile estenderle ad altre fasce orarie della giornata, o addirittura ai diversi giorni della settimana. Portando al limite tale ragionamento, sarebbe interessante simulare la risposta della domanda di mobilità per tutte le ore e per tutti i giorni in cui si pensa di attuare il sistema di *pricing*, considerando nelle varie ore la disponibilità di posti a seconda dell'andamento del *turn over* rilevato nell'arco della giornata e della settimana.

Oltre agli aspetti tecnico-progettuali, spostando l'attenzione sui diretti fruitori, il sistema proposto presenta diversi vantaggi sia per gli utenti sia per le amministrazioni locali che saranno chiamate a gestirlo. Per quanto riguarda gli utenti, questi avranno l'opportunità di sapere in modo semplice e veloce dove c'è maggior probabilità di trovare parcheggio e a quale tariffa. Questo ridurrà notevolmente i tempi di ricerca del parcheggio, eliminando il

traffico parassita e limitando gli impatti negativi sull'ambiente. Le amministrazioni, invece, a seguito di un investimento iniziale, potranno usufruire di un sistema che con la stessa infrastruttura riesce a governare sia la problematica della sosta, sia il controllo degli accessi veicolari in aree sottoposte a restrizioni. Fra gli altri vantaggi, il risparmio economico è forse il più importante. Infatti, un sistema siffatto ha dei costi di impianto sensibilmente contenuti, dato il basso costo dei singoli sensori. Proprio grazie alla snellezza della infrastruttura, anche i costi di gestione, a parte quelli relativi al personale della sede operativa e degli addetti al controllo, sono fortemente limitati alla sola manutenzione, ordinaria e straordinaria, del sistema.

Questo schema, come d'altronde tutte le politiche di *pricing*, ha come maggiore ostacolo l'accettabilità da parte dei cittadini del nuovo sistema proposto. Per tale motivo è bene far precedere l'attuazione dello schema con un periodo di prova, accompagnato da campagne d'informazione e di sensibilizzazione, durante le quali creare un rapporto *sereno* e consapevole tra utente e sistema.

Lo studio fin qui condotto vuole essere un primo approccio al quale si spera ne possano seguire altri, che possano continuare lo studio iniziato per la definizione di metodologie e per consentire in modo semplice e veloce di governare fenomeni di mobilità presenti all'interno dei centri cittadini. Sarebbe auspicabile che il metodo con i suoi vari passaggi, magari opportunamente migliorato sotto alcuni aspetti, potesse essere inglobato all'interno di un *framework*, per consentire lo sviluppo di un *software* capace di eseguire e ottimizzare il modello proposto. Un'idea potrebbe essere quella dello sviluppo di un *Plugin* in *QGIS*, che avrebbe il vantaggio di sfruttare l'interfaccia grafica del software GIS, oltre allo strumento di analisi dei dati e di modellazione dell'offerta di trasporto.

Si spera che questo studio possa contribuire a far incontrare le diverse potenzialità presenti nel variegato mondo dei trasporti, orientandole verso la ricerca di soluzioni alternative ai tradizionali sistemi di progettazione e gestione delle zone a traffico limitato e in generale del *pricing*, che possano

conseguire gli obiettivi di una migliore vivibilità urbana, di un più equilibrato rapporto ricavi-costi e di una maggiore sostenibilità del sistema complessivo.

*“Non c’è vento favorevole per il
marinaio che non sa dove va”
Seneca*

RINGRAZIAMENTI

A conclusione del lavoro svolto nel corso del dottorato di ricerca e descritto nel presente lavoro di tesi, vorrei ringraziare tutti coloro che mi hanno aiutato in questo percorso di crescita professionale nonché personale.

Un grazie a tutti i colleghi e professori del gruppo trasporti del Dipartimento di Ingegneria Civile, Ambientale, Aerospaziale e dei Materiali, sempre disponibili nel condividere idee e strumenti per affrontare il tortuoso processo di ricerca.

Un ringraziamento particolare va al mio amico e collega Manlio Di Giovanna, con cui ho condiviso un tratto di strada e a cui auguro ogni successo personale e professionale nel prosieguo della sua carriera.

Infine, un sentito riconoscimento va al Prof. Marco Migliore che mi ha sempre *"sopportato"*, sostenuto e motivato, seguendomi con pazienza e competenza e sapendomi trasmettere l'entusiasmo per una materia così complessa come quella dei trasporti.

BIBLIOGRAFIA

- Amoroso S., Catalano M., Galatioto F., Migliore M. (2012), "The interaction between rail stations and urban area in medium-sized towns. A case study for Trapani", *Ingegneria Ferroviaria*, LXVII, 11, 923-941.
- Amoroso S., Migliore M., Catalano M., Galatioto F. (2010), "A demand-based methodology for planning the bus network of a small or medium town", *European Transport*, 44, 41-56.
- Arnott R. (2006), "Spatial competition between parking garages and downtown parking policy", *Transport Policy* 13, 458-469.
- Axhausen K.W., Polak J.W. (1991), "Choice of parking: Stated preference approach", *Transportation*, 18 (1) 59-81.
- Axhausen K.W., Polak J.W., Boltze M., Puzicha J. (1994), "Effectiveness of the parking guidance system in Frankfurt/Main", *Traffic Engineering and Control*, 35 (5) 304-309.
- Azari K. A., Arintono S., Hamid H., Davoodi S. R. (2013), "Evaluation of demand for different trip purposes under various congestion pricing scenarios", *Journal of Transport Geography*, 29, 43-51.
- Bateman I. (2001), *The effect of road traffic on residential property values: a literature review and hedonic pricing study*, Scottish Executive, Edinburgh.
- Beckmann M., McGuire C., Winsten C. (1956), *Studies in the Economics of Transportation*, Yale University Press, New Haven, CT, 1956.
- Bekkn J.T., Osland O. (2005), *The Establishment & Development of Norwegian Toll Cordons*, Institute of Transport Economics.
- Bellei G., Gentile G., Papola N. (2000), "Ottimizzazione del trasporto urbano in contesto multiutente e multimodo mediante l'introduzione di

- pedaggi”, *Modelli e Metodi per l’ingegneria del traffico* (a cura di) Cantarella G. E., Russo F., Ed Franco Angeli, Milano, Italy, pp.347-370, 2000.
- Ben Akiva M. E., Lerman S. R. (1985), *Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand*, The MIT Press: Cambridge, Mass.
- Benenson I., Aronovich S., Noam S. (2005), “Let’s Talk Objects: Generic Methodology for Urban High-Resolution Simulation”, *Computers, Environment and Urban Systems* 29, 425–453.
- Benenson I., Martens K. (2008), “From modeling parking search to establishing urban parking policy”, *Zeitschrift Künstliche Intelligenz*, 3(08), 8–13.
- Benenson I., Martens K., Birfir S. (2008), “PARKAGENT: An agent-based model of parking in the city”, *Computers, Environments and Urban systems*, 32, 431-439.
- Benenson I., Torrens P.M. (2004), “Geosimulation: automata-based modeling of urban phenomena”, *Computers, Environment and Urban Systems: Special Issue on Geosimulation*, 28(1–2), 1–8.
- Bierlaire M. (2009), “Estimation of Discrete Choice Models with BIOGEME 1.8”, *Transport and Mobility Laboratory*, EPFL - École Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Bifulco C. (1993), “A Stochastic User Equilibrium Assignment Model for the Evaluation of Parking Policies”, *Ejor*, 71, pp. 269-287, 1993.
- Bifulco C. (1995), “Un modello di equilibrio stocastico per l’assegnazione multiutente e multimodale alle reti di trasporto urbane”, *Sviluppi della ricerca sui sistemi di trasporto* (a cura di) E. Cascetta e G. Salerno, Collana Trasporti, Ed. Franco Angeli, Milano, 1995.

- Bonsall P., I. Palmer (2004), "Modelling drivers' car parking behaviour using data from a travel choice simulator", *Transportation Research Part C* 12, 321-347.
- Buchanan C. (1962), "Towns and Traffic", *Automobilismo e automobilismo industriale*, A.C.I, Italy 1962.
- Buchanan C. (2009), "Have we reached the end of Traffic in Towns?", *Traffic Engineering and Control*, 50:1, 17-20.
- Burlando C., Musso E. (1999), *Economia della mobilità urbana*, UTET, Torino.
- Cantarella G.E. (1997), "A general fixed-point approach to multimode multiuser equilibrium assignment with elastic demand", *Transportation Science* 31, pp. 107-128.
- Cantarella G.E. (2001), *Introduzione alla tecnica dei trasporti e del traffico con elementi di economia dei trasporti*, UTET.
- Carrese S., Negrenti E., Belles B.B. (2004), "Simulation of the Parking Phase for Urban Traffic Emission Models", TRISTAN V - Triennial Symposium on Transportation Analysis, Guadeloupe.
- Cascetta E. (1998), *Teoria e metodi dell'ingegneria dei sistemi di trasporto*, UTET, Torino.
- Catalano M., Lo Casto B., Migliore M. (2008), "Car sharing demand estimation and urban transport demand modelling using stated preference techniques", *European Transport*, 40, 33-50.
- Comune di Palermo (1997), *PUT - Piano Urbano del Traffico*.
- Comune di Palermo (2009), *PUT - Piano Urbano del Traffico*.
- D'Acerno L., Gallo M., Montella B. (2005), "Proprietà teoriche dei modelli di assegnazione multimodale nel caso di funzioni di costo non separabili", *Metodi e tecnologie dell'ingegneria dei trasporti - Seminario 2002* (a

- cura di) Cantarella G.E. e Russo F., Franco Angeli Editore, 2005, pp. 414-427.
- D’Acierno L., Gallo M., Montella B. (2006), “Optimisation models for the urban parking pricing problem”, *Transport Policy* 13, pp.34-38.
- D’Acierno L., Montella B., Gallo M. (2002), “Multimodal assignment to congested networks: fixed-point models and algorithms”, Proceedings of PTRC 2002 “European Transport Conference 2002”, Cambridge (UK) 9-11 September 2002.
- Di Giovanna M. (2009), “Un sistema di supporto alle decisioni per la progettazione ottimale del cordon pricing nelle aree urbane. Il caso studio di Palermo”, Tesi di laurea in Ingegneria Civile, Università degli Studi di Palermo.
- European Environment Agency (2005), *Indicator fact sheet - TERM 2005 25:EEA*, Copenhagen, Denmark.
- Flowerdew A.D.J. (1993), *Urban traffic congestion in Europe: road pricing and public transport finance*. Economist Intelligence Unit, London.
- Gattuso D. (1992), “Un modello di assegnazione dinamica della domanda di sosta. Applicazione per la valutazione del programma urbano parcheggi della città di Reggio Calabria”, *Modelli e metodi per l’analisi ed il controllo delle reti di trasporto* (a cura di) E. Cascetta e G. Salerno, Collana Trasporti, Ed. Franco Angeli, Milano, 1992.
- Gervasoni A., Sartori M. (2007), “Il road pricing: esperienze internazionali, costi, benefici e sostenibilità finanziaria”, *Liuc Papers*.
- Giacalone V. (2012), “Controllo e tariffazione degli accessi motorizzati”, Tesi di laurea in Ingegneria Civile, Università degli Studi di Palermo.
- Gomez-Ibanez J.A., Small K.A. (1994), “Road Pricing foe Congestion Management: A Survey of International Practice”, NCHRP Synthesis 210,

- Transportation Research Board*, National Academy Press, Washington D.C., 1994.
- Hensher D. A., King J. (2001), "Parking demand and responsiveness to supply, pricing and location in the Sydney central business district", *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 35(3), 177–196.
- Hess D.B. (2001), "Effect of free parking on commuter mode choice: Evidence from travel diary data", *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1753.
- Hess S., Polak J.W. (2004), "An analysis of parking behaviour using discrete choice models calibrated on SP datasets", ERSA conference papers, European Regional Science Association.
- Horni A., Nagel K., Axhausen K.W. (2011), "High-Resolution Destination Choice in Agent-Based Demand Models", *Arbeitsberichte Verkehrs- und Raumplanung*, 682, IVT, ETH Zürich, Zürich.
- Institute of Transport Economics, Oslo (1999), *Road pricing strategies for greater Oslo area*.
- Institute of Transport Studies (2000), *Pricing European Transport Systems, Final Report*, University of Leeds, European Transport Pricing Initiative.
- Jaensirusak S. (1999), *Urban road pricing: from theory to practice*, Department of Civil Engineering, Udon Rathathani University, Thailand.
- Kelly J. A., Clinch J. P. (2006), "Influence of varied parking tariffs on parking occupancy levels by trip purpose", *Transport Policy*, 13(6), 487–495.
- Kristian W. (2005), "Urban Tolling in Norway—Practical Experiences", *Social and Environmental Impacts & Plans for Future Systems*, Norwegian Public Roads Administration.
- Lam W.H.K., Li Z.C., Huang H.J., Wong S.C. (2006), "Modeling time-dependent travel choice problems in road networks with multiple user classes and

- multiple parking facilities”, *Transportation Research Part B* 40, 5, 368-395.
- Lewis N.C. (1994), *Road pricing: theory and practice*, Thomas Telford, London.
- Lo Burgio A., La Franca L., Ferrante G. (2012), “Valutazione dell’accessibilità con software open source”, *Le Strade*, n.8-9 Agosto-Settembre 2012, 68-71.
- Marcucci E., Marini M.A., Ticchi D. (2005), “Road pricing as a citizen-candidate game”, *European Transport*, ISTIEE, Institute for the Study of Transport within the European Economic Integration, issue 31, pages 28-45.
- Marsden G. (2006), “The evidence base for parking policies-A review”, *Transport Policy: Special Issue on Parking*, 13(6), 447-457.
- Martens K. (2005), “The effects of restrictive parking policy on the development of city centers”, Jerusalem: Ministry of Transport.
- MATSim-T (2012), Multi Agent Transportation Simulation Toolkit, webpage, <http://www.matsim.org>.
- McCarthy P.S., Tay R. (1993), “Pricing road congestion: recent evidence from Singapore”, *Policy Studies Journal*, II, 32.
- Mccarthy P.S., Tay R. (1993), “Pricing road congestion: recent evidence from Singapore”, *Policy studies journal*.
- Meister K., Balmer M., Ciari F., Horni A., Rieser M., Waraich R.A. , Axhausen K.W. (2010), “Large-scale agent-based travel demand optimization applied to Switzerland, including mode choice”, 12th World Conference on Transportation Research, Lisbon, July 2010.
- Migliore M. (1998), “Un modello d’ottimizzazione domanda-offerta nella sosta”, *Proc. 3rd Conf. Rilievi, modellizzazione e controllo del traffico veicolare*, Rende (Italy), 1998.

- Migliore M. (2002), "The perception of network congestion by using parking fees", International Conference on Urban Transport and the Environment in the 21st Century, Spain, 2002.
- Migliore M. (2005), Dispensa di Laboratorio sperimentale dei Trasporti, Università degli Studi di Palermo.
- Migliore M., Catalano M., Castelluccio F., Lo Burgio A., Di Giovanna M. (2013), "The latent factors behind the urban travel behaviour", EWGT2013 – 16th Meeting of the EURO Working Group on Transportation, Porto, Portugal, 4-6 September 2013.
- Migliore M., Catalano M., Lo Burgio A., Maritano L. (2012), "The analysis of urban travellers' latent preferences to explain their mode choice behaviour", *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 162, 193-203.
- Montella B., Gallo M., D'Acerno L. (2001), "Un modello di assegnazione multimodale su iper rete per la simulazione degli spostamenti di tipo Park and Ride", *Metodi e modelli per il trasporto pubblico locale* (a cura di) Podestà C. e Maja R., Franco Angeli Editore, 2001, pp. 175-197.
- Nagel K., Schreckenberg M. (1992), "Cellular automaton model for freeway traffic", *J. Physique I (Paris)* 2, 2221-2229.
- Pigou A.C. (1920), *The Economics of Welfare*, MacMillan London.
- Rodonò C. (2013), "Politiche di pricing per una mobilità sostenibile in ambito urbano. Il caso studio di Palermo", Tesi di laurea in Ingegneria Civile, Università degli Studi di Palermo.
- Salerno G. (2007), Manuale dell'utente AxE (Assegnazione per Esperti).
- SFpark (2013), SFpark, webpage, <http://sfpark.org>.
- Sheffi Y. (1985), *Urban Transportation Networks*, Prentice-Hall, Englewood, 1985, pp. xvi-399.

- Shiftan Y., Burd-Eden R. (2001), "Modeling response to parking policy transportation research record", *Journal of the Transportation Research Board*, 1765, 27-34.
- Shoup D. (2004), "Curb Parking: the ideal source of local public revenue", *Regional Science and Urban Economics*, 34, 6, 753-784.
- Shoup D. (2004), "The ideal source of local public revenue", *Regional Science and Urban Economics*, 34(6), 753-784.
- Shoup D. (2006), "Cruising for parking", *Transport Policy*, 13(6), 479-486.
- Shoup D. (2007), "Cruising for Parking", *Access*, No. 30, Spring 2007, pp.16-22.
- The County Roads Office, Trondheim (1993), *The Trondheim toll ring evaluation report*, The Municipality of Trondheim.
- Thompson R.G., Richardson A.J. (1998), "A Parking Search Model", *Transportation Research Part A* 32, 3, 159-170.
- Transport for London (2001), *The greater London (centre zone) congestion charging order*, London.
- Transport for London (2003), *Congestion charging - six month on*, London.
- Transport for London (2006), *Impacts monitoring: fourth annual report*, London.
- Transport for London (2007), *Impacts monitoring: fifth annual report*, London.
- Van Der Goot D. (1982), "A model to describe the choice of parking place", *Transportation Research*, vol. 16A, n.2, Pergamon Press, Washington (USA), 1982.
- Vickrey W. (1954), "The economizing of curb parking space", *Traffic Engineering*, November 1954, 62-67.

- Vickrey W. (1992), *Principles of Efficient Congestion Pricing*, Columbia University.
- Voith R. (1998), "Parking, transit, and employment in a Central Business District", *Journal of Urban Economics*, 44, 43–58.
- Vythoukcas P. (1991), *Evaluating the effects of road pricing during the morning peak*, University of Oxford, Oxford.
- Waraich R.A., Axhausen K.W. (2012), "An Agent-based Parking Choice Model", 91st Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., January 2012.
- Waraich R.A., Dobler C. and Axhausen K.W. (2012), "Modelling Parking Search Behaviour with an Agent-Based Approach", 13th International Conference on Travel Behaviour Research, Toronto, July 2012.
- Waraich R.A., Dobler C., Weis C., Axhausen K.W. (2012), "Optimizing parking prices using an agent based approach", Eidgenössische Technische Hochschule Zürich, IVT, Institute for Transport Planning and Systems (2012).
- Whittles M. (2003), *Urban road pricing: public and political acceptability*, Ashgate Pub Group, Basingstoke.
- Wigan M.R. (1971), *Benefit assessment of network traffic model and application to road pricing*, Crow Thorne: Library Services.
- Wigan M.R. (1973), *The effects of the network structure on the benefits derivable from road pricing*, Crow Thorne: Library Services.
- Willoughby C. (2001), "Singapore's motorization policies 1960-2000", *Transport Policy*.
- Zambrini M. (2007), *Esperienze di road pricing e pedaggio urbano in Europa*, Istituto di Ricerche Ambiente Italia.

Zatti A. (2001), *Sistemi di controllo e pagamento automatico degli accessi nei contesti urbani: electronic road pricing*, Università di Pavia.

Zecca E. (2001), *Il road pricing*, Bocconi, Milano.

SITI INTERNET CONSULTATI

Comune di Palermo
www.comune.palermo.it

AMAT Palermo S.p.A.
www.amat.pa.it

Comune di Milano
www.comune.milano.it

Istat, Istituto nazionale di statistica
www.istat.it

Land Transport Authority, Singapore
www.lta.gov.sg

Congestion Charging, , Regno Unito
www.cclondon.com

Transport for London, Regno Unito
www.tfl.gov.uk

Department for Transport, Regno Unito
www.dft.gov.uk

Norwegian Public Road Administration, Norvegia
www.vegvesen.no

Swedish Transport Administration, Svezia
www.trafikverket.se

Swedish Transport Agency, Svezia
www.transportstyrelsen.se

San Francisco Municipal Transportation Authority, Stati Uniti
www.sfpark.org

Wikipedia, enciclopedia libera e collaborativa
www.wikipedia.org