



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE, EDILE E AMBIENTALE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

TESI DI LAUREA

*Sistemi di trasporto "Personal Rapid Transit":
analisi tecnico-funzionale e prospettive di realizzazione*

Relatore: Prof. Claudio Meneguzzer

Laureanda: Anna Fasiol

Matricola: 1061241

ANNO ACCADEMICO

2013-2014

SOMMARIO

INTRODUZIONE	3
1. IL PERSONAL RAPID TRANSIT	5
1.1 Attuali problematiche nei sistemi di trasporto.....	5
1.2 Caratteristiche del PRT.....	6
1.2.1 Capacità.....	7
1.2.2 Headway.....	12
1.2.3 Velocità.....	14
1.2.4 Congestione.....	15
1.2.5 Sicurezza.....	16
1.2.6 Energia.....	16
1.2.7 Inquinamento.....	18
1.2.8 Impatto visivo.....	18
1.2.9 Rumorosità	20
1.2.10 Attrattività.....	20
1.2.11 Possibili applicazioni.....	22
1.2.12 Benefici collettivi	25
1.2.13 Costi.....	26
1.2.14 Difficoltà nello sviluppo.....	28
1.2.15 Opinioni.....	29
2. STORIA DEL PRT.....	31
3. CARATTERISTICHE FISICO-TECNOLOGICHE.....	39
3.1 Veicoli e motore	40
3.2 Guide	45
3.3 Stazioni	49
3.4 Scambi.....	52
3.5 Sistema di controllo e funzionamento a richiesta.....	56
4. DOMANDA	61
4.1 Importanza dei modelli di previsione	63
4.2 Le preferenze dichiarate: l'esperienza di Rotterdam	68

5. PROGETTO	73
5.1 Rete: algoritmi genetici	74
5.2 Stazioni: dimensionamento.....	81
5.3 Flotta:dimensionamento	85
6. ROUTING	89
6.1 Approcci sequenziali e adattivi.....	92
6.2 I veicoli vuoti.....	99
6.2.1 M/G/s.....	102
6.2.2 SNN	104
6.2.3 MDP	106
6.2.4 SV (BWNN+SNN).....	109
6.2.5 Un confronto tra i metodi di EVR	111
7. PROGETTI REALIZZATI	115
7.1 Morgantown	116
7.2 Masdar City, Abu Dhabi.....	119
7.3 Heathrow Airport.....	122
8. CONCLUSIONE.....	127
Bibliografia.....	131
Citazioni indirette	135

INTRODUZIONE

Utilizzare mezzi di trasporto rapidi, svincolati dalla congestione stradale, sicuri, poco inquinanti e personalizzati è un'esigenza sempre più sentita nel mondo di oggi dove i servizi di trasporto pubblico non sempre si contraddistinguono per efficienza, né riescono ad attrarre l'utenza in modo significativo, con la conseguenza che i potenziali passeggeri degli stessi sistemi di trasporto pubblico urbano, per scelta o per necessità, si affidano al mezzo privato. Una risposta possibile, ma a tutt'oggi scarsamente diffusa, a queste necessità viene dai cosiddetti Automated Transport Systems (ATS). Si tratta di mezzi di trasporto automatici che non richiedono la presenza di un conducente.

Questo lavoro si propone di presentare ed analizzare una tra le proposte di trasporto urbano automatizzato: il Personal Rapid Transit (PRT).

A partire da quelle che sono le esigenze del singolo utente e della collettività nell'ambito del sistema dei trasporti, il primo capitolo presenta alcune delle caratteristiche peculiari del PRT, analizzando anche le conseguenze e le ripercussioni che la sua introduzione comporta (o comporterebbe) nel tessuto urbano.

Il secondo capitolo tratteggia la storia del trasporto automatizzato di tipo PRT dalle origini negli anni '60 ad oggi. Il successivo analizza nel dettaglio i principali elementi costruttivi del sistema: veicoli, guide, scambi, stazioni e sistema di controllo.

A seguire si riportano, nel quarto capitolo, alcune considerazioni sulla modellazione della domanda, in particolare sulla difficoltà che si incontra nel prevederla e allo stesso tempo sull'importanza di riuscirvi.

La questione della progettazione viene affrontata nel relativo capitolo, in cui si presentano alcuni modelli che consentono il dimensionamento della flotta di veicoli, delle stazioni ed il progetto della rete.

Il sesto capitolo è dedicato alle strategie di *routing* sia per i veicoli vuoti che per quelli con passeggeri a bordo, facendo riferimento ad alcuni esempi di reti ideali, in fase di progettazione o realizzate.

Infine, un capitolo è dedicato ad una presentazione sintetica di tre reti PRT già realizzate.



1. IL PERSONAL RAPID TRANSIT

1.1 Attuali problematiche nei sistemi di trasporto

I mezzi di trasporto sono oggi in continua evoluzione nel tentativo di rispondere alle esigenze dell'utenza e la storia di ciascuno di essi ha origine generalmente da un'attenta analisi della realtà circostante, della domanda manifesta o latente e dei disservizi dei mezzi in attività.

Nel proporre innovazioni in tale settore lo scopo è generalmente quello di ridurre i costi, sia in termini economici che di tempo impiegato, dal momento che, sebbene la mobilità rappresenti un bisogno fondamentale, la finalità dello spostamento non è insita nello stesso, ma è quella di raggiungere località distanti nello spazio dove compiere attività di vario genere.

Fatte queste considerazioni si ritiene di dover fornire un quadro sintetico delle esigenze riscontrabili nel sistema dei trasporti attuale, per evidenziare quali caratteristiche deve possedere un nuovo mezzo per poter essere attrattivo per l'utenza e perché risultino giustificati gli investimenti nello studio e nelle tecnologie ad esso connesse.

Le questioni e problematiche a cui attualmente si chiede di rispondere sono principalmente: la forte dipendenza dai combustibili fossili del sistema trasportistico mondiale ed il conseguente surriscaldamento globale legato all'inquinamento, la congestione crescente sulle arterie viarie, l'uso eccessivo del suolo per la costruzione di nuove strade e parcheggi, la quantità rilevante di energia utilizzata nel settore trasportistico, la sicurezza stradale e il numero di vittime in incidenti d'auto, la dominanza delle automobili nel panorama dei mezzi di trasporto e la difficoltà che incontra chi non è in possesso di patente di guida nell'effettuare spostamenti in modo autonomo. (J. E. Anderson 2007)

Perciò ad un nuovo sistema di trasporto si richiede: che sia sostenibile, ovvero che possa operare con energia proveniente da fonti rinnovabili, che sia poco inquinante, che utilizzi porzioni limitate di terreno, che sia silenzioso, che abbia basso costo di realizzazione di modo che l'investimento possa essere coperto da tariffe ragionevoli, che sia sicuro, affidabile e comodo, attrattivo per tutti e utilizzabile anche da persone con disabilità, usufruibile 24 ore al giorno e 7 giorni su 7 e in ogni condizione meteorologica, che sia competitivo rispetto ad altri sistemi per prestazioni e svincolato dall'attuale congestione su strada. (J. E. Anderson 2007) (Buchnan, et al. 2005)

1.2 Caratteristiche del PRT



Figura 1. Veicolo PRT all'aeroporto di Heathrow (Jones 2007)

A partire dalle considerazioni sopra riportate, più di cinquant'anni fa nasce l'idea di un nuovo sistema di trasporto automatizzato, i cui primi prototipi in rete compaiono negli anni '70.

Si tratta del *Personal Rapid Transit* (PRT), un sistema di trasporto pubblico, anche detto Trasporto Personale Automatico (PAT), che per capacità e tipo di servizio (*on demand*, cioè su richiesta) viene accostato da molti autori al sistema dei taxi.

Il PRT appartiene alla famiglia degli APM (*Automated People Mover*), mezzi di trasporto pubblico di massa che in genere possono ospitare dalle 12 alle 100 persone (Gasparini 2005).

Tra questi il *Personal Rapid Transit* è stato poco sviluppato fino a quando non ha assunto una chiara definizione e connotazione grazie alla *Advanced Transit Association*, che nel 1988 ha elaborato un elenco delle caratteristiche che lo distinguono dagli altri APM (Gasparini 2005).

Il PRT è un sistema di trasporto a richiesta che permette all'utente di scegliere la propria destinazione e di raggiungerla, senza fermate intermedie, con veicoli piccoli e leggeri che corrono su una guida isolata e possono ospitare da due a sei passeggeri al massimo.

In altri termini esso costituisce, in un certo senso, un paradosso: è un sistema pensato per spostare grandi numeri di utenti, ma serve i passeggeri individualmente (Andréasson 2012).


I veicoli sono completamente automatizzati, non richiedono un conducente e sono controllati a distanza da un sistema computerizzato. Si muovono con ruote di gomma su una rotaia che può essere sopraelevata, a livello del suolo o sotterranea. A tal proposito si ritiene che la soluzione migliore sia una rete sopraelevata (J. E. Anderson 2007), meno costosa rispetto ad una sotterranea, e che permette al sistema di non subire interferenze da nessun altro tipo di veicoli, da animali o pedoni o ancora da ostacoli di altro genere, col vantaggio non indifferente di avere quindi una sede propria e isolata.

La possibilità di effettuare spostamenti senza soste intermedie è data dal fatto che le stazioni sono poste fuori linea. Perciò un veicolo che sia fermo alla stazione non ha alcun impatto sulla flotta circolante in rete. L'equipaggio di un veicolo è costituito da un gruppo limitato di passeggeri che condividono la stessa origine e destinazione. Perciò il viaggio è rapido e diretto.

Inoltre, la ridotta dimensione dei veicoli e la conseguente snellezza dell'infrastruttura garantiscono costi di costruzione contenuti. È così possibile realizzare reti capillari e di limitato impatto estetico.

I percorsi all'interno della rete non sono predefiniti, ma di volta in volta il sistema di controllo calcola il tragitto ottimale per contenere costi e tempi di viaggio, sfruttando procedimenti e algoritmi successivamente illustrati.

Un ulteriore vantaggio del PRT risiede nei tempi di attesa del servizio: un utente che arrivi alla stazione fuori ora di punta troverà quasi certamente un veicolo pronto alla partenza, mentre nel periodo di



massima affluenza dovrà attendere solo pochi minuti. Tutto ciò grazie ad una strategia di *routing* che interessa non solo i veicoli con passeggeri a bordo, ma che prevede una redistribuzione tra le varie stazioni degli stessi veicoli vuoti, proprio nell'intento di abbattere i tempi di attesa dell'utenza.

Qui di seguito sono elencati gli aspetti che caratterizzano il sistema PRT, alcuni dei quali lo pongono su un piano superiore rispetto ai mezzi di trasporto convenzionali. Si fa cenno anche alle possibili applicazioni delle reti, alle difficoltà di sviluppo riscontrate, ai benefici che si ritiene possa apportare agli utenti ed alla popolazione in generale e si riportano le opinioni riguardo a questo sistema di trasporto espresse da alcuni esperti del settore.

NOTA:

nel corso della presente trattazione si è fatto ricorso ad alcune convenzioni lessicali.

Ci si riferisce ai veicoli del sistema di Personal Rapid Transit in modo equivalente con i termini “veicolo” e “pod”, mentre “guida”, “binario”, “guideway” e “rotaia” si riferiscono alle strutture di sostegno dei veicoli, ovvero alle vie di corsa nelle loro differenti possibilità di realizzazione.

Con le espressioni “domanda” o “richiesta” si intende la domanda di trasporto espressa da uno o più passeggeri che condivideranno lo stesso mezzo.

Infine, “utente”, “viaggiatore”, “passeggero” e sinonimi non indicano necessariamente una sola persona fisica, ma indifferentemente da una a sei persone che possono costituire l'equipaggio del veicolo.

1.2.1 Capacità

Il successo di un nuovo sistema di trasporto dipende dalla capacità dello stesso di soddisfare la domanda dell'utenza e quindi dalla “capacità” nel senso trasportistico del termine. La difficoltà maggiore è certamente quella di stimare l'entità della domanda da soddisfare, come evidenziato nel capitolo 4. Per “capacità” si intende sia quella del singolo veicolo che della linea, e quest'ultima dipende dalle dimensioni del *pod*, dalla velocità e dall'*headway* minimo tra veicoli successivi. Inoltre, è necessario indagare anche quale dovrà essere la capacità delle diverse stazioni della rete.

J. E. Anderson (1998) propone un procedimento rapido per determinare la capacità delle stazioni e delle linee in una città con 12.000 abitanti per miglio quadrato (4.640 ab/kmq). Egli ritiene che la capacità di linea debba basarsi, oltre che sulla densità abitativa, anche sulla lunghezza totale della rete e sulla distanza media di percorrenza: è correlata alla dimensione dei veicoli e all'*headway* minimo. Basandosi sull'osservazione, l'autore sostiene che il dimensionamento di una linea deve prevedere tra i 1.000 e i 1.200 passeggeri all'ora. Egli osserva infatti come all'uscita dai parcheggi degli stadi dopo una partita, nel lasciare un parcheggio all'ora di punta, allo sbarco dei passeggeri da un 747 o all'orario di uscita dal luogo di lavoro,

non si verificano mai *headway* inferiori ai tre secondi tra un veicolo ed il successivo o tra un individuo e l'altro e dunque i flussi non superano mai la soglia indicata.

Oltre al dimensionamento basato sull'osservazione, Anderson propone anche un procedimento analitico qui di seguito riportato.

Si assume per ipotesi che la città in questione abbia una densità abitativa uniforme e che ogni abitante effettui in media, in un giorno lavorativo, tre spostamenti, il 10% dei quali avviene nell'ora di punta. Di conseguenza il numero totale di spostamenti nel periodo di massimo flusso per unità di superficie, per il quale deve essere dimensionato il sistema, è pari a circa 0,3 volte la densità abitativa.

Si considera poi una rete dalla semplice configurazione a griglia con maglie quadrate di mezzo miglio di lato, di modo che le guide siano distanziate così da poter ipotizzare che si trovino in corrispondenza di arterie viarie e che tutti gli abitanti non debbano percorrere più di un quarto di miglio (400 m) per portarsi alla stazione più vicina (questa conformazione di rete sembra ben adattabile alle città americane o alle città di nuova costruzione, meno a quelle europee).

Le stazioni sono pensate in posizione intermedia tra due intersezioni successive, a mezzo miglio di distanza l'una dall'altra.

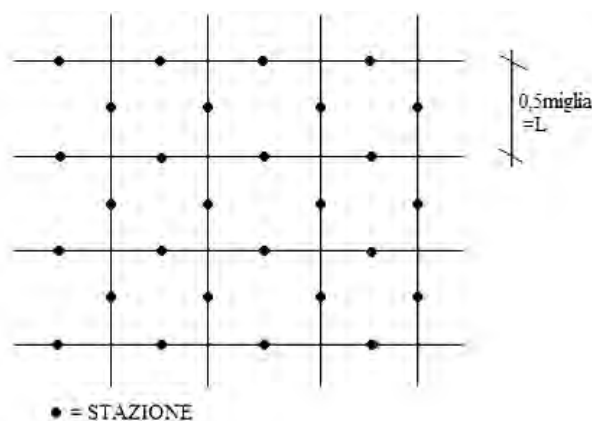


Figura 2. Esempio di rete a maglie quadrate

Con le ipotesi fatte, all'interno di una maglia della rete risiedono $12.000 \times 0,5^2 = 3000$ abitanti, per un totale di $0,3 \times 3.000 = 900$ spostamenti generati nell'ora di punta.

Dal momento che ogni stazione è condivisa tra due maglie, se tutti gli spostamenti fossero effettuati col PRT su ciascuna graviterebbero 450 passeggeri/ora.

Ipotizzando ora che solo il 50% degli spostamenti ricadano sulla rete PRT, ogni stazione dovrebbe essere dimensionata per 225 passeggeri/ora e sarebbe sufficiente perciò prevedere in ciascuna un solo stallo.

Il flusso medio per stazione è dunque ottenibile con la seguente formula:

$$\begin{aligned} \text{Flusso medio per stazione nell'ora di punta} &= \frac{1}{2} (\text{densità spostamenti}) L^2 \\ &= \frac{1}{2} 0,3 (\text{densità abitativa}) L^2 = 0,15 (\text{densità abitativa}) L^2 \end{aligned}$$

E risulta:

$$\text{Flusso medio sulla linea nell'ora di punta} = 0,15(\text{densità abitativa})L_{trip}$$

con L_{trip} che indica la lunghezza media degli spostamenti in rete.

Di seguito si motiva la precedente equazione.

Il numero dei veicoli in linea è pari al rapporto tra la lunghezza totale della linea stessa e la distanza media tra i veicoli. In alternativa può essere espresso come il rapporto tra il numero di passeggeri nell'unità di tempo per la durata media di viaggio nella stessa unità di tempo ed il tasso di occupazione medio del veicolo.

Ad esempio, se in una stazione A c'è un flusso in entrata di 60 persone al minuto, e tutte si spostano in B che dista 10 minuti di viaggio, il numero massimo di passeggeri sulla linea A-B è $60 \times 10 = 600$, dato che il primo a partire raggiunge B nell'istante in cui il sessantesimo passeggero parte da A. In altri termini si tratta di moltiplicare il flusso tra due stazioni per la durata del viaggio. Questo valore sarà poi diviso per il tasso medio di occupazione per ricavare il numero di veicoli.

Per trasferire al livello di rete il ragionamento fatto per A e B, è necessario ripetere il procedimento per ogni coppia di stazioni, ottenendo così il prodotto tra la domanda totale nell'unità di tempo e i tempi di viaggio pesati sulla medesima unità temporale.

Uguagliando le due espressioni si ottiene:

$$N \text{ veicoli} = \frac{DL_{trip}}{pV} = \frac{L_{line}}{H}$$

con

D domanda totale del sistema (viaggi/unità di tempo) pari a dA con d numero viaggi all'ora per miglio quadrato, cioè densità di spostamenti, e A area in miglia quadrate servita dal sistema;

L_{trip} lunghezza media di viaggio;

p numero medio di persone per veicolo;

V velocità media;

L_{line} lunghezza totale di sviluppo unidimensionale della rete;

$H = hV$ distanza media tra i veicoli:

h headway medio.

Sostituendo H con hV , moltiplicando entrambi i termini per pV e dividendoli per L_{line} si ottiene:


$$\frac{DL_{trip}}{L_{line}} = \frac{p}{h}$$

Risulta

$$\frac{p}{h} = \text{flusso medio di linea} = \frac{DL_{trip}}{L_{line}}$$

essendo p/h il rapporto tra passeggeri per veicolo e intertempo veicolare, cioè il numero di passeggeri nell'unità di tempo e dunque il flusso sulla linea.

Si ha poi



$$L_{line}(\text{per un quadrato di rete}) = 4 \times L \times \frac{1}{2} = 2L$$

dal momento che ogni lato è condiviso tra due quadrati.

Sull'intera area A:

$$L_{line}(A) = \frac{2LA}{L^2} = \frac{2}{L}A$$

Sostituendo:

$$\text{Flusso medio sulla linea nell'ora di punta} = \frac{dAL_{trip}}{\frac{2}{L}A} = \frac{1}{2}dLL_{trip}$$

che coincide con la formula che volevamo dimostrare per $d = 0,3 \times$ densità abitativa.

Nell'esempio esposto, considerando $L_{trip} = 5$ miglia si ottiene:

$$\begin{aligned} \text{Flusso medio sulla linea nell'ora di punta} &= \text{Flusso medio in stazione nell'ora di punta} \times \frac{L_{trip}}{L} \\ &= 225 \frac{5}{0,5} = 2.250 \text{ persone/ora} \end{aligned}$$

Nel caso di un tasso di occupazione di 1,2 passeggeri per veicolo, ciò corrisponde ad una flotta di 1.875 veicoli ($2.250/1,2$), garantita se l'*headway* è di 1,92 s ($3.600/1.875$).

Nel dimensionamento di cui sopra si è però supposta una domanda uniforme; nel caso realistico in cui questo non accadesse, l'intertempo veicolare minimo sarebbe inferiore a quello indicato, e molto minore considerando che in linea circolano anche veicoli vuoti, qui non conteggiati.

Il dimensionamento di massima riportato sin qui permette di avere un'idea generale della capacità di linea e delle stazioni di una rete.

Riguardo alla capacità delle stazioni, Skyweb Express riporta i seguenti valori orari in funzione del numero di stalli previsti: (University of Washington s.d.)

STALLI	VEICOLI/ORA
3	350-450
6	675-775
9	950-1.050
12	1.150-1.250

Perciò, in una rete di 10 km con 20 stazioni di cui cinque con 3 stalli, cinque con 6, cinque con 9 e altrettante con 12, la capacità totale è di 15.000 veicoli all'ora ospitabili nelle stazioni, corrispondenti a meno del 3% della capacità globale del sistema secondo il *Wilbur Smith Associates Study 2007*.

La capacità di un veicolo di PRT Skyweb Express è invece di tre adulti seduti ai quali possono aggiungersi due bambini, grazie a due sedili pieghevoli. In alternativa, un veicolo può trasportare una persona con la bicicletta o due persone con bagagli, o ancora due persone con un passeggino o una persona su sedia a rotelle con un accompagnatore. (J. E. Anderson 2007)

La capacità di linea, se si considerano veicoli a quattro posti con *headway* di 2s, è di 7.200 persone/ora, che realisticamente si riduce a 2.700 se si considera un tasso di occupazione media del veicolo di 1,5.

Tale capacità può essere solo teoricamente realizzata con una linea di autobus, considerando che quest'ultimi hanno *headway* superiori, ma anche una maggiore disponibilità di posti per veicolo.. Comporterebbe infatti circa 30 autobus/ora, cioè un passaggio ogni 2 minuti.

Un'analogia con gli autobus è la seguente: in entrambi i sistemi, nell'ora di punta, circa un terzo dei veicoli si sposta vuoto per poter ritornare alla stazione o alla fermata generatrice della maggior domanda (RailSystem.net s.d.).

Se confrontiamo il PRT con la metropolitana leggera (J. E. Anderson 2007) osserviamo che quest'ultima, con *headway* di circa 6 minuti in media e una capacità veicolare di 400 persone, ha una capacità di linea inferiore: il PRT può avere flussi di 120 passeggeri al minuto, pari a 720 viaggi in 6 minuti.

La capacità di linea del PRT viene approssimata pertanto a quella di tre corsie autostradali: una corsia in autostrada ammette flussi di 2.000 veicoli/ora che corrispondono a 7.200 persone considerando un tasso di occupazione di 1,2 passeggeri/veicolo, la rete PRT può ammettere 7.200 passeggeri (J. E. Anderson 2007), (University of Washington s.d.), (Taxi2000 Corporation 2007).

Nella tabella e nel grafico riportati di seguito il sistema è messo a confronto con altri mezzi di trasporto rispetto alla capacità di linea e, in tabella, ad altri parametri caratteristici (Viability of Personal Rapid Transit in New Jersey (Final Report) 2007).

Mode	Heavy Rail	Light Rail	Busway	PRT
Headway (sec)	120 - 200	60 - 360	15-300	0.5 - 3
Vehicle/Train Capacity	360 - 3000	240 - 360	40-70	3-6
Theoretical Line Capacity <i>1k Persons/hour</i>	6-90	2-20	0.5 - 16	3.6 - 28
Peak Load Factor	0.4- 0.8	0.5-0.7	0.3 - 0.6	0.2- 0.5
Observed Line Capacity <i>1k Persons/hour</i>	6 -50	1- 10	1- 11	1- 9

Tabella 1 (Viability of Personal Rapid Transit in New Jersey (Final Report) 2007)



Figura 3 (Viability of Personal Rapid Transit in New Jersey (Final Report) 2007)

L'impressione che si ricava da questi dati è che il PRT sia competitivo, per capacità di linea, sia con gli autobus che con la metropolitana leggera se si guarda ai valori attesi per il primo e a quelli osservati per gli altri due.

1.2.2 Headway

Con il termine “*headway*” si intende l’intervallo di tempo che intercorre tra il transito di un veicolo e quello di uno immediatamente successivo attraverso una certa sezione della guida.

Fin dall’inizio della storia del PRT si è scelto di puntare a incrementare la capacità del sistema riducendo gli *headway*. Poiché i veicoli sono piccoli e possono ospitare a seconda del modello dai due ai sei passeggeri, l’aumento della capacità di linea dipende essenzialmente dall’intervallo di tempo tra i veicoli e dalla velocità.

Grazie alla totale automatizzazione del sistema e all’uso di motori ad induzione, il cui funzionamento non è influenzato dalle condizioni atmosferiche né dall’aderenza delle ruote sulla guida, nell’arco degli anni, grazie all’evoluzione tecnologica, è stato possibile ridurre gli *headway* a valori inferiori al secondo: Taxi2000 indica un valore di 0,5s per i suoi veicoli, mentre per i *pod* destinati al trasporto merci l'*headway* raggiunge i 2,5s (University of Washington s.d.).

J. E. Anderson (2010) propone alcune considerazioni sul minimo spazio tra due veicoli successivi e su come questo può essere ottenuto nel sistema PRT rispetto a quanto avviene nei sistemi ferroviari.

L’autore assume come minima distanza di sicurezza tra due veicoli la differenza tra la maggior distanza di arresto in caso di frenata di emergenza e la più breve distanza di arresto in caso di guasto. In altre parole tale distanza deve permettere, qualora un veicolo si arresti con una forte decelerazione, che il successivo abbia il margine spaziale necessario per rallentare e fermarsi senza entrare in collisione.

La distanza di sicurezza è calcolata come la differenza tra gli spazi percorsi dai due veicoli con moti uniformemente decelerati:

$$H_{min} = Vt_c + \frac{V^2}{2} \left(\frac{1}{A_e} - \frac{1}{A_f} \right)$$

Indicando con:

H_{min} la distanza di sicurezza corrispondente all'headway minimo;

V la velocità in linea, generalmente compresa tra 40 e 50 km/h, circa 13 m/s;

t_c il tempo necessario all'attivazione del sistema frenante, dato dal tempo impiegato per realizzare una doppia trasmissione tra veicolo e centro di controllo. Il primo trasmette continuamente la propria posizione e la velocità al sistema centrale e quando quest'ultimo rileva un'anomalia, trasmette il comando di frenata.

Dato che per una comunicazione sono richiesti circa 40 ms, per il doppio scambio di informazioni servono 80 ms, approssimati a 100 ms. L'autore assume $t_c = 200 \text{ ms} = 0,2 \text{ s}$ in favore di sicurezza;

A_e la decelerazione minima in caso di frenata di emergenza;

A_f la massima decelerazione possibile in caso di arresto.

Assunta pari ad L la lunghezza del veicolo, dalla precedente si ricava l'headway T_{min} :

$$T_{min} = \frac{L + H_{min}}{V} = \frac{L}{V} + t_c + \frac{V}{2} \left(\frac{1}{A_e} - \frac{1}{A_f} \right)$$

Si osservi che per ridurre il valore di T_{min} è necessario limitare L . I veicoli devono quindi essere i più corti possibile.

Se si assume $L = 2,6 \text{ m}$, il primo addendo della somma è $\frac{L}{V} = \frac{2,6}{13} = 0,2 \text{ s}$.


Avendo posto $t_c = 0,2 \text{ s}$, risulta $\frac{L}{V} + t_c = 0,4 \text{ s}$.

Per ottenere un headway di 0,5 s, il terzo addendo $\frac{V}{2} \left(\frac{1}{A_e} - \frac{1}{A_f} \right)$ deve essere pari a 0,1 s, cioè circa zero. Ne deriva $A_e = A_f$. I due veicoli quindi devono avere la stessa decelerazione.

Anderson sottolinea il fatto che in ambito ferroviario A_f assume valore infinito: è infatti contemplata la possibilità di un arresto istantaneo di un convoglio in linea, che può essere causato dalla presenza di un corpo estraneo sui binari o di un treno fermo.

Di conseguenza la distanza minima tra convogli che garantisce la sicurezza della circolazione è ottenuta con headway elevati.

Non così per i sistemi di PRT. Infatti, in quest'ultimi si esclude la possibilità che si verifichino arresti quasi istantanei. Anderson giustifica tale assunzione considerando le cause di una brusca frenata in linea e le possibilità che abbiano luogo: un veicolo che non sia preceduto da altri sulla guida potrebbe essere indotto all'arresto dalla presenza di un oggetto sul binario o per effetto di una collisione in corrispondenza di uno scambio divergente.



L'eventualità che vi siano oggetti in linea è minima: essendo la guida sopraelevata, diversamente da quanto accade in ferrovia, è improbabile che un corpo esterno si trovi sui binari e la possibilità che tale oggetto sia rappresentato da una parte meccanica staccatasi da un altro veicolo è ridotta da un'attenta e puntuale manutenzione. Di conseguenza, è altamente improbabile che l'eventuale arresto sia dovuto alla presenza di oggetti sulla guida.

Alla seconda eventualità, ovvero alla collisione ad uno scambio, può essere attribuita una probabilità di accadimento nulla, poiché i tempi di ritorno dell'evento sono molto elevati.

Nel caso in cui i veicoli in linea siano più di uno, vi sono due possibili cause di collisione: un guasto in fase di ingresso in stazione che impedisce l'arresto negli spazi destinati allo scopo e porta all'urto dei veicoli fermi, e una collisione in corrispondenza di uno scambio convergente. Entrambe le eventualità sono altamente improbabili grazie al sistema di controllo automatico centralizzato e alla sicurezza garantita in frenata dai motori lineari ad induzione (LIM).

Di conseguenza, non esistono motivi che giustifichino un arresto istantaneo.

In ogni caso, nell'estrema eventualità in cui dovesse avvenire una collisione, i veicoli sono provvisti di ammortizzatori che garantiscono l'assorbimento della maggior parte dell'energia d'urto, ed il fatto che i passeggeri siano tutti seduti riduce i rischi connessi ad uno scontro.

In definitiva è possibile considerare uguali le decelerazioni di due veicoli consecutivi ($A_e = A_f$) e ottenere intertempi veicolari di frazioni di secondo (J. E. Anderson, Control of Personal Rapid Transit Systems 2010).

1.2.3 Velocità

La maggior parte dei progetti, sia realizzati che teorizzati, prevede velocità massime dei veicoli in linea comprese tra i 40 e i 70km/h (Anderson J. E., 2010). Tale valore appare confrontabile per esempio con le velocità degli autobus, ma bisogna considerare che un veicolo di PRT non effettua fermate intermedie grazie al posizionamento fuori linea delle stazioni e al funzionamento a richiesta e non è quindi soggetto alle frequenti accelerazioni e decelerazioni che invece caratterizzano autobus, tram, metropolitane e treni. Ne guadagna la velocità media di percorrenza.

Dal punto di vista del passeggero i tempi di viaggio complessivi sono ridotti anche in virtù della vicinanza tra le stazioni che possono essere anche a 250-400m l'una dall'altra (J. E. Anderson 2007) riducendo di molto i tempi necessari per raggiungere sia l'origine dello spostamento su guida che la propria destinazione ultima dalla stazione di arrivo.

I guadagni di tempo nelle diverse fasi di avvicinamento alla stazione di origine, attesa del mezzo, viaggio e spostamento verso la destinazione ultima garantiscono una velocità media complessiva elevata anche considerando il trasferimento nella sua interezza.

Un sistema di PRT inoltre, rispetto ai sistemi di trasporto tradizionali, ha un vantaggio ulteriore: se prendiamo ad esempio le linee urbane degli autobus, non è infrequente che per realizzare uno spostamento l'utente sia costretto a cambiare mezzo se la sua origine e la destinazione non sono sulla medesima linea. Ciò

causa maggiori tempi di percorrenza e di attesa. Con una rete di PRT si ha la garanzia di un percorso unico e diretto fino a destinazione.

Di conseguenza, dal momento che la velocità media è fatta dipendere dal numero delle fermate, dalla distanza tra di esse, dal tempo di sosta in ciascuna, dalla velocità massima in linea e dalla lunghezza del percorso, un veicolo PRT può essere dall'80% al 100% più veloce di un autobus e dal 20% al 30% più dei mezzi su ferro (Viability of Personal Rapid Transit in New Jersey (Final Report) 2007). Il grafico in figura mostra un confronto tra le velocità medie di diversi mezzi di trasporto urbano.

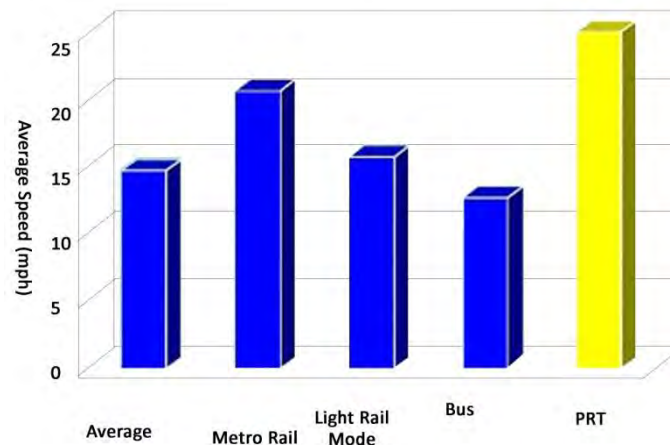


Figura 4. Velocità media in miglia orarie per diversi mezzi di trasporto (Viability of Personal Rapid Transit in New Jersey (Final Report) 2007)

Il confronto con una linea di metropolitana indica che un percorso di 12,9 km può essere compiuto in 24 minuti in metro e in soli 20,9 minuti con il PRT, grazie ad una velocità media di circa 37 km/h rispetto a quella di 32,2 km/h della metropolitana (Juster e Schonfeld 2013).

Esistono infine dei progetti di alta velocità che propongono reti PRT sulle quali i veicoli possono raggiungere dai 100 ai 240km/h, ma questi non sono stati approfonditi né testati e non sono ben definite le applicazioni di un sistema di questo genere (RailSystem.net s.d.).

1.2.4 Congestione

Un sistema di Personal Rapid Transit si propone di trasferire parte del traffico stradale sui mezzi pubblici candidandosi come mezzo complementare a quelli già presenti sul territorio nel tentativo di garantire un servizio più capillare e di creare connessioni tra fermate di autobus, tram, metro e treni.

L'obiettivo dichiarato è di ridurre la congestione su strada rendendo il sistema attrattivo per gli automobilisti con tempi di percorrenza bassi, spostamenti origine-destinazione, convenienza economica e comodità (J. E. Anderson 2007).

Il PRT si propone quindi come un metodo alternativo alla costruzione di nuove strade, ponti e gallerie per risolvere il problema della crescente congestione stradale.

A livello teorico una linea ha la capacità sufficiente per sostituire tre corsie autostradali (J. E. Anderson 2007), ma l'obiettivo concreto è di trasferire poco più del 20% degli spostamenti effettuati in auto in ambito urbano sulle guide sopraelevate (Taxi2000 Corporation 2007).

1.2.5 Sicurezza

La sicurezza del sistema è garantita dal controllo automatizzato che elimina i rischi connessi all'errore umano: non essendo presente un conducente, è rimessa ad un'elaborata rete di computer che possono contare sull'affidabilità dei motori lineari ad induzione. Grazie a quest'ultimi i veicoli sono in grado di circolare anche su superfici ghiacciate od innevate indipendentemente dalle condizioni di aderenza tra ruote e guida, e mantenendo costanti le distanze di arresto. Inoltre, il tempo di reazione che nella guida manuale varia tra 0,3 e 1,7 secondi è ridotto a pochi millisecondi (J. E. Anderson 2007).

Il sistema risulta dunque nel complesso più sicuro dei mezzi su strada. Ne è un esempio la rete di Morgantown, nel West Virginia, dove in quarant'anni di operatività non si è mai verificato un incidente significativo (West Virginia University s.d.).

Per assicurare il corretto funzionamento dei dispositivi di sicurezza è necessario pianificare controlli periodici sui computer di bordo, sui dispositivi del veicolo e sulla guida. Con queste procedure si garantisce l'incolumità del passeggero e si riduce il rischio di incidenti ad un valore così basso da poter essere accettato (J. E. Anderson, Control of Personal Rapid Transit Systems 2010).

La sicurezza degli utenti è poi garantita da dispositivi antincendio, uscite di sicurezza apribili sia dall'interno che dall'esterno a veicolo fermo e da telecamere a circuito chiuso installate a bordo. Inoltre ciascun veicolo, qualora fosse necessario, permette al passeggero di mettersi in comunicazione con un centralino che gestisce l'emergenza e può dirottare il veicolo alla fermata più vicina per prestare soccorso al viaggiatore in caso di malore o può far raggiungere l'ospedale più vicino nel caso in cui la situazione lo esiga e la rete lo consenta.

1.2.6 Energia

Sotto il profilo energetico si ritiene che il consumo di un veicolo di PRT sia pari a circa un quarto di quello di un'autovettura (J. E. Anderson 2007) (personalrapidtransit.com s.d.) con la quale può essere comparato se si considera che il sistema in esame ha una capacità pensata proprio sulla base di quella delle auto, il cui tasso di occupazione è oggi di circa 1,2 passeggeri per veicolo per la componente di mobilità sistematica. Quest'ultimo dato ha portato a dimensionare i *pod* (Anderson J. E., 1996).

I veicoli possono utilizzare batterie o essere alimentati da linee elettriche; i motori lineari ad induzione sono altamente efficienti e poco o per nulla inquinanti. Esiste poi una possibilità concreta di ricavare l'energia da fonte rinnovabile: si pensa infatti di alimentare i mezzi sfruttando l'energia solare, ponendo su di essi dei pannelli fotovoltaici. Il tutto sarebbe agevolato dalla posizione sopraelevata delle guide sulle quali si muovono i *pod*. (University of Washington s.d.).

Un indicatore utile per misurare l'efficienza energetica è il fattore di carico o tasso di occupazione. Si tratta del rapporto tra passeggeri che in media occupano effettivamente il veicolo e la capacità massima del mezzo stesso. Il massimo fattore di carico è del 100%, situazione ideale in cui tutti i veicoli viaggiano a pieno carico. Si ritiene (RailSystem.net s.d.) che il PRT massimizzi tale fattore rispetto ad altre modalità di trasporto, riducendo al minimo il consumo energetico per passeggero per unità di lunghezza.

Per fare un esempio, i veicoli ULTra della britannica *Advanced Transport Systems* (ATS Ltd) hanno un consumo per passeggero per chilometro di 0,5 MJ, pari a 839 BTU per miglio contro le 3496 BTU di un'autovettura media e le 4318 BTU per passeggero per miglio di un autobus (RailSystem.net s.d.).

Skyweb Express indica nelle schede tecniche che sono sufficienti meno di 125 Wh al chilometro per far viaggiare un veicolo e 2,5 kWh se si include anche l'alimentazione degli impianti di condizionamento e riscaldamento di bordo (Taxi2000 Corporation 2007).

Inoltre i *pod* viaggiano solo se necessario, a differenza di altri sistemi di trasporto pubblico come treni, metropolitane o autobus, che si spostano anche senza passeggeri per garantire il servizio con una frequenza prefissata.

Da un confronto tra otto diversi mezzi di trasporto urbano rispetto al consumo energetico per passeggero per miglio emerge la convenienza del PRT. Nel grafico riportato in figura 5 sono posti a confronto la metropolitana leggera (LR), la metropolitana pesante (HR), il filobus (TB), l'autobus (MB), il vanpool (VP), il dial-a-bus (DB), l'auto (A) e appunto il PRT (PR). I dati rappresentati nel grafico stesso provengono da fonti federali americane. Il dettaglio indica l'incidenza delle diverse componenti del consumo: costruzione (build), impianto di condizionamento/ventilazione/riscaldamento (HVAC), resistenza aerodinamica (air drag), resistenza al rotolamento sulla via di corsa (road) e energia cinetica (kinetic) (J. E. Anderson 2007).

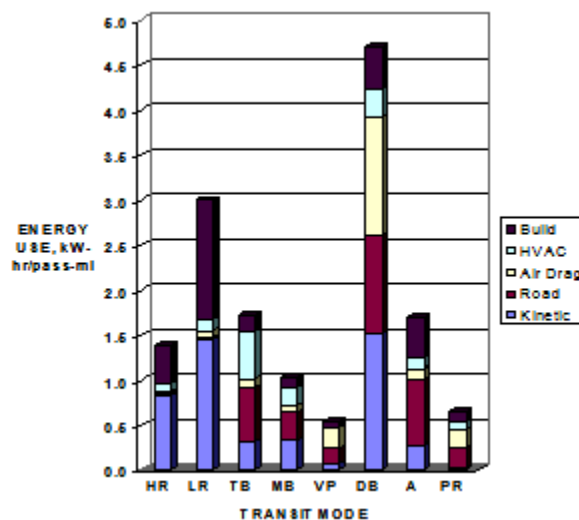


Figura 5. Consumo energetico per passeggero-miglio (J. E. Anderson 2007)

L'efficienza energetica del PRT è tale per il fatto che la velocità in linea ha un profilo prevalentemente costante, perciò l'incidenza delle accelerazioni e decelerazioni è limitata alle fasi di avvio ed

arresto. Inoltre è possibile recuperare l'energia di frenata grazie ad appositi dispositivi sul veicolo (Buchnan, et al. 2005).

1.2.7 Inquinamento

I sistemi di PRT non si propongono di sostituire in tutto e per tutto le automobili, né la ferrovia o le linee di autobus.

Nell'inserirli nei contesti urbani l'obiettivo è quello di incentivare un cambiamento modale, di portare la maggior parte possibile di automobilisti sulle reti di trasporto pubblico e di rendere queste ultime più attrattive rendendo disponibili collegamenti veloci tra i principali nodi di traffico.

Oltre a ridurre la congestione su strada ciò implica una diminuzione delle emissioni inquinanti tanto maggiore quanto più numerosi saranno gli automobilisti che utilizzeranno il nuovo sistema di trasporto automatizzato. È dunque nell'interesse delle molte città che soffrono del problema dell'inquinamento atmosferico investire su mezzi elettrici ad emissioni zero per trasferire il traffico sui *pod* e ridurre l'inquinamento (Juster e Schonfeld 2013).

Gli ATS, e tra questi anche il PRT, sono stati al centro del progetto CityMobil promosso dall'Unione Europea nel 2005 che ha portato anche all'attuazione di alcuni progetti tra il 2007 e il 2013 in tutta Europa per diffondere la conoscenza degli ATS e studiarli concretamente sul campo. L'obiettivo era di sviluppare le nuove tecnologie di trasporto urbano per ridurre l'inquinamento e la congestione stradale, oltre ad individuare i principali ostacoli che impediscono la diffusione dei mezzi automatizzati (van Dijke e van Schijndel 2012).

Possiamo affermare che quello della riduzione delle emissioni inquinanti è non solo un vantaggio concreto e misurabile che deriva dall'utilizzo di mezzi di locomozione automatizzati ed elettrici, ma è anche una questione molto sentita dalle amministrazioni locali, dagli enti nazionali e sovranazionali e può dunque rappresentare un aspetto che potrà indurre i soggetti competenti a considerare l'opportunità di realizzare un sistema di trasporto ecologicamente sostenibile come il PRT.

Alcuni dati a riguardo sono forniti da Skyweb Express per conto di Taxi2000 (Taxi2000 Corporation 2007). La società propone una stima della riduzione delle emissioni di CO₂ che deriverebbe dallo spostamento modale dall'auto al PRT in una città con 1,8 milioni di abitanti in cui sia realizzata una rete completa. Stimando ottimisticamente che il 24% degli spostamenti siano compiuti con il PRT, si otterrebbe un risparmio di 2.060 miliardi di litri di benzina, corrispondenti a circa cinque miliardi di chili di CO₂ in meno nell'atmosfera (4,754 miliardi di chili se si considera che un litro di benzina produce 2380 g (Quattroruote s.d.) di CO₂; 5,459 miliardi se a gasolio con fattore di 2650 g per litro).

1.2.8 Impatto visivo

Quella dell'impatto visivo è da più parti riconosciuta come la principale problematica relativa alla realizzazione di una rete di Personal Rapid Transit (J. E. Anderson 2007). D'altra parte se le reti metropolitane sono prevalentemente sotterranee il motivo è anche quello di nasconderle alla vista.

Le guide sopraelevate, per quanto di dimensioni ridotte, sono fortemente impattanti. Alcune scelte progettuali, come quella di ridurre la sezione della guida il più possibile o di utilizzare sistemi da scambio a bordo del veicolo per permettere sezioni divergenti e convergenti visivamente accettabili e dimensionalmente contenute, oltre a ridurre i costi limitano l'impatto visivo, ma ciò non è sufficiente ad eliminare il problema.



Figura 6 Viale alberato con guida PRT (University of Washington s.d.)

Data la delicatezza della questione, le città che richiedono valutazioni tecniche rispetto all'opportunità di realizzare una rete sopraelevata spesso approfondiscono l'impatto che tale rete potrebbe avere sull'aspetto urbano e ricercano soluzioni per inserire in modo esteticamente accettabile le guide e i pilastri che le sostengono nell'ambiente circostante.

È il caso, tra gli altri, di uno studio svedese del 1994 che esamina l'impatto visivo di una rete sulla città di Gavle, proponendo alcuni disegni, due dei quali sono qui riportati nelle figure 6 e 7. Tra le soluzioni proposte c'è quella di inserire le guide sopraelevate nei viali alberati della città di modo che risultino confuse tra le chiome degli alberi e che sia possibile realizzare percorsi pedonali ombreggiati al di sotto delle stesse. Altre considerazioni, corredate da schizzi, riguardano i pilastri che possono combinare la funzione di sostegno con quella di illuminazione stradale o di porta biciclette (University of Washington s.d.).

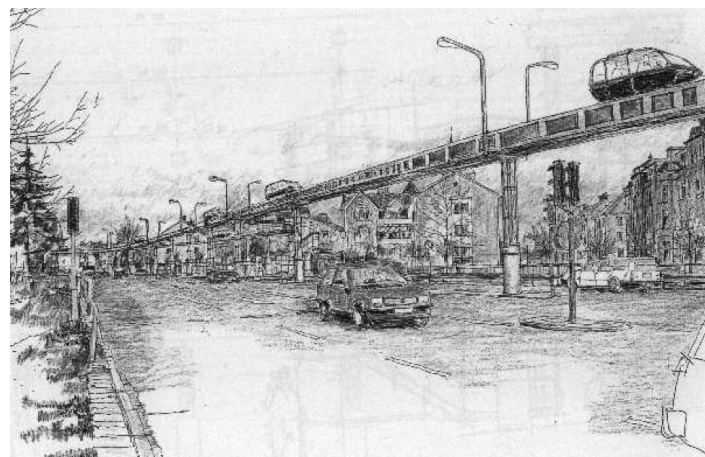


Figura 7 Rete PRT a Gavle (University of Washington s.d.)

1.2.9 Rumorosità

Un notevole vantaggio del PRT su altri mezzi come il treno, il tram o l'autobus è la sua silenziosità. Come evidenziano Juster & Schonfeld (2013) il merito sta nell'aver assemblato le migliori caratteristiche di altri mezzi: le ruote gommate degli autobus ed il motore elettrico delle metropolitane e dei tram. Il risultato è una rumorosità che si attesta su valori pari ai due terzi di quelli di bus e metro: le ruote gommate possono correre su guide lisce limitando le emissioni sonore ed il motore elettrico ad induzione, sebbene produca vibrazioni che possono essere ridotte se questo viene opportunamente posizionato, è molto meno rumoroso di un motore tradizionale.

Non vi sono sul veicolo altri elementi che producano rumori o vibrazioni non essendo previsti sistemi frenanti sulle ruote (Juster e Schonfeld 2013).

D'altra parte la silenziosità appare una condizione vincolante in un sistema che prevede vie sopraelevate che portano i veicoli molto vicini ai primi piani degli edifici; un mezzo rumoroso, per quanto efficiente ed energeticamente sostenibile, non potrebbe incontrare il favore della popolazione.

1.2.10 Attrattività

Le reti di Personal Rapid Transit sono concepite per essere attrattive e quindi spostare le scelte modali di parte degli utenti dall'automobile al PRT.

Tra gli elementi che le rendono competitive con le autovetture c'è il fatto che conducono il passeggero direttamente a destinazione e come afferma un documento della skyweb express "i passeggeri usano il trasporto pubblico solo se li porta dove vogliono andare" (University of Washington s.d.).

Il fatto di non dover cambiare veicolo per raggiungere la destinazione è molto rilevante: secondo una ricerca dell'università del Minnesota citata da Anderson (1998), un minuto perso per un trasferimento equivale, per un passeggero, a sei-dieci minuti in viaggio.

Inoltre, le stazioni possono non distare più di trecento o quattrocento metri tra loro. Di conseguenza l'utente del servizio non dovrà camminare a lungo per raggiungere la più vicina al proprio posto di lavoro o alla propria abitazione.

Anderson (2010) propone di misurare l'affidabilità del sistema in termini di percentuale di utenti che subiscono ritardi rispetto ai tempi di viaggio minimi richiesti per i vari spostamenti. L'autore propone il concetto di *dependability*, misurabile dai computer che controllano il sistema: si tratta del rapporto tra persone che subiscono ritardi nell'arco di un'ora e il numero totale di utenti che accedono al sistema nella stessa unità di tempo. L'efficienza del sistema può essere dimostrata quando questo parametro è contenuto.

I tempi d'attesa contenuti o assenti, il fatto che la durata del viaggio sia nota quasi con certezza e che il servizio sia a disposizione ventiquattr'ore al giorno sono tutti elementi che possono indurre un consistente cambiamento modale.

I veicoli inoltre sono confortevoli: garantiscono un posto a sedere ad ogni passeggero e non possono essere affollati oltre la loro capacità dichiarata, in aggiunta la superficie di corsa regolare e i limiti imposti

alle accelerazioni e decelerazioni determinano un elevato comfort di viaggio. Si tratta di mezzi sicuri, poco indicati come obiettivo terroristico o di sabotaggi.

I passeggeri godono di privacy e possono decidere se e con chi condividere il tragitto ad esempio impostando una fermata intermedia dove far salire a bordo un compagno di viaggio che li attendeva.

Inoltre, il funzionamento dell'intero sistema è semplice ed immediato: arrivando in stazione l'utente può consultare una mappa della rete sulla quale sono indicate le fermate. Con una card può accedere al sistema e selezionare la propria destinazione scegliendo il numero corrispondente o la posizione sulla mappa e la tessera può memorizzare le destinazioni più frequenti per proporle al viaggiatore come opzione preferenziale (J. E. Anderson 2007). La stessa tessera verrà poi inserita anche per accedere al veicolo che memorizzerà così la destinazione. A bordo poi ci sono solo tre pulsanti: "go" per dare il via allo spostamento, "stop" per arrestare il veicolo alla fermata più vicina e "emergency" per contattare un operatore che può intervenire in caso di emergenza e addirittura dirottare il veicolo verso altre fermate (University of Washington s.d.).

La tariffa può essere studiata per indurre i passeggeri a condividere i veicoli ed innalzare quindi il tasso medio di occupazione degli stessi, se applicata non al singolo utente ma al veicolo (Andréasson 2012).

Infine il sistema è accessibile per tutti: bambini, anziani e disabili non incontrano difficoltà e non è richiesta patente di guida né alcuna competenza particolare.

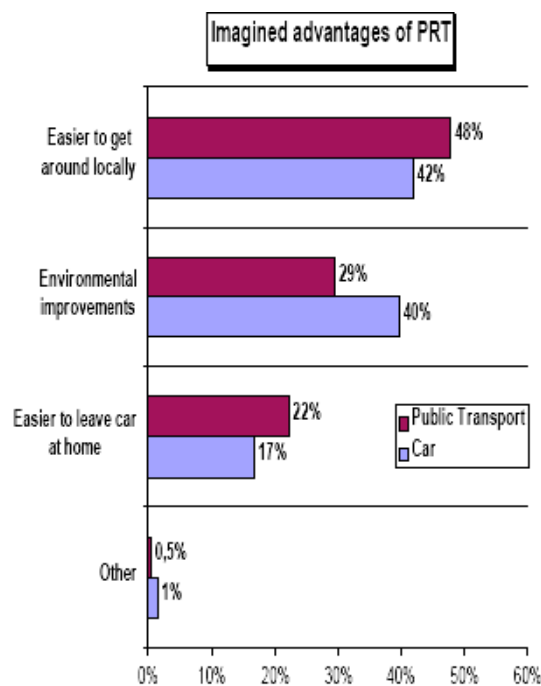


Figura 8 Vantaggi del PRT, studio svedese (Buchnan, et al. 2005)

Uno studio svedese riportato da M. Buchanan & al. (2005) indaga se e quanto il PRT sia ritenuto vantaggioso da automobilisti e utenti dei mezzi pubblici. Il grafico di Figura 8 indica in che misura gli intervistati delle due categorie (automobilisti in grigio e utenti di mezzi pubblici in viola) ritengono che

l'introduzione di una rete PRT comporti dei vantaggi. Ne emerge che il 41% degli intervistati e l'83% degli utenti di mezzi pubblici ritiene che il nuovo sistema di trasporto implichi notevoli benefici, i quali si declinano principalmente nell'agevolare gli spostamenti locali, migliorare l'ambiente e facilitare l'abbandono dell'auto.

1.2.11 Possibili applicazioni

Buchanan & al. (2005) individuano due principali tipologie di sistemi di PRT in via di sviluppo: PRT per brevi distanze e HCPRT, ovvero sistemi ad alta capacità-alta velocità.

I primi sono più sviluppati e ne esistono già esempi operativi all'aeroporto londinese di Heathrow, dove è stata realizzata una linea da *Advanced Transport Systems Ltd* (ATS), a Cardiff in Galles dove la stessa ATS ha costruito un circuito di un chilometro nel 2003, ad Abu Dhabi e negli Stati Uniti oltre che in Corea, Svezia ed in altri Paesi che ospitano circuiti test. Si tratta di reti adeguate ai centri cittadini o a piccole aree private che garantiscono flessibilità nell'installazione delle guide e delle stazioni. Queste reti propongono velocità massime modeste ma elevata puntualità e ridotti tempi di attesa.

La loro costruzione è rivolta a connettere internamente aree commerciali, creare connessioni in ambito urbano, favorire l'accessibilità delle fermate di autobus, metro, tram e delle stazioni ferroviarie e collegare parcheggi satellite di tipo park&ride ai centri cittadini. In alternativa possono essere realizzate all'interno di campus universitari o ospedalieri, in centri turistici, in parchi divertimento o in aeroporto per collegare airside e landside come ad Heathrow (*Viability of Personal Rapid Transit in New Jersey (Final Report) 2007*).

Possono essere previste anche reti da realizzare nell'interesse di privati che consentano ad esempio l'accesso ad edifici da un parcheggio esterno o da fermate di trasporto pubblico, rendendo superflua la costruzione di strade d'accesso.

La seconda tipologia indicata, l'HCPRT, è caratterizzata da velocità più elevate, superiori ai 60km/h, e non ne esistono prototipi né progetti concreti. Con queste reti si realizzerebbero capacità di 1800 veicoli all'ora, il che corrisponde a 2160 passeggeri all'ora per direzione se si considera un tasso medio di occupazione di 1,2 utenti. L'obiettivo dichiarato da Buchanan & al. (2005) è di realizzare *headway* inferiori al secondo anche sulle linee ad alta velocità, innalzando la capacità di linea.

Le eventuali applicazioni possono dunque essere solo teorizzate: si tratterebbe di collegare aree suburbane mal servite dal trasporto pubblico tradizionale o di collegare le città con quelle attività economiche che sorgono ad una media distanza da esse (Buchanan & Al., 2005)..

Una particolare funzione che può essere attribuita ad una linea o ad una rete di PRT è quella di alimentare il trasporto pubblico tradizionale, in modo da diminuire la congestione stradale non solo per effetto della scelta di alcuni automobilisti di utilizzare la forma di trasporto automatizzato, ma anche perché agli occhi di chi generalmente utilizza l'automobile appare più attraente il trasporto pubblico tradizionale grazie alle connessioni create.

Un'applicazione concreta è quella approfondita da Andréasson (2012), che vede nel PRT un sistema integrato con la ferrovia e propone la costruzione di stazioni di scambio tra i due tipi di trasporto.

L'obiettivo è di rendere la ferrovia competitiva con l'auto. Per fare ciò è necessario che anche i primi e gli ultimi chilometri dello spostamento siano ben serviti per ottenere un vero e proprio servizio origine-destinazione. Poiché la zona di attrazione di una stazione ferroviaria è piuttosto vasta e si estende tutto intorno ad essa, è difficile ed economicamente impegnativo garantire un servizio di autobus che converga alla stazione stessa e consenta agli utenti di effettuare solo brevi spostamenti a piedi. Tali linee infatti dovrebbero essere tra loro parallele e con molte fermate. Si tratta di un sistema poco competitivo con l'auto, perciò l'autore propone di sostituirlo con una rete PRT.

La difficoltà da risolvere sta nel far coesistere una grande stazione ferroviaria, dimensionata in funzione della lunghezza dei convogli e della gran quantità di passeggeri che vi transitano, con una stazione di PRT, generalmente più piccola perché i brevi tempi d'attesa garantiscono la presenza di pochi utenti al suo interno.

Andréasson (2012) propone la descrizione di una stazione svedese, dove i treni sono di 214 m e la banchina è della stessa lunghezza. Un binario per PRT delle stesse dimensioni potrebbe ospitare 60 veicoli.

La proposta dell'autore è di realizzare le guide sopraelevate in corrispondenza dello spazio tra due binari, sopra la banchina, collegandole a quest'ultima con scalinate come mostrato in figura.



Figura 9 Stazione ferroviaria di transito e stazione PRT (Andréasson 2012)

In una stazione di testa invece possono essere previste delle scale che salgono in corrispondenza dei binari verso la stazione del PRT. La figura 10 ne fornisce una rappresentazione.

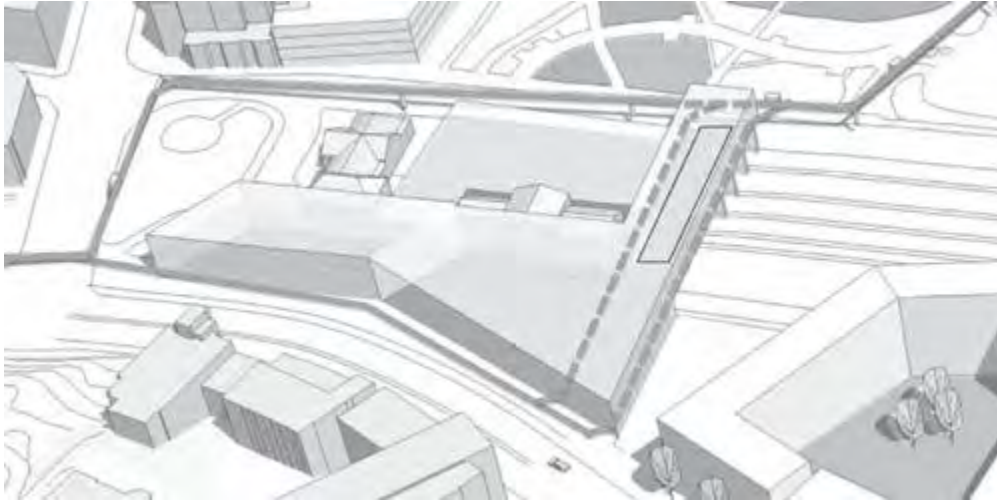


Figura 10 Stazione ferroviaria di testa e stazione PRT (Andréasson 2012)

Si osserva poi che la dimensione della stazione PRT deve essere tale da poter ospitare un gran numero di veicoli in attesa dell'arrivo del treno, sui quali si imbarcheranno molti passeggeri in breve tempo.

Il fatto che l'orario di arrivo dei treni sia conosciuto, o comunque noto con almeno 5-10 minuti di anticipo, facilita i processi di *routing* che portano nei tempi opportuni i veicoli vuoti ritenuti necessari alla stazione. Inoltre, la regolarità del servizio ferroviario e gli orari cadenzati consentono di dimensionare opportunamente la flotta sulla domanda dei pendolari sulla base di qualche settimana di osservazione.

Un discorso diverso va fatto per gli spostamenti verso la stazione ferroviaria, dal momento che in questo caso la domanda è diffusa sul territorio e starà al singolo utente valutare il momento opportuno per raggiungere la stazione di partenza del PRT più comoda per le proprie esigenze.

L'area sulla quale estendere la rete di raccolta dei passeggeri che utilizzeranno poi i treni deve essere contenuta in modo che un veicolo che raccoglie un passeggero alla stazione ferroviaria possa accompagnarlo a destinazione e rientrare alla stazione prima dell'arrivo del treno successivo. Nel caso in cui l'estensione dell'area che si ritiene opportuno servire ecceda queste dimensioni sarà necessario prevedere una flotta più numerosa.

Si osserva che se il servizio fosse dedicato ai passeggeri dei convogli ad alta velocità e lunga percorrenza si potrebbe contare su intertempi più lunghi tra treni successivi.

Un incentivo all'utilizzo dei mezzi PRT potrebbe essere fornito tramite la modalità di erogazione dei biglietti. L'autore a tal riguardo propone un unico biglietto che preveda sia il viaggio in treno che quello con i *pod*, contando anche sul fatto che il servizio è orientato alle esigenze dei pendolari che possono, conoscendosi, scegliere di condividere i veicoli qualora abbiano la stessa destinazione finale, incrementando così il tasso di occupazione. La presenza di una biglietteria sul posto aumenterebbe invece i tempi di attesa e peggiorerebbe l'efficienza del sistema.

La condivisione del veicolo può inoltre essere incoraggiata indicando con un messaggio sul mezzo stesso la destinazione, riservando tanti più veicoli per le destinazioni più richieste. Questo è possibile dal

momento che, essendo il traffico prevalentemente pendolare, un breve periodo di osservazione chiarisce quella che è la distribuzione della domanda sulle destinazioni possibili.

Infine l'autore ipotizza di incrementare la capacità con cui la linea principale può accogliere i veicoli in uscita dalla stazione accoppiando i veicoli stessi per poi separarli sulla linea nel caso in cui le destinazioni fossero differenti.

Andréasson (2012) porta a dimostrazione della bontà di questo progetto alcune simulazioni fatte su città svedesi che hanno condotto a buoni risultati.

In conclusione sono molte le possibili applicazioni del PRT, non solo in ambito urbano. Appare chiaro però che preliminarmente all'introduzione del sistema deve essere condotta un'indagine approfondita che chiarisca i vantaggi e le controindicazioni che ne deriverebbero.

1.2.12 Benefici collettivi

La realizzazione di una rete di Personal Rapid Transit ha dei vantaggi che ricadono non solo sugli utenti ma su tutta la cittadinanza, alcuni dei quali già esaminati nei paragrafi precedenti.

Una linea, come detto, ha una capacità pari a quella di tre corsie autostradali, ma il rapporto tra le superfici occupate è di 20:1, cioè il PRT occupa il 5% del territorio necessario per costruire un'autostrada (J. E. Anderson 2007), (University of Washington s.d.).



Figura 11 Traffico autostradale trasferito sul PRT (J. E. Anderson 2007)

Si garantisce così la possibilità di fare un uso diverso del territorio, considerato che Anderson stima che una rete PRT con una distanza di mezzo miglio tra le linee occupa lo 0,02% della superficie della città contro il 30-50% richiesto dalla rete stradale.

Si crea allora l'opportunità di sostituire i parcheggi con aree verdi e di avere densità abitative superiori accompagnate da una migliore qualità di vita.

La cittadinanza in caso di costruzione di reti PRT beneficerebbe inoltre di una maggior sicurezza per tutti gli utenti della strada per il fatto che la circolazione dei veicoli avverrebbe in sede isolata, separata da pedoni, ciclisti e autovetture.

Una città nella quale il PRT trasportasse una buona percentuale delle persone che si spostano sarebbe una città più sicura, meno inquinata, più efficiente energeticamente e con meno congestione sulle strade (J. E. Anderson 2007).

1.2.13 Costi

I costi relativi ad un sistema di PRT devono essere suddivisi in costi di investimento per la costruzione delle guide, delle stazioni e dei veicoli e costi di manutenzione ed esercizio.

I costi di un mezzo innovativo e non ancora affermato sono stimabili solo in maniera approssimativa. Inoltre, i costi delle componenti del sistema sono elevati proprio perché ancora non esiste una produzione tale da permettere economie di scala, come invece avviene per gli autobus (Gasparini 2005).

I costi di costruzione della rete possono variare molto in funzione del luogo, della lunghezza delle linee, del numero complessivo di stazioni e veicoli e della posizione della guida (Viability of Personal Rapid Transit in New Jersey (Final Report) 2007): sono più contenuti se quest'ultima è realizzata a livello del terreno, mentre aumentano se è sopraelevata e diventano esorbitanti se è sotterranea come nel caso di Masdar City (Emirati Arabi Uniti). Il "Final Report" (2007) stima i costi di costruzione per miglio in milioni di dollari e li pone a confronto con le linee di metropolitana e BRT:

COSTI DI COSTRUZIONE per miglio in M\$	MINIMO	MEDIO	MASSIMO
Metropolitana	110	200	2000
Metropolitana leggera	25	50-70	195
Bus Rapid Transit (BRT)	7	14-25	50
PRT unidirezionale	15	20-25	40
PRT bidirezionale	20	25-30	50

Il grafico seguente riporta i costi medi in milioni di dollari per miglio a confronto.

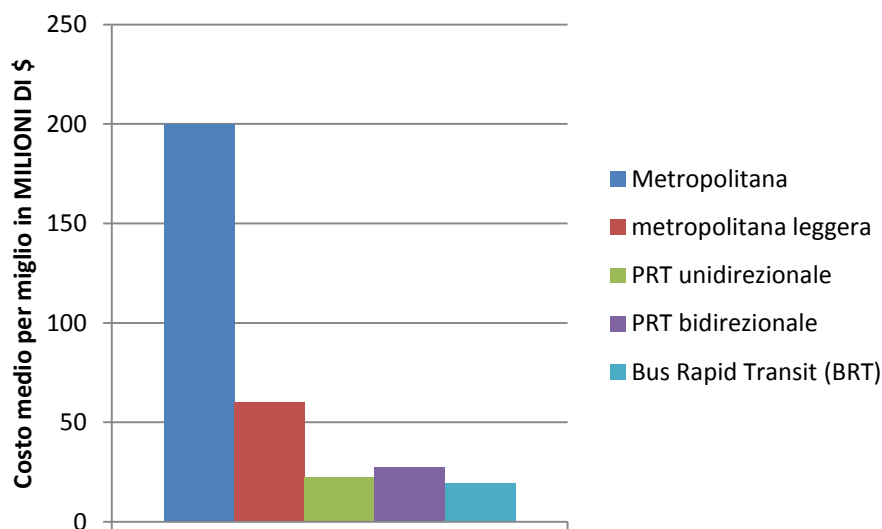


Figura 12 Costi di costruzione di mezzi pubblici a confronto

Secondo questi dati quindi il costo di realizzazione di una linea unidirezionale di PRT oscilla tra 15 e 40 milioni di dollari al miglio, ovvero a circa 7-24 milioni di euro al chilometro ed è comparabile con i costi delle linee di BRT, che sono servizi di autobus su corsie riservate.

Anche le stime risalenti al 2007 e riportate da R. Juster e P. Schonfeld (2013) sono dello stesso ordine di grandezza: da 30 a 50 milioni di dollari per direzione, corrispondenti a quanto indicato nelle stime medio-alte in “Viability of Personal Rapid Transit in New Jersey” (2007). Gli stessi R. Juster e P. Schonfeld (2013) provano a stimare quelli che possono essere stati i costi di realizzazione della rete di Heathrow e li indicano intorno ai 16,2 milioni di dollari per miglio, cioè 10,1 milioni di dollari al chilometro o 7.800.000 € al chilometro. Gli autori affermano che stime più recenti indicano la spesa in 10.200.000 \$ al miglio e 1.050.000 \$ per stazione.

Se consideriamo i dati forniti da iuav.it rispetto ai costi di costruzione di strade, autostrade, ferrovie e tramvie e li confrontiamo con un costo medio del PRT di 8 M€/km (16,6 M\$/miglio), otteniamo il seguente grafico:

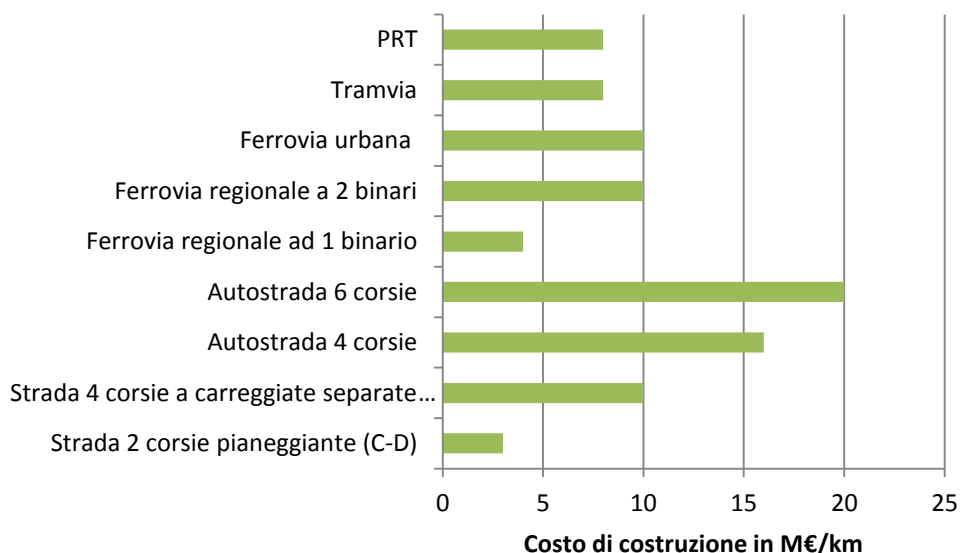


Figura 13 Costi di costruzione

I costi di manutenzione e quelli di esercizio sono calcolati per passeggero per miglio e si attestano attorno ai 30 centesimi di dollaro per il sistema ULTra, ai 22 centesimi par Taxi 2000, con valori attesi tra i 30 e gli 80 cent., in linea con i costi di autobus e metropolitana (Viability of Personal Rapid Transit in New Jersey (Final Report) 2007).

I costi in euro da sostenere per passeggero per un percorso di dieci chilometri sono riassunti nel seguente grafico che riporta un confronto tra differenti tecnologie al variare dei costi di costruzione. Si nota come per il PRT tali costi siano inferiori rispetto agli altri mezzi.

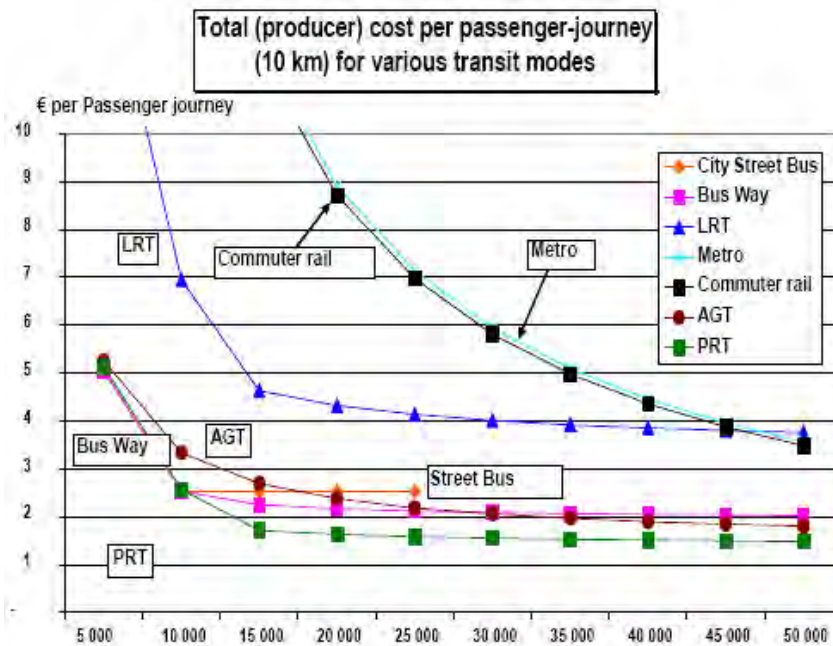


Figura 14 Costi di manutenzione ed esercizio per passeggero per un viaggio di 10km al variare dei costi di costruzione della rete indicati in ascissa (Buchnan, et al. 2005)

1.2.14 Difficoltà nello sviluppo

Appare lecito domandarsi perché un sistema di trasporto con mezzo secolo di storia ed i vantaggi esposti non sia oggi diffuso nel mondo.

A questa domanda ha tentato di rispondere anche l'Unione Europea all'interno del progetto CityMobil (citymobil-project.eu s.d.). Si tratta di un progetto europeo sul tema dei mezzi di trasporto automatizzati che si propone di approfondire l'organizzazione del trasporto urbano con lo scopo di ridurre l'inquinamento e la congestione e aumentare la qualità di vita, identificando quali sono gli ostacoli che ne impediscono lo sviluppo. Nell'ambito del progetto rientravano anche tre sperimentazioni di diverse applicazioni di ATS, due delle quali nascono insieme al progetto europeo, mentre la terza è rappresentata dal sistema PRT di Heathrow che è stato studiato ed analizzato. Al termine del progetto è stato redatto il *City Application Manual* (2011), un manuale che può essere d'aiuto alle autorità nell'introduzione di mezzi automatizzati.

Le barriere allo sviluppo nelle città degli ATS sono sintetizzate da Jan P. van Dijke e Margriet van Schijndel (2012). Gli autori le classificano come ostacoli legali, di sicurezza, di privacy, economico-amministrativi, operativi e, in misura molto minore, tecnologici.

Da un punto di vista legale la difficoltà nasce dal fatto che in Europa vige il trattato di Roma, secondo il quale il conducente è responsabile del veicolo su suolo pubblico. Non è contemplata la possibilità che il mezzo sia privo di conducente, nel qual caso non è chiaro di chi sia la responsabilità legale in caso di incidente. È questo il motivo per cui è più semplice realizzare questi sistemi su suolo privato piuttosto che su suolo pubblico. Per abbattere questo ostacolo servirebbe una nuova legge, e quindi tempi molto lunghi.

Gli autori evidenziano una carenza normativa anche in tema di sicurezza: non esiste un criterio condiviso tra le nazioni per stabilire se un veicolo automatizzato è sicuro tanto da poter essere utilizzato dalla popolazione. La procedura prevede che la singola amministrazione coinvolta in un progetto in questo ambito prenda visione di un metodo di verifica della sicurezza, ne analizzi i criteri ed i procedimenti e si riservi poi di richiedere indagini e test ulteriori. Questo modo di procedere allunga molto i tempi che sarebbero notevolmente snelliti se venisse internazionalmente accettata una procedura comune.

Un'ulteriore discussione nasce intorno al tema della privacy dei passeggeri. Questa deve essere garantita, ma spesso è indispensabile sapere chi si trova a bordo del veicolo per ragioni di sicurezza. La soluzione potrebbe essere un sistema di telecamere a circuito chiuso a bordo del veicolo attivabili dal passeggero in caso di necessità e la predisposizione di sistemi che lo mettano in comunicazione con le forze dell'ordine.

Un aspetto altrettanto discusso riguarda la sicurezza della merce che può venire trasportata e le misure antiterrorismo.

Economicamente sono richiesti investimenti iniziali cospicui e soprattutto a forte rischio che costituiscono un ostacolo significativo alla nascita di questi sistemi. È difficile infatti sia trovare finanziatori che fare previsioni di tipo economico sul lungo periodo. A questo si aggiunge lo svantaggio di essere tra i primi ad investire in una nuova tecnologia, quando non ci sono ancora sufficienti applicazioni reali della stessa che ne facilitino la progettazione e la valutazione in termini di costi e benefici.

Dal punto di vista tecnologico non ci sono difficoltà, osservano van Dijke e van Schijndel, considerato che già esistono sistemi di questo genere.

Infine ultime ma non meno importanti sono le seguenti questioni: l'integrazione nelle città, e in particolar modo nelle città storiche europee, l'inserimento architettonico, l'organizzazione dei sistemi di soccorso e la natura dei dispositivi di individuazione degli incidenti.

Vi sono dunque ostacoli di diversa natura che hanno frenato la diffusione degli ATS, ma lo stesso CityMobil dimostra un'attenzione alle tematiche connesse a questo tema e propone delle indicazioni utili a superare queste barriere da parte delle amministrazioni. Inoltre i risultati del progetto europeo indicano il PRT come il mezzo più indicato per spostamenti brevi in aree a bassa-media densità abitativa .

1.2.15 Opinioni

Sono numerose le opinioni espresse da diversi soggetti riguardo al sistema di PRT.

J. E. Anderson riporta (2007) le parole di Andrew Euston, ex membro dell'U.S. Department of Housing and Urban Development con il ruolo di coordinatore del programma di sviluppo urbano sostenibile, il quale ritiene il PRT una tecnologia essenziale per un mondo sostenibile.

Goran Tegner, business manager della svedese International Transek Consultans Company, nel 1997 difende con queste parole la necessità di investire in questo innovativo mezzo di trasporto: “ il PRT fornisce una così vasta gamma di vantaggi che il mio consiglio è di attribuirgli la più alta priorità nella ricerca, nello sviluppo e nei test per poter migliorare l'ambiente urbano” (J. E. Anderson 2007).

Anderson (2007) cita anche un documento europeo del 2006 che conclude affermando che il PRT garantisce una mobilità sostenibile e la personalizzazione del trasporto pubblico, completando il quadro dei mezzi esistenti.

Gli esponenti del New Urbanism, un movimento che teorizza una progettazione urbana caratterizzata da destinazioni d'uso miste e dalla prevalenza di modalità di trasporto diverse dall'automobile, si dividono tra favorevoli e contrari all'introduzione del Personal Rapid Transit. Tra i primi Peter Calthrope e Sir Peter Hall. Tra i contrari, J. H. Kunster ha affermato: "Se volete sostituire l'auto, perché farlo con qualcosa che non solo è come l'auto ma non è neanche utile quanto un'auto? Sembra da pazzi."

(wikipedia s.d.).

L' "Ohio, Kentucky, Indiana Loop Report" nel 2011 si esprime in modo molto critico in particolare nei confronti dell'impatto visivo delle guide sopraelevate che non garantiscono la privacy, e riporta lo scetticismo dei commercianti di Cincinnati che ritengono inevitabile, con l'adozione del PRT, una diminuzione dell'attrattività dei negozi che si affacciano sulle strade a piano terra e temono che la rete sopraelevata potrebbe essere oggetto di atti di terrorismo e vandalismo.

Il professor Vukan R. Vuchic, docente di ingegneria dei trasporti all'università della Pennsylvania e sostenitore delle forme di trasporto tradizionali, sostiene che una combinazione di piccoli veicoli e guide molto costose sia inadeguata sia in città, in quanto il sistema non ha una capacità sufficiente per soddisfarne la domanda, sia per le periferie urbane, dove il costo delle infrastrutture sarebbe insostenibile

(wikipedia s.d.).

Wayne D. Cottrell della University of Utah ritiene invece che la ricerca nel campo del PRT non è adeguata: a suo parere non c'è sufficiente letteratura sul tema e si guarda alla questione con poco senso critico (wikipedia s.d.).

Infine il fallimento di alcuni progetti sperimentali, come il CVS in Giappone, ha determinato l'idea che il PRT sia un mezzo poco sicuro, quando invece l'evidenza ci dice che non è così con riferimento alla rete di Morgantown (WV, USA), che è operativa dal '75 e non è mai stata sede di gravi incidenti (wikipedia s.d.).

2. STORIA DEL PRT

Al giorno d'oggi sono numerosissimi i mezzi di trasporto tra loro differenti che transitano sulle strade, al di sotto di esse ed al di sopra.

Quando e perché allora inventare o ricercare un nuovo sistema per permettere all'uomo di effettuare spostamenti? È evidente che tale investimento è giustificato solo quando la nuova proposta può dimostrare di essere superiore a buona parte dei sistemi alternativi già esistenti sotto un particolare punto di vista e di poter risolvere problematiche ancora insolute.

Affinchè un nuovo sistema di trasporto si affermi effettivamente sul mercato sono necessarie alcune condizioni di tipo economico, tecnologico ed ambientale.

Il primo passo, una volta sviluppata un'idea sulla carta, è quello di trovare i fondi per procedere nella ricerca e per realizzare i prototipi. Tutto ciò è possibile laddove vi sia un sostegno dello Stato o un forte investimento privato. La tecnologia disponibile, inoltre, deve aver raggiunto un grado di sviluppo tale da potersi mettere al servizio della nuova proposta senza rappresentare un ostacolo. Fondamentale è anche diffondere le nuove idee per creare una rete di collaborazioni volta a raggiungere un certo obiettivo; per diffusione di idee si intende anche il promuovere il nuovo sistema di trasporto affinché l'opinione pubblica



Figura 15 (J. E. Anderson, Some Lessons from the History of Personal Rapid Transit (PRT) 1996)

sia favorevolmente rivolta ad esso.

In questo capitolo ci si propone di indagare questi aspetti nella storia del Personal Rapid Transit, ricostruendo le successive tappe che hanno contribuito al suo sviluppo su suolo americano e in misura minore in altri Paesi. In questa sintesi ci si basa principalmente sulle opere di uno degli ideatori del PRT: J. E. Anderson (1996), (2009).

Sebbene il sistema del Personal Rapid Transit sia oggi presentato come un mezzo di trasporto moderno ed innovativo, la sua storia affonda le radici negli anni Cinquanta ed in realtà alcuni dei concetti base risalgono ad epoche precedenti, quando la tecnologia non era ancora in grado di sostenerli concretamente.

Tale storia trova un terreno fertile su suolo americano ed Anderson spiega questo fatto affermando che negli Stati Uniti, ancor prima che negli stati europei, ci si pose il problema della congestione derivante dalla presenza di un numero crescente di automobili sulle strade urbane. Proprio da qui originano i primi progetti di un sistema svincolato dal traffico cittadino che utilizzasse una rete propria e separata dalle altre modalità di trasporto. Inoltre, nell'America di quegli anni c'era un clima tollerante e aperto alle innovazioni. Infine non è da sottovalutare il fatto che l'Europa, in quello stesso periodo, doveva risollevarsi dalla seconda guerra mondiale.

Così alcuni ingegneri, tecnici, imprenditori e professori universitari concentrarono le loro energie, dapprima in modo indipendente, per ricercare una valida alternativa all'automobile che consentisse di alleggerire dal traffico le strade, creando migliori qualità di vita.

Una grande spinta alla ricerca fu costituita dall'intervento statale: nel 1972 fu istituito un programma di ricerca e sviluppo orientato al PRT, in un periodo in cui la crisi energetica imponeva di investire su mezzi di trasporto che non utilizzassero combustibili fossili. Fu il presidente Nixon in un discorso di presentazione del progetto ad affermare: "se possiamo mandare un uomo a fare quattro passi sulla luna a 200.000 miglia di distanza, dovremmo essere in grado di portare 200.000 persone a lavorare a quattro miglia di distanza".

Per lo sviluppo del PRT sono stati fondamentali l'appoggio governativo e l'istituzione di organi competenti per progredire nella ricerca, mentre le crisi politiche e finanziarie hanno dirottato i fondi altrove rallentando il processo di realizzazione.

Donn Fichter è ritenuto il primo ideatore del PRT: nel 1953, appena laureatosi a Chicago, iniziò a pensare a come migliorare il trasporto in ambito urbano ed abbozzò una prima soluzione. Egli si concentrò in particolare su veicoli leggeri e piccoli, per un solo passeggero, che consentissero di realizzare una rotaia poco costosa e di dimensioni limitate. Il sistema si prestava a zone a medio-bassa densità abitativa e voleva proporsi come alternativa ai tradizionali sistemi di trasporto collettivo.

Un ulteriore contributo fu quello di E.O. Haltom che nello stesso anno propose di utilizzare una monorotaia per realizzare reti in cui le stazioni fossero fuori linea, per poter incrementare la capacità del sistema. Infatti se tutti i veicoli fossero obbligati ad arrestarsi ad ogni stazione, gli headway tra di essi dovrebbero essere elevati e dunque l'unico modo per garantire l'alta capacità sarebbe quello di utilizzare veicoli grandi con conseguente aumento dei costi. Haltom propose la soluzione vincente con il suo Monocab: le stazioni fuori linea consentivano headway inferiori ed era quindi possibile utilizzare veicoli più piccoli e contenere i costi dell'infrastruttura. Il problema rimaneva quello degli scambi, che in questo progetto erano costituiti da rotaie mobili e limitavano dunque inferiormente gli headway diminuendo la capacità del sistema. Un ulteriore limite era quello del tipo di guida che si utilizzava: i veicoli viaggiavano appesi ad una rotaia il cui impatto visivo era notevolmente maggiore rispetto alla soluzione in cui questa è posta inferiormente al mezzo.

Soluzioni a questi aspetti critici furono successivamente proposte dalla *Vero*, impresa texana a cui Haltom vendette il progetto, che elaborò un sistema a sospensione magnetica e induzione e propose scambi che non richiedevano il movimento dei binari.

In seguito, dopo cessioni ad altre compagnie tra cui anche la Boeing, a causa della mancanza di fondi il progetto venne abbandonato.

Tra gli anni '50 e '60 anche la General Motors contribuì allo sviluppo del PRT, soprattutto con

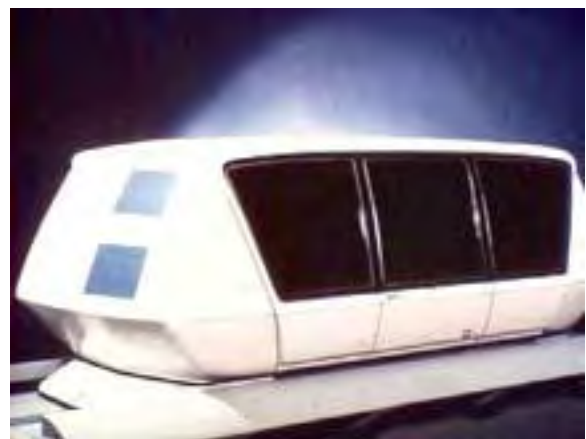


Figura 16 Veicolo TTI (J. E. Anderson, *Some Lessons from the History of Personal Rapid Transit (PRT) 1996*)

miglioramenti del sistema di propulsione: in collaborazione con altri soggetti diede origine a TTI (Transportation Technology Incorporated), che realizzò un primo sistema di PRT il quale operò fino agli anni '70 al Duke University Medical Center. Questo sistema non si affermò su larga scala in quanto la forma della rotaia ne rendeva difficile l'utilizzo in caso di neve o pioggia che non potevano essere facilmente smaltite.

Nei primi anni '60 William Alden introdusse il concetto di "sistema duale", ipotizzando un piccolo veicolo elettrico che poteva spostarsi su strada per raggiungere la rotaia sulla quale viaggiare fino a destinazione. Il suo principale contributo fu di ideare un sistema di scambio governato dal veicolo che consentiva headway contenuti. Egli tentò anche di risolvere il problema dell'accumulo di neve sulle rotaie che avevano una sezione a U: con un sistema di riscaldamento della rotaia era possibile sciogliere la neve e farla defluire. Tuttavia il costo di questa tecnologia su una rete reale si sarebbe rivelato eccessivo.

In seguito i sistemi duali non si rivelarono vantaggiosi e ci si concentrò quindi su veicoli gommati che viaggiavano su rotaia.

Il primo esempio illustre e tuttora funzionante di PRT basato sul progetto di Alden risale proprio a questo periodo e venne costruito a Morgantown, West Virginia, USA.



Figura 17 Il PRT di Morgantown (WV-USA) (University of Washington s.d.)

Si tratta di una rete la cui realizzazione iniziò a fine anni '60 e si concluse nel 1975. Fu voluta per alleggerire il centro urbano dal traffico di autobus che effettuavano un servizio navetta e serve i tre diversi campus universitari della città.

Il progetto fu il risultato di un veloce processo decisionale e di un'altrettanto rapida fase costruttiva che, per motivi politici, condusse sì alla realizzazione dell'opera in tempi stretti, ma anche a valutazioni affrettate e a scelte discutibili. Tra tutte quella di imporre l'aumento della dimensione dei veicoli fino ad ottenere una capienza di venti posti, con conseguente impennata dei costi di costruzione. (Per ulteriori dettagli su questo progetto si rimanda al capitolo 7.1).

Vi furono poi altre proposte interessanti che però non furono realizzate se non come prototipo in scala. Tra queste l'*Uniflo* progettato nel 1961 da Lloyd Berggren aveva il vantaggio di prevedere un motore sul tracciato anzichè sul veicolo, ma viaggiava all'interno di grandi ed impattanti strutture tubolari.

Una svolta nel processo di crescita del PRT, che fino a questo momento proseguiva grazie alle intuizioni dei singoli, avvenne nel 1964 grazie alla stesura dell' "*Urban mass transportation act*", un atto legislativo che prevedeva lo sviluppo di un programma di ricerca sui nuovi mezzi di trasporto in ambito urbano, coordinato dal dipartimento statunitense per le politiche abitative e lo sviluppo metropolitano.

Dal 1966 vennero autorizzati diversi studi sui sistemi di trasporto innovativi, noti come *HUD (Housing and Urban Development) studies*, alcuni dei quali riguardavano proprio i sistemi PRT. L'intento era quello di sviluppare nuove idee rispetto al trasporto urbano, valutarne la convenienza economica e confrontarle con i sistemi tradizionali. L'idea di fondo era che solo investendo in questa direzione sarebbe stato possibile invertire la tendenza alla congestione sulle strade delle città americane.

Ancora una volta furono ragioni politiche ad interrompere questa fase di ricerca.

Dal 1968 la *Aerospace Corporation*, fondata dalla *United States Air Force*, intraprese un progetto che cercava applicazioni delle tecnologie aerospaziali in ambito urbano.

Partendo dai risultati degli studi HUD fu possibile progettare sistemi di PRT ad alta capacità: furono introdotte importanti innovazioni tecnologiche che permisero di far viaggiare i veicoli con *headway* di 0,2 secondi alla velocità di 60 miglia orarie, senza parti mobili sui binari, con riduzione dell'impatto acustico e visivo grazie all'utilizzo di un'infrastruttura di dimensione ridotta e a veicoli su ruote gommate alimentati da corrente elettrica. A seguito di questi studi nel mondo si iniziò a parlare del PRT, grazie anche alla pubblicazione di alcune opere sull'argomento.

È in questo periodo che anche in Europa e nel mondo asiatico nascono i primi progetti di reti di PRT. Tra questi il primo fu il *British Cabtrack System*, elaborato da L.R. Blake e dalla Brush Electric Company. Parzialmente finanziato dal ministero dei trasporti, il *Cabtrack* consentiva *headway* di 0,6 secondi. Vennero anche realizzati studi per verificare l'adattabilità del sistema ad una specifica zona di Londra e ne fu costruito un modello in grande scala. Purtroppo il progetto non proseguì in quanto, ancora una volta, un cambio di governo negò la continuità dei finanziamenti.



Figura 18 Il CVS (J. E. Anderson, Evolution of Personal Rapid Transit 2009)

Il Giappone sviluppò il CVS (*Computer-controlled Vehicle System*) tra il 1968 ed il 1978.

Si trattava di un sistema di PRT che prevedeva *headway* di un secondo e veicoli a quattro posti dal peso di circa 900 kg. Vennero realizzati dei test a scala reale in cui 60 veicoli viaggiavano su un percorso di 4,8 km in una zona suburbana di Tokio. Il CVS cessò di funzionare per motivi di sicurezza legati ai sistemi di frenata e distanziamento dei veicoli.

Qualificandosi come osservatore esterno, Anderson (1996) afferma che il fallimento del CVS è da imputare a tre fattori principali: la dimensione eccessiva dei binari che, larghi tre metri e profondi quasi due,

avevano un impatto negativo sui costi e sull'aspetto estetico del sistema, i problemi di trazione in caso di neve o ghiaccio e la mancanza di adeguati accorgimenti alle stazioni per consentire la salita e la discesa dai veicoli in modo rapido.

In Germania nel 1970 il ministero dei trasporti invitò ad associarsi due diverse società che avevano lavorato indipendentemente allo sviluppo del PRT. Il risultato fu l'ideazione del *Cabinetaxi*, sistema con veicoli a tre posti che potevano spostarsi sia al di sopra che al di sotto del binario grazie a ruote gommata e motori ad induzione ai lati del veicolo stesso. In seguito a dimostrazioni ed attente valutazioni sulla sicurezza il *Cabinetaxi* fu considerato sicuro ed affidabile, pronto ad essere installato nelle città tedesche. Tuttavia la realizzazione delle reti non venne finanziata dallo stato a seguito della crisi economica che colpì il paese nel 1980 ed i progetti vennero trasferiti negli Stati Uniti.



Figura 19 Il Cabinetaxi (J. E. Anderson, Evolution of Personal Rapid Transit 2009)

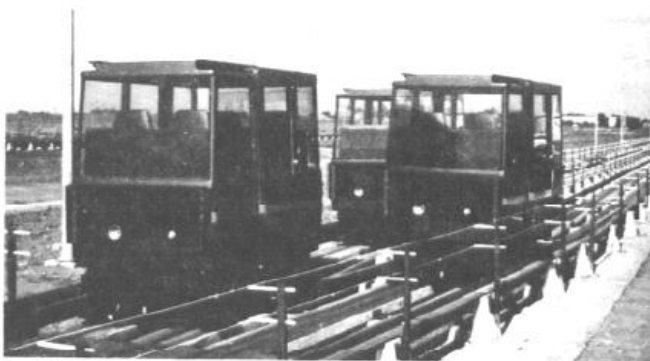


Figura 20 Il sistema Aramis (Gerland e Zemlin 1980)

Un'altra esperienza europea fu quella francese: il progetto *Aramis* prese il via a Parigi nel 1967 grazie all'investimento dell'industria spaziale *Matra*.

L'aspetto innovativo di questo progetto era costituito dal fatto che i veicoli in rete si muovevano in plotoni all'interno dei quali erano distanziati di soli 30 centimetri grazie a sistemi ad ultrasuoni e a sensori ottici. Ogni veicolo era equipaggiato con un dispositivo che permetteva lo scambio di binario per poter abbandonare il plotone, dirigersi verso una stazione e tornare poi ad accodarsi ad un altro plotone sulla linea principale.

Questo sistema di funzionamento non si prestava però a reti tradizionali: venne pensato infatti per una rete ad anello attorno alla città di Parigi. Anche questo progetto tuttavia fallì: le difficoltà nel gestire le frenate sul bagnato e gli spazi tanto ridotti tra i veicoli ebbero la meglio e l'*Aramis* non fu realizzato.

A Goteborg, in Svezia, si ipotizzò di realizzare un sistema *Cabtrack* dal momento che c'erano difficoltà legate alla natura del sottosuolo roccioso nella realizzazione della metropolitana. Le autorità svedesi ritennero però opportuno attendere ulteriori sviluppi tecnologici prima di investire nella realizzazione di un sistema di PRT. Oggi la Svezia è attivamente coinvolta nello sviluppo delle tecnologie di controllo e gestione a distanza dei veicoli: un centro sportivo nella città di Uppsala dal 2006 è sede di un circuito test della società coreana *Vectus* (Gustafsson 2009).

Infine, Anderson (1996) presenta il caso del Canada dove a fine anni '60 fu ancora una volta la dimensione dei veicoli ad imporre costi di realizzazione elevati che hanno impedito l'affermarsi del sistema sul mercato.

Rifacendoci a quanto riportato da D. MacKinnon (1975) possiamo qui fornire alcuni dati relativi alle cinque principali tipologie di PRT sviluppate negli anni '60-'70: il *Cabtrack* britannico, il progetto americano dell'*Aerospace*, il *Cabinetaxi* tedesco, il CVS giapponese e l'*Aramis* francese. Tra questi come si è detto i primi due vennero progettati solo a livello teorico, mentre per i successivi tre sono stati realizzati anche dei prototipi completi per effettuare test su scala reale.

La tabella riportata indica le principali caratteristiche dei cinque sistemi.

TABLE I
SYSTEM PARAMETERS

SYSTEM	VEHICLE CAPACITY (SEATS)	MINIMUM HEADWAY	MAXIMUM CAPACITY (SEATS PER LANE PER HOUR)	VEHICLE UTILIZATION (SEAT-KMS PER VEHICLE PER HOUR)	APPROXIMATE K FACTOR
CABTRACK	4	0.6 SECONDS AT 36 KPH (22.5 MPH)	24,000	144 (90)*	0.15
AEROSPACE	6	0.5 SECONDS AT 32 KPH (20 MPH)	28,800	192 (120)	0.10
CABINTAXI	3	0.7 SECONDS AT 36 KPH (21 MPH)	15,428	105 (66)	0.20
CVS	4	1.0 SECONDS AT 80 KPH (50 MPH)	14,400	320 (200)	1.10
ARAMIS	4	0.183 SECONDS AT 50 KPH (31.2 MPH)	78,688 (14,000)**	200 (124)	0.01

* SEAT MILES PER VEHICLE PER HOUR
** WITH PLATOONING

Tabella 2 Parametri caratteristici dei cinque sistemi di PRT storici (MacKinnon 1975)

Il numero di posti a sedere previsti nel veicolo si attesta sui quattro, con l'eccezione dei tre previsti dal sistema tedesco e dei sei che fanno del veicolo dell'*Aerospace* il più grande tra i cinque confrontati. Le dimensioni sono comunque simili e comprese tra i due e i tre metri di lunghezza per 1,3-1,8 metri di larghezza e 1,7-1,9 di altezza. Il peso invece è variabile tra i 600 kg del *Cabtrack* e gli oltre 1000 kg dell'*Aerospace*.

Il valore dell'*headway* minimo consentito sulla rete è specificato alle diverse velocità di percorrenza ed evidenzia come nel sistema francese gli intertempi veicolari siano molto ridotti. Anche la capacità di linea, nella configurazione senza plotoni, premia il sistema *Aramis*.

Il fattore *k* infine rappresenta il rapporto tra l'*headway* espresso in termini spaziali e la minima distanza necessaria per effettuare una frenata di emergenza: i sistemi con valore *k* inferiore ad 1 sono equipaggiati con particolari dispositivi di assorbimento della frenata e paraurti che ne consentono comunque una circolazione sicura.

La storia recente ci riporta ancora in America dove negli anni Novanta nasce il PRT2000 grazie proprio a J.E. Anderson, progetto che dalla Raytheon passò alla Taxi2000.

Successivamente D. Malewicki progetta lo Sky Tran, una sorta di PRT ad alta velocità in grado di raggiungere i 160 km/h grazie ad un sistema di levitazione magnetica.

Negli anni 2000 in Olanda viene realizzata una rete di PRT che è rimasta operativa solo per qualche mese; Ford ha proposto un nuovo modello di veicolo che permetteva spostamenti duali su strada e via vincolata; in Galles è stato presentato un prototipo dell'ULTra, azienda che ha poi realizzato quella che a tutti gli effetti è considerata la prima rete attiva di Personal Rapid Transit all'aeroporto londinese di Heathrow, descritta in dettaglio nel capitolo 7.3 (wikipedia s.d.).

Anderson conclude il suo excursus storico evidenziando alcuni insegnamenti che possono essere utili per un futuro sviluppo del PRT e che vogliamo qui sintetizzare. Egli sostiene che, affinché il programma di sviluppo abbia successo, è necessario che le autorità competenti capiscano non solo il principio di funzionamento di una rete di Personal Rapid Transit, ma anche le relazioni che intercorrono tra questa e la rete di trasporto preesistente, oltre alla storia delle precedenti esperienze di realizzazione ed ai relativi motivi di successo ed insuccesso. Ritiene inoltre importante che chi pianifica lo sviluppo urbano tenga in considerazione la possibilità di realizzare una rete di trasporto automatico e che i cittadini quali fruitori del servizio vengano adeguatamente informati delle potenzialità e dei rischi del sistema. Altri fattori sui quali l'autore pone l'accento sono il controllo del peso dei veicoli e conseguentemente della dimensione delle infrastrutture di sostegno e l'attenzione alla tecnologia, intesa come volontà continua di innovazione e di far fruttare al meglio le tecnologie esistenti.

Analizzando i progetti realizzati, ed in particolare quelli a Heathrow e Masdar City trattati nel capitolo 7, si riscontra che è davvero possibile far funzionare una rete in modo efficiente. Tuttavia è fondamentale progettare questi sistemi in ambienti che lo consentano e cioè in aree di dimensioni contenute con destinazione ben precisa, come nel caso dell'aeroporto londinese. Inoltre molta attenzione va posta al costo di realizzazione: è richiesto infatti un investimento iniziale ingente, e soluzioni sotterranee come a Masdar non producono altro che aumenti esponenziali dei costi preventivati.

In conclusione possiamo dire che davvero, più o meno recente che sia, la storia insegna ed aiuta a non ripetere gli errori commessi in passato, sebbene vi sia sempre la possibilità di commetterne di nuovi. Dopo 60 anni dai primi progetti è forse davvero giunto il momento del Personal Rapid Transit.



3. CARATTERISTICHE FISICO-TECNOLOGICHE

In questo capitolo si vogliono analizzare i principali componenti di un sistema di Personal Rapid Transit nei loro aspetti costruttivi e funzionali. Sono trattati in particolare i veicoli, le guide, gli scambi in linea, le stazioni ed il sistema di controllo automatico.

I primi sono presentati descrivendo le loro caratteristiche, dimensioni e dispositivi di bordo facendo un cenno alla tecnologia propulsiva che utilizzano.

Le guide o binari sui quali si muovono, che rappresentano la parte economicamente più rilevante dell'intero sistema, sono presentate partendo dai criteri di progettazione che J. E. Anderson (J. E. Anderson, How to design a guideway 2009) ritiene siano da adottarsi per pervenire ad un progetto efficiente, realizzabile ed economicamente valido.

Strettamente connessi con la fisionomia delle guide sono gli scambi, ovvero i tratti di linea nei quali le guide convergono o divergono. Si presentano qui alcune soluzioni tecnologiche per realizzarli.

Le stazioni non sono descritte nei loro elementi costitutivi, che possono variare a seconda del contesto nel quale si inseriscono, ma l'accento è posto sulle motivazioni funzionali e progettuali che ne hanno determinato la collocazione fuori linea con notevoli vantaggi per l'efficienza globale del sistema.

Infine, sono trattati il sistema di controllo e le tecnologie che permettono il funzionamento a richiesta del sistema. Non si tratta propriamente di un componente della struttura del PRT, ma di un insieme di dispositivi informatici e di reti di trasmissione dati che sono essenziali al funzionamento del controllo automatizzato a distanza.

3.1 Veicoli e motore

Un veicolo che possa operare in un sistema di PRT deve garantire ben precise prestazioni e possedere determinate caratteristiche.

Da un punto di vista generale deve avere una linea accattivante, deve ben inserirsi in un contesto urbano e dunque essere anche poco rumoroso e poco inquinante. Inoltre devono essere contenuti i costi di costruzione, manutenzione e i costi operativi. Il funzionamento deve essere semplice, il veicolo deve garantire elevati

standard di sicurezza e comfort al passeggero, e fondamentale è infine che possa essere controllabile a distanza in modo completamente automatizzato, cioè che sia possibile muoverlo senza conducente, con o senza passeggeri a bordo.

Le dimensioni devono garantire il soddisfacimento della domanda attraverso un servizio rapido che limiti i tempi d'attesa. Esse influiscono pesantemente sul tipo di guida da realizzare ed in particolare sulle dimensioni della stessa, incidendo in modo determinante sui costi.

In risposta a queste esigenze sono stati progettati e realizzati piccoli veicoli elettrici completamente automatizzati e dotati di tutti i comfort di una tradizionale autovettura, con un sistema di propulsione costituito da un motore lineare ad induzione.

Le dimensioni, seppur variabili tra i diversi modelli, sono pensate per ospitare dai due ai sei passeggeri. Gli spazi interni permettono di caricare a bordo bagagli, una carrozzina o una bicicletta, oltre ad essere studiati per facilitare alle sedie a rotelle la salita e la discesa.

Le misure contenute dei veicoli consentono di progettare guide snelle e con piccoli raggi di curvatura e di contenere i costi dell'infrastruttura, oltre a permettere accelerazioni e decelerazioni elevate rendendo minimi i tempi di percorrenza e consentendo di dimensionare flotte in grado di soddisfare la domanda pur con un numero relativamente ridotto di veicoli.

La scelta di dimensionare i veicoli per piccoli gruppi di viaggiatori deriva anche da osservazioni condotte sulle attuali abitudini della popolazione che si sposta in automobile. Uno studio americano (Taxi2000 Corporation 2007) ha posto in evidenza che nelle città per la maggior parte degli spostamenti effettuati in auto entro i dieci chilometri il conducente si sposta da solo, senza altri passeggeri a bordo: il tasso medio di occupazione dei veicoli, in America ed in Europa, è inferiore a due. Sulla base di questi dati sono stati ipotizzati veicoli per uno o due passeggeri, arrivando infine a preferire quelli da tre o quattro posti per garantire un'adeguata capacità della linea, ritenendo non conveniente incrementare ulteriormente la capacità dei singoli veicoli: ciò non avrebbe apportato grandi variazioni di attrattività del sistema, ma avrebbe inciso negativamente su costi, *headway* e conseguentemente sui tempi d'attesa alle stazioni.



Figura 21 Esempio di veicolo PRT- esterno- della Skyweb Express (Gasparini 2005)

Skyweb Express produce veicoli a tre posti con i sedili affiancati tra loro in un'unica fila, con possibilità di sollevare le sedute per permettere l'accesso ad una sedia a rotelle e ad un accompagnatore, o ad un ciclista di caricare a bordo se stesso e la bicicletta. Il veicolo di questa azienda costruttrice ha un'altezza di 1,60 m, una lunghezza di circa 2,6 m e pesa 522 kg a vuoto. Può caricare fino a 295 kg ed essere modificato per trasportare merci (Gasparini 2005).



Figura 22 Esempio di veicolo PRT- interno - della Skyweb Express (Gasparini 2005)

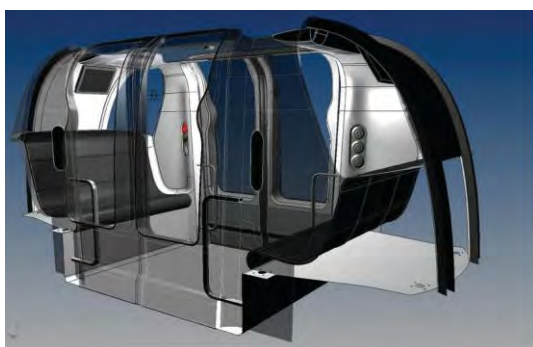


Figura 23 Veicolo ULTra (ULTra s.d.)

Advanced Transport Systems produce veicoli ULTra, molto simili ai precedenti per dimensioni. Si tratta di veicoli a quattro posti, adattabili per il trasporto di rifiuti e merci, con porte che si aprono al livello dei marciapiedi delle fermate per facilitare l'accesso con carrozzine. Hanno una sagoma leggermente superiore a quella dei precedenti, con 3,7 m di lunghezza, 1,47 m di larghezza e un'altezza di 1,8 m. Pesano 850 kg a vuoto (ULTra s.d.).

Entrambe le tipologie di veicoli sono equipaggiate con sedili ergonomici, impianto di riscaldamento, ventilazione e condizionamento alimentato a batteria, luci interne che permettono ai passeggeri di leggere durante il viaggio, porte automatiche sui due lati per facilitare la salita e la discesa. Inoltre all'interno sono installati dei display e dei dispositivi audio che forniscono al viaggiatore tutte le informazioni necessarie, lo aggiornano sulla posizione corrente in rete, consentono alla società costruttrice o all'amministrazione locale di mostrare messaggi personalizzati (TAXI2000 s.d.), (ULTra s.d.).

A bordo è presente un'interfaccia che permette al passeggero di selezionare la stazione di destinazione (questa in alternativa può essere installata in stazione) e Skyweb Express prevede tre bottoni: "go", "next stop" e "emergency". Con il primo l'utente conferma la propria scelta di destinazione e acconsente alla chiusura delle porte e alla partenza, con il secondo richiede la fermata immediatamente successiva sulla linea, ad esempio in caso di malore o di errata direzione, con il terzo è possibile contattare il centro di controllo e parlare con un operatore. Su ogni veicolo è installato un sistema anti incendio, sono presenti uscite di sicurezza apribili sia dall'interno che dall'esterno a veicolo fermo in caso di guasto. Le superfici sono progettate per essere facilmente lavabili ed il pavimento è antiscivolo. I mezzi sono sicuri ed hanno elevata affidabilità (ULTra s.d.), (TAXI2000 s.d.).

Costruttivamente il veicolo è costituito da una cabina che ospita i passeggeri e si muove sopra la guida, montata su un telaio che la supporta e scorre sul binario, nel quale sono collocati gli elementi

propulsivi e la batteria oltre ai sistemi di interfaccia con la rotaia e agli strumenti di misurazione e di comunicazione con i centri di controllo.

Per la propulsione dei veicoli si utilizzano motori elettrici lineari. La scelta ricade su quest'ultimi innanzitutto perché, essendo elettrici, sono silenziosi e quasi per nulla inquinanti. Inoltre si tratta di motori economici che limitano la dissipazione non avendo parti mobili che lavorano per attrito, possono far accelerare e decelerare il veicolo indipendentemente dalla bontà delle condizioni di aderenza tra ruote e guida, senza problemi in caso di ghiaccio o neve, sono silenziosi e consentono il posizionamento di magneti lungo la guida che costituiscono un aiuto nella determinazione della posizione dei veicoli da parte del sistema di controllo. I motori elettrici di questo tipo non richiedono la presenza di elementi pericolosi sulla linea o sul veicolo (Gasparini 2005).

Il loro funzionamento prevede l'interazione tra due elementi, uno installato sul veicolo l'altro sulla guida. Quest'ultima a distanze regolari ospita delle piastre metalliche. Il motore vero e proprio è invece sul veicolo ed è costituito da elettromagneti posizionati nel telaio inferiore. Ciascun veicolo ne ospita più d'uno. Quando la corrente viene fatta circolare nella spira che avvolge il magnete, si genera un campo magnetico scorrevole che a sua volta, per effetto della legge di Faraday-Neumann-Lenz, genera un campo elettrico indotto nella piastra metallica più vicina. Questo fenomeno comporta la formazione di una forza orizzontale che fa avanzare il veicolo respingendolo in senso opposto a quello di scorrimento del campo magnetico. Quando l'elettromagnete si trova in corrispondenza di un conduttore viene disattivato in favore di un altro che è in avvicinamento.

La figura riporta un semplice schema del funzionamento appena descritto: in rosso il magnete attivo C, in azzurro i conduttori fissi sulla guida. C si attiva in prossimità di 6 per poi disattivarsi quando, per effetto dell'avanzamento del veicolo, si trova in corrispondenza della piastra. In seguito si attiverà B in avvicinamento a 5, e così via.

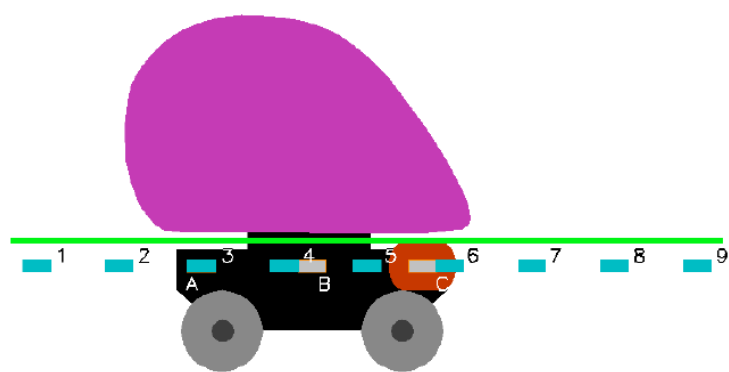


Figura 24 Funzionamento del motore elettrico lineare ad induzione (Gasparini 2005)

In funzione della posizione corrente del veicolo i vari motori lineari a induzione presenti su di esso si attiveranno o disattiveranno in sequenza, alimentati da corrente elettrica a frequenza e voltaggio variabile per modificare opportunamente la velocità.

Benché per quanto si è potuto constatare questo sia il sistema più utilizzato, non è il solo. La coreana Vectus ha utilizzato nel suo circuito test di Uppsala un sistema che si potrebbe definire speculare a quello descritto, nel quale cioè sono i conduttori ad essere mobili mentre i magneti sono solidali alla guida (Gustafsson 2009). Ogni veicolo ha nella parte inferiore dei conduttori che determinano l'attivazione degli elettromagneti alimentati da una linea elettrica ospitata nella guida dove gli stessi magneti sono collocati ad intervalli regolari.

Il funzionamento, illustrato dalla figura seguente, prevede che il veicolo fornisca continuamente al sistema di controllo informazioni rispetto alla propria velocità e posizione, con una precisione al centimetro. In base a queste informazioni il controllo interviene attivando o disattivando gli inverter corretti e fornisce la corrente alla frequenza ed ampèraggio necessari a far muovere i veicoli alla velocità richiesta, permettendo la loro accelerazione o decelerazione. È possibile controllare la velocità dei veicoli con un errore di 0,05m/s (Gustafsson 2009).

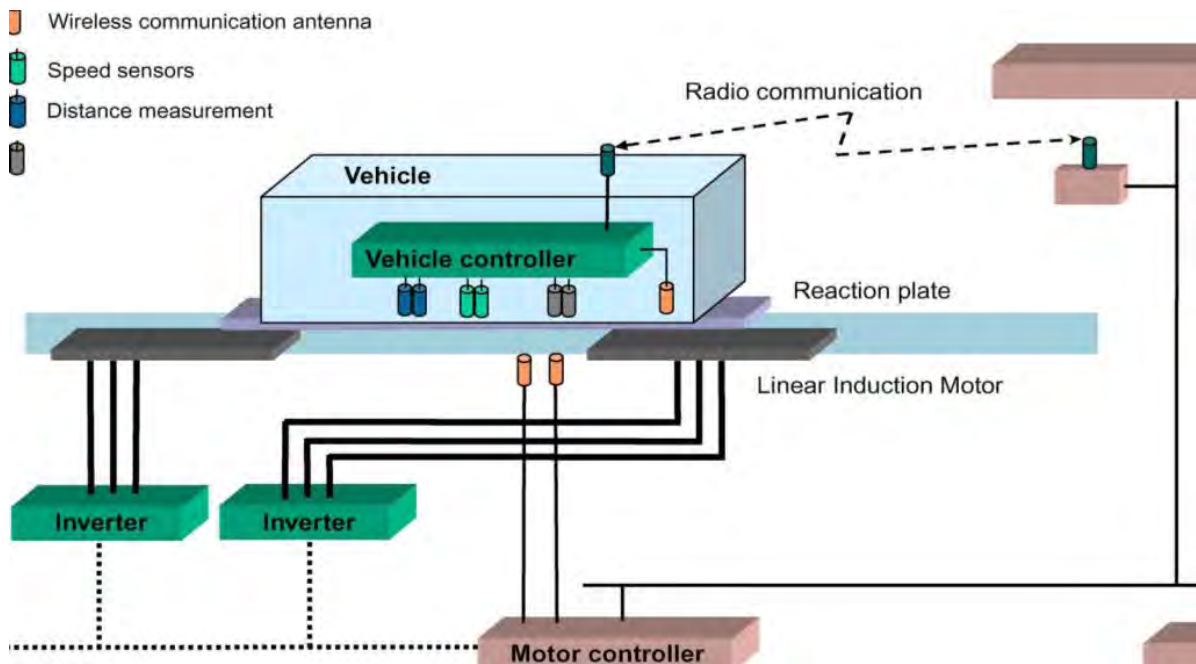


Figura 25 Sistema veicolo-guida-controllo centrale (Gustafsson 2009)

Il diagramma seguente mostra l'entità della corrente, misurata in ampère in ordinata, che attraversa ciascuno dei tre motori solidali alla guida e indicati con diversi colori, a seconda della posizione del veicolo nel tempo, rappresentata con linea nera continua.

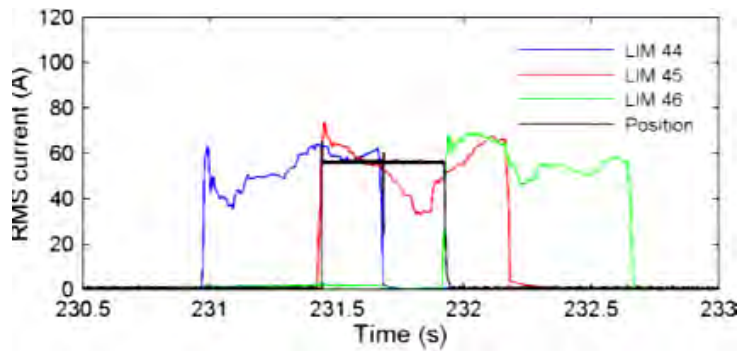


Figura 26 Andamento della corrente in funzione del tempo e della posizione del veicolo (Gustafsson 2009)

I motori elettrici lineari a bordo del veicolo possono essere alimentati in due modi: da una batteria a bordo o da una linea di corrente che percorre la guida. Nel primo caso, la batteria installata sul veicolo può essere ricaricata a veicolo fermo in appositi stalli previsti in alcune fermate e/o nei depositi. In questi veicoli c'è poi anche un'ulteriore batteria che alimenta i sistemi di illuminazione e ventilazione, l'apertura e chiusura delle porte, i display e gli altri dispositivi di bordo.

Questa tipologia di veicoli consente di realizzare guide molto semplici, eliminando i problemi legati alla trasmissione di elettricità attraverso la guida stessa. Ciò abbatta decisamente i costi della guida ma richiede un'attenta valutazione riguardo al numero e alla posizione in rete degli stalli con centralina di carica. Inoltre in questo modo un veicolo può percorrere un numero di chilometri limitato prima di doversi fermare per ricaricarsi e ciò deve essere considerato al momento del dimensionamento della flotta (vedi capitolo 5.3) e dell'elaborazione della strategia di *routing*.

È questo il funzionamento dei veicoli ULTra che, con quattro ruote gommate delle quali le anteriori sono sterzanti, sospensioni tradizionali e telaio in alluminio sono molto simili ad auto elettriche. I motori lineari installati su di essi sono alimentati da batterie a 48 V montate sulla parte posteriore del veicolo. Possono raggiungere i 40km/h, con una decelerazione di emergenza di 3m/s^2 (ULTra s.d.).

Un funzionamento alternativo è quello che prevede l'alimentazione elettrica dalla guida. In questo caso la corrente è fornita dalla rete urbana, dato che una rete di PRT in una città di medie dimensioni consuma annualmente solo il 10% del fabbisogno cittadino. Tale energia alimenta non solo i motori ma anche i vari sistemi di illuminazione, ventilazione e gli altri dispositivi di bordo (TAXI2000 s.d.).

La difficoltà tecnica aggiuntiva in questo caso riguarda la costruzione della guida, nella quale dovranno essere inseriti dei cavi elettrici che a contatto con il veicolo ne alimenteranno i motori.

Per limitare i disagi agli utenti che possono essere causati da un guasto alla linea di distribuzione o al sistema di alimentazione dei motori è previsto che ogni veicolo disponga di una batteria capace di alimentare il motore in caso di guasto per consentirgli di raggiungere in autonomia la stazione più vicina (TAXI2000 s.d.).

Quello descritto è il funzionamento dei due motori lineari ad induzione installati sui veicoli Skyweb Express. Tali veicoli, che non prevedono batterie ad eccezione di quella di emergenza, hanno il vantaggio di essere più leggeri, sebbene richiedano una guida più complessa.

3.2 Guide

Le possibili soluzioni per realizzare una guida sono sostanzialmente diverse tra loro per posizione, materiali impiegati e ruolo delle nuove tecnologie.

Prima di approfondire le caratteristiche specifiche di un sistema di guide si ritiene opportuno tracciare un quadro dei requisiti e dei criteri di progettazione, dal momento che il progetto della guida è un elemento fondamentale che può determinare il successo od il fallimento di un intero sistema. Il non definire preliminarmente un piano generale dell'opera può indurre i progettisti ad ideare un sistema di binari che comporterà forti limitazioni al funzionamento della rete. È perciò essenziale non astrarre dal contesto il problema della progettazione della guida, ma considerarlo parte di un articolato disegno che comprende la tipologia degli scambi, i veicoli e gli *headway* tra di essi, le velocità previste, il peso, l'ambiente nel quale si inserisce l'opera, il contesto urbano ed altri fattori.

J. E. Anderson ha elaborato una serie di criteri e di requisiti ai quali la guida di un sistema di PRT deve rispondere. Egli afferma che nell'intera opera è la guida l'elemento più costoso; questo rappresenta un ulteriore motivo di importanza di questa componente all'interno del progetto complessivo (J. E. Anderson, *How to design a guideway* 2009).

L'autore riflette sul fatto che nella lunga storia del PRT sono state moltissime le soluzioni diverse proposte dai vari costruttori per altrettanti progetti tra i quali Veyar, Monocab, TTI, StaRRcar, Uniflo, Morgantown, Aerospace Corporation System, Cabin Taxi, CVS e Aramis. Nessuno tra questi è stato prodotto in serie.

Oggi che il progresso tecnologico ha risolto il problema del controllo a distanza automatizzato, l'obiettivo è di progettare guide con caratteristiche standard che possano essere prodotte in serie e sulle quali possano circolare i diversi veicoli in produzione. ULTra, Skyweb Express ed altre società stanno già lavorando in questa direzione.

D'altra parte un nuovo mezzo su rotaia come il PRT non può essere la soluzione vincente ad ogni problematica relativa al trasporto urbano, ma come sostiene L. J. Gambaccini "i mezzi di trasporto su rotaia fissa sono solo una tra le soluzioni, al pari di autobus, traghetti o taxi. Se saranno quella selezionata in una certa città per rispondere alle esigenze di trasporto, la chiave del successo sta nel non considerarla in un contesto isolato, ma nell'inserirla in un quadro ampio, affinché possa contribuire a soddisfare le esigenze della società urbana nella sua globalità" (J. E. Anderson, *How to design a guideway* 2009). Dall'applicazione di questi concetti alla progettazione della guida, deriva una particolare attenzione all'inserimento della stessa nel contesto urbano e alla necessità di un progetto che consenta ampliamenti di rete senza particolari ostacoli e che rispetti le esigenze dell'utenza. In questo senso, a livello pratico, una guida ha la funzione di sostenere i veicoli, all'interno dei quali viaggiano i passeggeri, in modo sicuro, affidabile e confortevole per un periodo di vita utile di almeno 50 anni, a costo, velocità ed impatto visivo che siano ritenuti accettabili.

I requisiti che deve possedere la guida sono molteplici, secondo Anderson (2009), e conducono ad alcune ben precise scelte progettuali.



Prima tra tutte è la scelta di rotaie sopraelevate: le soluzioni alternative di linee sotterranee o a livello del terreno sono considerate meno attraenti dai progettisti. Un sistema sotterraneo infatti comporterebbe costi di realizzazione molto elevati, benché implichi il vantaggio di annullare l'impatto visivo dell'opera.

Una linea a terra invece minimizzerebbe i costi, ma con lo svantaggio di necessitare di superfici maggiori per poter essere realizzata; dato che il PRT è pensato come un sistema di trasporto urbano, da inserire cioè in un ambiente in cui l'uso del suolo è particolarmente intensivo, si preferisce la soluzione sopraelevata.

La guida, sostenuta da pilastri, può allora essere collocata sopra le strade urbane esistenti o sopra i marciapiedi con un discreto impatto visivo, ma con occupazione di suolo quasi nulla.

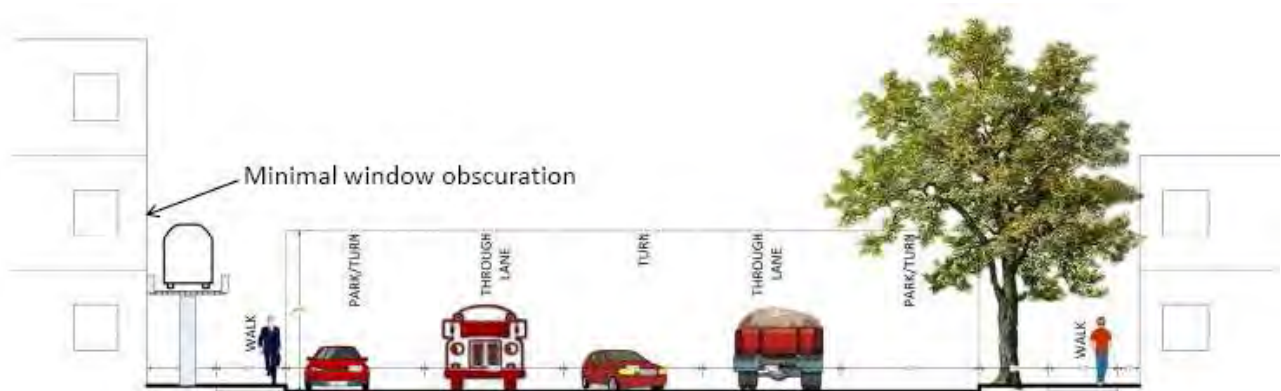



Figura 27 Possibile collocazione della guida (PRT Consulting s.d.)

Fondamentale è progettare un sistema di supporto dei veicoli che garantisca elevati standard di sicurezza per i viaggiatori.

Si è discusso a tale riguardo dell'eventualità di guasti di veicoli in linea che ne comportino l'arresto e di come intervenire per soccorrere i passeggeri coinvolti. L'opportunità di costruire un marciapiede lungo la guida che consenta ai viaggiatori di abbandonare il veicolo in sicurezza non appare una soluzione decisiva del problema né una scelta economicamente conveniente: comporterebbe infatti la necessità di allargare la struttura aumentandone sensibilmente il peso e soprattutto il costo. Inoltre consentirebbe sì ai passeggeri in grado di muoversi autonomamente di mettersi in sicurezza, ma in un sistema pensato per essere accessibile a disabili, anziani e bambini non può essere questa l'unica via di fuga per i passeggeri. Il sistema di sicurezza deve allora essere concepito senza escludere nessuna categoria di passeggeri e i marciapiedi a lato guida non sono quindi previsti (J. E. Anderson, How to design a guideway 2009).

Da un punto di vista strutturale l'obiettivo deve essere quello di contenere le dimensioni del binario, per limitarne il peso e conseguentemente il costo di costruzione. Una dimensione contenuta inoltre riduce l'impatto visivo e favorisce l'inserimento in un contesto urbano, permettendo al sistema di guide di essere più facilmente modellabile attorno agli edifici esistenti.

La guida, nella sua tipologia, non può poi prescindere da una chiara definizione di quella che sarà la configurazione degli scambi (vedi paragrafo successivo): alcune tecnologie di scambio prevedono parti



mobili sulla guida stessa, oltre la presenza di particolari strumenti inseriti nella pavimentazione o nella struttura della linea di corsa. Ci si orienterà allora su monorotaie, su strutture in acciaio o su piste di calcestruzzo. In ogni caso tra le priorità c'è quella di favorire gli interventi manutentivi, di rendere semplice l'installazione e la sostituzione dei vari tratti e la loro parziale o totale rimozione, nonché di consentire l'estensione della rete. L'obiettivo è quindi di realizzare strutture prefabbricate e modulari, facilmente trasportabili ed assemblabili in situ.

Ovviamente la guida deve potersi adattare a rilievi ed avvallamenti, permettere tracciati curvilinei che possano essere percorsi anche a velocità elevate pur garantendo un adeguato comfort di viaggio. Quest'ultimo deve essere valutato considerando che le massime accelerazioni e decelerazioni rientrino negli intervalli di valori consentiti e che lo stesso valga per le accelerazioni centrifughe, con riferimento ad esempio alle normative esistenti in ambito ferroviario.

La rete deve garantire l'accesso ai disabili, rispettando le leggi e normative sul tema, essere utilizzabile in ogni condizione atmosferica, fatti salvi fenomeni eccezionali, e non necessitare di un sistema di riscaldamento per poter funzionare in periodo invernale. Non deve verificarsi accumulo di acque meteoriche, bisogna prevenire la corrosione delle parti metalliche e si deve dimensionare valutando le escursioni termiche e le conseguenti dilatazioni e contrazioni che queste comportano nella struttura. In altre parole il binario deve essere fruibile da chiunque e compatibile con l'ambiente naturale in cui è posto.

Devono essere limitate le interferenze elettromagnetiche che possono essere originate dalla guida, minimizzato l'inquinamento acustico che deriva dal contatto tra veicolo e rotaia e smorzate le vibrazioni prodotte.

Inoltre, si devono prendere le misure necessarie per scongiurare atti di vandalismo e sabotaggi.

Infine, nel caso in cui il posizionamento dei pilastri di sostegno sia a contatto con il traffico stradale cittadino, è da scongiurare la possibilità di collisioni con i pilastri stessi e in ogni caso si devono fare valutazioni sulla possibilità che alberi in prossimità della linea possano comprometterne l'efficienza con rami e foglie o a seguito della loro caduta.

La struttura della guida ed i pilastri devono essere adeguatamente dimensionati per sopportare i carichi previsti. Le sollecitazioni longitudinali sono date dal carico dinamico dei veicoli in movimento e la condizione limite da prendere in considerazione è quella che vede i veicoli molto vicini tra loro, distanziati con *headway* minimo e che si arrestano frenando contemporaneamente con una decelerazione di 0,5g. Tale situazione deve essere valutata congiuntamente all'azione del vento. I carichi verticali sono dati da due combinazioni: la prima considera i veicoli a pieno carico e l'azione del vento a 30 m/s, la seconda solo il vento a 54 m/s, secondo quanto riportato da Anderson (2009). Infine si deve dimensionare considerando l'azione sismica e la massima accelerazione orizzontale relativa alla zona in questione. Devono essere poi rispettate le limitazioni sulla deformazione massima in campata, con riferimento alle normative sui ponti. Il tutto considerando una vita utile di 50 anni (J. E. Anderson, How to design a guideway 2009).

Si presentano ora due modelli di guide elaborati in tempi recenti da Skyweb Express e ULTra, realizzati rispettivamente a Masdar City ed Heathrow (paragrafi 7.2, 7.3), indicando alcuni parametri costruttivi (TAXI2000 s.d.), (ULTra s.d.).

ULTra System propone un sistema modulare, assemblabile rapidamente sul posto. Si tratta di una guida piatta, larga 1,6 m internamente, affiancata da un bordo sopraelevato di 25 cm che consente al sistema ottico di navigazione di mantenere i veicoli in traiettoria corretta. Non comprende parti mobili, e la sola



Figura 28 Veicoli sulla guida ad Heathrow (UK airports information blog s.d.)

tecnologia presente è rappresentata da trasponder immersi nella pavimentazione. Questa può essere realizzata in diversi materiali: struttura in acciaio con piastre di calcestruzzo, fibra di vetro o ancora semplicemente in conglomerato bituminoso se la guida è a livello del terreno.

Le dimensioni sono piuttosto contenute, per un impatto visivo limitato: ampiezza interna 1,6 m, altezza interna 25 cm, larghezza esterna 2,1 m se sopraelevata in acciaio e calcestruzzo, 1,75 m se a terra e altezza esterna 45 cm.

Se la guida sopraelevata è posta sopra una strada, i pilastri la sostengono ad un'altezza di 5,7 m, se invece è sopra un marciapiede l'altezza è limitata a 2,5 m. I pilastri sono posti ogni 18 m ed hanno un peso di 10 tonnellate ciascuno.

Skyweb Express evidenzia come il proprio modello sia modulare, adatto a sostituzioni ed ai frequenti ampliamenti della rete che, essendo costituita da un tratto campione, ammette la possibilità di essere estesa ad aree più vaste.

Non sono forniti parametri specifici rispetto alle dimensioni, ma la distanza tra colonne di sostegno è indicativamente compresa tra i 15 e i 30 m. La guida è fessurata inferiormente per permettere il deflusso dell'acqua. La caratteristica che la distingue dalla precedente è la presenza di una copertura protettiva, intesa sia come protezione dalle intemperie che da atti di vandalismo, ma che potenzialmente può facilitarne l'inserimento nell'ambiente, schermare i campi magnetici, facilitare l'accesso per la manutenzione e limitare la rumorosità.

3.3 Stazioni



Figura 29 Schema di stazione off-line (personalrapidtransit.com s.d.)

Le stazioni all'interno di una rete in un contesto urbano sono collocate in punti strategici stabiliti sulla base dell'organizzazione urbanistica della città per servire in modo capillare il territorio e fornire così all'utenza un servizio diffuso che permetta un'elevata accessibilità. Nel caso di reti realizzate in contesti particolari, come in un aeroporto o all'interno di un complesso universitario, di una cittadella ospedaliera o di un'area commerciale, è la funzione stessa del sistema che determina la posizione delle stazioni.

Un sistema di PRT non pone vincoli alla distanza tra successive fermate, ma ha come obiettivi l'accessibilità e il soddisfacimento della domanda (J. E. Anderson 2007).

Le stazioni non sono poste sulla linea principale ma al di fuori di essa e il loro funzionamento, per descriverlo con le parole di J. E. Anderson (J. E. Anderson, *Personal Rapid Transit: matching Capacity to Demand* 1998), è simile a quello degli svincoli e delle uscite autostradali. Così come le automobili in autostrada, i veicoli percorrono a velocità elevata e pressoché costante la linea principale e la abbandonano, qualora ciò fosse necessario, in corrispondenza degli svincoli che permettono di imboccare la linea esterna di competenza di una certa stazione. È in questa fase che il veicolo, dopo aver abbandonato la rete principale, decelera e si arresta in corrispondenza di uno stallo ed apre le porte per permettere la discesa dei passeggeri a bordo e/o l'imbarco di nuovi viaggiatori. In seguito, chiuse le porte, il veicolo riprende la sua corsa accelerando per raggiungere la velocità di regime ed accede nuovamente alla linea principale precedentemente abbandonata.

Da un punto di vista costruttivo se le guide sono sopraelevate o sotterranee anche le stazioni dovranno esserlo. Pertanto sono necessari degli ascensori che consentano l'accesso anche alle persone che non possono salire le scale, siano essi disabili o anziani, o semplicemente che facilitino l'utilizzo della rete a passeggini e carrozzine o biciclette che possono poi essere comodamente caricati a bordo del veicolo.

Internamente alla stazione non è prevista la realizzazione di servizi di base come i bagni, né la presenza di sale d'aspetto o di panche e sedie dal momento che per questo sistema i tempi d'attesa sono

davvero minimi e contenuti generalmente entro uno o pochi minuti. Si tratta dunque di ambienti semplici e spartani (J. E. Anderson, Personal Rapid Transit: matching Capacity to Demand 1998).

Il dimensionamento è specifico per ciascuna stazione e si basa principalmente sull'entità della domanda che la caratterizza: ognuna è quindi un elemento a sé stante e non esiste una stazione tipo replicabile nelle diverse posizioni della rete. Per le specifiche dei criteri di dimensionamento si rimanda al capitolo 5.2.

Per quanto riguarda le dimensioni si può tracciare un paragone con le stazioni ferroviarie. Quest'ultime hanno una dimensione limite data dalla lunghezza del treno, mentre nel PRT non è previsto un minimo, ma ci si basa sul numero di stalli che è opportuno predisporre in funzione della domanda attesa. In genere la dimensione varia tra 2 e 12 stalli (Anderson J. E., 1998) distribuiti su un solo binario, e qualora si renda necessario aumentare la capacità è possibile affiancare nuovi binari a quello esistente, benché tale soluzione non sia ottimale sia in termini economici che di efficienza del sistema (Anderson J. E., 1998).

Nel caso di un solo binario si può calcolare una capacità di 300 veicoli/ora per stazioni con 2 stalli, fino a capacità di 1300 veicoli orari se sono presenti 12 stalli (Anderson J. E., 1998); si veda anche il paragrafo 1.2.1.

Al di là delle dimensioni variabili ed adattabili al contesto che consentono di limitare i costi di costruzione all'indispensabile, l'elemento che fa delle stazioni in un sistema di PRT un fattore determinante nel favorire l'efficienza è la loro collocazione fuori linea.

Questa scelta progettuale consente di mantenere velocità elevate lungo la guida principale dove i veicoli non risentono delle accelerazioni o decelerazioni di quelli che vi si immettono o che la abbandonano. Di conseguenza è possibile mantenere alte velocità lungo tutta la linea, garantendo alte capacità alla rete. Risulta allora sufficiente una flotta di veicoli numericamente contenuta e quindi relativamente meno costosa.

Se non vi fossero binari esterni ed i veicoli si arrestassero in linea alle stazioni, tutti i *pod* sarebbero obbligati a fermarsi ad ogni stazione, o comunque a procedere con spaziature ed intertempi maggiori e con velocità medie inferiori, e ciò diminuirebbe notevolmente la capacità di rete. Il funzionamento sarebbe simile a quello di una rete di tram, dove tra i passaggi di veicoli successivi intercorrono diversi minuti.

Le stazioni fuori linea garantiscono allora la possibilità di avere veicoli molto vicini tra loro, con intertempi dell'ordine del secondo o addirittura inferiori grazie alla possibilità di rallentare e imbarcare passeggeri senza ostacolare il transito dei veicoli che proseguono nella loro corsa, proprio come avviene in autostrada e contrariamente a quanto accade in ferrovia o in metropolitana.

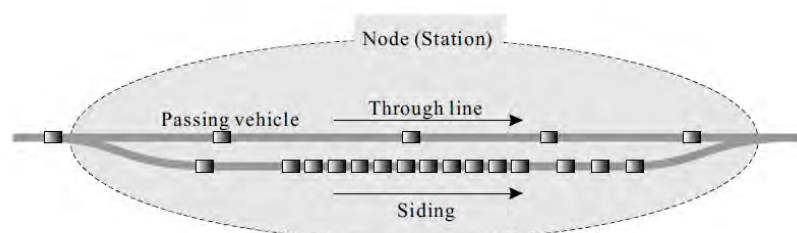



Figura 30 Schema funzionale di una stazione PRT
(Won, Choe e Karray, Optimal Design of Personal Rapid Transit 2006)



Questo sistema appare pratico ed efficace per veicoli di piccole dimensioni che possono ospitare solo pochi passeggeri e limitare così i tempi di salita e discesa.

In ogni caso esiste un limite dato dal fatto che se tali tempi risultano essere elevati per un qualsiasi motivo per un certo veicolo, quelli che lo seguono risultano penalizzati in quanto non possono riprendere la corsa fintanto che il primo non abbia chiuso le porte ed abbandonato il proprio stallo. Si tratta comunque di contrattempi poco frequenti e altrettanto poco significativi, anche in considerazione del fatto che i sistemi PRT sono pensati per servire spostamenti casa-lavoro o casa-studio ed in generale attività per le quali ci si trova a fare viaggi rapidi limitando le perdite di tempo (J. E. Anderson 2007).

Il funzionamento non stop garantito da questa collocazione delle stazioni, consente tempi di percorrenza minori ed un comfort maggiore, assicurando spostamenti origine-destinazione senza fermate intermedie ed incrementando il comfort di viaggio per i passeggeri i quali hanno la possibilità di viaggiare da soli o in gruppi ridotti di al massimo sei persone. I tempi di attesa poi risultano minimi e pressoché nulli nei periodi in cui la domanda non è troppo intensa, mentre si attestano sull'ordine del minuto o di pochi minuti negli orari di punta (J. E. Anderson 2007).

Con le stazioni esterne è possibile poi far sostare i veicoli vuoti in attesa di passeggeri con un conseguente risparmio energetico, dal momento che in alternativa dovrebbero continuare a spostarsi sulla rete pur senza viaggiatori a bordo per non intralciare la linea.

Alle stazioni possono essere predisposti degli stalli dove è possibile per i veicoli ricaricare la batteria senza ostacolare il transito di altri. Infine in questo modo il servizio può essere offerto per tutta la giornata, poiché il sistema *on demand* garantisce che i veicoli si spostino solo quando c'è una domanda da soddisfare e non si verifica quindi una situazione paragonabile a quella degli autobus di linea delle nostre città che vediamo viaggiare vuoti nei periodi di minor domanda (J. E. Anderson 2007).

Il sistema delle stazioni off-line costituisce dunque un buon compromesso tra accessibilità e velocità, garantendo alte velocità di percorrenza anche con stazioni molto ravvicinate tra loro, e assicurando una buona accessibilità al territorio.

3.4 Scambi

Gli scambi all'interno di una rete di Personal Rapid Transit sono ineliminabili e frequenti; possono essere gestiti con tecnologie differenti che hanno grande influenza sul tipo di binario di guida da realizzare (J. E. Anderson, How to design a guideway 2009).

L'ipotesi di eliminare il problema della progettazione funzionale e tecnologica degli scambi prevedrebbe una serie di guide circolari tra loro tangenti e la necessità che i passeggeri, nei punti di tangenza, cambino veicolo. Tuttavia in questo caso si annullerebbero molti dei vantaggi di una rete di Personal Rapid Transit e si può intuire la conseguente diminuzione della domanda. Gli scambi risultano quindi una parte essenziale del progetto di rete.

Essendo le stazioni esterne rispetto alla guida principale, ciascuna di esse comporta due scambi che fungono da entrata ed uscita. Inoltre, nella rete vera e propria dove le guide si incrociano si possono prevedere intersezioni multilivello, o più frequentemente a Y con due guide convergenti o una che diverge.

Rispetto ai multilivello, gli scambi ad Y hanno il vantaggio di essere visivamente meno impattanti, ma il difetto di produrre dei fenomeni di congestione "a collo di bottiglia" dove due guide confluiscono in una sola (J. E. Anderson, Control of Personal Rapid Transit Systems 2010).

Per evitare queste situazioni si è sperimentata la convenienza di un'alternanza tra scambi convergenti e divergenti (J. E. Anderson, Control of Personal Rapid Transit Systems 2010).

La prima operazione nella progettazione della rete consiste nello stabilire in che modo i veicoli potranno muoversi sugli scambi e da ciò deriva la scelta del tipo di sostegno. Diverse soluzioni sono state proposte dagli studiosi in questo campo nel corso degli anni e dalle varie case costruttrici in epoca recente.

Possiamo classificarle in tre categorie, in ciascuna delle quali è un elemento differente a garantire al veicolo la possibilità di svolta. Tali elementi sono: guide mobili, ruote sterzanti e dispositivi di bordo.

Una prima soluzione adottata fu quella della guida mobile in cui erano elementi meccanici della guida stessa a posizionarsi in modo differente alle intersezioni per assicurare al veicolo in transito il percorso corretto. Un'applicazione è quella del Monocab di Haltom negli anni '60 (J. E. Anderson, Some Lessons from the History of Personal Rapid Transit (PRT) 1996).

Questa modalità non è più adottata in quanto comporta grandi limitazioni. Il fatto che la guida debba muoversi implica intertempi elevati tra i veicoli: dopo il transito di un *pod* e prima dell'arrivo di un successivo, nel caso in cui quest'ultimo dovesse imboccare un ramo diverso dell'intersezione, il binario di guida deve potersi riposizionare, operazione che richiede un certo tempo e quindi va ad incrementare l'*headway* minimo di sicurezza.

Ai tempi di svolta più elevati si sommano motivazioni legate all'intero sistema. Il guasto ad uno scambio nei suoi elementi meccanici determina infatti una minor efficienza di tutta la rete: nel caso in cui il ramo inutilizzabile fosse aggirabile non viene compromessa l'accessibilità al resto delle rete, ma potrebbe essere resa inaccessibile una stazione o un'intera zona.



I vantaggi che comporta questa soluzione sono invece la semplificazione dei sistemi del veicolo con la riduzione di parti mobili di bordo e la possibilità di trasferire al PRT una tecnologia già sperimentata in campo ferroviario.

La storia ci dice che gli aspetti negativi della rotaia mobile in questo campo di applicazione ne hanno presto determinato l'abbandono, incentivando la ricerca di nuove tecnologie che potessero risolvere in altro modo il problema.

Una soluzione oggi applicata e discussa è quella di installare su ogni veicolo un sistema meccanico che permetta di svoltare in sicurezza. Tale tecnologia semplifica la costruzione dei binari di guida che non necessitano di nessun dispositivo mobile né di tecnologie interne, favorendo una posa più rapida di elementi che possono anche essere modulari. Inoltre permette ai veicoli di mantenere velocità elevate, non pregiudica negativamente gli intertempi veicolari e un eventuale guasto al sistema sterzante di un veicolo non ha effetto sull'efficienza globale del sistema.



Figura 31 Dispositivo di scambio di bordo (Gasparini 2005)

La Sky Web Express utilizza questa tecnologia. Nel dettaglio si tratta di due bracci alle estremità dei quali sono collocate due rotelle. I bracci sono collegati ad un albero centrale il quale è impernato nella mezziera dell'asse del veicolo rispetto al quale può oscillare in modo che una delle rotelle entri a contatto con la guida del binario. Il sistema è installato sia sull'asse anteriore che sul posteriore. L'oscillazione dell'albero è indotta da un elettromagnete che viene attivato in corrispondenza degli scambi (Gasparini 2005).

La figura sottostante mostra come le rotelle interagiscono con la guida a seguito dell'oscillazione dell'albero.

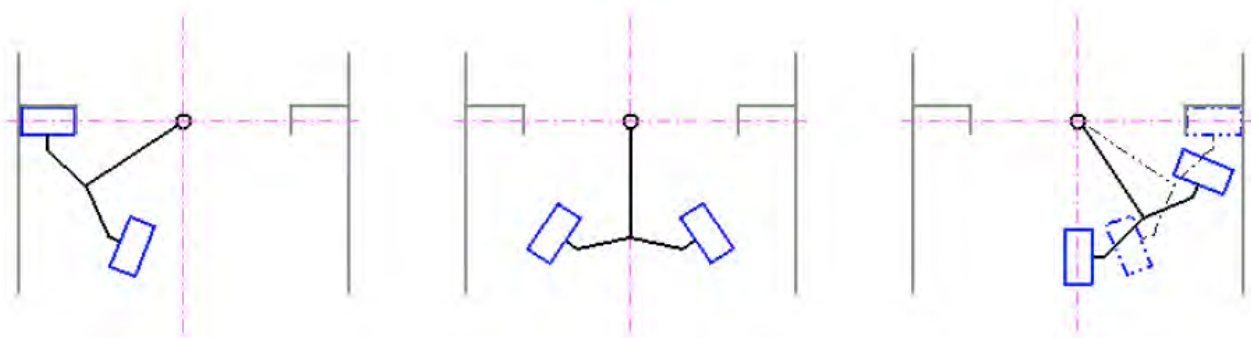
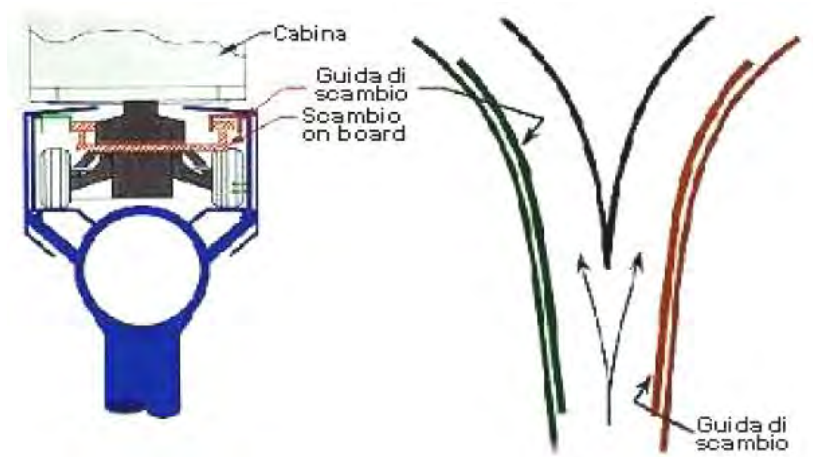


Figura 32 Schema del funzionamento del dispositivo di scambio (Gasparini 2005)

Questo sistema è realizzato per contenere l'ingombro del meccanismo sul veicolo e della guida stessa.



**Figura 33 Guida e dispositivo di scambio
(Gasparini 2005)**

L'ultima soluzione disponibile, applicata nelle due reti di PRT realizzate ad Heathrow (ULTra s.d.) e a Masdar City (2getthere s.d.), prevede veicoli con ruote sterzanti. La guida in questo caso ha una struttura semplicissima, le svolte avvengono rapidamente e sono consentiti *headway* minimi inferiori al secondo.

2getthere, che ha realizzato il PRT a Masdar City, fornisce una sommaria descrizione riguardo alla navigazione dei veicoli sulla guida (2getthere.eu).


Questi si spostano in rete e il centro di controllo conosce la posizione di ciascuno elaborando le informazioni fornite dai computer di bordo riguardo al numero di giri delle ruote e li direziona fornendo il necessario raggio di sterzata. Il veicolo può mantenersi internamente alla guida grazie a sistemi di sensori ottici che la individuano.

Nel caso di Heathrow ULTra realizza dei margini rialzati di qualche centimetro per facilitare l'identificazione del limite della guida ai software (ULTra s.d.).

Ulteriore contributo fondamentale per mantenere il veicolo in traiettoria è la presenza di magneti cilindrici i quali vengono inglobati nella pavimentazione del binario di guida e sono posizionati ogni 2-4 metri, garantendo una precisione di localizzazione ottimale, con un margine di errore di soli 2 cm in rettilineo. La presenza dei magneti è rilevata da un sensore installato dietro alle ruote anteriori di ogni veicolo (2getthere s.d.). I mezzi utilizzati in reti che fanno uso di questa tecnologia sono dotati di ruote anteriori sterzanti.

Stabilita la tecnologia da utilizzare negli scambi, restano definite anche le caratteristiche dei veicoli che li percorreranno e in particolare risulteranno noti i raggi minimi di curvatura da utilizzare. Si possono così stabilire le minime distanze consentite tra scambi successivi per contenere l'accelerazione laterale subita dai veicoli in curva, in base anche alla velocità di percorrenza delle curve stesse.

Non è da sottovalutare infine il problema della gestione dei conflitti di traiettoria: due veicoli potrebbero teoricamente trovarsi a dover impegnare uno scambio a Y nello stesso momento. Questa situazione può essere evitata se si attua una buona strategia di *routing*.



Anderson (2010) propone un primo semplicistico approccio in cui l'elaborazione dei percorsi è realizzata in modo che un veicolo lungo il tragitto attraversi solo scambi liberi, cioè in modo che la sua traiettoria non entri in conflitto con altre. Questo tipo di assegnazione è definito sincrono e comporta notevoli svantaggi che si traducono principalmente in tempi di attesa elevati, soprattutto in reti con numerose intersezioni.

Appare più opportuno allora, sempre secondo l'autore americano, un approccio quasi-sincrono in cui un veicolo in procinto di raggiungere un'intersezione occupata viene deviato in tempo reale su un percorso alternativo e quindi i tragitti non sono governati su una base temporale assoluta come nel caso sincrono, ma si guarda alle posizioni relative dei veicoli in rete per modificare il loro percorso in maniera dinamica.

Si osserva che la problematica del *routing*, per quanto riguarda gli scambi in rete, è tuttora oggetto di ricerca e non esistono reti già realizzate che abbiano una complessità tale da costituire un esempio del funzionamento degli scambi ad Y, fatta eccezione per gli scambi relazionati all'accesso e all'uscita dalle stazioni per i quali le problematiche sono differenti.

3.5 Sistema di controllo e funzionamento a richiesta

Le reti di PRT hanno un funzionamento *on-demand* in cui il passeggero arrivato alla stazione richiede un veicolo per soddisfare la propria esigenza di trasporto. Questo sistema permette così di limitare gli spostamenti dei veicoli vuoti, i quali vengono inviati alle stazioni che ne necessitano, e di contenere i costi di gestione oltre a rendere possibile il funzionamento continuativo ed efficiente di tutto il sistema che si attiva solo per soddisfare le domande dell'utenza e non prevede corse a vuoto senza una precisa motivazione. Inoltre, in questo modo il passeggero non solo richiama un veicolo alla propria stazione di partenza, ma impone anche la destinazione che sarà raggiunta senza fermate intermedie con conseguente risparmio di tempo.

Il sistema che permette di realizzare questo servizio è molto complesso e articolato e se ne vuole qui chiarire il funzionamento in termini generali.

Esso è costituito da diversi dispositivi tra loro interfacciati che consentono a livello globale un continuo controllo dello stato del sistema: è sempre nota la posizione di tutti i veicoli, la loro prossima destinazione e le richieste dei passeggeri alle varie stazioni.

Il sistema operativo di una rete di PRT è costituito da tre principali tipologie di dispositivi: il Central Control System (CCS), il Wayside Communication System (WCS) composto dai dispositivi di bordo dei veicoli e lo Station Control System (SCS), a sua volta composto dal Passenger Information and Display System (PIDS) e dallo Zone Controller (Hwang, et al. 2013).

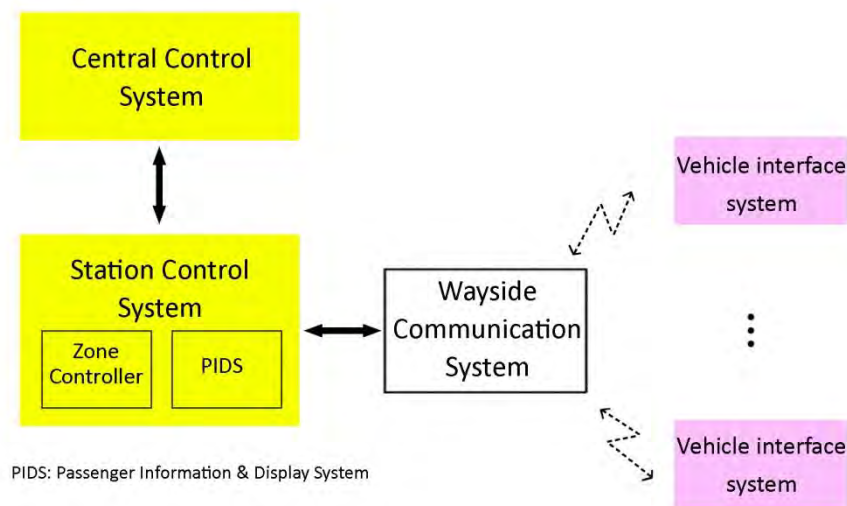


Figura 34 Schema dei dispositivi di controllo (Hwang, et al. 2013)

Il CCS è il computer centrale che gestisce tutta la rete, calcola ed elabora l'assegnazione dei veicoli e comunica il percorso opportuno ed ottimale in ogni situazione, invia i comandi di movimento e riceve le richieste di veicoli vuoti alle stazioni. Esso è connesso ai dispositivi di controllo delle stazioni SCS e agli stessi veicoli.

Alle stazioni principali è presente uno Zone Controller, un dispositivo adibito al controllo di un gruppo di stazioni vicine tra loro, mentre ad ogni fermata, a servizio dei passeggeri, è collocato un sistema PIDS. Si tratta di interfacce elettroniche attraverso le quali il viaggiatore può richiedere un veicolo e ricevere le informazioni e disposizioni per poter accedere al servizio.

È proprio l'arrivo di un passeggero ad una stazione a mettere in moto il sistema.

Rifacendoci a quanto descritto da Hwang & al. (2013) riguardo ad una rete test realizzata in Corea, ripercorriamo i passaggi che permettono all'utente di utilizzare il sistema nella modalità "a richiesta".

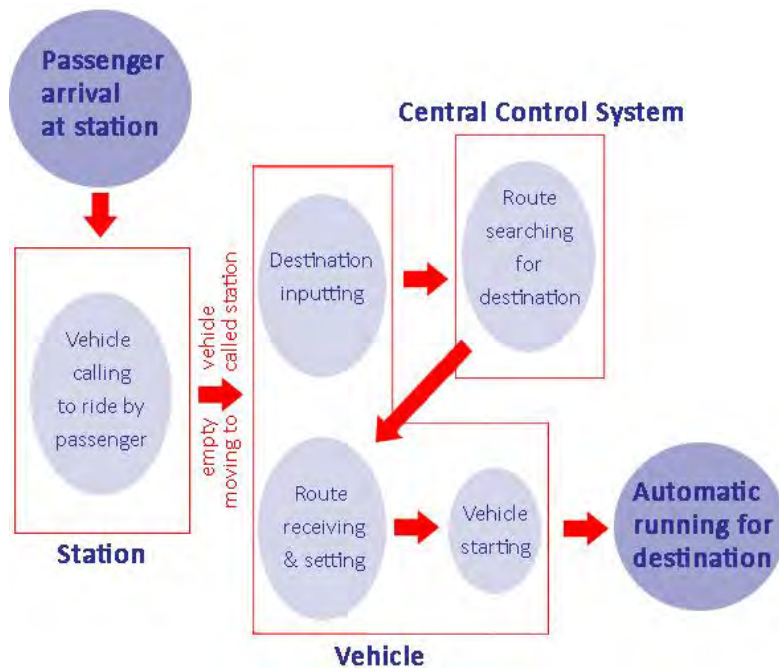


Figura 35 Fasi successive dall'arrivo di un passeggero in stazione (Hwang, et al. 2013)

Come mostrato in figura, all'arrivo in stazione il passeggero tramite il PIDS avvia un flusso di dati che porterà un veicolo vuoto alla stazione in questione. Qui l'utente potrà salire a bordo ed impostare la destinazione desiderata, avviando così un nuovo flusso di informazioni che il veicolo riceverà infine con l'indicazione del percorso da seguire e il comando di partenza. Potrà allora essere raggiunta la destinazione selezionata.

Scendendo nel dettaglio dei flussi informativi si può dire che inizialmente dal PIDS di una stazione viene inviata al CCS la richiesta di un veicolo vuoto. È il CCS che, nota la disposizione e la condizione dei veicoli in rete, ricerca il veicolo vuoto disponibile nel punto più vicino alla stazione dalla quale è stata fatta la richiesta. Il controllo centrale elabora anche il percorso ottimale per il veicolo in questione, che lo porterà nel minor tempo possibile alla destinazione dove è atteso.

L'arrivo alla stazione è rilevato dallo SCS che fa aprire le porte per permettere al passeggero di salire a bordo. Una volta sul veicolo il viaggiatore, o il piccolo gruppo di viaggiatori, imposta su un pannello la destinazione desiderata.

Ancora una volta la richiesta perviene al controllo centrale che elabora il percorso necessario per portare a destinazione il veicolo in tempi brevi, invia al computer di bordo l'informazione necessaria attraverso lo SCS e comanda la partenza. La destinazione viene infine raggiunta senza fermate intermedie.

Lo schema seguente mostra nel dettaglio le successive fasi che portano dall'arrivo di un passeggero alla stazione alla sua partenza verso la destinazione prescelta evidenziando i flussi di informazioni tra sistema di controllo centrale, dispositivi di bordo e sistema di controllo in stazione, che regolano ogni aspetto dello spostamento, dall'apertura e chiusura delle porte alla determinazione dei percorsi da seguire.

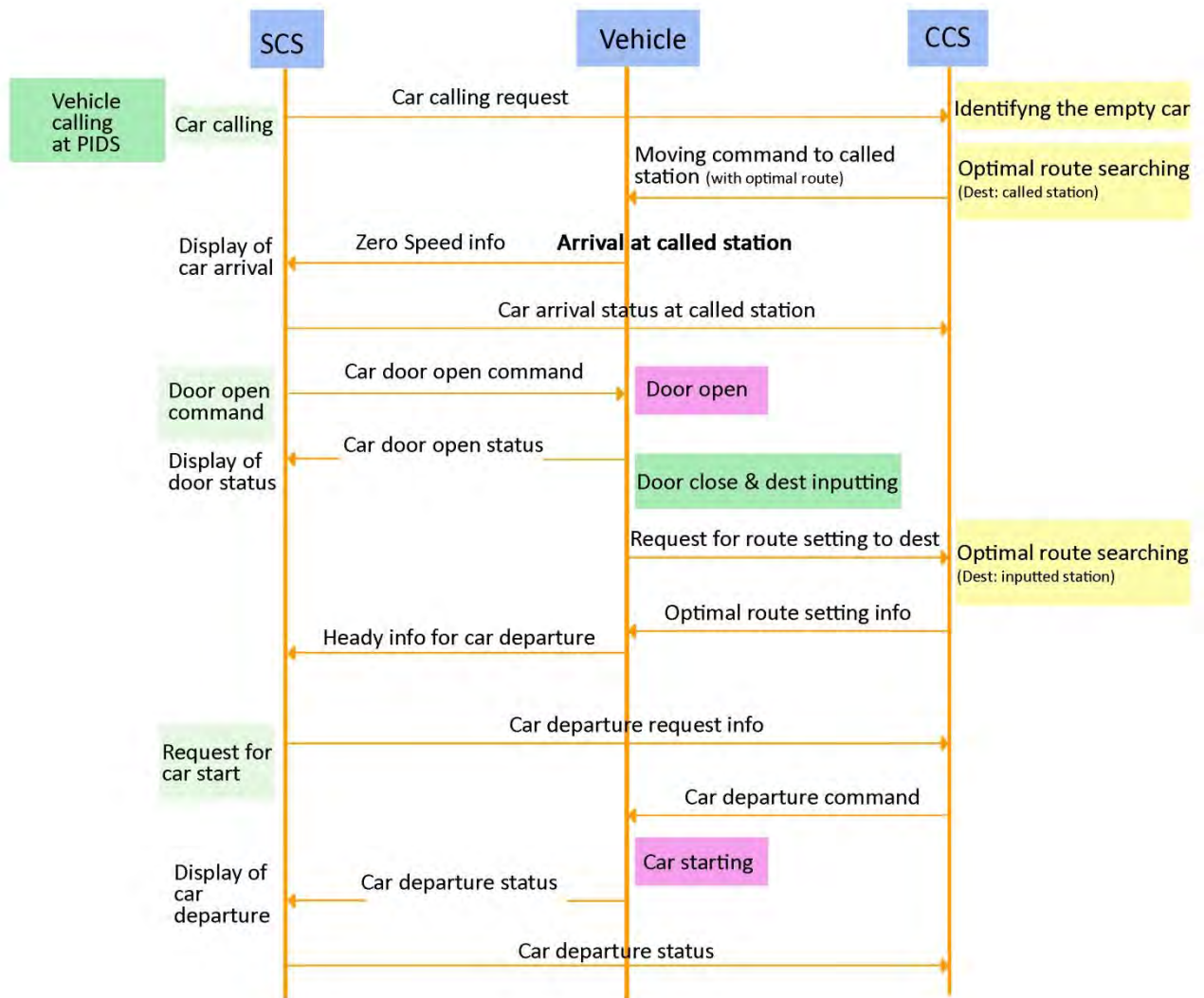



Figura 36 (Hwang, et al. 2013)

Anderson, in *Control of PRT Systems* (2010), osserva che in ogni caso è sempre preferibile strutturare il sistema in modo che un eventuale guasto al controllo centrale non implichi necessariamente un blocco generale, ma causi solo un funzionamento meno efficiente.



A conclusione di questo paragrafo si osserva che quanto esposto con riferimento al lavoro di Hwang & al. (2013) è relativo ad un sistema che non opera in modo preventivo, ma solo in modo reattivo (vedi cap. 6).

Tuttavia sappiamo che con la modalità preventiva è possibile ridurre i tempi di attesa, se viene realizzata sulla base di dati di domanda affidabili. Di conseguenza non sempre l'invio di un veicolo vuoto è la diretta conseguenza della richiesta di un passeggero alla stazione, ma può avvenire in previsione di questa eventualità. Il funzionamento generale rimane lo stesso così come il tipo di interconnessione tra i diversi sistemi di controllo, ma alla richiesta dell'utente si sommano le previsioni di domanda fatte dallo stesso CCS che determinano il movimento preventivo dei veicoli vuoti.

Inoltre non si è fatto cenno alle strategie di *routing* che il CCS implementa per indicare ad ogni veicolo quale percorso intraprendere per raggiungere la propria destinazione; per questo aspetto si rimanda al capitolo 6.

Ciò che appare fondamentale evidenziare è come il funzionamento dell'intera rete sia regolato in modo completamente automatizzato e come il controllo centrale disponga sempre di un quadro completo della condizione del sistema e possa così governarlo nel modo più efficiente possibile in funzione delle strategie che vengono utilizzate per il movimento dei veicoli, siano essi vuoti o meno.



4. DOMANDA

In questo capitolo ci si propone di approfondire gli aspetti relativi alla modellazione della domanda in un sistema di PRT. Su questo argomento si è riscontrata una certa carenza in letteratura, tuttavia si tratta di una tematica di fondamentale importanza: conoscere l'andamento della domanda è determinante per poter progettare una rete adeguata, per dimensionare la flotta in modo tale da poter soddisfare le richieste dell'utenza, per stabilire quante stazioni prevedere e dove collocarle e per distribuire i veicoli tra di esse in modo quanto più possibile efficiente.

Per altri sistemi di trasporto la domanda può essere stimata con una buona approssimazione utilizzando dati storici che possono essere continuamente aggiornati grazie ad attività di conteggio e monitoraggio.

La difficoltà per il PRT risiede nel fatto che si tratta di un sistema innovativo: come detto ne esistono solo poche realizzazioni per lo più sperimentali, perciò non è possibile rilevare le preferenze dell'utenza, ma solo ricavare delle preferenze dichiarate sulla base di questionari che ipotizzano la presenza di una o più linee di PRT. Tali preferenze differiscono da quelle rilevate in modo diretto e sono caratterizzate da un'elevata incertezza e una minore affidabilità.

Ulteriori difficoltà nell'analisi della domanda derivano dal contesto in cui si trova la rete: questa infatti può essere realizzata per essere complementare ai sistemi di trasporto pubblico esistenti e perciò nell'analisi della domanda deve essere inserita in una complessa struttura multimodale. Si deve considerare sia la componente di domanda che ha per origine e destinazione ultima fermate del PRT sia una parte detta appunto multimodale, complicando la corretta previsione dell'entità della domanda stessa.

Un aspetto secondario è poi il fatto che quando si presenta una richiesta le viene associato un veicolo e non viene sempre contemplata la possibilità che l'utenza effettui il *ride sharing*. Si tratta cioè di stabilire quale sarà il tasso di occupazione, oltre che di determinare se i passeggeri che condividono un veicolo abbiano la stessa destinazione o meno.

Si potrebbe inoltre osservare, dato il funzionamento *on demand* del PRT, che la previsione della domanda è un aspetto trascurabile: potrebbe essere sufficiente un approccio reattivo nel quale al manifestarsi di una richiesta il sistema invia alla stazione di origine un veicolo atto a soddisfarla. Tuttavia è dimostrato (di seguito sono riportate le considerazioni a riguardo di Zheng, Jeffery e McDonald (2009)) che un approccio preventivo basato su una strategia di gestione e previsione della domanda comporta un funzionamento migliore del sistema, quantificabile attraverso la misurazione dei tempi medi di attesa dell'utenza alle stazioni.

Il presente capitolo riporta in una prima parte alcune considerazioni (Zheng, Jeffery, & McDonald, 2009) sulla fondamentale importanza dell'applicazione di strategie di gestione del traffico relative alla previsione della domanda nei sistemi PRT. Tali osservazioni sono supportate da una simulazione su rete reale che illustra quantitativamente quale sia il vantaggio di tali strategie.

Nella seconda parte del capitolo, in risposta alla questione riguardante il come ottenere stime di domanda e matrici origine-destinazione per una rete non ancora realizzata, si fa riferimento ad un caso



pratico esposto da Li & Al. (2010), i quali descrivono una possibile soluzione per l'indagine delle preferenze dichiarate in un contesto fortemente multimodale.

4.1 Importanza dei modelli di previsione

Gli autori (Zheng, Jeffery, & McDonald, 2009) sostengono la tesi secondo la quale una previsione che approssimi correttamente la domanda reale garantisce la possibilità di gestire il sistema con un approccio preventivo e di conseguenza di poterlo utilizzare in modo efficiente.

Indice di ciò è la riduzione dei tempi di attesa medi dell'utenza quando è utilizzata una strategia di gestione della domanda. Nel caso in cui però la previsione fosse fortemente differente dalla realtà osservata e l'errore fosse in eccesso, ne deriverebbe uno spreco di risorse, se invece l'errore fosse in senso contrario si farebbe un uso non ottimale del sistema.

Nel primo caso infatti la previsione induce ad attendere una domanda superiore a quella che poi effettivamente si manifesterà e ne conseguono spostamenti di veicoli vuoti tra le stazioni che si riveleranno immotivati.

Nel secondo invece la previsione sottostima la realtà e dunque per alcune richieste, cioè per la quota di domanda non prevista, essendo inattuabile un'azione preventiva, si rende necessario un approccio reattivo che comporta maggiori tempi di attesa.

Due sono le strategie di gestione proposte dagli autori, chiamate "*local demand prediction tactic*" e "*long term demand prediction strategy*", che tradurremo rispettivamente in "metodo di previsione della domanda locale" e "strategia di previsione della domanda a lungo termine".

Con la prima espressione si indica una previsione di domanda a breve termine e limitatamente ad una sola stazione: l'obiettivo è di prevedere quelle che saranno le richieste ad una stazione con un anticipo temporale x rappresentato dal tempo necessario ai veicoli vuoti disponibili in un deposito o in altra stazione per raggiungere il luogo in questione.

La seconda, come suggerisce il nome, è una strategia più a lungo termine che coinvolge tutta la rete e ciascuna stazione: il fine è di prevedere le variazioni di domanda in tutte le stazioni in periodi di 5-10 minuti, a partire dalla conoscenza di massima dell'evoluzione su base giornaliera della domanda stessa.

Le considerazioni sulla bontà delle due strategie sono derivate da una simulazione su una rete prodotta grazie al sistema informatico di simulazione "Hermes" (High Extensive Resource for Modeling Event-Driven Supply Chains): gli autori simulano il funzionamento della rete rappresentata in figura seguente.

Essa in parte ricalca quella realizzata all'aeroporto londinese di Heathrow tra il terminal 5 ed il business park (indicato in seguito con P5) ed in parte è rappresentativa di un ipotetico ampliamento della stessa.

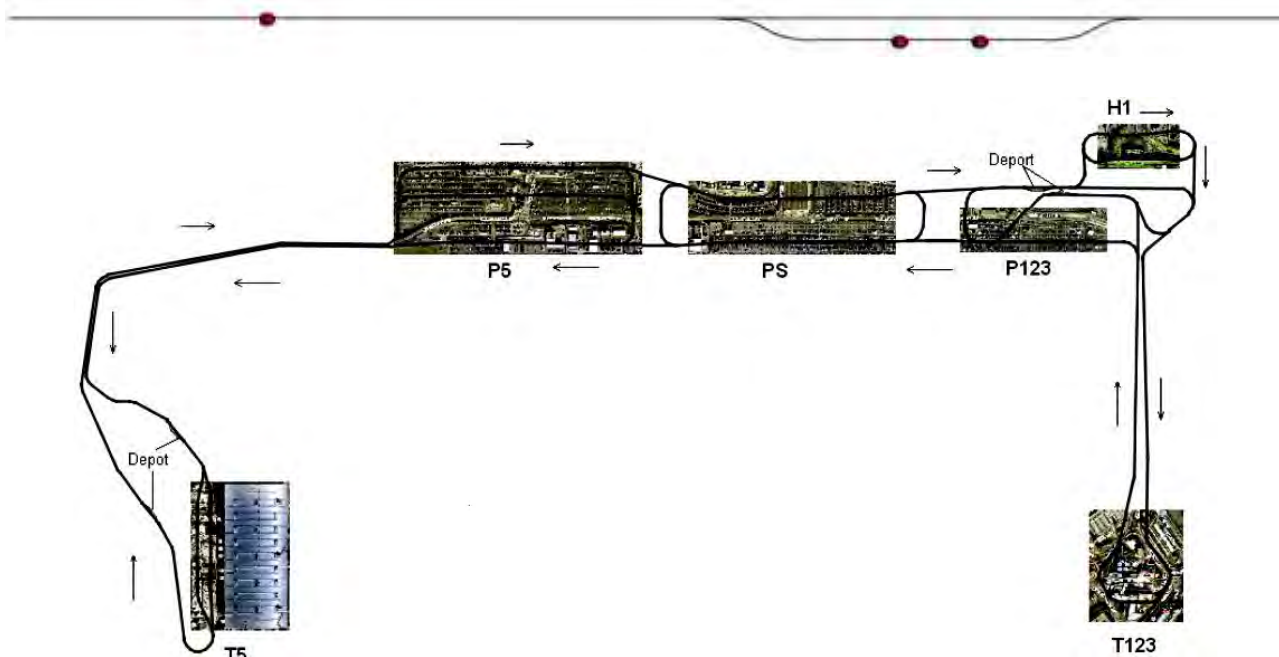


Figura 37 Rete di PRT oggetto di simulazione (Zheng, Jeffery, & McDonald, 2009)

Tale rete ha un'estensione di circa 16,5 km ed è caratterizzata da 23 stazioni ripartite tra i vari terminal, i parcheggi e l'albergo come indicato in tabella 3, e da quattro depositi per veicoli, due in prossimità del terminal 5 ed altrettanti presso l'area dei terminal 1, 2 e 3.

Simbolo sulla mappa	Stazioni	Descrizione
T5	1,2,3,4	Terminal 5
T123	5,6,7	Terminal 1, 2 e 3
P5	8,9,10,11,12	Parcheggio vicino al Terminal 5
PS	13,14,15,16,17,18	Parcheggi condivisi tra tutti i Terminal
P123	19,20,21	Parcheggio vicino ai Terminal 1,2,3
H1	22,23	Hotel

Tabella 3

Sulla rete descritta è caricata la domanda con i valori riportati in tabella 4 ed espressi in veicoli/ora, non in passeggeri in quanto la prima è l'unità di misura preferibile per trattare il sistema (l'unico valore diverso da zero sulla diagonale indica gli spostamenti tra le due fermate dell'albergo.)

Tali valori sono relativi all'orario di punta mattutino o pomeridiano, apprezzabili nel grafico di figura 38 che riporta l'evoluzione temporale della domanda in un'intera giornata.

	T5	T123	P5	P123	PS	H1	Sum
T5	0	360	1000	24	12	40	1436
T123	120	0	15	900	135	60	1230
P5	900	30	0	60	30	10	1030
P123	48	990	60	0	36	60	1194
PS	24	135	30	36	0	30	255
H1	24	66	10	60	30	20	210
Sum	1116	1581	1115	1080	243	220	5355

Tabella 4

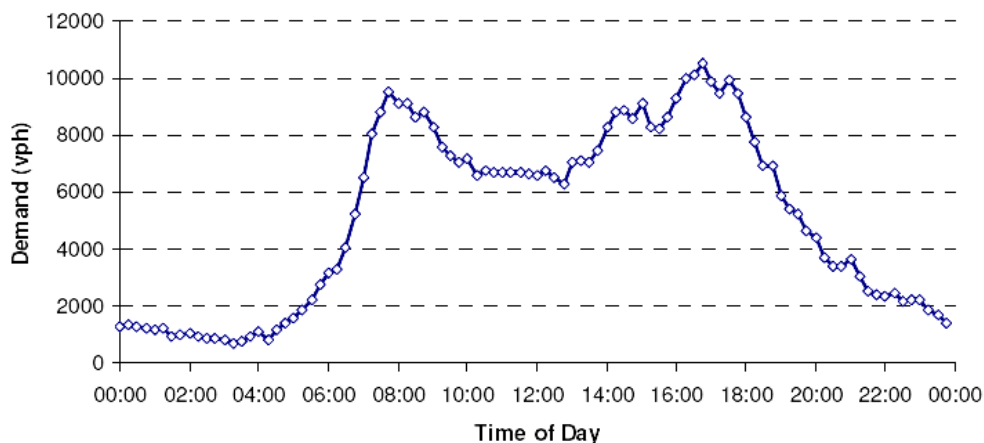


Figura 38 Profilo di domanda (Zheng, Jeffery, & McDonald, 2009)

Si considera infine che i veicoli in rete si muovano con una velocità di 10 m/s (36 km/h), con un *headway* minimo pari a 0,5 s.

Una prima simulazione è volta a testare il “metodo di previsione della domanda locale”. Il simulatore ricrea il comportamento della rete con e senza l’applicazione del suddetto metodo per consentire poi un confronto diretto tra le due situazioni, basato sul raffronto dei tempi d’attesa medi dell’utenza alle stazioni. Il sistema è quindi implementato per prevedere con un anticipo x il quantitativo di veicoli che devono essere inviati ad una stazione per soddisfare la domanda che è prevedibile si manifesti, basandosi appunto sulla previsione dell’evoluzione della domanda nel breve periodo.

Si osservi che il simulatore, nel compiere questa operazione, considera: il numero di veicoli pieni o vuoti presenti alla stazione in esame, il numero di veicoli che vi giungeranno entro il tempo x ed il numero di utenti che vi arriveranno. Inoltre si assume che ogni stazione abbia un deposito di veicoli vuoti che disti un tempo x .

La seconda simulazione, che testa la “strategia di previsione della domanda a lungo termine”, ha l’obiettivo di migliorare il funzionamento del sistema distribuendo i veicoli alle varie stazioni nel modo più conveniente possibile per rispondere all’evoluzione della domanda all’interno di un periodo di 24 ore.

Per verificare la bontà ed applicabilità della suddetta strategia in tutte le condizioni di domanda, gli autori hanno ripetuto la simulazione in sei diverse situazioni: di domanda media, bassa, crescente, decrescente ed in corrispondenza del picco mattutino e di quello serale. È inevitabile e facilmente intuibile che l’applicazione di una simile strategia di gestione non comporti alcun vantaggio in condizioni di domanda stabile, mentre si avranno migliorie nell’efficienza globale nelle situazioni di marcata tendenza crescente o decrescente della stessa.

I risultati della prima simulazione, condotta e mediata su tutto l’arco della giornata, sono mostrati nel grafico seguente. Si può apprezzare come l’applicazione del metodo di previsione della domanda comporti nella maggior parte delle stazioni una contrazione dei tempi di attesa medi: questi si riducono dell’11,5%. La variazione, seppur contenuta, è considerata statisticamente significativa (Zheng, Jeffery, & McDonald, 2009).

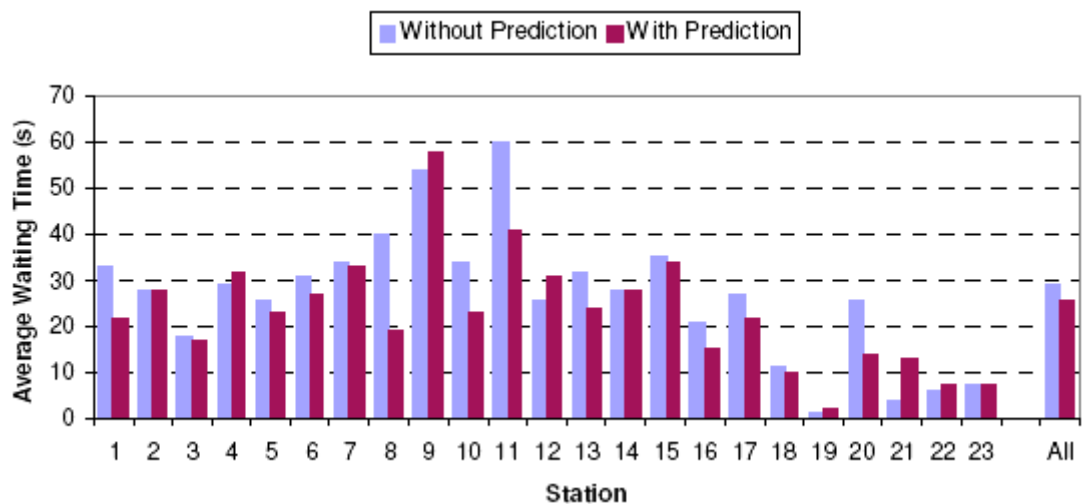


Figura 39 Tempi medi di attesa alle stazioni (Zheng, Jeffery, & McDonald, 2009)

La seconda simulazione, condotta come si è detto nei sei diversi periodi caratterizzati da differenti andamenti della domanda, produce i risultati riportati in figura 40: il grafico confronta ancora una volta i tempi medi d’attesa dell’utenza in secondi nei due casi di applicazione (rosso) e non applicazione (blu) della strategia di gestione a lungo termine della domanda.

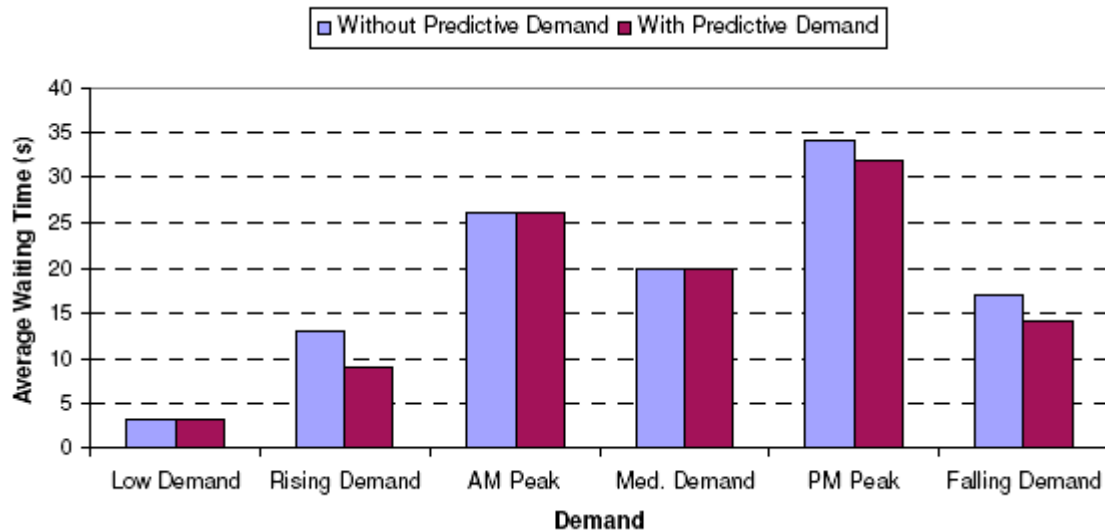


Figura 40 Tempi medi d’attesa per periodi con diversi andamenti di domanda (Zheng, Jeffery, & McDonald, 2009)

Osservando il grafico si può riscontrare quanto precedentemente ipotizzato: se il livello di domanda è basso o medio e nel picco mattutino, cioè in condizioni di domanda prevalentemente stabile se si confronta con il grafico di figura 38, i tempi d’attesa medi rimangono invariati. Questo perché c’è identità tra domanda prevista e domanda corrente. L’analisi dei rimanenti intervalli temporali mostra invece una riduzione dei tempi d’attesa. In particolare tali contrazioni si attestano sull’ordine del 26% nell’intervallo corrispondente ad una tendenza decisamente crescente dell’andamento della domanda e del 20% quando la domanda rapidamente decresce nel tempo (Zheng, Jeffery, & McDonald, 2009).

In conclusione si è osservato quindi che il far uso del “metodo di previsione della domanda locale” per muovere i veicoli vuoti e della “strategia di previsione della domanda a lungo termine” per posizionare i *pod* nelle stazioni e nei depositi comporta riduzioni significative dei tempi medi d’attesa per l’utenza, realizzando dunque una maggiore efficienza nel servizio.

4.2 Le preferenze dichiarate: l'esperienza di Rotterdam

Approfondita la convenienza di dedicare risorse all'introduzione di strategie di gestione che contemplino lo strumento della previsione della domanda in rete nel tempo, ci si concentra ora su come ottenere stime attendibili della domanda di trasporto che può interessare un sistema di PRT.

La questione viene qui trattata con riferimento ad un caso pratico: una potenziale realizzazione di rete di PRT in un'area del porto di Rotterdam, Paesi Bassi. In questa situazione tale rete è pensata come risorsa per migliorare l'accessibilità di un'area che non è ben servita dal trasporto pubblico e per potenziare la rete stessa del trasporto locale la quale non sarebbe alternativa al PRT bensì complementare.

Pur essendo una situazione specifica in un preciso contesto geografico, le considerazioni che se ne traggono hanno carattere generale. Questo anche perché l'ipotesi di una rete che viene realizzata in un territorio per renderlo accessibile, per creare un'unica struttura insieme alle reti di tram e treni e che sia concorrenziale all'uso di vetture private è applicabile in diversi contesti urbani.

Il caso di Rotterdam propone anche una riflessione sui passi da compiere per poter progettare ed inserire un sistema di PRT in un contesto urbanizzato, evidenziando come non sia possibile prescindere da una conoscenza della domanda che si riversa sui mezzi attualmente presenti sul territorio. Questa conoscenza permette, se associata ad un'indagine delle preferenze dichiarate dall'utenza, di modificare il quadro della domanda ripartendola in modo attendibile tra vecchi e nuovi sistemi di trasporto.

In termini più concreti, Li & al. (2010) affermano che un primo passo è quello di conoscere l'area di intervento. Nel caso in esame si tratta di un'area in cui la rete stradale è fortemente congestionata per effetto del fatto che l'area stessa non è adeguatamente servita dai mezzi pubblici. È questa considerazione che ha indotto i soggetti competenti ad ipotizzare un sistema alternativo ed innovativo per spostare la domanda su mezzi meno inquinanti. Stabilita la necessità di progettare il sistema, il problema iniziale è quello di ipotizzare l'ubicazione delle stazioni; è l'analisi spaziale della domanda, la sua distribuzione nell'area, a suggerirne il posizionamento. Inoltre si sono fatte considerazioni relative alla disposizione dei nodi principali dei sistemi già esistenti: per facilitare all'utenza spostamenti multimodali le stazioni sono ipotizzate in prossimità dei nodi del trasporto pubblico, si sono progettati parcheggi scambiatori serviti da altrettante stazioni e si è infine privilegiata l'accessibilità di tutta l'area.

Il risultato è l'ipotesi di rete riportata in figura 41. In essa sono indicate anche le linee di trasporto pubblico preesistenti.



Figura 41 Reti di PRT, treno e tram nell'area di studio (Li, Chen, Li, van Zuylen, & van Arem, 2010)

Prodotto un progetto di massima di una rete, è possibile verificarne l'attrattività attraverso l'indagine delle preferenze dichiarate. L'obiettivo è di ricavare un matrice di domanda stazione-stazione e di stimare l'entità dello shift modale dai vari sistemi di trasporto al PRT per verificare l'effettiva convenienza economica che deriverebbe dalla realizzazione della rete.

L'indagine è condotta attraverso un questionario da sottoporre all'utenza che attraversa l'area con i diversi mezzi disponibili. Tale questionario può essere formulato in diversi modi, sempre secondo Li & al. (2010), contemplando un numero più o meno elevato di casistiche, con dettagli più o meno spinti.

Per questo particolare caso studio è stato adottato un approccio *fractional factorial* rispetto ad un *full factorial*: è conveniente cioè progettare un questionario che proponga a chi risponde una gamma limitata di possibilità tra le quali scegliere. D'altra parte, in un contesto fortemente multimodale elencare tutte le possibili alternative per un particolare spostamento sarebbe controproducente sia per il soggetto che di fronte a tante possibilità tra loro affini non ha strumenti per effettuare una scelta, che per chi poi deve interpretare i risultati.

Il questionario è suddiviso in tre sezioni: la prima indaga le attuali scelte modali dell'intervistato, la seconda presenta diversi scenari nei quali si ipotizza la presenza nell'area del nuovo sistema di PRT e la terza, opzionale, riguarda i dati anagrafici del soggetto.

La logica del questionario nella sua parte principale, cioè nella seconda sezione, è quella di descrivere nel dettaglio una situazione, ovvero uno spostamento da compiere contestualizzandolo nel tempo e nello spazio. Sono così definite origine, destinazione, giorno in cui deve essere effettuato il viaggio, orario di partenza ed anche le condizioni atmosferiche (limitatamente al tipo di giornata piovosa o meno).

Il soggetto cui è sottoposto il questionario deve essere accuratamente informato sul nuovo sistema di trasporto, supponendo che già sia a conoscenza delle caratteristiche dei mezzi esistenti. Questa è una fase molto delicata affinché i risultati finali siano attendibili.

La scheda del questionario riporta quindi una tabella dello stesso tipo di quella raffigurata qui sotto: propone al potenziale utente varie soluzioni per effettuare lo spostamento descritto utilizzando diversi mezzi di trasporto.

	Autobus, tram, metro	PRT	Auto	Bicicletta
Meteo	Pioggia	Pioggia	Pioggia	Pioggia
Tempo di viaggio a flusso libero	14 min	4 min	4 min	18 min
Tempi di attesa	13 min	3 min	10 min	--
Tempi di spostamento a piedi	4 min	8 min	1 min	--
Costo	€0,50	€3,00	€1,00	--
La tua scelta				

Tabella 5 Esempio di una parte del questionario (Li, Chen, Li, van Zuylen, & van Arem, 2010)

Infine, nell'analisi dei risultati ottenuti si costruiscono delle nuove funzioni di utilità per tutti i mezzi coinvolti, utili a modellare il comportamento di scelta dell'utenza attribuendo valore ai fattori costo, meteo, tempo di viaggio in condizioni di flusso libero, tempo trascorso nell'attesa di un mezzo o rallentamenti dovuti alla congestione sulla rete stradale e tempo impiegato per effettuare spostamenti a piedi.


È chiaro che l'inserimento nel panorama dei sistemi di trasporto del PRT sposta gli equilibri e, modificando le funzioni di disutilità/utilità dei vari mezzi, induce una redistribuzione della domanda stimabile, ad esempio, attraverso l'utilizzo di un modello logit.

È proprio la nuova distribuzione della domanda tra i diversi sistemi di trasporto, oltre alle matrici O-D tra stazioni che si possono ottenere dai dati raccolti, ad essere osservata con attenzione per valutare la convenienza della realizzazione del progetto. Si osserva che si deve tenere conto, nel realizzare le matrici, del fatto che solo una parte della domanda che grava sul PRT trova all'interno di esso sia l'origine che la destinazione dello spostamento. Una parte non trascurabile di domanda è infatti data dall'utenza che effettua spostamenti multimodali utilizzando il sistema solo per un tratto del tragitto.

Il risultato nel caso specifico riporta oltre che la suddivisione della domanda tra i sistemi di trasporto, un confronto tra situazione attuale e futura che premia il Personal Rapid Transit sia per l'attrattività in termini assoluti che come strumento per incrementare la domanda di tram, treno e bus.

Solo al termine di un processo come quello fin qui descritto è possibile progettare correttamente le stazioni e la dimensione della flotta e di conseguenza fare valutazioni sul costo del progetto.

I limiti che si possono riscontrare in un processo di analisi come quello sopraesposto sono l'impossibilità di verificare le previsioni fatte e la loro correttezza fino a quando la rete non sarà realmente realizzata, e questo può non essere un grave problema se la domanda è sottostimata, nel qual caso è possibile introdurre in rete nuovi veicoli con un esborso economico non previsto ma che nel lungo periodo può essere



coperto dagli introiti tariffari. Tuttavia, se l'errore è di sovrastima, il rischio è che l'investimento iniziale non sia giustificato.

Non è inoltre semplice stimare la domanda indotta, ovvero quella porzione di domanda che si manifesterà solo dopo la realizzazione del progetto.

Un'ulteriore difficoltà risiede nella natura stessa dell'indagine: la valenza del questionario decade se non è sufficientemente chiaro all'utenza il tipo di sistema del quale si ipotizza la costruzione, e allo stesso modo i risultati non sono attendibili se le variabili in gioco non sono dettagliatamente definite, ovvero se si lascia troppo spazio alla fantasia del soggetto riguardo ad esempio alla finalità dello spostamento in questione o all'orario d'inizio dello stesso. Vi sono poi i rischi correlati all'utilizzo di qualsiasi questionario, in ogni ambito e in quello trasportistico in particolare: è necessario progettare attentamente la modalità di somministrazione, istruire gli intervistatori e stabilire la numerosità del campione a cui sottoporre le schede.

Una considerazione finale è che dovendo necessariamente indagare preferenze dichiarate nell'impossibilità di rilevarle sul campo, un margine consistente di aleatorietà è insito nel problema stesso ed esso può essere ridotto solo entro un certo limite ponendo attenzione agli aspetti sopra elencati. Perciò il massimo che si possa fare è condurre un'indagine di questo tipo nel modo più rigoroso e tenendo sempre presente in fase di progettazione definitiva che le stime di domanda possono fornire solo una valutazione approssimativa di quella che effettivamente sarà la reale attrattività del sistema.



5. PROGETTO

Il progetto di una rete di Personal Rapid Transit è un processo al quale la letteratura si riferisce con la sigla GNDP (*Guideway Network Design Problem*) (Won, Choe, & Karray, *Optimal Design of Personal Rapid Transit*, 2006) e comprende diverse fasi tra loro interconnesse. La figura di seguito riportata rappresenta uno schema di ciò che comporta il progettare una nuova rete.

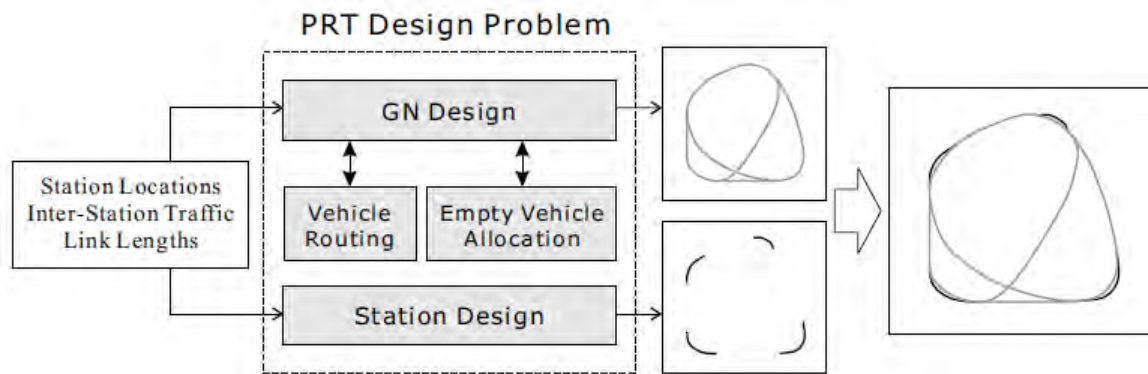


Figura 42 Struttura dei problemi di progettazione
(Won, Choe, & Karray, *Optimal Design of Personal Rapid Transit*, 2006)

In primo luogo si tratta di progettare la *Guideway Network*, la vera e propria rete di guide che collegano tra loro le stazioni garantendo la connettività e contenendo i costi. Questa fase dipende chiaramente dal numero di fermate e dalla loro collocazione che, come si è detto nel capitolo precedente, deriva dall'osservazione dell'area in cui si realizza il sistema e dai dati relativi alla domanda, alle previsioni su di essa e alla sua collocazione spaziale.

Il progetto di rete è poi interconnesso al *routing* dei veicoli, ovvero alle assegnazioni di percorso che il sistema fornisce ai singoli *pod* sia che siano vuoti sia che stiano rispondendo ad una richiesta dell'utenza: nel primo caso si tratta di *empty vehicle allocation* o disposizione dei veicoli vuoti, nel secondo semplicemente di *vehicle routing*. È poi oggetto di progettazione ciascuna stazione nelle sue caratteristiche dimensionali: è ancora una volta l'analisi della domanda ed in particolare un esame delle matrici origine-destinazione tra le coppie di stazioni ad influenzare in modo determinante quella che sarà la lunghezza del binario di servizio ovvero la capacità delle singole stazioni.

Infine, si può considerare parte del progetto anche il dimensionamento della flotta. È infatti necessario stabilire, sempre sulla base delle matrici di domanda stimate, quanti veicoli sono necessari a soddisfare le richieste dell'utenza.

In generale nell'ambito della progettazione i criteri da considerare sono l'aspetto economico e l'entità della domanda che si deve soddisfare e con la quale deve essere raffrontata la capacità del sistema. L'obiettivo è di realizzare una rete che possa funzionare in modo efficiente contenendo i costi di costruzione.

In questo capitolo si approfondiranno gli aspetti relativi al progetto di rete e al dimensionamento delle stazioni e della flotta dei veicoli, mentre per ciò che riguarda il *routing* si rimanda al capitolo 6.

5.1 Rete: algoritmi genetici

Per costruire la rete deve essere innanzitutto stabilita la posizione delle stazioni che dovranno essere collegate. A questo punto l'incognita è il come le stazioni saranno tra loro connesse. Da questo dipenderanno i costi di realizzazione ed esercizio, che sono direttamente proporzionali alla lunghezza delle linee, all'energia che i veicoli dovranno consumare per effettuare i loro spostamenti ed al traffico veicolare tra le stazioni.

Si rappresenta qui il problema rifacendosi alla simbologia utilizzata da Won, Choe & Karray (2006) e Won, Lee, Lee & Karray (2006).

La rete è rappresentata come un sottografo di un grafo completo e orientato $G=(N,L)$ dove N è l'insieme delle n stazioni collocate nell'area di progetto e L è l'insieme dei link, costituito da $n(n-1)$ elementi ciascuno di lunghezza d_{ij} e così definito: $L = \{(i,j)|i,j \in N, i \neq j\}$.

La rete di progetto potrà allora essere rappresentata in modo equivalente da una matrice o da un vettore con le seguenti strutture:

$$X = (x_{1,2}, x_{1,3}, \dots, x_{2,1}, x_{2,2}, \dots)$$

$$X = \begin{bmatrix} 0 & x_{1,2} & \dots \\ x_{2,1} & 0 & \dots \\ \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

Gli elementi $x_{i,j}$ assumeranno valore 1 se la rete prevede l'esistenza di un collegamento diretto tra le due stazioni corrispondenti, 0 in caso contrario, ovvero:

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{se esiste l'arco che collega } i \text{ e } j; \\ 0 & \text{altrimenti.} \end{cases}$$

Quello che segue è un esempio di come si schematizza una rete applicando questo modello (Won, Choe, & Karray, Optimal Design of Personal Rapid Transit, 2006) (Won, Lee, Lee, & Karray, 2006).

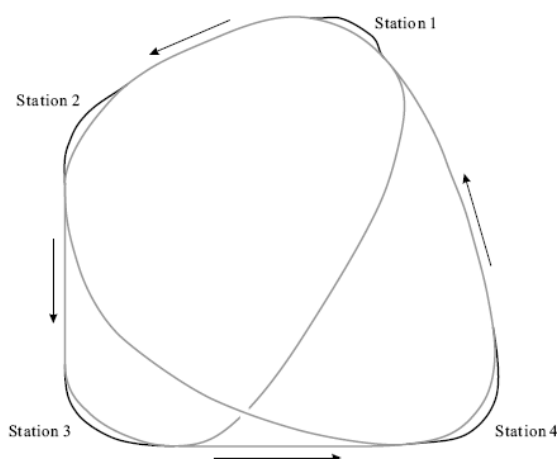


Figura 43 Esempio di rete con quattro stazioni
(Won, Choe, & Karray, Optimal Design of Personal Rapid Transit, 2006)

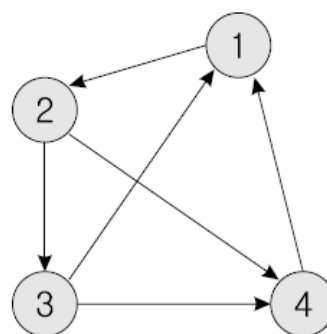


Figura 44 Grafo della rete
(Won, Choe, & Karray, Optimal Design of Personal Rapid Transit, 2006)

Si evidenzia il fatto che in questa rete, come in tutte le reti di PRT, i link sono unidirezionali.

La rete dell'esempio ha quattro nodi-stazioni e sei link ed è schematizzabile con il vettore a struttura

binaria $X = (1,0,0,0,1,1,1,0,1,1,0,0)$, o con la matrice $X = \begin{bmatrix} - & 1 & 0 & 0 \\ 0 & - & 1 & 1 \\ 1 & 0 & - & 1 \\ 1 & 0 & 0 & - \end{bmatrix}$.

Si è così costruito un semplice linguaggio binario per rappresentare diverse alternative di progetto che sarà molto utile all'interno degli algoritmi che verranno utilizzati.

Nel modello si considera che i nodi siano costituiti da un unico binario, che all'interno del nodo stesso diverge in linea principale e linea esterna di stazione. Le convergenze o divergenze presenti nel caso in cui allo stesso nodo entrino od escano più binari si considerano invece poste esternamente al nodo a monte o a valle (come in figura 45).

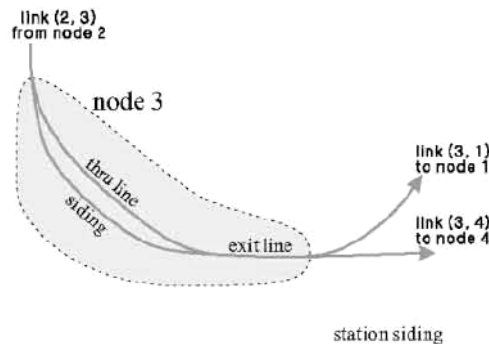


Figura 45 Struttura del nodo 3. (Won, Lee, Lee, & Karray, 2006)

Gli autori (Won, Choe, & Karray, Optimal Design of Personal Rapid Transit, 2006) (Won, Lee, Lee, & Karray, 2006) indicano come obiettivo della progettazione di rete la minimizzazione di due funzioni: una prima funzione dei volumi di traffico $f_T(x)$ e una seconda di costo $f_C(x)$. L'esigenza di minimizzare il traffico sugli archi è giustificata dal fatto che *headway* maggiori derivano da minori volumi di traffico, e la diretta conseguenza è un aumento della sicurezza sulla rete.

L'intento è dunque quello di agire su X per minimizzare le due funzioni nel rispetto del vincolo di connettività, ovvero imponendo come condizione necessaria che da ogni stazione sia possibile raggiungere ciascuna delle altre.

La difficoltà risiede nel fatto che le minimizzazioni delle due funzioni indicate entrano in contrasto tra loro: estremizzando la questione, una rete che abbia un collegamento diretto per ogni coppia di stazioni sarà di certo la soluzione che minimizza il traffico su ogni arco nelle ore di punta, tuttavia è anche quella più costosa. È dunque necessario cercare un X ottimo che rappresenti una "soluzione di compromesso" del problema.

Won, Choe & al. propongono un esempio di funzioni di costo e di traffico da inserire nel problema. La prima è data dalla somma di due addendi relativi ai costi di costruzione ed al costo di viaggio sostenuto dall'utenza:

$$f_C(X) = c_L \sum_{\substack{i,j \in N \\ i \neq j}} d_{i,j} x_{i,j} + \left[\sum_{\substack{i,j \in N \\ i \neq j}} c_{i,j}(X) T_{i,j} \right]$$

dove c_L è il costo di costruzione di un arco per unità di lunghezza che viene moltiplicato per l'effettiva lunghezza di rete per ottenere il costo totale di costruzione (nella prima sommatoria si moltiplicano le distanze tra tutte le coppie di stazioni per i valori 1 o 0 a seconda che nella rete X tale collegamento sia o meno esistente).

Nell'addendo tra parentesi quadre, $c_{i,j}$ è pari al costo di spostamento dalla stazione origine i alla destinazione j all'interno della rete X . Tale valore, moltiplicato per $T_{i,j}$, con $T_{i,j} \in \mathbb{N}_+$ pari al numero totale di veicoli che nell'intera vita del sistema si sposteranno tra i e j , determina il costo di viaggio globale. Questo addendo è presente nell'equazione proposta da Won, Choe & al. (2006), mentre non è considerato da Won, Lee (2006).

La funzione di traffico è invece definibile se si specifica una strategia di *routing*.

Won, Lee & al. (2006) propongono di assegnare ad ogni veicolo il percorso a lunghezza fisica inferiore senza considerazioni in merito ai tempi impiegati o riflessioni a carattere energetico. Gli spostamenti inter-nodali così calcolati nella rete X sono rappresentabili con una matrice $R(X)$ i cui elementi assumono ancora una volta valori 1 o 0 come segue:

$$r_{k,i}(X) = \begin{cases} 1 & \text{se il percorso che collega le stazioni della coppia } k \text{ attraversa il nodo } i \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

L'indice k si riferisce alla k -esima coppia di stazioni.

Rifacendosi ancora all'esempio precedente, date le distanze tra i nodi, è possibile costruire la matrice.

Siano $d_{1,2} = 6,3$; $d_{2,3} = 6$; $d_{2,4} = d_{3,1} = 10$; $d_{3,4} = 8$; $d_{4,1} = 8,2$ le distanze tra i nodi. Il percorso più breve da 1 in 2 (coppia $k=1$) non include nodi intermedi e si ha quindi $r_{1,1}(X) = r_{1,2}(X) = r_{1,3}(X) = r_{1,4}(X) = 0$. Il più breve da 1 a 3 ($k=2$) attraversa il nodo 2 e quindi $r_{2,2}(X) = 1$, $r_{2,1}(X) = r_{2,3}(X) = r_{2,4}(X) = 0$.

Procedendo analogamente per tutte le coppie si ottiene

$$R(X) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

Per ottenere i cammini minimi tra le coppie di stazioni gli autori suggeriscono di utilizzare l'algoritmo di Floyd illustrato nel capitolo relativo al *routing* (capitolo 6).

Si può ora finalmente definire la seguente funzione di traffico:

$$f_T(X) = \max_{k \in N} \tau_k(X)$$

$$\text{con } \tau_k = \sum_{j \in N} (t_{k,j} + e_{k,j}(X)) + \sum_{\substack{i,j \in N \\ i \neq j}} (r_{i,j,k}(X) (t_{i,j} + e_{i,j}(X)))$$

τ_k indica quindi la stima del traffico nell'ora di punta in uscita dalla stazione k . Esso è ottenuto dalla somma di due elementi. Il primo è calcolato come la somma su tutte le stazioni j dei valori di picco orario $t_{k,j}$ tra la stazione k e ciascuna altra stazione e il valore $e_{k,j}(X)$ che indica il flusso orario di veicoli vuoti in uscita da k . Si tratta perciò del traffico che esce da k sulla linea esterna, la linea di stazione. Il secondo è il traffico di transito attraverso k che non impegna la linea esterna ma rimane sulla principale ed è pari alla somma del numero di veicoli pieni e vuoti che effettuano un tragitto $i \rightarrow j$ per tutte quelle coppie di stazioni (i,j) appunto per le quali il percorso più breve che le congiunge ha in k una stazione intermedia.

Gli autori chiariscono il significato di questa funzione applicandola al già citato schema di rete riportato nelle figure 43 e 44, nella prima delle quali i tratti neri indicano i binari esterni relativi alle stazioni:

Sulla rete è caricata la domanda indicata in tabella:

Domanda di traffico tra stazioni (veicoli all'ora)		Destinazioni			
		1	2	3	4
origini	1	/	100	300	300
	2	100	/	250	350
	3	50	50	/	200
	4	100	150	250	/

Tabella 6

I valori $\tau_1(X), \tau_2(X), \tau_3(X), \tau_4(X)$ in veicoli/ora risultano i seguenti:

$$\tau_1(X) = t_{1,2} + t_{1,3} + t_{1,4} + t_{3,2} + t_{4,2} + t_{4,3} + e_{3,2}(X) + e_{4,2}(X) = 1550$$

$$\tau_2(X) = t_{2,1} + t_{2,3} + t_{2,4} + t_{1,3} + t_{1,4} + t_{4,3} = 1550$$

$$\tau_3(X) = t_{3,1} + t_{3,2} + t_{3,4} + t_{2,1} + e_{3,1}(X) + e_{3,2}(X) = 900$$

$$\tau_4(X) = t_{4,1} + t_{4,2} + t_{4,3} + e_{4,2}(X) = 850$$

essendo i valori di e calcolati come indicato nel cap. 6.2 che riprende questo esempio ($e_{3,1}(X) = 100, e_{3,2}(X) = 400, e_{4,1}(X) = 350, e_{4,2}(X) = 0$). Si ha quindi $f_T(X) = \max_{k \in N} \tau_k(X) = 1550$ veicoli/ora.

Il valore di $f_T(X)$ indica il valore del punto più congestionato di tutta la rete, infatti dato che gli archi convergono e divergono alle stazioni si ha sempre un valore di picco massimo orario minore o al più uguale a $f_T(X)$ per ogni arco della rete. È naturale che tale valore non possa superare quello di massimo traffico ammissibile su un link dato dal rapporto tra velocità e lunghezza veicolare, ed anzi debba essere considerevolmente inferiore a questo per avere maggiori *headway* e quindi migliori condizioni di sicurezza.


Assunti come dati di input opportuni valori di

N ,

$d_{i,j}$,

$t_{i,j}$ (per $i, j \in N$ e $i \neq j$ è il picco orario di domanda tra le due stazioni),

$T_{i,j}$ per $i, j \in \{1 \dots n\}, i \neq j$,



possiamo esprimere il problema di progetto della rete come minimizzazione della funzione $f(X) = (f_C(X), f_T(X))$ agendo su X e vincolato come detto dalla condizione di connettività.

Si tratta di un problema computazionalmente complesso dal momento che aumentando il numero delle stazioni in rete la dimensione dello spazio delle soluzioni cresce più che esponenzialmente e per il quale non esiste una soluzione con semplici algoritmi. La complessità è superiore per le reti di PRT rispetto per esempio ad una rete stradale dal momento che, come già osservato, i link sono monodirezionali.

Per risolvere il problema proposto si ricorre a metodi euristici e molti autori, tra i quali Won, Choe & al. (2006), Won & Karray (2007 e 2008), Chebbi & Chaouachi (2014) ritengono che l'approccio migliore alla soluzione sia quello che utilizza gli algoritmi genetici multi-obiettivo (MOGA: *MultiObjective Genetic Algorithm*) e questo tipo di procedimento ben si presta alla rappresentazione della rete sopra riportata che utilizza un linguaggio binario e fornisce la soluzione ottimale o soluzioni vicine a quella ottimale in tempi ragionevolmente contenuti anche per reti di grandi dimensioni. Per algoritmo genetico si intende un algoritmo euristico che procede per passi successivi e permette di valutare, a partire da soluzioni di partenza, nuove ipotesi risolutive ottenute come ricombinazioni e composizioni delle soluzioni iniziali pervenendo così alla soluzione ottimale (wikipedia).

Applicati al caso in oggetto tali algoritmi generano diverse soluzioni X per le quali vengono calcolati i valori delle f_C e f_T . Si considerano poi combinazioni di queste X e si cerca di ottenere una soluzione che soddisfi il problema di minimizzazione multipla vincolata. Tuttavia ciò che si ottiene non è una soluzione unica, ma un set di soluzioni tra loro equivalenti e tra le quali non ve n'è una che si possa dire superiore alle altre (Won, Lee, Lee, & Karray, 2006).

Gli autori propongono un algoritmo chiamato *GNDGA*, un algoritmo genetico che nella fase di inizializzazione genera casualmente delle soluzioni X da inserire nell'insieme delle soluzioni iniziali. In tali vettori ogni elemento può assumere valore 0 o 1 con pari probabilità ($p=0,5$). Segue un ciclo principale nel quale si procede a continue selezioni tra le soluzioni di reti fattibili generate e si compongono nuove soluzioni da indagare ed eventualmente selezionare tramite diverse operazioni. La generazione di nuove soluzioni a partire dalle precedenti è effettuata prima con un processo di mutazione genetica in cui i bit sono modificati con una certa probabilità, poi ciò che si ottiene è sottoposto ad ulteriore modifica tramite una tra cinque specifiche azioni che hanno pari probabilità di essere applicate ($p=0,2$).

Le cinque azioni sono le seguenti:

- 1) Aggiunta casuale di un link: è scelto arbitrariamente un bit x_k *tc* $x_k = 0$ e se ne modifica il valore in 1.
- 2) Aggiunta di un link che aggiri il nodo più congestionato: si tratta di quel nodo i *tc* $f_T(X) = \tau_i(X)$. L'azione prevede di introdurre un nuovo link tra un nodo che precede i e uno che lo segue scelti casualmente per alleggerire il traffico sul nodo in questione.
- 3) Rimozione casuale di un link: tale azione può compromettere la connessione della rete.

- 4) Rimozione di un link ridondante: elimina un link garantendo però che ogni nodo abbia almeno un arco entrante ed uno uscente.
- 5) Modifica della sequenza dei nodi: come mostrato in figura, sono scelti quattro nodi in sequenza collegati nell'ordine da tre archi (nodi 2,3,4,1 con archi 23, 34, 41) che vengono rimossi e sostituiti da una nuova serie di nodi ed archi (nodi 2,4,3,1, archi 24, 43, 31).

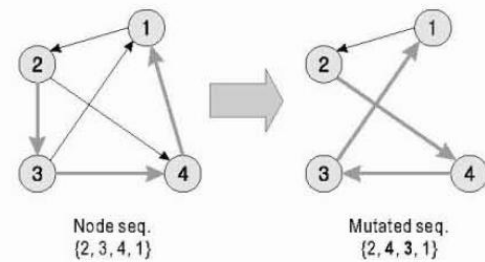


Figura 46 Azione 5): modifica della sequenza dei nodi. (Won, Lee, Lee, & Karray, 2006)

L'algoritmo genetico qui descritto in modo piuttosto semplificato si dimostra essere uno strumento adeguato per

risolvere i GNDP, dal momento che ne è garantita la convergenza in tempi piuttosto rapidi. Si può osservare che non viene contemplata la possibilità di avere nodi che non individuino stazioni anche se potrebbe rivelarsi utile inserirli nel modello di rete per abbattere i costi permettendo di lavorare su tratte di linea più brevi e che prevedono scambi anche fuori dalle stazioni. Inoltre si è fatta una notevole semplificazione nell'indicare la distanza tra due nodi come la distanza in linea d'aria: ben diverso può essere il valore se si considera che nell'area in esame possono essere presenti ostacoli di tipo naturale e topografico o artificiale come edifici. Infine Won & Lee (2006) propongono una riflessione sull'opportunità di includere nella funzione di costo anche il costo di viaggio, come proposto dallo stesso Won e da Choe in un altro lavoro (Won, Choe, & Karray, Optimal Design of Personal Rapid Transit, 2006).

L'approccio con algoritmo genetico base fin qui esposto può essere migliorato con alcune modifiche di modellazione e procedurali. Tra gli altri trattano questo tema Won & Karray(2007 e 2008). In un primo lavoro (Karray & Won, 2007) si propone di ricorrere ad una rappresentazione della rete mediante circuiti, mentre in un secondo (Won & Karray, Personal Rapid Transit Network Design Using Genetic Algorithm and Ant Colony System Hybridization, 2008) si implementa ulteriormente il procedimento introducendo nell'algoritmo un ACS (*Ant Colony System*) per accelerare la ricerca della soluzione. Si tratta di utilizzare una matrice che memorizzi la storia delle selezioni attuate.

Si vuole qui solo accennare al metodo di rappresentazione della rete tramite circuiti chiusi (Karray & Won, 2007) senza approfondire l'ACS.

Il grafo della rete è visto come unione di uno o più grafi orientati che collegano tra loro due o più nodi. Esso è un sottografo del grafo completo G_C :

$G = \{\varphi_1, \dots, \varphi_L\}$ con $\varphi_l, l \in \{1, \dots, L\}$ che indica un ciclo semplice che collega n_l nodi appartenenti ad N , con $n_l \geq 2$. Ciascun ciclo è così definito: $\varphi_l = (\pi_l(1), \dots, \pi_l(n_l))$. Ogni ciclo è costituito da n_l link $(\pi_l(1), \pi_l(2)), (\pi_l(2), \pi_l(3)), \dots, (\pi_l(n_l), \pi_l(1))$. Essendo i cicli semplici in essi i nodi non si ripetono; se così fosse allora quel ciclo sarebbe rappresentabile con più cicli semplici.

Il grafo della rete si può quindi ottenere dall'unione dei "bordi", che sono link, dei singoli cicli semplici $\varphi_1 \dots \varphi_L$ con l'accorgimento di eliminare gli archi che sono contenuti in più di un ciclo per non ottenere

sovrapposizioni. In questo modo G risulterà connesso e si può dimostrare che il grafo è fortemente connesso se il numero di nodi in N è finito.

Un esempio di quanto detto è riportato in figura:

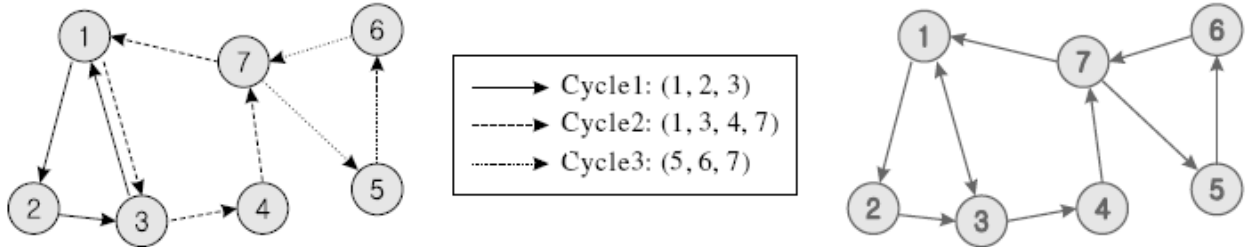


Figura 47 Esempio di rappresentazione a cicli: a sinistra i singoli cicli, a destra il grafo finale (Karray & Won, 2007)

Una modellizzazione della rete di questo genere agevola la risoluzione dell'algorithmo genetico. In esso infatti per verificare la fattibilità di una soluzione si dovrà verificare che i cicli che compongono G tocchino tutti i nodi di N , mentre per verificare la connessione del grafo è sufficiente verificare che non ci siano cicli isolati. Se sono violate tali condizioni il grafo proposto viene scartato e su di esso non è necessario fare ulteriori valutazioni. Gli autori proseguono nella trattazione illustrando l'algorithmo nel dettaglio, senza ulteriori significative variazioni rispetto a quanto proposto da Won & Lee (2006).

A conclusione di questa sezione riguardante il progetto di una rete possiamo sintetizzare quanto affermato dicendo che si tratta certamente di un problema molto complesso dal punto di vista computazionale e che per essere positivamente risolto deve garantire una soluzione economicamente vantaggiosa ma anche assicurare un funzionamento efficiente. Uno strumento che consente di pervenire a soluzioni quasi ottimali o ottimali sono gli algoritmi genetici, metodi euristici che nelle molte varianti esistenti producono buoni risultati in tempi contenuti.

5.2 Stazioni: dimensionamento

Dopo aver progettato la rete è possibile entrare nel dettaglio di quelle che fino a questo momento sono state trattate solo come nodi: le stazioni.

Si è già detto che queste si differenziano dalle fermate di altri sistemi di trasporto su sede propria per la caratteristica di essere esterne alla linea principale. Sono infatti posizionate lungo una linea di servizio esterna. Nel dimensionamento di una stazione l'obiettivo è determinare la lunghezza ottimale del binario di servizio in modo da contenere i costi ed assicurare lo smaltimento del traffico dell'ora di punta senza dar luogo a code che, se eccessivamente lunghe rispetto alla lunghezza del binario di servizio, si riverserebbero sulla linea principale con l'effetto di annullare i benefici sul traffico in transito derivanti dall'aver posto le stazioni fuori linea.

Si descrive nel seguito il processo di dimensionamento secondo quanto indicato da Won, Choe & Karray (2006). Gli autori propongono una schematizzazione del binario di servizio suddividendolo in cinque tratte, così come rappresentato in figura.

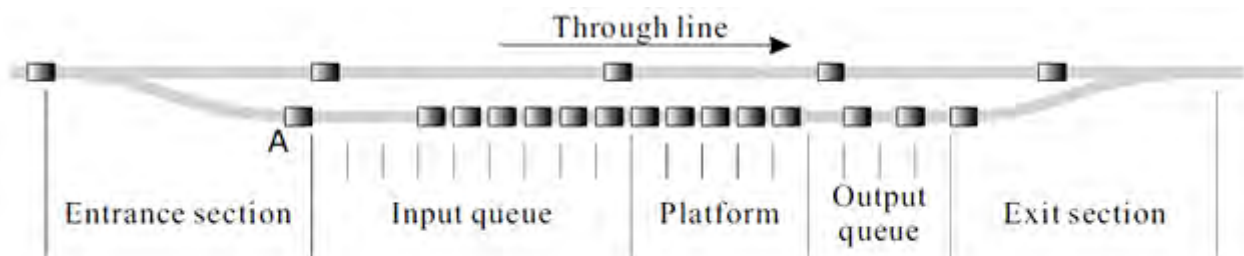


Figura 48 Schema dei binari di una stazione
(Won, Choe, & Karray, *Optimal Design of Personal Rapid Transit*, 2006)

Ciascuna tratta ha una propria funzione specifica.

La prima, detta di entrata, funge principalmente da raccordo tra la linea principale e quella esterna e permette così ai veicoli che debbono arrestarsi alla stazione in questione di uscire sul binario di servizio e di decelerare solo dopo aver abbandonato la linea principale.

Il secondo tratto è detto di coda in ingresso e rappresenta lo spazio in cui i veicoli si accodano nell'attesa di poter procedere e di giungere alla piattaforma.

La terza sezione è il tratto che affianca la banchina sulla quale gli utenti attendono l'arrivo dei veicoli. È qui che si aprono le porte e i passeggeri a bordo, se presenti, scendono lasciando il posto a quelli in partenza.

Infine, vi è una sezione di accodamento in uscita dove i veicoli attendono di poter rientrare sulla linea principale e un ultimo tratto di uscita per l'accelerazione che li conduce con velocità di regime al binario della linea principale.

La prima e l'ultima sezione vengono dimensionate con criteri geometrici e cinematici affinché possano adempiere alle funzioni loro attribuite, le tre centrali invece hanno ciascuna un'estensione corrispondente ad un certo numero di stalli per veicoli indicati in n_i , n_p , n_o rispettivamente per le sezioni di accodamento in entrata, di banchina e di accodamento in uscita.



I dati di input per poter procedere al dimensionamento sono la dimensione dei veicoli che verranno utilizzati in rete, da cui deriva la lunghezza di uno stallo, e i dati di domanda per poter determinare il traffico orario di punta. Il procedimento prevede di ricavare dai dati di traffico il valore n_p , da questo stabilire n_i ed infine imporre n_o leggermente inferiore a n_i . Con riferimento alla figura sopra riportata i valori sono i seguenti: $n_i = 9$, $n_p = 5$, $n_o = 4$. Ovviamente prevedere un maggior numero di stalli implica la possibilità di sostenere volumi di traffico superiori.

Si devono a questo punto fare delle assunzioni rispetto alla capacità di accelerazione e decelerazione dei veicoli: si può ragionevolmente assumere un valore a_p tra 1 e 2m/s^2 .

Si assume poi che un veicolo in entrata acceda alla sezione di accodamento in ingresso per poi spostarsi all'interno di un plotone di veicoli nella sezione *platform*. Il primo veicolo del plotone andrà ad occupare il posto libero più lontano in questa sezione. Se si suppone un valore di n_i sufficientemente grande, la seconda sezione fornirà di volta in volta n_p veicoli alla terza sezione.

Il numero di *pod* che transita attraverso il binario di servizio per unità di tempo è allora pari a $C_s = n_p/t_p$, dove $t_p = t_v + t_d + t_b$. Si tratta del rapporto tra il numero di stalli previsti nella sezione centrale e una variabile tempo calcolata come la somma tra due variabili deterministiche ed una, t_b , aleatoria.

Tra le prime t_v indica il tempo di avanzamento di un plotone, e tale valore aumenterà al crescere della dimensione della banchina, anche se non in modo strettamente proporzionale. Esso viene calcolato come segue:

$$t_v = \begin{cases} \frac{n_p l_s}{v_p} + \frac{v_p}{a_p} & \text{se } n_p l_s \geq v_p^2/a_p \\ 2\sqrt{n_p l_s/a_p} & \text{altrimenti} \end{cases}$$

Nelle equazioni:

l_s è la lunghezza di uno stallo, perciò l'estensione della banchina è pari a $n_p l_s$;

a_p è il valore dell'accelerazione o decelerazione;

v_p è la velocità di avanzamento del plotone il cui andamento nel tempo è illustrato in figura.

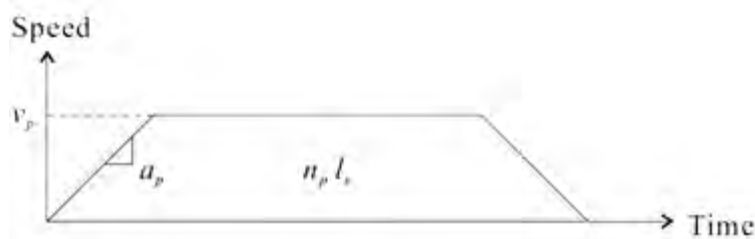


Figura 49 Velocità di avanzamento nel tempo (Won, Choe, & Karray, *Optimal Design of Personal Rapid Transit*, 2006)

Le due espressioni indicate per il calcolo di t_v si riferiscono rispettivamente al caso in cui la lunghezza della banchina sia sufficiente a garantire un andamento della velocità come quello in figura 49, e al caso in cui tale grafico degeneri in un triangolo a causa delle dimensioni insufficienti, dato a_p , a sviluppare la v_p .

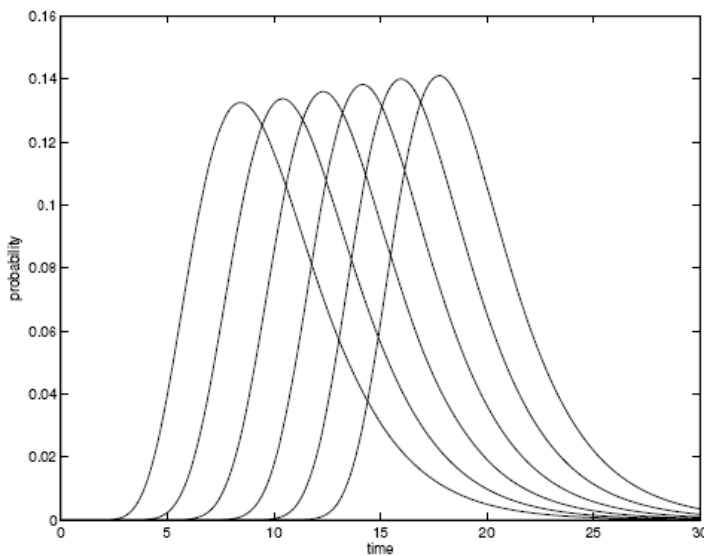
La variabile t_d indica invece il tempo tecnico necessario all'operazione di apertura e chiusura delle porte del veicolo.

Infine t_b è variabile aleatoria che dipende dal comportamento dei passeggeri ed indica il tempo di carico e scarico. Il suo valore può essere stimato se si ipotizza una funzione di densità di probabilità. Gli autori propongono una distribuzione log-normale per i tempi d'imbarco, dipendente dai due parametri comportamentali m e σ : $p_1(t) = \frac{1}{\sigma t \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(\ln t - m)^2}{2\sigma^2}}$.

Ipotizzando valori di media e varianza del tempo di imbarco di 10 s e 12 s^2 , si ha $m = 2,246$ e $\sigma = 0,337$.

La funzione di densità di probabilità del tempo di imbarco su n_p veicoli è

$$p_{n_p}(t) = n_p p_1(t) \left(\int_0^t p_1(\tau) d\tau \right)^{n_p - 1}$$



La figura a fianco rappresenta le funzioni densità di probabilità di t_b per $n_p = 1, 2, 4, 8, 16, 32$. Si può osservare dal grafico come i valori medi di t_b aumentino linearmente, per n_p che cresce esponenzialmente. Tali valori sono riportati nella tabella 7.

Figura 50 (Won, Choe, & Karray, Optimal Design of Personal Rapid Transit, 2006)

n_p	1	2	4	8	16	32
$E[t_b]$ (s)	10,00	11,89	13,74	15,55	17,30	18,96

Tabella 7

Un calcolo integrale permette infine di ottenere il valore atteso $E[t_b] \approx 10 + 1,891 \log_2 n_p$.

Si può ora calcolare il valore atteso di C_s :

$$E[C_s] = E \left[\frac{n_p}{t_v + t_d + t_b} \right] \approx \frac{n_p}{t_v + t_d + E[t_b]} = \frac{n_p}{t_v + t_d + 10 + 1,891 \log_2 n_p} = \hat{E}[C_s]$$

Nel caso in cui per esempio $l_s = 3 \text{ m}$, $a_p = 2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$, $v_p = 2,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$, $t_d = 6 \text{ s}$, si ottiene

$$\hat{E}[C_s] = \frac{n_p}{1,2 n_p + 17 + 1,891 \log_2 n_p}$$

La tabella 8 riporta per i diversi valori di n_p i valori di $E[C_s]$ e mostra come $\hat{E}[C_s]$ ne sia un buono stimatore.

n_p	1	2	4	8	16	32
$E[C_s]$ (vph)	204,1	345,9	571,8	901,3	1321,9	1771,4
$\hat{E}[C_s]$ (vph)	197,8	338,2	562,9	892,4	1316,2	1776,3

Tabella 8

Il grafico seguente mostra invece come aumenta la capacità della stazione in veicoli all'ora al variare del numero di stalli presenti n_p . Si vede che per $n_p \rightarrow \infty$ c'è un asintoto orizzontale e la capacità tende a v_p/l_s , che nell'esempio numerico corrisponde a $\lim_{n_p \rightarrow \infty} \hat{E}[C_s] = \frac{n_p}{1,2n_p + 17 + 1,891 \log_2 n_p} = \frac{1}{1,2}$ veicoli/secondo = 3000 veicoli/ora.

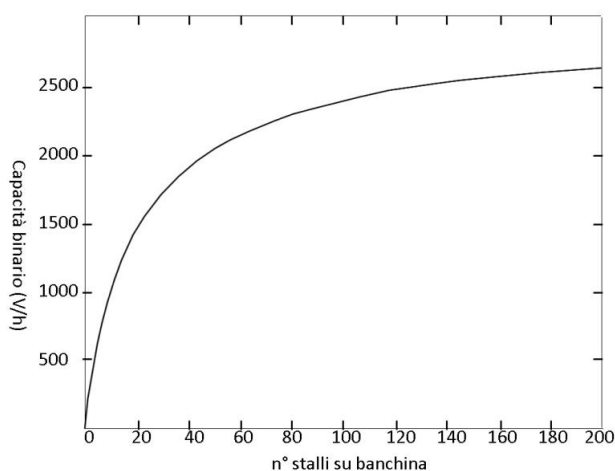


Figura 51 Andamento della capacità in funzione del numero di stalli (Won, Choe, & Karray, Optimal Design of Personal Rapid Transit, 2006)

Da ciò si deduce che poiché la capacità della linea esterna è limitata da v_p/l_s , il traffico orario di punta non può superare tale valore. Perciò per aumentare la capacità è necessario aumentare v_p e/o ridurre l_s .

Per fornire un esempio numerico sulla capacità della linea di servizio, l'autore si rifà ancora all'esempio qui riportato nelle figure 43 e 44 con la domanda di traffico indicata nella tabella 6.

In questo caso, per dimensionare la stazione 1, la domanda di picco oraria da soddisfare è data da 700 veicoli/ora. Considerando che se $n_p = 5$ la capacità è solo di 657,2 veicoli all'ora ($= \frac{5}{1,2 \cdot 5 + 17 + 1,891 \log_2 5} 3600$), si sceglie $n_p = 6$ e si ottiene una capacità di 742,6.

Si procede in modo analogo per tutte le stazioni.

In conclusione quindi il dimensionamento dipende fortemente dalla domanda e dal traffico dell'ora di punta in particolare, per cui si deve basare su dati quanto più possibile attendibili, ed è fondamentale per avere una rete che funzioni senza essere penalizzata dalla capacità delle stazioni. Nel caso in cui si ottengano lunghezze eccessive del binario di servizio, è possibile ipotizzarne lo sviluppo su due binari paralleli.

L'obiettivo in ogni caso è di contenere i costi garantendo efficienza.

5.3 Flotta:dimensionamento

Per fare una valutazione economica preliminare di un progetto di rete di PRT e per poter concepire il progetto stesso in modo completo, è necessario dimensionare, oltre alla parte infrastrutturale, il numero dei veicoli che andranno a comporre la flotta. Essa dovrà avere una dimensione tale da garantire il servizio agli utenti che lo richiedono e va dimensionata in funzione della domanda nell'ora di punta.

Una strategia di *routing* efficiente è fondamentale per ottenere una flotta relativamente contenuta, nell'intento di limitare il costo da sostenere per l'acquisto e la manutenzione dei veicoli. Esiste inoltre un aspetto che esula dalla problematica del *routing* in senso stretto: ciascun veicolo dispone di una batteria che deve essere ricaricata in un deposito specifico, a meno che la linea non sia diversamente attrezzata.

È dunque necessario dimensionare la flotta tenendo presente che la minimizzazione deve essere applicata non solo al numero di veicoli, ma anche al consumo di energia della batteria.

È di questo che trattano Chebbi & Chaouachi (2014).

Gli autori individuano nella capacità della batteria un vincolo al numero di veicoli da prevedere in un sistema con un predeterminato numero di richieste. Si tratta ancora una volta di un problema di complessità computazionale crescente con la dimensione della rete che può essere risolto con un metodo euristico, ad esempio con i già citati algoritmi genetici.

Chebbi & Chaouachi (2014) schematizzano il sistema con un grafo $G=(V,E)$. Si suppone che nel sistema ci siano n domande. Ciascuna di queste richiede l'invio di un veicolo vuoto dal deposito D alla stazione DS_i di partenza per lo spostamento i -esimo che abbia la batteria sufficientemente carica. Da qui il veicolo per soddisfare la domanda deve raggiungere AS_i , stazione di arrivo.

Viene poi assunta l'ipotesi che tutti i veicoli abbiano la stessa capacità di batteria B e che questa possa essere caricata in un unico punto D della rete.

Si sottolinea che queste ipotesi sono piuttosto riduttive soprattutto per grandi reti nelle quali possono esserci più punti destinati alla ricarica e in cui i veicoli circolanti potrebbero essere equipaggiati con batterie a diversa capacità. In ogni caso si considerano valide le due ipotesi per semplificare il procedimento.

L'obiettivo ultimo è quindi quello di determinare i percorsi a costo minimo che partendo dal deposito soddisfino la domanda nel più breve tempo possibile e riportino poi i veicoli ancora in D , rispettando il vincolo imposto dalla batteria e in modo che sia minimizzato il totale consumo di energia e il numero di veicoli utilizzati.

La schematizzazione della rete in grafo prevede che l'insieme dei nodi sia dato dall'insieme delle domande e dal deposito (indicato con V_0):

$$V = V^* \cup V_0, \text{ con } V^* = \{1, \dots, n\}.$$

L'insieme degli archi E invece è costituito da elementi $e = (i, j)$, con $i, j \in V$. Una coppia (i, j) è inserita nell'insieme E se e solo se soddisfa uno tra i seguenti criteri:

- Il momento in cui perviene la richiesta j (DT_j) è successivo all'istante ottenuto sommando al momento in cui il sistema riceve la richiesta i (DT_i) al tempo necessario per effettuare lo

spostamento $DS_i \rightarrow AS_i \rightarrow DS_j$ ($DT_j > DT_i + t(DT_i, AT_i, DT_j)$). Il costo di quest'arco è il costo dello spostamento $AS_i \rightarrow DS_j \rightarrow AS_j$.

- il nodo i è $tc \ i \in V^*$. Si costruisce in questo caso un arco $(0, i)$, dal deposito al nodo i -esimo, il cui costo è quello dello spostamento $0 \rightarrow DS_j \rightarrow AS_j$.
- Il nodo i è $tc \ i \in V^*$. Si costruisce in questo caso un arco $(i, 0)$ il cui costo è quello dello spostamento $AS_i \rightarrow 0$.

Si noti che applicando i precedenti criteri se esiste l'arco (i, j) , allora non esiste (j, i) .

Si tratta ora di risolvere un VRP (Vehicle Routing Problem) in cui ogni percorso deve essere compiuto entro un tempo limite dato dallo stato della batteria del veicolo che lo intraprende.

Per farlo gli autori hanno ideato un particolare MOGA (Multi-Objective Genetic Algorithm) che fa uso di operazioni di crossover, mutazione e selezione, e si distingue per come vengono generate le soluzioni nella fase di inizializzazione. Gli autori propongono infatti di utilizzare due distinte operazioni di minimizzazione per ottenere le soluzioni che con i metodi tipici di un algoritmo genetico saranno poi modificate e composte per ottenere la soluzione ottimale.

Si pone innanzitutto $x_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{se esiste l'arco}(i, j) \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$,

$$x_{ij} \in \{0, 1\} \forall (i, j) \in E,$$

$$\sum_{j \in \delta^+(i)} x_{ij} = 1 \forall i \in V^*,$$

$$\sum_{j \in \delta^-(i)} x_{ij} = 1 \forall i \in V^*.$$

Con queste ultime due condizioni si impone che per ogni nodo, escluso quello rappresentante il deposito, si abbia un solo arco entrante ed un solo arco uscente.

Si possono ora descrivere le due operazioni di minimizzazione.

La prima minimizza il consumo totale delle batterie dei veicoli presenti in rete:


$$\text{Min} \sum_{(i,j) \in E} c_{ij} x_{ij}$$

La seconda minimizza il numero di veicoli utilizzati, minimizzando il numero di archi che collegano il nodo deposito ai nodi di V^* :

$$\text{Min} \sum_{(i) \in E} x_{0i}$$

Le soluzioni così generate non sono fattibili nel sistema che si tenta di realizzare, ma attraverso successive operazioni di tipo genetico si perviene ad un set di soluzioni fattibili e non dominate, tra le quali cioè l'algoritmo non può individuarne una superiore alle altre.

Per questa operazione Chebbi & Chaouachi (2014) propongono di scegliere nel set di non dominate le due soluzioni x_1 e x_2 che risultano le migliori l'una per consumo energetico, l'altra per numero di veicoli. Ordinando poi le soluzioni rimaste nel set secondo uno dei due criteri, la soluzione dominante è ottenuta confrontando le soluzioni estreme della serie ordinata con x_1 e x_2 .



Chebbi & Chaouachi (2014) testano il MOGA su un sistema di rete con dodici stazioni e ottengono buoni risultati. Osservano anche che la bontà di questo procedimento è incrementata dal fatto che i due obiettivi di minimizzazione non sono in contrasto tra loro: si arriva anzi ad un punto tale per cui il consumo energetico diminuisce di pari passo con il numero di veicoli utilizzati.

Si fa notare infine che la trattazione impone alcune restrizioni poco realistiche: non è posto infatti alcun limite al numero di veicoli che possono stazionare nel deposito. Inoltre, come già evidenziato i veicoli sono considerati tutti tra loro equivalenti. Infine l'applicazione proposta dagli autori non fa uso di precisi dati di domanda, ma genera la domanda stessa in modo casuale, limitando superiormente il numero di richieste. Ciò simula sì quantitativamente il traffico dell'ora di punta, ma non ne rispecchia la distribuzione tra le varie stazioni. Sarebbe allora opportuno, per una miglior rappresentazione del funzionamento del sistema, introdurre ulteriori vincoli nel procedimento.

Il merito dell'algorithmo proposto risiede comunque nella sua semplicità e capacità di generare l'opportuna dimensione della flotta, una soluzione utile per un dimensionamento generale del sistema di PRT.



6. ROUTING

Una volta progettata la rete si pone il problema del *routing* dei veicoli su di essa.

È questo un tema molto complesso dal momento che la natura del sistema implica l'inesistenza di percorsi predefiniti: ad ogni richiesta dell'utenza il sistema centrale deve assegnare un percorso sulla rete che conduca a destinazione, valutando non solo il tragitto più breve, ma tenendo in considerazione le condizioni di traffico ovvero le posizioni relative dei *pod*. È evidente quindi che può avvenire che richieste di spostamento tra la stessa origine e destinazione formulate dall'utenza in momenti diversi possano comportare assegnazioni di percorsi in rete differenti proprio a seguito del variare delle condizioni di rete nel tempo.

Il processo in analisi è pertanto di natura dinamica e deve essere risolto in tempo reale: ad un veicolo deve essere inviata l'indicazione del percorso da seguire immediatamente dopo che l'utente ha richiesto il servizio e non possono esistere tempi d'attesa in questa fase.

Tuttavia il *routing* non riguarda solo l'assegnazione alla rete dei veicoli con passeggeri a bordo. Altrettanto delicato ed analizzato in letteratura è quello che viene definito problema di EVR: *Empty Vehicles Redistribution* o distribuzione dei veicoli vuoti.

È di fondamentale importanza per l'efficienza del sistema che nel momento in cui giunge ad una stazione un utente, o un gruppo di utenti che condividono mezzo e spostamento, questo trovi un veicolo pronto a soddisfarne la domanda. Il problema diventa allora quello di stabilire come spostare i veicoli definiti "idle", cioè inutilizzati e fermi in una stazione a bassa domanda, verso un'altra a forte domanda con scarsa disponibilità di veicoli. Si tratta di possedere dei dati relativi alla domanda che permettano di prevederne lo sviluppo e di utilizzare alcune teorie ed algoritmi per individuare i veicoli più opportuni ed assegnare loro un percorso, il tutto sempre con l'obiettivo di minimizzare sia i costi per il sistema che i tempi d'attesa dell'utenza.

Si analizza ora in dettaglio il problema di *routing* dei veicoli con passeggeri a bordo e nel farlo si fa principalmente riferimento a Schupach & Zenklusen (2013) e a Won, Choe & Karray (2006).

Successivamente si analizzerà l'EVRP.

La rete, che sarà chiamata GN (*Guideway Network*), nei processi di *routing* può essere schematizzata come illustrato nel capitolo 5.1: come sottografo di un grafo completo e orientato $G = \{N, L\}$ con $N = \{1, \dots, n\}$ insieme delle n stazioni, e $L = \{(i, j) | i, j \in N, i \neq j\}$ insieme di $n(n-1)$ elementi, corrispondenti ai link che connettono ciascuna stazione i con ogni stazione j , ciascuno con una lunghezza d'arco $d_{i,j}$.

GN è rappresentata allora da un vettore binario $X = (x_{i,j}) \in \{0,1\}^{n(n-1)}$ dove $x_{i,j}$ è l'elemento di X corrispondente all'arco (i,j) e

$$x_{i,j} = \begin{cases} 1 & \text{se esiste l'arco che collega } i \text{ e } j \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases}$$

GN è quindi un vettore del tipo

$$X = (x_{1,2}, x_{1,3}, \dots, x_{2,1}, x_{2,2}, \dots)$$

O in modo equivalente una matrice

$$X = \begin{bmatrix} 0 & x_{1,2} & \dots \\ x_{2,1} & 0 & \dots \\ \dots & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

In modo semplificato, Won, Choe & Karray (2006) propongono di assegnare i veicoli alla rete individuando per ogni coppia origine-destinazione, data la GN X , il percorso minimo per lunghezza fisica. Tale assegnazione minimizza sia il consumo energetico che il tempo di percorrenza.

I percorsi individuati possono essere identificati da $n(n-1)$ vettori

$$r_{i,j}(x) = (r_{i,j,k}(x)) \in \{0,1\}^n$$

$$r_{i,j}(x) = \begin{cases} 1 & \text{se il percorso tra } i \text{ e } j \text{ passa per } k \\ 0 & \text{altrimenti} \end{cases} \quad \text{con } i,j \in N \text{ e } i \neq j$$

Per individuare il percorso minimo tra due stazioni nella rete diversi autori, tra i quali anche Won, Choe & Karray (2006), propongono di ricorrere all'algoritmo di Floyd-Warshall. Tale algoritmo infatti consente di trovare i cammini minimi per ogni coppia di nodi in un grafo orientato e pesato, dove nel caso in esame come pesi possono essere considerate le lunghezze d'arco $d_{i,j}$.

L'algoritmo (wikipedia s.d.) consiste in h iterazioni successive, con $h=n$, dove n è il numero di nodi nel grafo (stazioni della rete). A ciascuna iterazione viene considerato un nuovo nodo del grafo, cosicché al termine delle h iterazioni tutti i nodi sono stati esaminati. Ad ogni passo si aggiorna una matrice $A = [n \times n]$ i cui elementi A_{ij} indicano il costo del percorso minimo dal nodo di indice i a quello di indice j attraversando solo i nodi con indice minore o uguale ad h . Ciò viene fatto esaminando ogni cella della matrice A : si verifica se la distanza tra i nodi i ed h sommata a quella tra h e j è minore di quella tra i e j . In questo caso si aggiorna la cella con il nuovo valore di costo. Nel caso in cui non esista un collegamento, nella cella è posto un valore infinito.


Tutto ciò può essere così formalizzato:

se $(A^{h-1}[i,h] + A^{h-1}[h,j]) < A^{h-1}[i,j]$ allora $A^h[i,j] = (A^{h-1}[i,h] + A^{h-1}[h,j])$ dove h è l'iterazione corrente.

Scrivendo l'algoritmo con uno pseudocodice si ha (wikipedia s.d.):

```
# inizializzazione
int [0..n, 0..n] dist;
int [0..n, 0..n] pred;
for i := 1 to n
  for j := 1 to n
    dist[i][j] := Weight(i,j);
    pred[i][j] := i;
  endfor
endfor

# floyd-warshall
for h := 1 to n
```



```

for i := 1 to n
  for j := 1 to n
    if (dist[i][j] > dist[i][h] + dist[h][j]) then
      dist[i][j] := dist[i][h] + dist[h][j];
      pred[i][j] := pred[h][j];
    endif
  endfor
endfor
endfor

```

dove “*Weight*” è una funzione che indica il peso dell’arco:

$$Weight(i, j) = \begin{cases} 0 & \text{se } i = j \\ \infty & \text{se } \nexists \text{ collegamento } i, j \\ \text{lunghezza d'arco } i, j & \text{altrimenti} \end{cases}$$

La ricostruzione dei cammini minimi si ottiene definendo i predecessori dei nodi, di modo che se il cammino minimo tra i e j passa per il nodo h allora il predecessore di j in $i \rightarrow j$ sarà chiaramente il predecessore di j in $h \rightarrow j$.

In questo modo si possono ottenere i cammini minimi per ogni coppia origine-destinazione ed agendo sulla funzione *Weight* si può variare il percorso minimo calcolandolo per esempio in funzione della lunghezza, del tempo di percorrenza, ecc.

6.1 Approcci sequenziali e adattivi

Per l'assegnazione di un percorso ai veicoli in rete da parte del sistema centrale esistono due diversi approcci detti di *routing* sequenziale ed adattivo.

Il primo consiste nell'assegnare un percorso ad un *pod* valutando che sia il più breve e che non interferisca con i tragitti imposti ad altri veicoli in precedenza. Tale percorso non può essere modificato successivamente alla partenza ma sono i veicoli che si immetteranno in rete in un secondo momento a dover considerare la posizione del primo *pod*. Ciò comporta un processo sequenziale in cui i veicoli sono analizzati in successione e nel tempo costituiscono un vincolo ed un costo per quei *pod* ai quali dovrà essere assegnato un percorso: questo infatti potrebbe consistere in un tragitto con deviazioni che, se fosse possibile effettuare piccole modifiche ai percorsi già assegnati, si ridurrebbe anche notevolmente in lunghezza con conseguente abbattimento dei costi (Schupach e Zenklusen 2013).

Quest'ultima osservazione conduce ad un nuovo ed alternativo approccio: il *routing* adattivo. Con questo sistema di assegnazione alla rete i percorsi possono subire modifiche anche mentre il veicolo è in movimento e tali correzioni permettono una migliore utilizzazione della rete stessa riducendo i costi ed ottimizzando i tempi di percorrenza.

Schupach & Zenklusen (2013) propongono un'analisi dettagliata del *sequential routing* che è presentato come un procedimento che tende a minimizzare la funzione *ritardo medio della domanda*.

La rete è rappresentata ancora come un grafo

$$G = \{N, L\}.$$

Gli autori propongono di suddividere il tempo in intervalli Δt uguali tra loro per semplificare la rappresentazione della domanda e dei movimenti dei veicoli in rete.

Si ipotizza poi che ogni veicolo sia posizionato su un nodo e che in un successivo intervallo temporale ciascun *pod* possa restare fermo sullo stesso nodo o spostarsi su di un altro.

Si assume inoltre che non possano esserci due veicoli nello stesso nodo nel medesimo intervallo temporale e che tratti di rete lunghi, cioè percorribili in tempi superiori al Δt , siano suddivisi in ulteriori archi da nodi aggiuntivi in modo che ciascuno dei tratti in cui l'arco iniziale risulta suddiviso sia percorribile proprio nel tempo Δt . In questo modo la rappresentazione utilizzata impone Δt come *headway* minimo tra veicoli, garantendo la distanza di sicurezza. Si può osservare inoltre che la suddivisione della rete in sotto-archi è fatta in funzione di un Δt scelto di modo che, note le accelerazioni e le velocità dei veicoli lungo la rete stessa, ogni sotto-arco sia percorso da ciascun veicolo proprio nel tempo Δt .

La domanda è cumulata all'interno degli intervalli temporali, ciascuno dei quali apporta nuove richieste. Esse sono rappresentabili come

$$\pi = (s_\pi, t_\pi, \tau_\pi)$$
$$s_\pi, t_\pi \in N; s_\pi \neq t_\pi; \tau_\pi \in Z^+$$

dove s_π rappresenta la stazione di origine per la domanda, t_π la stazione di destinazione e τ_π l'istante in cui perviene la richiesta.

Inoltre, con il simbolo π è indicato per comodità di notazione anche il veicolo che serve la richiesta corrispondente.

Alle precedenti si aggiungono ulteriori due ipotesi: l'assunzione un numero finito di domande globali (non si impone invece un limite al numero di richieste che possono pervenire in uno stesso intervallo temporale), e la presenza di un *pod* libero alla posizione s_π nell'istante in cui è presentata la domanda π (per questa assunzione si rimanda alla teoria di redistribuzione dei veicoli vuoti trattata in seguito all'interno di questo capitolo).

Infine, data la conformazione delle stazioni poste tutte fuori rete, si può osservare che un veicolo può entrare in conflitto con altri solo lungo il proprio percorso e non prima della partenza o dopo l'arrivo a destinazione.

Per istante di partenza di un *pod* si considera l'ultimo intervallo temporale in cui lo stesso figura in s_π . Per istante di arrivo invece il primo intervallo temporale nel quale risulta in t_π . Tali assunzioni sono dette *parking assumption* e derivano proprio dalla configurazione delle stazioni per la quale un veicolo non interferisce con la rete se staziona sul binario esterno di una fermata.

Fatte le precedenti considerazioni, il *sequential routing* si propone di minimizzare la funzione obiettivo

$$\sum_{\pi \in \Pi} del_\pi$$

dove con Π si indica l'insieme di tutte le domande e

$$del_\pi = \tau - \tau_\pi - d(s_\pi, t_\pi)$$

è la funzione ritardo medio della domanda. Essa è calcolata come differenza tra tempo impiegato per soddisfare la richiesta ($\tau - \tau_\pi$), a sua volta ottenuto dalla differenza tra istante attuale τ e momento τ_π in cui perviene la domanda, e il tempo teorico necessario per realizzare lo spostamento richiesto nell'ipotesi di condizioni di assenza di conflitti in linea ($d(s_\pi, t_\pi)$).

Infatti con $d(s_\pi, t_\pi)$ si indica il percorso più breve per numero di archi e quindi anche per tempi di percorrenza (secondo la costruzione che si è esposta) che collega s_π e t_π .

Si può dimostrare che esiste sempre un modo per condurre i veicoli a destinazione, indipendentemente dal numero dei veicoli stessi in rete: si può infatti far semplicemente entrare in rete un *pod* alla volta, condurlo a destinazione e solo allora inserire un nuovo veicolo in rete. Tuttavia, senza necessità di ricorrere ad una soluzione così svantaggiosa per l'economia del sistema è dimostrata l'impossibilità che si venga a creare una situazione di blocco in rete.

Indipendentemente da come si spostano i veicoli è infatti in ogni caso possibile che questi raggiungano le proprie destinazioni. La dimostrazione è data dal fatto che è sempre possibile soddisfare tutte le domande: un veicolo può attendere che tutti i *pod* attivamente presenti in rete giungano a destinazione per essere poi indirizzato verso la propria destinazione insieme ai veicoli rispondenti a richieste future secondo una strategia sequenziale uno ad uno.

Formalmente si indica Π = insieme delle richieste attive, cioè pervenute ad un istante $\tau_\pi \leq \tau$ con τ istante attuale, raccolte da un veicolo π non più in posizione di parcheggio.

Se $\pi \in \Pi$, allora il veicolo π occupa una posizione $n_\pi \in N$.

Nell'intervallo di tempo successivo i veicoli in rete possono essere portati in $n'_\pi \in N$, $\forall \pi \in \Pi$ in modo da soddisfare la seguente disequazione:

$$\sum_{\pi \in \Pi} d(v'_\pi, t_\pi) < \sum_{\pi \in \Pi} d(v_\pi, t_\pi)$$

cioè in modo che la distanza totale dei veicoli dalle rispettive destinazioni decresca.

Per ogni $\pi \in \Pi$ si sceglie poi arbitrariamente un arco a_π uscente da v_π tale da condurre il veicolo π più vicino alla destinazione.

Si costruisce allora $A_\pi = \{a_\pi | \pi \in \Pi\}$, e si considera il sottografo di $G(N, A_\pi)$. In questo sottografo per ogni nodo c'è al più un arco uscente, dal momento che due o più veicoli non possono condividere lo stesso nodo. Se tale grafo contiene un ciclo diretto allora per soddisfare la precedente disequazione senza incorrere in conflitti è sufficiente muovere i veicoli sui vertici del ciclo lungo gli archi a_π senza spostarne altri; se ciò non accade ciascun veicolo può essere simultaneamente spostato lungo a_π , avvicinandosi così alla destinazione e senza peraltro creare conflitti in rete.

Resta così dimostrato che è sempre possibile condurre tutti i veicoli a destinazione senza che la rete risulti bloccata (Schupach e Zenklusen 2013).

I due principali modelli di *routing* trattati da Schupach & Zenklusen (2013), i quali non prevedono particolari ipotesi sul tipo di distribuzione della domanda e trattano le richieste esplicitate per ogni intervallo temporale, si fondano sulla modellazione del sistema fin qui esposta e fanno uso dei cosiddetti *time expanded graphs*, uno strumento utile in questo tipo di algoritmi che coinvolgono la dimensione temporale della domanda.

Si tratta di grafi che permettono di rappresentare tutte le ipotesi di *routing* per le richieste Π sulla rete ad un certo intervallo temporale $\bar{\tau}$.

I *time expanded graphs* sono del tipo $H=(W, F)$ e sono costruiti per gli intervalli temporali $\{\bar{\tau}, \bar{\tau} + 1, \dots, T\}$, con T numero naturale che rappresenta un istante sufficientemente lontano e tale che tutte le richieste dichiarate prima dell'istante $\bar{\tau}$ siano soddisfatte in T .

Nel grafo gli insiemi W e F , rispettivamente di nodi e archi, sono costituiti ciascuno dall'unione di due insiemi definiti come segue:

$$W = W_1 \cup W_2$$

$$F = F_1 \cup F_2$$

$$W_1 = \{v^\tau | v \in V, \tau \in \{\bar{\tau}, \bar{\tau} + 1, \dots, T\}\},$$

$$F_1 = \{(v_1^\tau, v_2^{\tau+1}) | v_1, v_2 \in V, v_1 = v_2 \text{ oppure } (v_1, v_2) \in A, \text{ e } \tau \in \{\bar{\tau}, \dots, T-1\}\},$$

$$W_2 = \{\bar{s}_\pi | \pi \in \Pi\} \cup \{\bar{t}_\pi | \pi \in \Pi\},$$

$$F_2 = \{(\bar{s}_\pi^\tau, \bar{s}_\pi^\tau) | \tau \in \{\bar{\tau}, \dots, T\}\} \cup \{(t_\pi^\tau, \bar{t}_\pi^\tau) | \tau \in \{\bar{\tau}, \dots, T\}\}$$

I nodi in W_1 e gli archi in F_1 rappresentano i nodi occupati dai veicoli ad ogni istante e come i veicoli stessi si muovono. W_2 e F_2 sono invece utilizzati per modellare le *parking assumption*: archi e nodi sono rappresentativi dei non-movimenti dei veicoli che sono fermi ad una stazione prima della partenza e dopo l'arrivo.

Con l'introduzione di questi nodi ed archi ausiliari è possibile rappresentare con un unico tragitto in H gli spostamenti dei veicoli. Tale percorso è indicato con P_π e l'assenza di conflitti tra i diversi *pod* è possibile se i relativi percorsi sono disgiunti.

Inoltre si può calcolare il ritardo di ogni veicolo $\pi \in \Pi$ come dipendente dal percorso in rete. Ad ogni arco di F si può associare un costo:

$$\left\{ \begin{array}{l} F_1 \\ (s_\pi, t_\pi) \end{array} \right\} \Rightarrow c=0$$

$$\{f = (t_\pi^r, \bar{t}_\pi) \Rightarrow c(f) = \tau - \tau_\pi - d(s_\pi, t_\pi)$$

Perciò il ritardo di ogni veicolo, pari a $c(P_\pi)$, dipende unicamente dal solo arco (t_π^r, \bar{t}_π) .

Può ora essere definito il *routing* sequenziale.

Esso prevede che non appena si manifesta una domanda π venga assegnato un percorso al veicolo π ad essa associato, e questo non verrà modificato indipendentemente dall'evoluzione futura della domanda.

Le domande sono analizzate in gruppi Π_τ , ovvero all'interno dello stesso intervallo temporale τ . A ciascuna di esse, prese in ordine aleatorio, viene assegnato il percorso più rapido disponibile, vincolato dal fatto di non creare interferenze né con veicoli cui era stato assegnato un tragitto in un intervallo precedente a π , né con altri relativi allo stesso intervallo ma già analizzati.

L'approccio adattivo proposto si basa invece sulle già citate ipotesi che prevedono al massimo un *pod* per ogni nodo, con $a_\tau \in W$ che rappresenta le posizioni dei veicoli all'istante τ , e prevede la minimizzazione dei costi di tutti gli spostamenti π , calcolati come detto.

Il procedimento di assegnazione del percorso prevede quindi di calcolare i percorsi del tipo $a_\pi - \bar{t}_\pi$ a costo minimo.

Per fare ciò Schupach & Zenklusen (2013) indicano l'algoritmo di Dijkstra come il più opportuno.

Tale algoritmo, così come quello già illustrato di Floyd-Warshall, è utilizzato per ottenere i cammini minimi in un grafo orientato che abbia pesi non negativi sugli archi.

Il procedimento è il seguente. In un grafo con nodi $\{1,2, \dots, n\}$ il peso del generico arco (j,k) è indicato con $p(j,k)$. L'obiettivo è ricavare il costo del percorso $f(i)$, ovvero del percorso da nodo l a nodo i e di ricostruire lo stesso attraverso la definizione di nodi predecessori nel cammino minimo indicati con $j(i)$ (nodo che precede i nel cammino minimo).

Si definiscono ancora S l'insieme dei nodi cui sono già state assegnate le etichette p e j , T l'insieme dei restanti nodi.

L'algoritmo prevede i seguenti passi:

- Passo 0: inizializzazione

$$S = \{1\}$$

$$T = \{2, 3, \dots, n\}$$

$$f(1) = 0$$

$$j(1) = 0$$

$$f(i) = \infty \quad \forall i \neq 1$$

- Passo 1: assegnazione delle etichette permanenti

Se $f(i) = \infty \quad \forall i \in T$ STOP. Si rimanda a passo 2.

Si trova j in T tale che $f(j) = \min_{i \in T} f(i)$ con $i \in T$

Si pone $T = T \setminus \{j\}$ e $S = S \cup \{j\}$

Se $T = \emptyset$ STOP.

- Passo 2: assegnazione etichetta provvisoria

Per ogni $i \in T$, adiacente a j e tale che $f(i) > f(j) + p(j, i)$ poniamo:

$$f(i) = f(j) + p(j, i)$$

$$J(i) = j$$

E si torna al passo 1.

Dijkstra permette dunque di ricostruire i cammini minimi oltre che di conoscere i costi di tutti i percorsi tra il nodo scelto come origine (1) e ogni altro nodo della rete.

Stabiliti così i percorsi minimi è semplice conoscere il flusso tra gli intervalli τ e $\tau+1$. All'istante τ i veicoli occupano i nodi $\bar{N} = N \cup \{\bar{s}_\pi | \pi \in \Pi\} \cup \{\bar{t}_\pi | \pi \in \Pi\}$. Perciò a $\tau+1$ il numero di veicoli $\pi \in \Pi$ che si trovano ad un $n \in \bar{N}$ può essere espresso da $x_\pi(n) \in [0, 1]$, dove 0 indica l'assenza di veicoli al nodo n corrispondente e 1 ne indica la presenza. All'istante $\tau+1$ ogni veicolo è mandato in un nodo $u_\pi \in \bar{N}$ con $u_\pi \neq u_{\pi'} \quad \forall \pi \neq \pi' \text{ con } \pi, \pi' \in \Pi$; per evitare conflitti deve essere $Pr[u_\pi = n] = x_\pi(n)$.

Ottenute le posizioni u_π a $\tau+1$, iterando il procedimento si ottengono quelle nei momenti successivi $\tau+2, \tau+3, \dots$

Gli autori presentano anche un confronto tra i due approcci. L'indicatore scelto per attuare tale raffronto è il ritardo nei tempi di servizio che deriva dall'utilizzo dell'uno e dell'altro sistema di *routing*.

Il confronto è applicato ad una rete ideale rappresentata in figura 52.

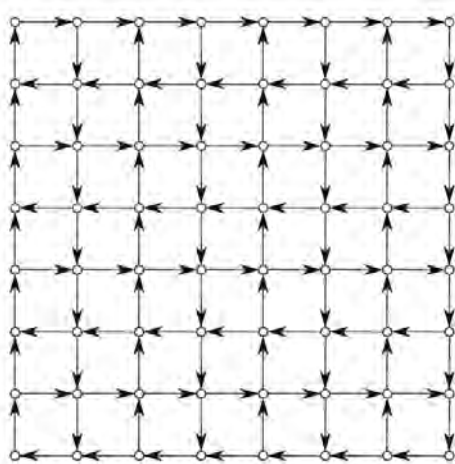


Figura 52 Esempio di rete (Schupach e Zenklusen 2013)

La simulazione prevede 1000 intervalli temporali all'interno dei quali le richieste sono trattate come variabili indipendenti di Poisson generate secondo un parametro λ che con il suo valore indica il numero medio di richieste all'interno di ciascuno dei 1000 intervalli temporali. Le coppie di origine-destinazione sono scelte in modo casuale.

Nel grafico che segue sono rappresentate due serie di punti, una per il *sequential routing* (blu) l'altra per l'*adaptive routing* (rossa), che rappresentano l'andamento del ritardo medio per veicolo al variare del parametro λ e dunque dell'intensità della domanda.

In generale si può osservare che una domanda maggiore comporta maggiori tempi di percorrenza. Se si confrontano tra loro le due serie invece appare evidente come per livelli bassi di domanda e quindi di flusso i due approcci si equivalgono: in queste condizioni sono presenti in rete più soluzioni di percorsi che evitano collisioni. Con l'aumentare di λ invece appare nettamente più vantaggioso un approccio adattivo, in quanto garantisce tempi di viaggio più contenuti fino ad un valore limite di domanda per il quale neppure questo modello può evitare una forte congestione della rete.

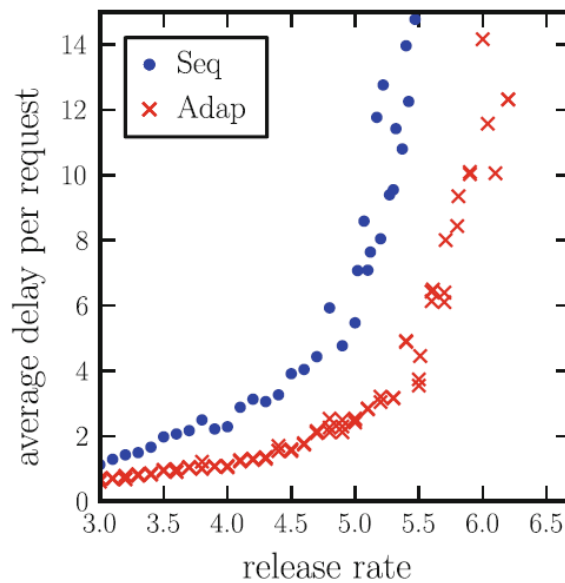


Figura 53 Ritardo medio per veicolo al variare del parametro λ (Schupach e Zenklusen 2013)

Il grafico successivo (figura 54) analizza invece il numero di richieste che è possibile servire in contemporanea all'interno dei successivi intervalli temporali.

Le diverse linee fanno riferimento, oltre che ai due differenti approcci (ancora blu e rosso), a livelli di flusso e di domanda crescenti con l'intensità dei colori nel grafico ($\lambda=5,4$; $5,5$; $6,2$; $6,3$).

Il *routing* sequenziale (blu) appare stabile per numero di richieste servite se $\lambda=5,4$, mentre già se $\lambda=5,5$ le domande si accumulano e non possono essere smaltite con conseguente rapido congestionamento della rete deducibile anche dalla rapida crescita delle successive curve nel grafico.

Tale punto critico per entità della domanda è presente anche nell'approccio adattivo, ma si inizia a riscontrare a livelli di flusso-domanda maggiori, cioè per $\lambda=6,3$.

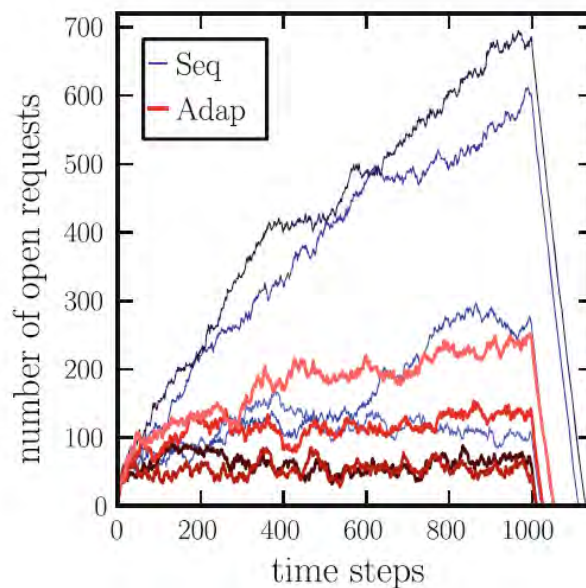


Figura 54 Numero di richieste che è possibile servire all'interno dei successivi intervalli temporali (Schupach e Zenklusen 2013)

A conclusione di questo argomento si può affermare che un approccio al *routing* di tipo adattivo permette un uso più efficiente dell'infrastruttura, pur mantenendo tempi computazionali limitati.

Si osservi che nella presente trattazione si è posta un'ipotesi molto restrittiva: si è supposto che per ogni domanda fosse immediatamente disponibile un veicolo vuoto alla stazione di partenza. Tuttavia, dato che una situazione reale implica un numero finito di veicoli dislocati nelle varie stazioni, tale ipotesi è irrealistica ed anzi appare fondamentale considerare in rete anche i movimenti dei veicoli vuoti. Tale tematica per nulla secondaria è trattata nel paragrafo seguente.

6.2 I veicoli vuoti

La principale difficoltà nel gestire la distribuzione dei veicoli in rete risiede in quella che è la principale caratteristica del sistema di PRT: l'essere un sistema *on demand*, a richiesta. In aggiunta si deve considerare la domanda non è esattamente prevedibile né quantitativamente né dal punto di vista spaziale. È perciò un problema non indifferente stabilire in che numero e dove sia opportuno posizionare i veicoli inutilizzati.

Esistono diversi approcci a riguardo e numerose teorie, alcune delle quali sono trattate in queste pagine. Si ritiene qui opportuno innanzitutto inquadrare in modo formale la questione.

In ogni stazione i della rete x entrano i_i veicoli e ne escono o_i , con i_i e o_i valori di picco orario (Won, Choe e Karray, *Optimal Design of Personal Rapid Transit* 2006). Tali valori possono essere così calcolati:

$$i_i = \sum_{j=1}^n t_{j,i} ; o_i = \sum_{j=1}^n t_{i,j}$$

In base a queste definizioni le stazioni possono essere classificate in stazioni sorgenti e utilizzatrici.

Le prime sono tali per cui $i_i > o_i$, e si definisce $s_i = i_i - o_i$ il numero di veicoli vuoti disponibili in i . Si tratta di stazioni che fungono prevalentemente da destinazione per gli spostamenti.

Le seconde, utilizzatrici, sono invece quelle in cui vale $i_j < o_j$ e nelle quali $u_j = o_j - i_j$ è il numero di veicoli necessario a compensare quelli che escono per poter soddisfare la domanda che ha in j l'origine.

In una rete x in cui vi sia un numero p di stazioni sorgenti, un numero q di stazioni utilizzatrici e sia chiamato $c_{i,j}(x)$ il costo dello spostamento di un veicolo da i in j , un primo obiettivo è quello di determinare il numero di veicoli vuoti che si rende necessario spostare, di modo da minimizzare il costo dello spostamento.

Ciò significa, detto $e_{i,j}(x)$ il numero di veicoli che si spostano dalla stazione sorgente i alla utilizzatrice j per unità di tempo, che la soluzione è quell' $e_{i,j}(x)$ con $i \in \{1, \dots, p\}$ e $j \in \{1, \dots, q\}$ che rispettando i vincoli $\sum_{j=1}^q e_{i,j}(x) = s_i$ e $\sum_{i=1}^p e_{i,j}(x) = u_j$ minimizza la seguente equazione:

$$\sum_{i=1}^p \sum_{j=1}^q c_{i,j}(x) e_{i,j}(x)$$

Won Choe & Karray (2006) propongono l'esempio di un semplice caso pratico, già citato per altri scopi nel capitolo 5.1, che è qui riportato.

In una rete come quella schematizzata in figura 55 sia data la seguente tabella rappresentativa della domanda di spostamento tra le stazioni espressa in veicoli/ora:

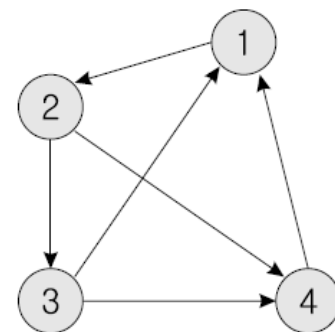


Figura 55 Esempio di rete (Won, Choe e Karray, *Optimal Design of Personal Rapid Transit* 2006)

Domanda di traffico tra stazioni (veicoli all'ora)		Destinazioni			
		1	2	3	4
origini	1	/	100	300	300
	2	100	/	250	350
	3	50	50	/	200
	4	100	150	250	/

Tabella 9 (Won, Choe e Karray, Optimal Design of Personal Rapid Transit 2006)

Dai dati in tabella risultano:

$$i_1 = 250 \quad ; \quad o_1 = 700$$

$$i_2 = 300 \quad ; \quad o_2 = 700$$

$$i_3 = 800 \quad ; \quad o_3 = 300$$

$$i_4 = 850 \quad ; \quad o_4 = 500$$

Le stazioni sorgenti di veicoli vuoti sono le stazioni 3 e 4: $s_3 = 500$ e $s_4 = 350$. Le utilizzatrici sono 1 e 2: $u_1 = 450$ e $u_2 = 400$.

Si tratta ora, noti i costi di spostamento per singolo veicolo, di trovare una soluzione ammissibile con il metodo dell'angolo di nord-ovest:

Costo per veicolo		stazioni utilizzatrici		generati
		1	2	
stazioni sorgenti	3	40	28	500
	4	34,6	40	350
necessari		450	400	

Tabella 10 (Won, Choe e Karray, Optimal Design of Personal Rapid Transit 2006)

Si riportano i passaggi ed il risultato non ottimale cui si perviene applicando il metodo indicato:

<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 20%;">0</td><td style="width: 20%;">0</td><td style="width: 20%; border-right: 1px solid black;">500</td><td style="width: 40%;"></td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td style="border-right: 1px solid black;">350</td><td>□</td></tr> <tr style="border-top: 1px solid black;"><td>450</td><td>400</td><td style="border-right: 1px solid black;"></td><td></td></tr> </table>	0	0	500		0	0	350	□	450	400			<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 20%; background-color: yellow;">450</td><td style="width: 20%;">0</td><td style="width: 20%; border-right: 1px solid black;">500</td><td style="width: 40%;"></td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td style="border-right: 1px solid black;">350</td><td>□</td></tr> <tr style="border-top: 1px solid black;"><td>450</td><td>400</td><td style="border-right: 1px solid black;"></td><td></td></tr> </table>	450	0	500		0	0	350	□	450	400			<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 20%;">450</td><td style="width: 20%;">0</td><td style="width: 20%; border-right: 1px solid black;">50</td><td style="width: 40%;"></td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td style="border-right: 1px solid black;">350</td><td>□</td></tr> <tr style="border-top: 1px solid black;"><td>0</td><td>400</td><td style="border-right: 1px solid black;"></td><td></td></tr> </table>	450	0	50		0	0	350	□	0	400		
0	0	500																																				
0	0	350	□																																			
450	400																																					
450	0	500																																				
0	0	350	□																																			
450	400																																					
450	0	50																																				
0	0	350	□																																			
0	400																																					
<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 20%;">450</td><td style="width: 20%;">50</td><td style="width: 20%; border-right: 1px solid black;">0</td><td style="width: 40%;"></td></tr> <tr><td>0</td><td style="background-color: yellow;">350</td><td style="border-right: 1px solid black;">350</td><td>□</td></tr> <tr style="border-top: 1px solid black;"><td>0</td><td>350</td><td style="border-right: 1px solid black;"></td><td></td></tr> </table>	450	50	0		0	350	350	□	0	350			<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 20%;">450</td><td style="width: 20%;">50</td><td style="width: 20%; border-right: 1px solid black;">0</td><td style="width: 40%;"></td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td style="border-right: 1px solid black;">350</td><td>□</td></tr> <tr style="border-top: 1px solid black;"><td>0</td><td style="background-color: yellow;">350</td><td style="border-right: 1px solid black;"></td><td></td></tr> </table>	450	50	0		0	0	350	□	0	350			<table style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <tr><td style="width: 20%;">450</td><td style="width: 20%; background-color: yellow;">50</td><td style="width: 20%; border-right: 1px solid black;">50</td><td style="width: 40%;"></td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td style="border-right: 1px solid black;">350</td><td>□</td></tr> <tr style="border-top: 1px solid black;"><td>0</td><td>400</td><td style="border-right: 1px solid black;"></td><td></td></tr> </table>	450	50	50		0	0	350	□	0	400		
450	50	0																																				
0	350	350	□																																			
0	350																																					
450	50	0																																				
0	0	350	□																																			
0	350																																					
450	50	50																																				
0	0	350	□																																			
0	400																																					

450	50	0
0	350	0
0	0	

Come detto tale soluzione non è ottimale. Con un procedimento di ottimizzazione, utilizzando ad esempio la *regola del ciclo* (Cerulli Prof. – Dott.ssa Gentili. Lezioni di Ricerca Operativa Corso di Laurea in Informatica ed Informatica Applicata 2009) e considerando i costi degli spostamenti si perviene alla soluzione ottimale:

e(i,j)		Destinazioni	
		1	2
Origini	3	100	400
	4	350	0

Tabella 11 (Won, Choe e Karray, *Optimal Design of Personal Rapid Transit 2006*)

Chiarita la questione con l'esempio sopra citato, di seguito sono analizzati alcuni metodi per risolvere gli EVRP (*Empty Vehicles Redistribution Problem*).

Lees-Miller (2013) ne propone quattro e confronta i risultati ottenuti applicandoli al caso reale della rete di PRT realizzata all'aeroporto di Heathrow, Londra. L'obiettivo è di elaborare una strategia per far arrivare il numero opportuno di veicoli alle stazioni che fungono prevalentemente da origine (le stazioni definite "sorgenti" da Won, Choe & Karray (2006)). Si tratta di risolvere un *Vehicle Routing Problem* dinamico nel quale la domanda non è nota a priori. I metodi utilizzati per risolvere il problema lo affrontano ponendo ipotesi anche irrealistiche o molto restrittive: viene ignorata la congestione in linea e si considerano pertanto costanti i tempi impiegati dai veicoli per effettuare spostamenti tra le stazioni, supponendo che essi possano sempre usufruire del tragitto più breve; viene trascurata la congestione nelle stazioni, data dai tempi di salita e discesa ed eventualmente dal fenomeno di *ride sharing*, e tali tempi sono considerati inclusi nel tempo di viaggio.

In particolare sono trattati i quattro modelli approfonditi da Lees-Miller (2013) che minimizzano il tempo d'attesa dell'utenza: il primo è basato sulla teoria delle code M/G/s, il secondo (SNN) è applicabile se la matrice domanda è nota, il terzo è un processo decisionale makroviano (MDP) che elabora una politica di intervento sul sistema per portarlo in uno stato che massimizza i benefici per l'utenza e in altri termini minimizza i tempi di attesa, e il quarto detto di *Sampling and Voting*, descritto da Lees-Miller & Wilson (2011), che compone due diversi algoritmi ed elabora differenti scenari di domanda per stabilire se, quali e quanti veicoli vuoti devono essere spostati verso le stazioni che ne necessitano.

6.2.1 M/G/s

Lees-Miller (2013) osserva che la disponibilità e la posizione in rete dei veicoli vuoti concorre a determinare i tempi di attesa dell'utenza insieme al livello di congestione in linea e nelle stazioni.

Assunte valide le ipotesi e semplificazioni esposte alla fine del paragrafo precedente, risulta ora indispensabile ancora una volta schematizzare il sistema per poter poi trattare un primo modello di EVR.

Si definisce S l'insieme delle stazioni della rete contenente nS elementi. Siano poi $t_{i,j}[\text{min}] \forall (i,j) \in S$ i tempi impiegati a percorrere il percorso più breve tra le stazioni i e j , con $t_{i,j} = 0$ se $i = j$, organizzati in una matrice. Si pone a questo punto una condizione fondamentale che chiameremo (1):

$$t_{i,h} + t_{h,j} > t_{i,j} \forall i, j, h \in S$$

Tale condizione vale anche se la stazione h è posta tra le stazioni i e j a causa della decelerazione che sarebbe necessaria per arrestare il veicolo in h .

Si semplifica ulteriormente il sistema considerando una sola destinazione per ogni veicolo, non contemplando di fatto il *ride sharing* ed identificando ogni veicolo con un'unica domanda. Inoltre, si stabilisce che i veicoli in rete che costituiscono la flotta k siano presenti in un numero prefissato n_k tutti tra loro identici per dimensioni e prestazioni.

La domanda viene rappresentata in una matrice d_{ij} assunta nota a partire da dati storici nella quale ogni elemento d_{ij} indica il numero di richieste al minuto (con $d_{ij} = 0$ se $i=j$). La domanda si assume quindi invariante nel tempo, ipotesi questa poco realistica nel lungo periodo ma accettabile nel contesto dell'orario di punta.

Il flusso in rete è dato allora da $d_{ij} + x_{ij}$, con x_{ij} rappresentativo del flusso dei veicoli vuoti, posto nullo se $i=j$.

Il problema di EVR è una minimizzazione che può essere espresso come segue:

$$\min \sum_{i,j \in S} t_{ij} x_{ij}$$

L'EVRP è soggetto a due vincoli: $\sum_{j \in S} (d_{ij} + x_{ij}) = \sum_{j \in S} (d_{ji} + x_{ji}) \forall i \in S$, vincolo di conservazione del flusso e $x_{ij} \geq 0 \forall i \in S, \forall j \in S$.

La soluzione ottimale per ogni coppia di stazioni sarà x^*_{ij} , cui corrisponde un numero minimo di veicoli in rete necessari per soddisfare la domanda pari a $n_k^* = \sum_{i,j \in S} t_{ij} (d_{ij} + x^*_{ij})$.

Il rapporto $\rho = \frac{n_k^*}{n_k}$ costituisce un fattore di utilizzazione della rete o di intensità di domanda, e indica quanto la domanda si avvicina alla capacità massima del sistema: se $\rho > 1$ la domanda supera la capacità del sistema e conseguentemente si formeranno fenomeni di accodamento.

Questi elementi in particolare sono utilizzati nel primo modello analizzato. Si tratta di una strategia basata sulla teoria della code, attraverso la quale è possibile stimare i tempi di attesa nel sistema.

In una rete di PRT è applicabile un modello M/G/s, che in teoria delle code indica un sistema multi-server, makroviano e con una distribuzione dei tempi di servizio generica. In altri termini l'arrivo dei passeggeri e quindi la successione delle domande è di tipo Makroviano, rispetta cioè il processo di Poisson

(M), i tempi di servizio non rispettano una legge prestabilita (G) ed il numero di server, ovvero di veicoli, è $s = n_k(s)$. Tale teoria applicata ad una rete di PRT rispecchia le condizioni delle code solo nell'ipotesi di considerare una sola stazione come origine per tutti gli spostamenti; nel caso di un numero superiore di origini il tempo di attesa risulterebbe sottostimato.

Ogni domanda d_{ij} è identificata da una terna di stazioni (I, J, H) che indica l'origine e la destinazione dello spostamento in oggetto oltre alla destinazione finale del veicolo che ormai vuoto si sposta in H . Può essere $J=H$ nel caso in cui la destinazione ultima coincida con quella del primo spostamento.

I tempi impiegati per soddisfare una singola richiesta sono allora ottenuti dalla somma del tempo impiegato dal veicolo per effettuare lo spostamento richiesto dall'utenza e del tempo che è necessario allo stesso veicolo, vuoto, per portarsi in H . Le domande sono organizzate in una matrice $[d_{ij}]$ e si hanno:

- $d_{i\sigma} = \sum_{j \in S} d_{ij}$, totale di riga, cioè numero totale di spostamenti originati dal nodo i ;
- $d_{\sigma i} = \sum_{j \in S} d_{ji}$, totale di colonna, cioè numero totale di spostamenti attratti dal nodo i ;
- $d_{\sigma\sigma} = \sum_{i, j \in S} d_{ij}$, totale di matrice, cioè numero totale di domande nel sistema.

La percentuale d domanda totale che è collocata tra i nodi i e j è allora $\Pr(I = i, J = j) = \frac{d_{ij}}{d_{\sigma\sigma}}$.

Un veicolo giunto alla propria destinazione J , può proseguire verso una nuova stazione $H \neq J$ oppure rimanere in J laddove questo fosse necessario. La probabilità che il veicolo debba spostarsi in H è pari a $\Pr(H = h | J = j) = p_{jh} = \frac{x_{jh}^*}{(d_{j\sigma} + x_{j\sigma}^*)}$, cioè è il rapporto tra il flusso ottimo di veicoli vuoti in uscita da J e il flusso totale, di veicoli vuoti e pieni, in uscita dalla stessa stazione. La probabilità complementare, cioè che il veicolo resti in J , è ottenibile per differenza: $p_{jj} = 1 - \sum_{h \in S, h \neq j} p_{jh}$.

Dall'equazione (1) si deduce che è conveniente inviare direttamente i veicoli alla loro destinazione, e questo vale anche per i veicoli vuoti: $x_{\sigma i}^* > 0 \Rightarrow x_{i\sigma}^* = 0 \forall i$, ovvero se ci sono veicoli vuoti in entrata in una stazione, non ci sarà alcun veicolo in uscita dalla stessa.

Ci sono allora due possibilità: se $x_{jh}^* = 0 \forall h \neq j$, allora $p_{jh} = 0 \forall h \neq j$ e $p_{jj} = 1$, cioè nessun veicolo vuoto si sposta in rete; se invece esiste una coppia di stazioni per cui $x_{\sigma h}^* > 0$, allora come detto $x_{h\sigma}^* = 0$ e dunque il veicolo vuoto compie un solo spostamento che ha in h la destinazione ultima. Ciò a dimostrare che per tutti i veicoli vuoti il numero massimo di spostamenti in rete è uno.

Si osserva qui che nel caso in cui fossero presenti nel sistema stazioni a domanda nulla queste dovrebbero essere escluse dal modello: non c'è alcun interesse a trasferire veicoli vuoti in stazioni nei quali rimarrebbero inutilizzati. Ciò deriva anche da un'osservazione di carattere matematico. Si è infatti espressa la probabilità $p_{jh} = \frac{x_{jh}^*}{(d_{j\sigma} + x_{j\sigma}^*)}$, e l'equazione perde di significato se si annulla il denominatore, cioè se $d_{j\sigma} + x_{j\sigma}^* = 0$. Dal momento che $d_{j\sigma}$ e $x_{j\sigma}^*$ non possono assumere valori negativi, l'equazione precedente implica $d_{j\sigma} = x_{j\sigma}^* = 0$, ovvero impone che non ci siano veicoli uscenti dalla stazione j , un modo equivalente per affermare che j è stazione a domanda nulla. Si è così dimostrato che stazioni di questo genere devono essere escluse dal modello.

Si vuole ora finalmente valutare il tempo di servizio, cioè il tempo necessario a soddisfare una richiesta. Esso è indicato con

$$\tau = t_{IJ} + t_{JH}$$

Essendo questa una variabile aleatoria, è più corretto ricercarne il valore atteso:

$$E[\tau] = E[t_{IJ}] + E[t_{JH}]$$

Gli addendi della precedente si possono ricavare nel modo seguente:

- tempo di movimento atteso del veicolo occupato $E[t_{IJ}] = \sum_{i \in S} \sum_{j \in S} t_{i,j} \Pr(I = i, J = j) = \sum_{i,j \in S} t_{i,j} d_{i,j} d_{\sigma\sigma}$,
- tempo di movimento atteso del veicolo vuoto (dopo alcuni passaggi) $E[t_{JH}] = \frac{\sum_{j,h \in S} t_{j,h} x_{jh}^*}{d_{\sigma\sigma}}$.

Ne discende il tempo di servizio totale in valore atteso $E[\tau] = \frac{\sum_{i,j \in S} t_{i,j} (d_{i,j} + x_{jh}^*)}{d_{\sigma\sigma}} = \frac{n_k^*}{d_{\sigma\sigma}}$.

Nella teoria delle code M/G/s l'intensità di domanda è $\rho^{M/G/s} = \frac{\lambda}{\mu s}$, con μ che indica la media del tasso di servizio per server pari a $1/E[\tau]$ e $\lambda = d_{\sigma\sigma}$ il tasso medio di arrivo dei passeggeri, mentre $s = n_k$ indica il numero di server, ovvero di veicoli della flotta. Quindi in questo caso $\rho^{M/G/s} = \frac{\lambda}{\mu s} = \frac{d_{\sigma\sigma}}{(d_{\sigma\sigma}/n_k^*) n_k} = \frac{n_k^*}{n_k}$. Nel caso in cui fosse $\rho > 1$, significherebbe che gli arrivi sono più frequenti rispetto alla velocità con cui il sistema può soddisfare la domanda, e infatti i tempi di attesa hanno andamento divergente per $\rho \rightarrow 1$.

Quanto esposto riguardo alla teoria delle code applicato al sistema di PRT è valido qualora nel sistema vi sia una sola stazione origine degli spostamenti, nell'ipotesi in cui non ci siano veicoli inutilizzati alla stazione sbagliata: se è presente un veicolo vuoto ad una stazione diversa da quella origine dello spostamento infatti il modello attribuisce erroneamente un tempo d'attesa nullo a quello spostamento, mentre nella realtà l'utente è in attesa dell'arrivo del veicolo.

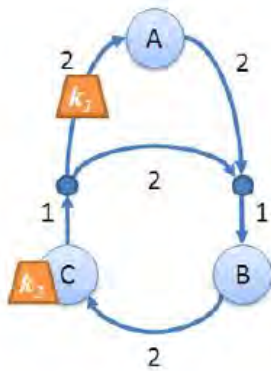
6.2.2 SNN

Un ulteriore modello, più attinente alla realtà, è il modello cosiddetto SNN, *Statistic Nearest Neighbours*, applicabile nel caso in cui la domanda futura sia nota a priori. Esso si propone come soluzione agli 'EVRP con l'obiettivo di assegnare i percorsi ai veicoli vuoti in modo che questi siano disponibili all'utenza nel più breve tempo possibile, evitando di rimanere inutilizzati.

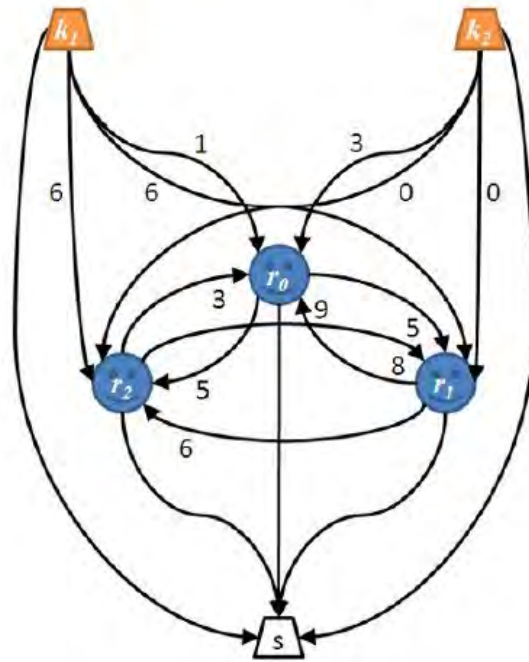
Il sistema anche in questo caso è rappresentato con un grafo. I nodi sono dati dall'unione di tre insiemi $K \cup R \cup \{s\}$, dove gli elementi di R sono i nodi-stazioni della rete reale, quelli di K i veicoli e gli s sono nodi speciali considerati la destinazione ultima del veicolo e non hanno una connotazione fisica. Un veicolo nel suo tragitto si sposta quindi dalla sua posizione K attraversando o meno nodi di tipo R fino al nodo s . Gli archi appartengono all'insieme $E = \{(u, v) : u \in K \cup R, v \in R \cup \{s\}, u \neq v\}$.

Un esempio è riportato in figura 56.

(a) The PRT network and initial vehicle positions.



(c) The resulting vehicle-request graph.



(b) The requests to be served.

r_0	A \rightarrow B at 0.0min (now)
r_1	C \rightarrow B at 0.3min
r_2	C \rightarrow A at 1.2min

Figura 56 un esempio di grafo.

Nell'immagine (a) è rappresentata la rete con i tempi di percorrenza tra le stazioni. I pesi d'arco indicati sono i tempi di percorrenza espressi in minuti. Sono presenti in rete due veicoli k_1 e k_2 ; k_1 arriverà alla stazione A in un minuto, e k_2 è inutilizzato alla stazione C.

L'immagine (b) fornisce un elenco completo delle domande ed include le indicazioni riguardo l'origine, la destinazione e l'istante in cui è formulata la richiesta.

La figura (c) sintetizza gli spostamenti in un grafo ed ha un nodo per ogni veicolo e uno per ogni domanda, oltre ad un nodo terminale s.. Supponiamo che il veicolo k_1 serva le domande r_0, r_1 e r_2 , nell'ordine. Innanzitutto concluderà lo spostamento che lo porta in A in 1 minuto, giungendo così nella stazione di origine dello spostamento r_0 . Il veicolo si sposterà quindi in B in 3 minuti, da dove si sposterà vuoto in C in 2 minuti; l'arco (r_0, r_1) avrà dunque peso $2+3=5$. Il procedimento si ripete in modo similare per r_2 , ed il veicolo terminerà la sua corsa in s.

(Lees-Miller 2013)

Il tempo impiegato per lo spostamento di un veicolo è indicato con $t(i, j) = t_{ij}$.

Assumendo che la prima richiesta compaia all'istante 0 e che inizialmente i veicoli siano vuoti e fermi alle stazioni o che al più stiano servendo passeggeri che hanno richiesto il servizio prima del momento in esame, ogni veicolo u che appartiene a K è disponibile ad una stazione j_u all'istante e_u .

I veicoli vuoti percorrono archi a ciascuno dei quali è associato un peso:

$$w_{uv} = \begin{cases} e_u + t(j_u, i_v) & \text{se } u \in K, v \in R \\ t(i_u, j_u) + t(j_u, i_v) & \text{se } u, v \in R, u \neq v \\ 0 & \text{se } u \in K \cup R, v = s \end{cases}$$

Per ogni arco poi è definita una variabile $x_{u,v} = \begin{cases} 1 & \text{se è presente un veicolo sull'arco} \\ 0 & \text{se non è presente alcun veicolo} \end{cases}$.

Infine, per ogni richiesta u è definito t_u l'istante in cui un veicolo accoglie la richiesta stessa ed è disponibile al nodo di origine della domanda. Dato che l'attesa dell'utente è pari a $(t_u - e_u)$, cioè all'intervallo che intercorre tra l'istante in cui la domanda viene espressa e quello in cui è effettivamente presente alla stazione un veicolo disponibile a soddisfarla, minimizzare l'attesa si riduce a minimizzare la somma dei t_u per tutte le domande, essendo e_u non modificabile.

In termini matematici è un problema di minimizzazione vincolato

$$\min \sum_{u \in R} t_u$$

soggetto ai vincoli seguenti:

- $\sum_{v:(u,v) \in E} x_{uv} = 1 \quad \forall u \in K \cup R$ e $\sum_{u:(u,v) \in E} x_{uv} = 1 \quad \forall v \in R$ (condizione che impone che per ogni richiesta ci sia un solo veicolo dedicato a servirla);
- $\sum_{u:(u,v) \in E} x_{uv} = n_k$ (tale condizione indica che il numero totale di veicoli in rete deve essere n_k);
- $x_{uv} = 1 \rightarrow t_u + w_{uv} \leq t_v \quad \forall (u, v) \in E, v \neq s$ (aggiornamento dei costi d'arco: se un veicolo serve la domanda u per poi servire la domanda v , il suo percorso è $i_u \rightarrow j_u \rightarrow i_v$);
- $e_u \leq t_u \quad \forall u \in R$ (l'istante in cui il veicolo è disponibile a soddisfare la domanda è sempre successivo o al più coincidente con quello in cui la domanda è formulata);
- $t_u \leq t_v \quad \forall (u, v) \in E_{FCFS}$ ($E_{FCFS} = \{(u, v): u \in R, v \in R, i_u = i_v, e_u < e_v\}$, cioè è assicurato un ordine di servizio di tipo *First Come First Served* nel caso in cui la stazione di origine i sia la stessa per più domande);
- $x_{uv} \in \{0,1\} \quad \forall (u, v) \in E$ (al più un veicolo sugli archi di tipo (u, v)).

Tale modello non fornisce risultati attendibili nel caso di flotte ampie ed è ancora oggetto di ricerca. Si ribadisce che, per poter essere applicato, esso prevede la conoscenza preventiva della domanda.

6.2.3 MDP

Il terzo modello descritto da Lees-Miller (2013) nel campo dell'EVR è il *Makrov Decision Process* (MDP). Si tratta di un procedimento che si pone come obiettivo la costruzione di una strategia decisionale, ovvero di una politica d'intervento sul sistema che ne massimizzi il beneficio globale definito in modo tale da far coincidere con la sua massimizzazione la minimizzazione dei tempi totali di attesa dei passeggeri. In altri termini si tratta, dato un sistema in condizione iniziale s , di stabilire quale azione a sia opportuno che il decisore compia per portare il sistema in un nuovo stato s' con una probabilità $Pr(s, a, s')$, di modo che risulti massimizzato $\sum R(s)$, somma dei benefici associati agli stati del sistema e si abbia di conseguenza un'ottimizzazione del flusso dei veicoli vuoti. Problemi di questo genere vengono risolti in programmazione dinamica (Puterman 2005).

Per inquadrare il sistema è necessario conoscere la matrice di domanda, la dimensione della flotta e la matrice dei tempi di percorrenza tra le stazioni. Si considerano sempre valide le ipotesi ed assunzioni semplificative esposte all'inizio del paragrafo relativo agli EVRP.

Un sistema è caratterizzato da due fattori: la successione delle domande alle stazioni e la posizione dei veicoli. Per quanto riguarda il primo, si considera qui solo la lunghezza della coda, supponendo che l'utente non riveli al sistema la propria destinazione fino al momento in cui non sia effettivamente presente alla stazione un veicolo disponibile a raccoglierlo. Si tratta di un'ipotesi pessimistica in quanto nella realtà la destinazione di ogni spostamento viene rivelata al sistema al momento in cui l'utente giunge in stazione. Riguardo al secondo fattore, si sottolinea che i veicoli sono supposti tra loro ancora una volta tutti equivalenti ed interscambiabili, risulta pertanto interessante conoscerne la destinazione ed il tempo che presumibilmente impiegheranno per raggiungerla e non importa conoscere la loro stazione d'origine: saranno così noti il numero dei veicoli e l'istante in cui essi raggiungeranno una certa stazione.

Per definire operativamente lo stato di un sistema, si rende necessario individuare degli intervalli temporali t ed assumere valori interi $t_{ij} \in \mathbb{N}$ per indicare i tempi di spostamento tra le varie stazioni. Lo stato s (vettore) di sistema risulta noto se si conoscono q_i e b_{ik} :

$$s \leftarrow \begin{cases} q_i = \text{numero di domande alla stazione } i - \text{esima} \\ b_{ik} = \text{numero di veicoli che distano un tempo } k \text{ dalla stazione } i - \text{esima,} \\ \quad (\text{con } k = 0, \dots, t_i^{\max} - 1; \\ t_i^{\max} = \max_j t_{ji} \text{ è la durata maggiore tra quelle dei percorsi che portano un veicolo in } i \\ b_{i0} = \text{numero di veicoli inutilizzati alla stazione } i \text{ o che ci arriveranno entro } t + 1; \\ \quad \sum_{i,k} b_{ik} = n_k) \end{cases}$$

Un esempio è riportato nella figura 57 che schematizza con questo criterio la rete PRT di Heathrow, che collega il terminal 5 (T5) al due stazioni nel business park (BPA e BPB).

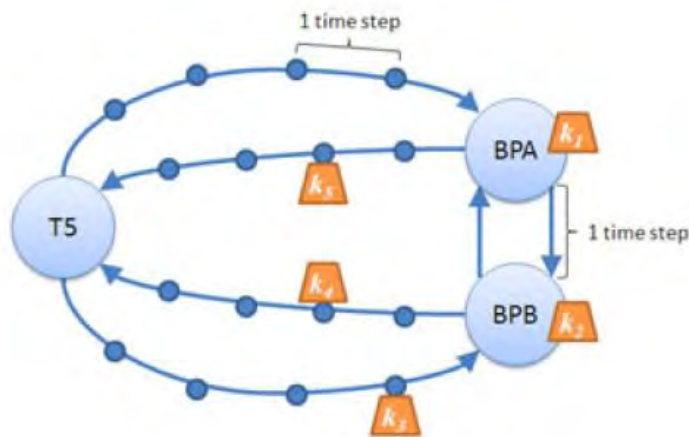


Figura 57 Esempio di rete (Lees-Miller 2013)

L'intervallo temporale nell'esempio è posto pari ad un minuto, tempo impiegato da un veicolo per spostarsi tra le stazioni BPA e BPB, ed i punti blu suddividono gli archi in rete in tratti percorsi in 1 minuto. Nel sistema $n_k = 5$, mentre i valori di b_{ik} sono riportati in tabella:

<i>i</i>	b_{i0}	b_{i1}	b_{i2}	b_{i3}	b_{i4}
BPA	1	0	0	0	0
BPB	1	1	0	0	0
T5	0	0	0	2	0

Tabella 12

I veicoli vuoti da spostare da una stazione i sono calcolabili come differenza tra b_{i0} , numero veicoli vuoti effettivamente presenti nella stazione in questione, e q_i numero di passeggeri che attendono un veicolo in i . Vengono cioè mossi in uscita da i i soli veicoli vuoti che non verranno utilizzati dall'utenza.

Se tuttavia $b_{i0} > q_i$, nessun veicolo vuoto lascerà la stazione. L'azione del decisore è dunque la seguente:

$$\bar{a}_i = \max\{0, b_{i0} - q_i\}$$

Le azioni sul sistema possono essere organizzate in una matrice $A = \{a_{ij}\}$ con elementi interi e non negativi. Tali azioni risultano valide se inferiori ad un valore massimo: la somma di ciascuna i -esima riga della matrice, escluso l'elemento diagonale, deve essere inferiore a \bar{a}_i ($\sum_{j \neq i} a_{ij} \leq \bar{a}_i$).

Si introduce a questo punto una variabile aleatoria N_i che indica il numero di domande che pervengono alla stazione i nel periodo $(t, t+1)$, rispettando la distribuzione di Poisson. Tra queste alcune verranno servite nell'intervallo stesso, altre eventualmente si sommeranno alla coda di richieste e verranno servite in intervalli successivi. L'autore sceglie di non limitare il valore di N_i , ma impone una semplificazione sulla lunghezza della coda: q_{max} ha un valore finito ed è il numero massimo di utenti in coda. Eventuali ulteriori richieste verranno rifiutate dal sistema.

Risulta perciò un numero massimo di richieste accettabili in i pari alla lunghezza massima di coda ammissibile meno la lunghezza di coda presente perché accumulata precedentemente, più il numero di utenze servite nell'intervallo: $\bar{N}_i = q_{max} - q_i + (b_{i0} - a_i)$.

Il numero di spostamenti serviti dal sistema nell'intervallo temporale, tra nuove domande e precedenti, è $V_i = \min\{q_i + N_i; b_{i0} - a_i\}$.

Una nuova variabile M_{ij} rappresenta le domande per ogni stazione i indicandone la destinazione j , e rappresenta il numero di richieste nell'intervallo temporale in oggetto. Tale variabile può essere organizzata in un vettore $M_i = (M_{i,1} \dots M_{i,ns})$ che suddivide le richieste rilevate in i sulle varie destinazioni. La probabilità che lo spostamento da i sia verso j è pari a $Pr = \frac{d_{ij}}{d_{i\sigma}}$.

Un nuovo stato s' del sistema, descritto utilizzando le variabili sopra riportate, è il seguente:

$$\mathbf{b}'_{ik} = \begin{cases} q'_i = q_i + N_i - V_i \\ \theta_{ik} + b_{i,k+1} + b_{ik} - \sum_j (M_{ij} + a_{ij}), k = 0 \\ \theta_{ik} + b_{i,k+1}, k = 1, \dots, t_i^{max} - 2 \\ \theta_{ik}, k = 1, \dots, t_i^{max} - 1 \end{cases}$$

con $\theta_{ik} = \sum_j [I(t_{ji} = k + 1)(M_{ji} + a_{ji})]$, in cui $I(t_{ji} = k + 1)$ assume valore 1 se la condizione tra parentesi è soddisfatta, altrimenti vale 0. Con questa equazione si indica il numero di veicoli che si spostano verso i e distano da questa stazione $k+1$.

Per determinare s' si devono allora conoscere le N_i , distribuite secondo M_{ij} per ogni i .

Infine il MDP rimanda ad un algoritmo che attraverso la massimizzazione di una funzione dipendente da $Pr(s, a, s')$ ricava le azioni da compiere sul sistema affinché la lunghezza delle code a tutte le stazioni risulti minima. Il procedimento è iterativo e conduce ad una soluzione ottimale.

Ulteriori considerazioni riguardo a questo modello sono riportate nella parte conclusiva del capitolo nella quale esso è raffrontato con gli altri approcci qui proposti.

6.2.4 SV (BWNN+SNN)

Un ultimo modello che si vuole trattare è il Sampling and Voting (SV) presentato da Lees-Miller (2013) ed analizzato nel dettaglio da Lees-Miller & Wilson (2011).

Si tratta di un approccio che risulta più aderente alla realtà rispetto ai precedenti in quanto considera che benché una matrice domanda di dati storici possa essere effettivamente conosciuta, questo non significa che la domanda reale sia nota a priori: la matrice storica può non rispecchiarne l'evoluzione reale. L'obiettivo è di inviare comunque i veicoli alle stazioni prima che la domanda sia esplicitata, nell'intento ancora una volta di abbattere i tempi di attesa degli utenti, ma dato che la domanda non è prevedibile con certezza vengono analizzati diversi scenari possibili. Il SV mette in chiara evidenza le peculiarità dell'EVR: problema stocastico, in quanto è nota solo una matrice di domanda *media*, e dinamico poiché le richieste giungono al sistema mentre esso è in funzione.

Le ipotesi di base sono ancora quelle di trascurare la congestione in linea ed in stazione illustrate in precedenza. Ad ogni veicolo si associa una successione di domande che devono essere soddisfatte. Tale lista viene continuamente aggiornata ed i parametri da associare al veicolo sono la stazione di destinazione dell'ultimo viaggio assegnatogli, $d[k]$, e l'istante di arrivo a destinazione $a[k]$.

Il SV fa uso di due diversi algoritmi: SNN, già visto in precedenza e che assume la domanda come nota e muove i veicoli preventivamente e BWNN (*Bell and Wong Nearest Neighbour*) Lees-Miller & Wilson (2011).

Quest'ultimo è un algoritmo dinamico che considera la domanda non nota a priori e dunque muove i veicoli vuoti solo in seguito all'esplicitazione di una richiesta. Una volta che il sistema rileva una domanda viene inviato alla stazione origine il veicolo k che dalla posizione $d[k]$ può raggiungerla nel minor tempo possibile.

Il procedimento è indicato in figura 58.

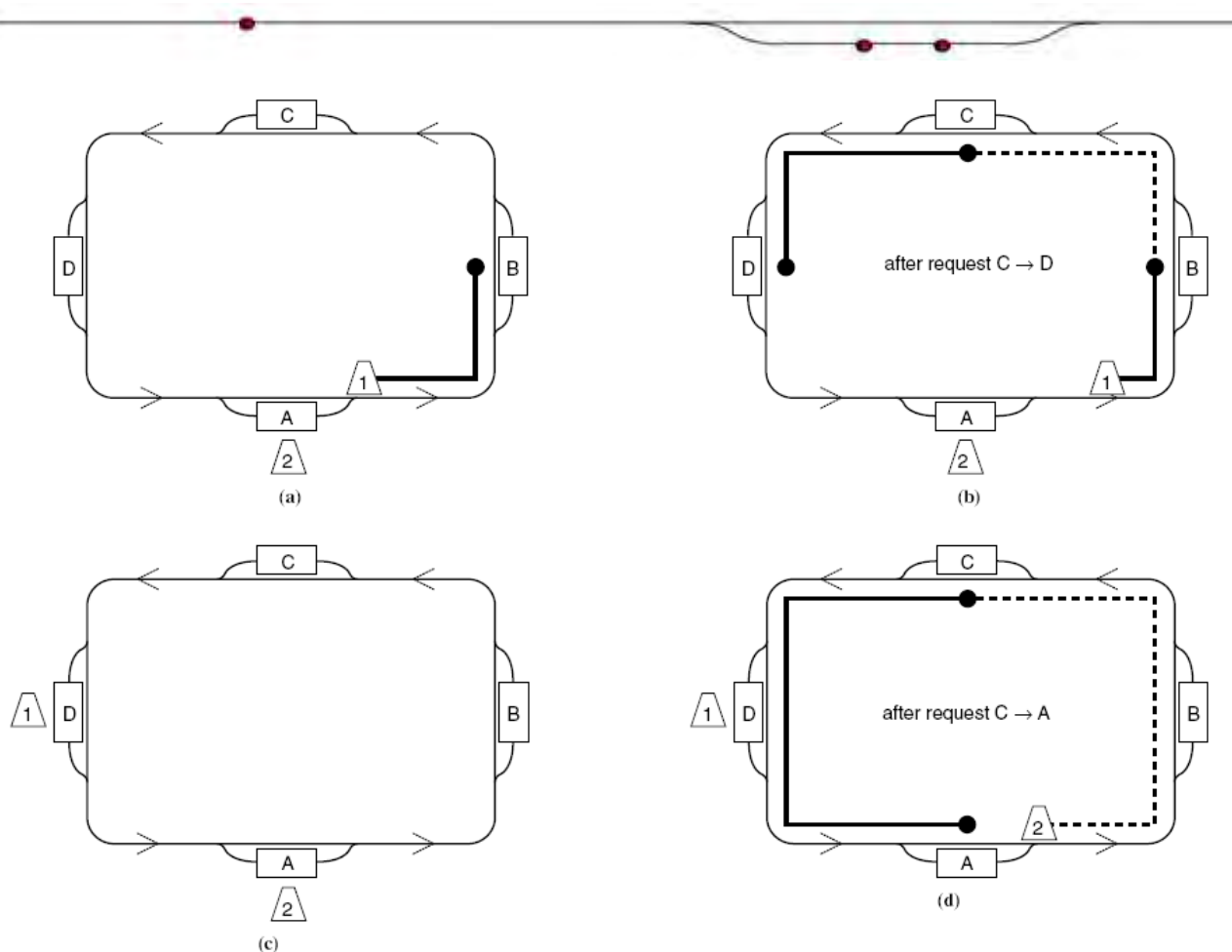


Figura 58 (Wilson e Lees-Miller 2011)

Nel circuito illustrato con quattro stazioni off-line (da A a D) sono presenti due veicoli (1 e 2) che circolano in senso antiorario.

(a): il veicolo 1 si sta spostando in B e il veicolo 2 è inattivo in A.

(b): perviene una richiesta di viaggio da C in D, alla quale è assegnato il veicolo 1 perché garantisce un tempo di attesa più breve rispetto al veicolo 2. La nuova richiesta viene inserita nella lista del veicolo 1 e richiede uno spostamento a vuoto del veicolo (linea tratteggiata) da B a C, oltre allo spostamento effettivo (linea continua) da C a D. Il veicolo 1, che transita dunque per B e C (cerchi pieni) non è considerato inattivo perché non ha terminato la sua lista di richieste.

(c): il veicolo 1 è inattivo in D perché non ha ulteriori richieste.

(d): al veicolo 2 è assegnata una richiesta da C ad A: si sposta vuoto verso C.]

[Nota: il veicolo 2 era inutilizzato in A e avrebbe potuto portarsi in C in un momento precedente. Ciò avrebbe ridotto i tempi di attesa dei passeggeri]

In modo differente, SNN non invia un veicolo solo al manifestarsi della domanda, ma dato che con le ipotesi fatte è possibile inviare veicoli in anticipo rispetto alla domanda, un *pod* può iniziare la sua corsa a tempo $t=a[k]$ benché la domanda sia formulata a $t>a[k]$ (vedi Nota alla figura 58): in questo senso BWNN si differenzia dallo SNN. In entrambi gli algoritmi si indica come procedere nel caso in cui più di un veicolo soddisfi le condizioni indicate per fare in modo che sia un unico veicolo a spostarsi per rispondere ad una sola domanda.

Il SV si basa su entrambi gli algoritmi descritti: applica il BWNN per scegliere quale veicolo associare ad ogni domanda, ma utilizza lo SNN per spostare i veicoli anticipatamente. Per stabilire se e dove portare un veicolo vuoto il SV genera, a partire dalla matrice di domanda storica, n_z serie di sequenze

possibili di future domande n_r . Ognuna delle n_z sequenze definisce, insieme alla situazione iniziale del sistema, un problema di EVR statico che viene risolto con lo SNN. Si vengono così a creare n_z soluzioni ciascuna delle quali è costituita da una successione di n_r movimenti di veicoli vuoti ed è differente dalle altre in quanto diverse sono le sequenze di domande cui rispondono. Per stabilire finalmente quali veicoli muovere effettivamente e come farlo si usa un sistema a voti (sa cui il nome *Sampling and Voting*) secondo il quale sarà opportuno spostare quei veicoli che all'interno delle n_z soluzioni vengono più frequentemente mossi. In altri termini per ogni stazione i ciascuna soluzione attribuisce un voto alla possibile destinazione di un veicolo che si trova inutilizzato in essa, considerando anche la stessa i come possibile destinazione. Nel momento in cui la maggioranza di voti sia attribuita ad una stazione destinazione j diversa da i , un veicolo è inviato da i in j .

In definitiva restano definiti i viaggi a vuoto p , con $p \in \{1, \dots, n_r\}$, identificati dalla terna (i_p, j_p, k_p) , con $i_p, j_p \in S$ e $k_p \in K$, e per ogni stazione i i veicoli preposti allo spostamento sono $k_i = \{k \in K: d[k] = i \text{ e } a[k] \leq t\}$.

6.2.5 Un confronto tra i metodi di EVR

Descritti più o meno approfonditamente i quattro modelli, così come sono presentati da *Lees-Miller* (2013) e dallo stesso autore con *E. Wilson* (2011), si riportano alcuni confronti tra di essi ottenuti applicandoli ad una rete reale. La rete in questione è quella già precedentemente citata dell'aeroporto londinese di Heathrow che, seppur nella sua semplicità, evidenzia l'importanza di valutare bene quali veicoli spostare verso il terminal per evitare inutili perdite di tempo: se è richiesto un veicolo in T5 è necessario scegliere se inviarlo da A o B. La scelta sbagliata comporterà un'attesa di un minuto all'utenza che necessita di un veicolo al parcheggio e che dovrà attenderne l'arrivo dall'altro estremo dello stesso.

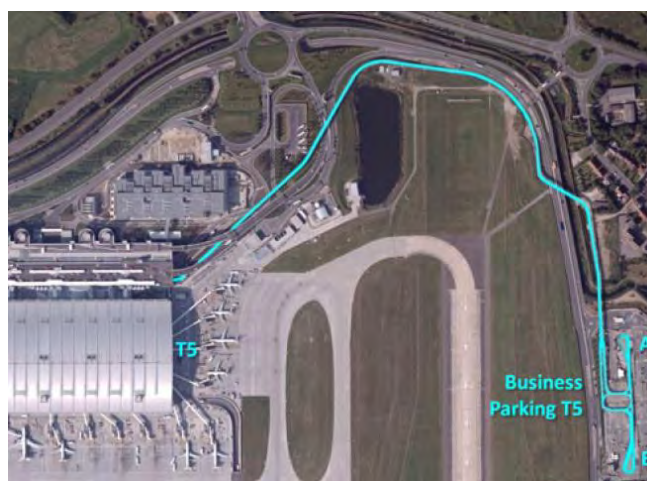


Figura 59 Struttura della rete PRT di Heathrow (Lees-Miller 2013)

Un primo confronto è basato su di una comparazione in termini di tempi medi d'attesa dell'utenza, al variare della dimensione n_k della flotta e dell'intensità della domanda.

La rete è di dimensioni limitate e perciò ben si presta all'analisi del MDP, il quale è risolvibile con la programmazione dinamica, ma solo appunto per reti limitate. Le principali ipotesi nel condurre il confronto sono relative proprio a questo modello: si è assunto un q_{max} per troncare la lunghezza della coda, si sono arrotondati i tempi necessari all'arrivo di un veicolo in stazione all'intero dell'intervallo temporale più vicino e nel caso in cui ad una stazione i la lunghezza della coda superasse la massima lunghezza imposta si impone di annullare la riga i -esima della matrice A (non viene cioè in questo caso spostato alcun veicolo in uscita da i), dal momento che il modello non produrrebbe più una soluzione realistica perché considererebbe veicoli disponibili allo spostamento anche quelli che però sono utili, se lasciati in i , a soddisfare le domande in esubero. Per il SV si sono assunti i seguenti valori: $n_r = 50$ e $n_z = 10$.

I grafici riportati (figura 60) mostrano come variano i tempi d'attesa medi dell'utenza applicando i quattro modelli ed al variare della dimensione della flotta da 1 a 3 veicoli, oltre che per diverse intensità di domanda. Quest'ultima in tutti i casi è dalle stazioni BP al terminal T5 e varia di intensità oltre che per distribuzione tra le due origini A e B.

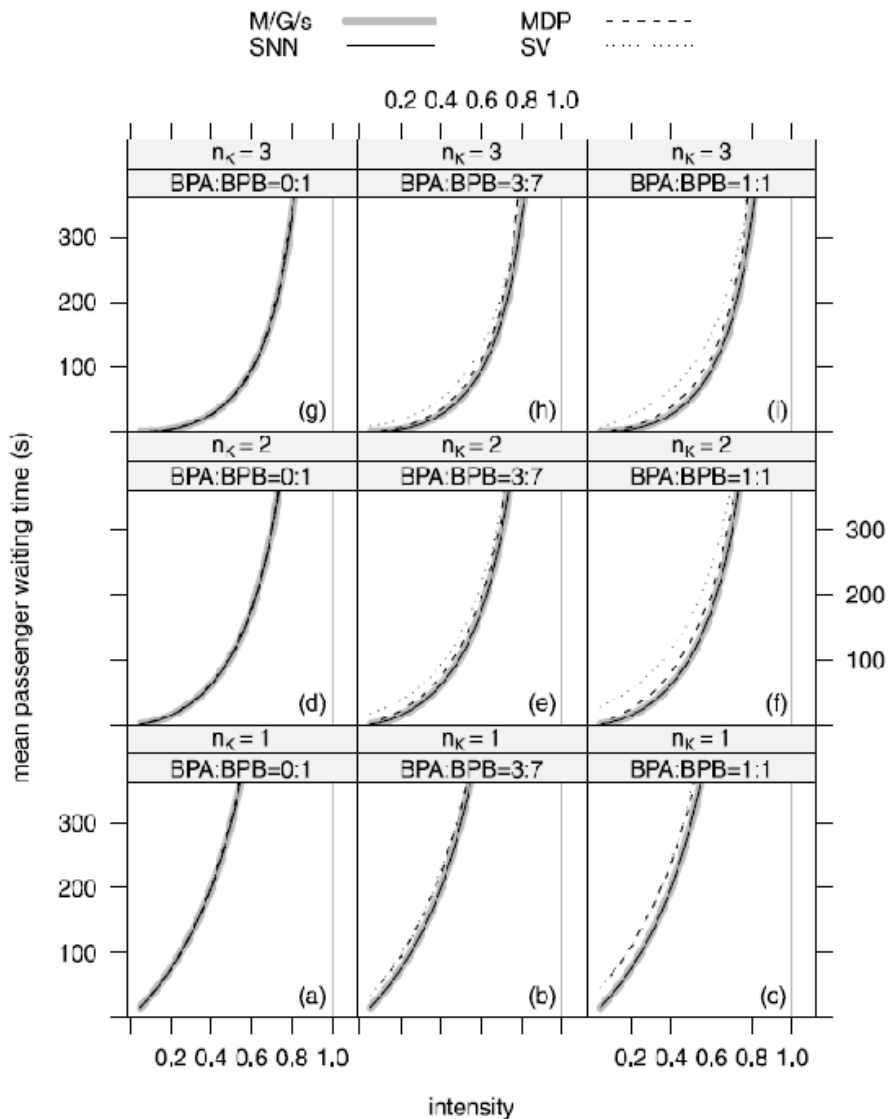


Figura 60 Tempi medi d'attesa dei passeggeri in diverse situazioni di domanda per i quattro modelli (Lees-Miller 2013)

Nei grafici (a), (d) e (g) l'origine per tutte le domande è la stazione B e la strategia ottimale è intuitivamente quella di rimandare i veicoli vuoti dal terminal verso B. In tutti e tre i casi i tempi medi d'attesa per i quattro modelli sono coincidenti.

Nei grafici (c), (f) e (i) invece la domanda è equamente ripartita tra A e B. Si osserva che i metodi M/G/s e SNN forniscono gli stessi risultati, mentre MDP e SV comportano tempi d'attesa maggiori. Questo perché si deve ricordare che M/G/s e SNN hanno come ipotesi la perfetta conoscenza dell'andamento della domanda, mentre in MDP ed SV questa è ignota. Si veda ad esempio il caso di un solo veicolo. Se non è nota la matrice domanda, questo dal terminal sarà inviato arbitrariamente in A o in B e la scelta si rivelerà probabilisticamente corretta nel 50% dei casi. Nel restante 50% il veicolo si troverà nel parcheggio alla stazione errata e l'utente dovrà attenderlo per 60 secondi, il tempo necessario al *pod* per attraversare il business parking. Dunque il 50% dell'utenza avrà tempo d'attesa nullo e la restante metà di 1 minuto. Ne consegue che il tempo medio di attesa è 30 secondi, pari proprio allo scarto misurabile nel grafico (c) per intensità 0,1. In generale si può osservare anche che MDP produce tempi medi d'attesa inferiori rispetto a SV e il gap diminuisce all'aumentare della dimensione della flotta.

Il grafico successivo (figura 61) è invece finalizzato ad evidenziare come variano i tempi medi d'attesa incrementando la dimensione della flotta al variare dell'intensità di domanda e per distribuzioni differenti della stessa tra le stazioni A e B applicando MDP. Come si può osservare si verifica un rapido abbattimento dei tempi d'attesa se il numero dei veicoli aumenta. Quando i server, cioè i veicoli, tendono ad una quantità infinita l'attesa tende ad essere nulla per intensità inferiori ad 1.

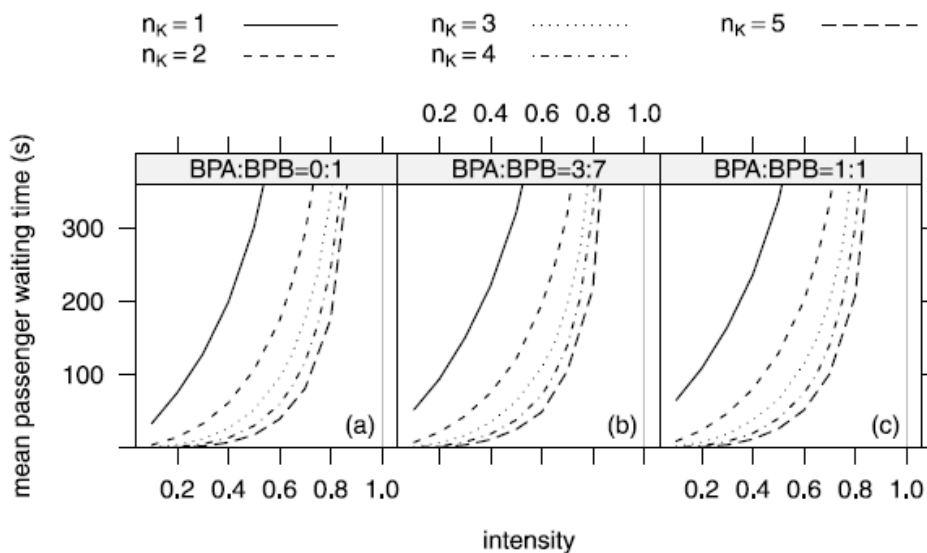


Figura 61 Tempi medi d'attesa dei passeggeri applicando il MDP al variare della dimensione della flotta (Lees-Miller 2013)

Un ultimo grafico in figura 62 riporta un confronto tra i modelli M/G/s e SV, con le stesse variabili dei precedenti, per una flotta con dimensione massima di 20 veicoli, non modellabile con MDP.

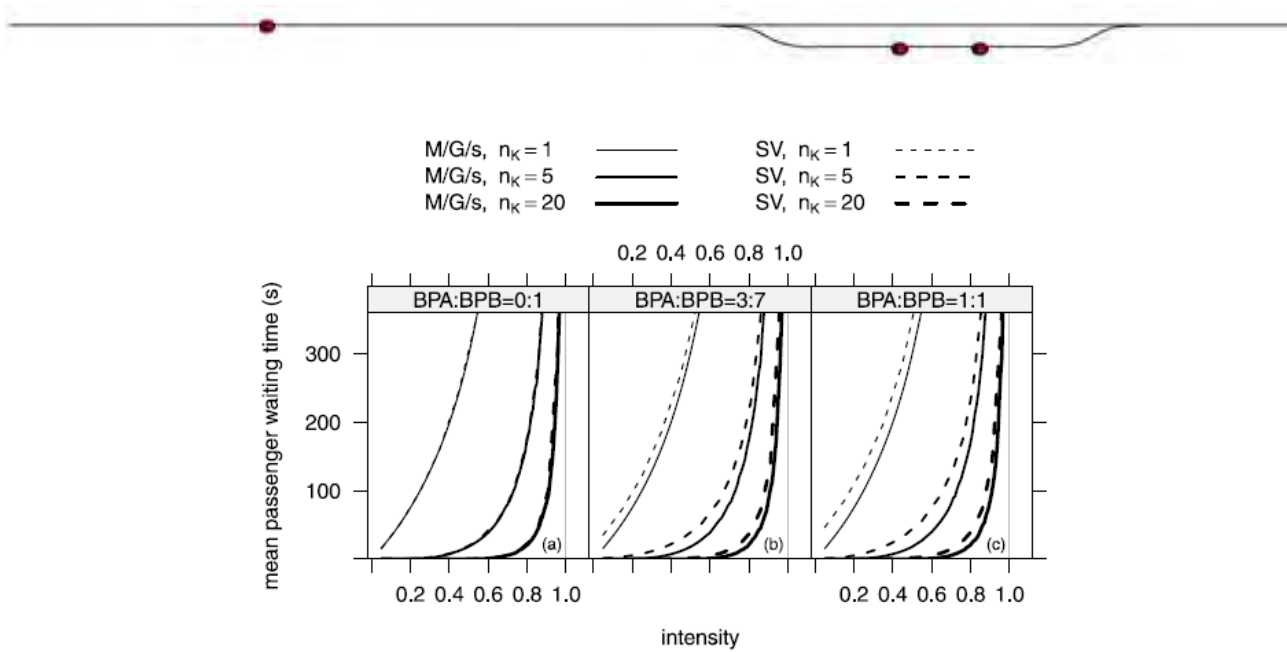


Figura 62 Confronto tra i tempi medi di attesa ottenuti con M/G/s e SV al variare della dimensione della flotta (Lees-Miller 2013)

Le osservazioni sugli ultimi grafici inducono l'autore a concludere che esista, all'interno di un'economia di scala, una dimensione di flotta tale da comportare sia tempi d'attesa accettabili che una spesa ottimale per il gestore del sistema.

A conclusione del presente capitolo si evidenzia ancora una volta che in nessun momento della trattazione si sono considerati i costi che il muovere veicoli vuoti in rete comporta, né si è fatto riferimento alla possibilità che i tempi di percorrenza possano essere variabili nel periodo in esame a seguito di fenomeni di congestione che sono stati qui esclusi a priori nelle semplificazioni iniziali. Perciò, i risultati ottenibili con i quattro modelli analizzati sono affetti da errori, ma sono comunque un valido elemento per migliorare i modelli stessi arricchendoli con elementi che li rendano più attinenti alla realtà di una rete di PRT.

7. PROGETTI REALIZZATI

Con questo capitolo ci si propone di illustrare in modo sintetico le caratteristiche delle tre reti di PRT attualmente in funzione a Morgantown (West Virginia-USA), Heathrow (Londra-GB) e Masdar City (Abu Dhabi). L'intento è di presentare i contesti nei quali i progetti si inseriscono, le loro peculiarità e le principali caratteristiche tecniche.

Si sono scelti proprio questi progetti per motivi diversi: la rete di Morgantown nel West Virginia è il più vecchio esempio di *Automated Transit Network* tuttora in funzione, ed anche se non si può propriamente dire che si tratti di un sistema di PRT, ha molte caratteristiche in comune con quest'ultimo; il sistema realizzato ad Abu Dhabi è all'avanguardia, più recente e presenta interessanti soluzioni tecnologiche oltre a rappresentare l'occasione per alcune riflessioni di tipo economico, urbanistico e sulla finalità del progetto; la rete di Heathrow è la più moderna, la sua costruzione si è appena conclusa ed è considerata la prima vera rete di PRT al mondo.

I progetti vengono esposti in ordine puramente cronologico.

7.1 Morgantown

Morgantown è una città della Virginia Occidentale di circa 30.000 abitanti (dato 2007, Wikipedia) ed è sede universitaria. Nel periodo dell'anno in cui la WVU è attiva al numero dei residenti si deve sommare quello degli studenti fuori sede (28.898 studenti nel 2009 (The city of Morgantown s.d.)) che sono ospitati nei campus dislocati per la città ed il totale degli abitanti è da considerarsi pressoché raddoppiato.

Gli spostamenti degli studenti tra i campus avvenivano fino agli anni Settanta con dei bus navetta che attraversavano il centro città e costituivano una buona componente di traffico in una cittadina di dimensioni contenute che non poteva sostenerlo. Per ovviare questa situazione, su iniziativa del Professor Samy Elias, rettore dell'università (J. E. Anderson, *Some Lessons from the History of Personal Rapid Transit (PRT)* 1996), si valutò la possibilità di realizzare un sistema di trasporto automatizzato dedicato agli studenti, dal momento che questa soluzione appariva meno costosa di un tradizionale sistema di trasporto su rotaia.

Con il consenso delle autorità cittadine e della delegazione locale del congresso, il rettore ottenne un finanziamento di \$50.000 per realizzare uno studio comparativo applicato al caso di Morgantown tra tre diversi sistemi di PRT, tra i quali quello più indicato per la città risultò essere il modello proposto da Alden (vedi capitolo 2).

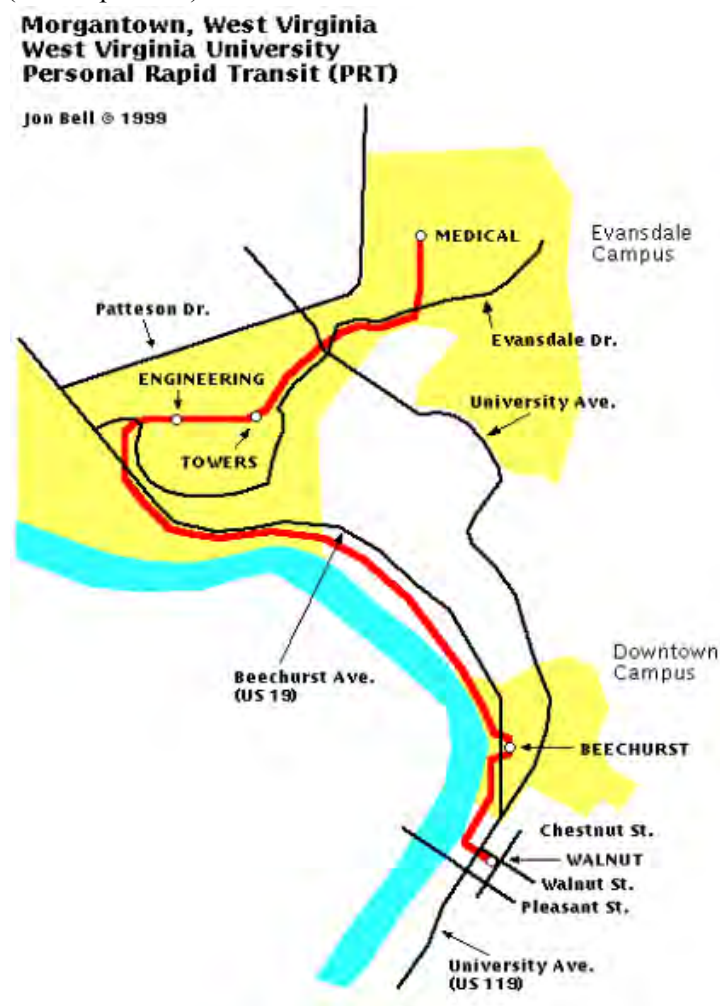


Figura 63 Mappa della rete
(Presbyterian College s.d.)

La città fece allora pressione sul ministero dei trasporti ed ottenne di poter essere la sede della realizzazione di una rete test, ricevendo i finanziamenti necessari per la costruzione del progetto: i lavori iniziarono nel 1970 e si conclusero a tempo record, anche per pressioni politiche, nel 1972. La rete è effettivamente funzionante dal 1975.

Il progetto è costituito da una rete che conta 5 stazioni le quali servono i principali poli universitari con la struttura mostrata in figura 63, si sviluppa per 13,2 km e può essere percorsa interamente in undici minuti e mezzo da Walnut Street Station Downtown a Health Sciences Station (West Virginia University s.d.). Sulla rete viaggiano 73 veicoli ciascuno dei quali può ospitare fino a 20 passeggeri, dei quali 8 seduti e 12 in piedi.

Ogni veicolo è dotato di motore elettrico, ruote gommate e di due ruote laterali che gli consentono di restare all'interno della rotaia. Tutte le ruote sono

sterzanti e su ogni veicolo è posizionato un computer che elabora i dati forniti da un tachimetro e da altre strumentazioni di bordo per inviare poi le informazioni ad un sistema centrale che coordina gli spostamenti in linea. Il peso a pieno carico di un veicolo è di 11.800 lb (J. E. Anderson 2007).

La rotaia è sopraelevata per il 65% del suo sviluppo ad un'altezza di circa sei metri da terra, realizzata in calcestruzzo con una forma a "U", dispone di un sistema di riscaldamento che ne consente l'utilizzo durante tutta la stagione invernale (progressiveengineer s.d.). L'alimentazione della linea è a corrente alternata trifase a 575 V (University of Washington s.d.).

La velocità media di percorrenza è di 14 miglia orarie (circa 22,5km/h) e i veicoli possono raggiungere una velocità di punta di 30 miglia orarie (48,3km/h) (wvu.edu). L'*headway* minimo consentito dal sistema è di 15 secondi (J. E. Anderson 2007).

Il sistema ha un funzionamento a richiesta nel periodo diurno ad alta domanda, per cui l'utente che giunge in stazione seleziona la propria destinazione da una tastiera e si porta al binario destinato al suo spostamento. Infatti le stazioni dispongono di più binari che servono le diverse destinazioni (progressiveengineer.com). In orario notturno o quando la domanda è debole il funzionamento è invece simile a quello di una normale linea di autobus o tram e i veicoli si muovono ad orari prestabiliti, fermandosi a tutte le fermate. Nei giorni in cui ci sono particolari manifestazioni sportive il servizio è disponibile per una fascia oraria di durata superiore.

Il sito dell'università del West Virginia fornisce gli orari in cui il sistema è funzionante ed avvisa gli studenti se la rete è fuori servizio. Esiste anche una app che fornisce informazioni sulla disponibilità del sistema. Per gli studenti è possibile accedere alle stazioni grazie alla tessera universitaria in modo gratuito, mentre il resto dell'utenza utilizza la rete pagando \$0,50 a corsa.




Figura 64 Veicolo ad una stazione
(fatherpitt.wordpress.com s.d.)

I dati forniti dalla West Virginia University indicano che la rete è utilizzata da 15.000 passeggeri al giorno nel periodo in cui l'università è aperta, che circa 83 milioni di passeggeri hanno viaggiato sul PRT di Morgantown dal 1975 ad oggi e che i suoi veicoli hanno percorso 22 milioni di miglia (35,2 milioni di chilometri circa).

L'*automatic transit network* di Morgantown non è da considerare un sistema PRT a tutti gli effetti: i veicoli sono molto grandi e non è garantito un servizio on demand continuativo. Tuttavia ha dato inizio alla storia del personal rapid transit. Esso è considerato più propriamente un *Group Rapid Transit system* (GRT) (University of Washington s.d.)

Essendo una rete che risale agli anni Settanta necessita di una modernizzazione tecnologica e di una ristrutturazione delle strutture. La WVU nel 2009 ha così elaborato un "*PRT Master Plan*" per la modernizzazione del sistema. È stata pianificata una serie di tre successivi interventi necessari per poter continuare a fare operare il sistema, dal momento che non era più sostenibile continuare ad utilizzare le



tecnologie ed i veicoli in uso e che, sebbene non vi siano mai stati incidenti, il livello di sicurezza della rete non era adeguato alle normative vigenti. Il piano di intervento consiste nella sistemazione di alcuni elementi e nella sostituzione di altri.

Una prima fase, già completata, ha portato alla sostituzione dei computer di bordo e dei sistemi di propulsione dei veicoli, con una spesa di 15 milioni di dollari (West Virginia University s.d.).

La fase successiva è attualmente in corso e ne è prevista la conclusione entro Agosto 2016. Si tratta della sostituzione del sistema di controllo automatico centralizzato, del sistema di controllo dei veicoli che utilizzerà un sistema di onde radio e di alcune stazioni e della ristrutturazione di alcuni tratti di linea, che comporterà un miglioramento nelle prestazioni del sistema secondo la WVU.

L'ultima fase, che verrà completata entro il 2018, prevede la sostituzione della flotta e un'analisi dell'infrastruttura per poter progettare le migliorie e gli interventi necessari, per un costo stimato totale di 43,3 milioni di dollari (West Virginia University s.d.).

Gli investimenti previsti sono di notevole portata e dimostrano che la struttura ed il principio del sistema restano validi anche a quarant'anni dalla costruzione. La città e l'università hanno nel PRT un motivo di vanto.

7.2 Masdar City, Abu Dhabi



Figura 65 Progetto di Masdar City (Foster+partners s.d.)

La città di Masdar in Abu Dhabi negli Emirati Arabi è stata progettata da Norman Foster e da architetti inglesi e si pone come obiettivo di limitare le emissioni al minimo per essere la prima città verde al mondo. Il progetto ha preso il via nel 2006 ed è in fase di attuazione. La città sarà alimentata dall'energia prodotta da centrali eoliche e fotovoltaiche. Il sistema dei trasporti non poteva rientrare nel progetto che infatti prevede solo mezzi ad emissioni zero. Tra questi c'è anche il PRT.

La scelta di realizzare una città nella quale non potranno circolare auto tradizionali, consente di realizzare strade più strette che insieme alle mura della città permetteranno di escludere i venti caldi del deserto in favore di brezze più fresche che potranno attraversare le vie della città.

Sebbene il progetto iniziale contemplasse la possibilità di realizzare una rete di PRT su larga scala, ciò non è stato realizzato ed oggi è

presente solo un breve tratto di linea che porta gli studenti dal centro città all'istituto di ricerca scientifica realizzato in collaborazione con il MIT.

Il motivo di questo ridimensionamento è di tipo tecnico e economico: il progetto prevedeva una rete sotterranea completamente isolata dal traffico pedonale, ma i costi dell'opera si sono rivelati eccessivi e dopo aver realizzato un primo tratto pilota non si è proseguito nel completare l'opera.

Si vuole qui in ogni caso descrivere il progetto originale che appare interessante perché denota un rapporto strettissimo tra progettazione urbanistica e dei sistemi di trasporto in una città che è stata costruita e che continua a crescere nel deserto.

La difficoltà principale apparve quella di realizzare una rete di trasporto per una città che ancora non esiste, per una popolazione che ancora non risiede a Masdar, per un'utenza non definita con certezza. Per sviluppare il progetto è stato creato allora un team di architetti e progettisti del traffico i quali hanno pianificato il PRT realizzando sia l'analisi della domanda che il *routing* e studiando le connessioni con le altre forme di trasporto urbano (sistemica.net). Il team di progettisti ha cercato di integrare soluzioni di trasporto sostenibile con il progetto della città. Si è così pensato di evitare la congestione sulle linee dei mezzi di trasporto pubblico partendo da un concetto diverso di destinazione d'uso delle varie aree all'interno dei quasi sette chilometri quadrati su cui si sviluppa la città: in essa non vi sono quartieri residenziali o aree

prettamente commerciali né zone in cui si concentrino solo le attività lavorative. Lo sviluppo della città prevede aree a destinazione d'uso misto, di modo che sia possibile lavorare vicino a casa e dunque ridurre gli spostamenti, ma anche per poter realizzare stazioni che servano utenti che vi si recano per motivazioni diverse, in modo da distribuire la domanda (dall'intervista a Luca Guala, (Treehugger s.d.)).

Il sistema PRT è inserito all'interno di questo contesto perché garantisce un sistema ecologicamente sostenibile. Diversi motivi hanno indotto i tecnici a pensare a una rete di Personal Rapid Transit sotterranea: in questo modo i veicoli non entrano in conflitto con il traffico pedonale, rispetto ad una linea sopraelevata poi ha il vantaggio di non essere visibile dai primi piani dei palazzi. È nato così il progetto di una linea completamente sotterranea, che corre sotto le strade ad una profondità di 6 m e che collega la città all'aeroporto internazionale di Abu Dhabi a 20 km di distanza, oltre a garantire il collegamento tra i parcheggi esterni al perimetro urbano alle diverse aree della città.

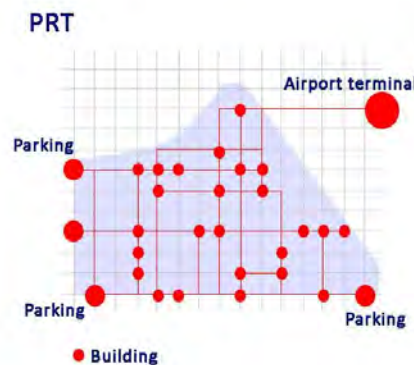


Figura 66 Schema della rete PRT progettata a Masdar. (Treehugger s.d.)



Figura 67 Progetto di Masdar City (Foster+partners s.d.)

Il sistema doveva essere complementare ai più tradizionali mezzi di trasporto come tram e metropolitana di superficie, garantendo un servizio a domanda continuativo per passeggeri e merci. Le stazioni sotterranee possono essere raggiunte con ascensori e scale ed il sistema è presentato dal progettista italiano L. Guala come una sorta di ascensore orizzontale che consente al passeggero di scegliere la propria destinazione una volta a bordo del veicolo o mentre è ancora in stazione, e di raggiungere la destinazione prescelta con tempi d'attesa di pochi minuti e tempi di viaggio che non superano i 10 minuti, dal momento che la rete non si sviluppa su una grande superficie e la distanza massima tra stazioni è di 2,5 km (Treehugger s.d.).

I veicoli previsti dal progetto, e poi effettivamente realizzati da 2getthere, sono su ruote gommate, dispongono di batterie al litio-ferro-fosfato ricaricabili in specifiche sezioni delle stazioni, garantiscono una percorrenza di 60 km dopo un periodo di carica di un'ora e mezza, possono ospitare da 4 a 6 passeggeri e si spostano tra le fermate alla velocità di 25 km/h.

La prima fase del progetto, la sola poi effettivamente realizzata, prevedeva due stazioni passeggeri e tre per il carico merci, collegate da 1,4 km di rete percorsa da 10 veicoli PRT e 3



**Figura 68 I veicoli PRT a Masdar
(Destination Green s.d.)**

FRT (Freight Rapid Transit) (2getthere.eu)

L'apertura al pubblico è avvenuta nel Novembre 2010 e nel Maggio di quest'anno è stato raggiunto il milione di passeggeri. Il sistema è attivo 18 ore al giorno, tra le 6.00 e le 24.00, sette giorni su sette.

Sebbene l'estensione del progetto sia contenuta, principalmente per motivi economici legati al costo di un'opera sotterranea che porta il costo di un chilometro di linea a 70 milioni di dollari, il caso

di Masdar dimostra come sia possibile far vivere una città, incluso il sistema dei trasporti, senza ricorrere al petrolio ed è esempio di architettura sostenibile in cui il PRT rientra a pieno titolo.

7.3 Heathrow Airport



Figura 69 Veicoli alla stazione (ULTra s.d.)

L'aeroporto di Heathrow è il principale aeroporto di Londra ed il primo in Europa per il traffico di passeggeri (72.367.054 passeggeri nel 2013, dato Wikipedia), secondo per numero di movimenti aerei solo a Francoforte e Parigi-Charles De Gaulle. (Wikipedia)

Heathrow Airport ha cinque terminal, l'ultimo dei quali è stato inaugurato sei anni fa e potrebbe gestire anche trenta milioni di passeggeri all'anno. È da qui che parte il primo sistema di Personal Rapid Transit realizzato nel mondo, se si escludono le reti dimostrative e temporanee.

Si è già accennato più volte in queste pagine alla struttura e al funzionamento della rete e si vuole ora approfondirne la storia e le caratteristiche.

La rete di PRT di Heathrow collega il terminal 5 al business parking con una linea di 3,8 km sulla quale si muovono 21 veicoli e che comprende tre stazioni, due al parcheggio ed una all'interno del terminal. Il sistema è stato realizzato dalla ULTra (Urban Light Transit) di Bristol; la costruzione della linea si è conclusa nel 2008, successivamente sono stati eseguiti dei test grazie alla collaborazione del personale dell'aeroporto e i lavori si sono conclusi nell'Ottobre 2010. La rete è aperta al pubblico dall'Aprile 2011.

Questo innovativo sistema di trasporto è andato progressivamente a sostituire il sistema di autobus che forniva lo stesso servizio dal terminal al parcheggio e rispetto al quale il PRT utilizza il 50% in meno di energia e produce circa la metà di CO_2 per passeggero al chilometro (*citymobil-project.eu*).

Il PRT opera 22 ore al giorno sette giorni a settimana; nel 2013 il sistema ha raggiunto la quota di 700.000 passeggeri e celebrato il primo milione di miglia, garantisce tempi di attesa minimi calcolati in media di circa dodici secondi ed il 95% dell'utenza attende il proprio veicolo per meno di un minuto (ULTra s.d.).

I veicoli sono dotati di una batteria elettrica ricaricabile nei punti attrezzati, possono raggiungere i 40 km/h e trasportano fino a quattro adulti e due bambini, valige comprese. Una curiosità è che viaggiano tenendo la destra. La guida sulla quale viaggiano è prevalentemente sopraelevata, ma comprende anche tratti a livello del terreno nel tratto in cui passa dietro alla pista nord.

Ad oggi non si sono verificati incidenti, e i costruttori dichiarano, sulla base delle statistiche relative all'anno 2012, che il sistema ha un'affidabilità superiore al 98% (98,7% secondo i dati raccolti all'interno del progetto europeo CityMobil, *citymobil-project.eu*)

Secondo il *master plan* aeroportuale elaborato nel 2013, entro il 2019 la linea dovrebbe essere ampliata comprendendo anche collegamenti tra i terminal 2 e 3 e i rispettivi parcheggi più distanti, tuttavia il progetto non è più stato inserito nel piano definitivo ed è stato posticipato in favore della realizzazione di interventi più urgenti.



Figura 70 Veicolo sulla guida (ULTra s.d.)

La casa costruttrice fornisce (ULTra s.d.) alcuni elementi tecnici sulle caratteristiche della linea e dei veicoli. La prima ha dimensioni ridotte che ne limitano l'impatto visivo: si tratta di superfici piane in calcestruzzo larghe 1,6 m affiancate da un bordo di 25 cm che permette di utilizzare un sistema per la navigazione ottica, detto *vision based detection system* (Peters, Ross-Martin e Achim 2009), che installato sul veicolo consente di identificare la direzione da mantenere per restare all'interno della guida. Questa ha una profondità di 45 cm e non contiene parti meccaniche o sistemi propulsivi ma solo un sistema di trasponder; è prefabbricata ed assemblata in situ.

I veicoli hanno un ingombro di 3,7x1,47x1,8 m, pesano a vuoto 850 kg, possono portare un carico di 450 kg al massimo, hanno un raggio di curvatura minimo di 5 m e possono affrontare salite con una pendenza limite del 20%. Nel caso in cui si renda necessaria una frenata di emergenza, la decelerazione massima consentita è di 3 m/s^2 . Ogni veicolo è dotato di quattro ruote gommate delle quali le anteriori sono sterzanti e sulle quali è montata una cassa in alluminio nella quale si trova la batteria ricaricabile automaticamente nei punti specifici disposti in rete. La struttura del veicolo è in acciaio e alluminio e sui due lati dello stesso ci sono altrettante porte automatiche. I *pod* sono equipaggiati inoltre con pannelli informativi, illuminazione interna che consente la lettura, dispositivi di riscaldamento, ventilazione e raffreddamento, telecamere di sicurezza a circuito chiuso, sistema antincendio e uscite di sicurezza manovrabili a veicolo fermo sia dall'interno che dall'esterno.

Le stazioni consentono a più veicoli di imbarcare passeggeri in contemporanea e sono presenti pannelli sui quali i passeggeri possono richiedere un veicolo indicando la propria destinazione.

Il costo del progetto si attesta tra i 7 e i 15 milioni di dollari al km secondo ULTra, comprensivo di tutte le tecnologie, dei veicoli e delle stazioni.

I vantaggi del sistema di PRT a Heathrow sono molteplici: un confort superiore e minori tempi di attesa per i passeggeri rispetto al servizio di autobus precedente e il dimezzamento delle emissioni nell'atmosfera spiccano tra gli altri.

Come già detto il progetto del PRT di Heathrow è parte integrante del progetto europeo CityMobil realizzato tra il 2006 ed il 2011. Il documento finale elaborato per sintetizzare gli esiti del progetto europeo riporta alcune considerazioni riguardo alla rete di PRT.

I tempi di viaggio in media sono di 24 secondi superiori rispetto a quanto previsto e questo ritardo è davvero minimo. Nella brochure si riflette anche sui tempi d'attesa e si indica il tempo medio in 19 secondi, specificando che il 70% circa dei passeggeri non aspetta affatto, il 94% di chi attende lo fa per meno di 1 minuto (citymobil-project.eu s.d.). La figura 68 riporta questi dati sui tempi d'attesa.

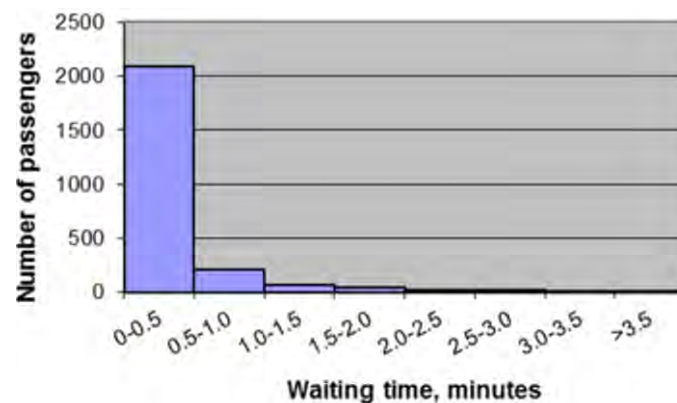


Figura 71 (citymobil-project.eu s.d.)

La brochure riporta inoltre i risultati di un sondaggio condotto per confrontare il sistema di autobus con il PRT che di fatto l'ha sostituito.

A più di 300 passeggeri nel Marzo 2009 è stato sottoposto un questionario nel quale si chiedeva di valutare alcuni parametri ed aspetti del servizio di bus navetta tra il terminal 5 ed il parcheggio. Questi interessavano tre principali argomenti: l'accessibilità, il veicolo e la qualità del servizio. Alcuni parametri sono: i tempi d'attesa e di viaggio, il comfort, l'aspetto dei mezzi, la facilità con cui è possibile individuare le fermate, il livello di informazione, la comodità per il trasporto dei bagagli. Nel Maggio 2009 lo stesso questionario è stato proposto ad utenti del nuovo sistema di PRT. Dal confronto tre le risposte schematicamente riportato in figura 69 emerge che il PRT è migliore in tutti gli ambiti indagati eccetto che nella facilità di individuarne fermata internamente al T5 e questo perché all'epoca del questionario non erano ancora stati posizionati i cartelli indicatori nel terminal.

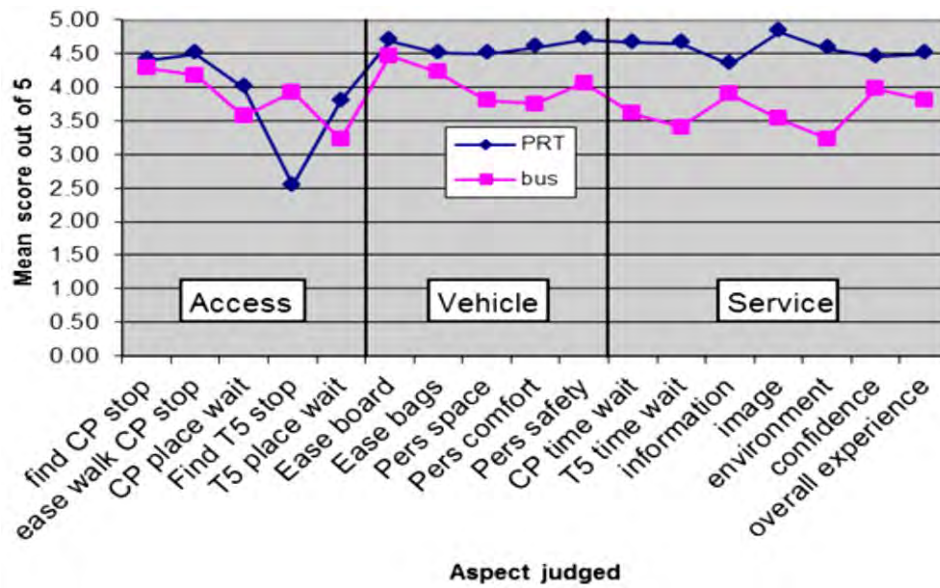


Figura 72 (citymobil-project.eu s.d.)

Gli esponenti del CityMobil Project ipotizzano la possibilità di portare i veicoli internamente all'aeroporto, azione che non necessiterebbe di grandi modifiche alle superfici dei pavimenti.

Infine, nella Final Brochure si osserva che in ogni caso la rete dell'aeroporto con le sue tre stazioni e i 3,8 km di sviluppo ha dimensioni troppo limitate per permettere valutazioni sull'effettiva convenienza del Personal Rapid Transit a livello generale.



8. CONCLUSIONE

Il Personal Rapid Transit è una risorsa importante nel panorama dei sistemi di trasporto alternativi, ma è ancora poco conosciuto e poco diffuso. Il suo principale punto di forza sta nel rispondere in maniera convincente a numerose esigenze nel settore, sia dal punto di vista della compatibilità ambientale che per il servizio offerto.


Il PRT privilegia gli spostamenti origine-destinazione senza soste intermedie; consente di effettuare trasferimenti in tempi rapidi, svincolati dalla congestione del traffico su strada e comunque senza ritardi imprevisti, annullando o quasi i tempi d'attesa alle stazioni grazie ad un servizio "a richiesta"; offre un elevato comfort di viaggio; associa ai vantaggi di un mezzo pubblico le comodità di un'autovettura. Inoltre, è non inquinante e poco rumoroso. Questo sistema completamente automatizzato è pensato per alleggerire le strade dal traffico privato trasferendo gli automobilisti non solo sui *pod*, ma anche sui tradizionali sistemi di trasporto pubblico collettivo con i quali il PRT crea un'unica rete urbana che si impone come valida alternativa all'automobile. Quanto ai costi, i dati raccolti dalle limitate applicazioni nel mondo sembrano porre il PRT sullo stesso piano di tram e reti di BRT. Tuttavia, proprio per la scarsità di progetti realizzati è complicato stimare a quanto ammonterebbe l'investimento necessario per realizzare una rete completa che serva un'intera città.

D'altra parte si devono considerare alcune limitazioni di vario genere allo sviluppo su larga scala di reti di trasporto automatizzato innovative come il PRT. La più evidente tra queste difficoltà è l'impatto visivo, elemento non eliminabile che relega queste reti ad applicazioni in ambienti nei quali possano inserirsi senza stonare nel contesto: sarà molto difficile vedere un *pod* correre tra le mura di una cittadella di origine medievale o nei centri storici delle città europee. Più fattibile appare invece l'inserimento in ambienti di nuova costruzione, in città moderne o con spiccata vocazione alla modernità. L'ambito di realizzazione è soggetto anche a una verifica dell'entità della domanda: il PRT è studiato per aree a medio-bassa densità abitativa e non può sostituire la maggiore capacità offerta ad esempio dalla metropolitana pesante.

Un altro ostacolo alla diffusione è dato dalla scarsa conoscenza che hanno i progettisti del traffico e gli urbanisti riguardo al sistema PRT. È necessario quindi incrementare la mole di letteratura disponibile sull'argomento e coinvolgere i soggetti che hanno potere decisionale negli ambiti locali in iniziative volte alla diffusione della cultura dei nuovi sistemi di trasporto se si cerca l'affermazione degli stessi.

Di altro genere sono le opposizioni dei commercianti che vedono nel traffico sopraelevato la causa della probabile svalutazione dei negozi a livello stradale e che hanno una forte influenza sulle decisioni finali, come nel caso del progetto di rete su vasta scala proposto ad Amristar in India nel 2011 che si presentava come la più vasta rete PRT al mondo e che attraversa ora una fase di stallo e probabilmente di completo abbandono proprio per motivazioni legate all'economia locale.

Ci sono altre motivazioni economiche a impedire una semplice e rapida diffusione del sistema di trasporto oggetto di questa tesi: i costi da sostenere nell'investimento iniziale, seppur in linea con altre soluzioni di trasporto urbano, rappresentano comunque un investimento dal futuro incerto e legato a un



parametro molto imprevedibile come la domanda di trasporto dell'utenza. A ciò si aggiunge l'inesistenza di reti complete di grandi dimensioni che rappresentino una garanzia di successo. Ci si affida perciò alle iniziative dei privati in contesti limitati ad aree aeroportuali come ad Heathrow o in campus universitari. Vero è che in un periodo di crisi economica globale non è semplice proporre investimenti che hanno ancora elevati margini di incertezza, ma l'investimento di cui parliamo è sul futuro e, le seppur numericamente e spazialmente limitate esperienze di realizzazione, ne dimostrano la concreta fattibilità tecnico-economica.

Inoltre, la ricerca nel campo delle tecnologie, dai motori elettrici ai sistemi di controllo, dai modelli di routing all'ottimizzazione delle dimensioni di rete, ha raggiunto un livello tale da costituire una buona base per sviluppi in grande scala. Fondamentale per un'efficienza del sistema appaiono l'utilizzo di approcci adattivi per l'assegnazione dei percorsi in rete ai veicoli e un'attenzione particolare a quelle che in questo lavoro sono chiamate strategie di gestione della domanda che consentono un'adeguata applicazione dei modelli di EVR, i quali comportano il movimento dei soli veicoli vuoti strettamente necessari.

Più reti saranno realizzate, più semplice sarà valutare la bontà del sistema e gli aspetti sui quali è necessario investire in ricerca.

Alcuni di questi aspetti sono già stati indicati dagli autori qui citati. Si tratta ad esempio di rendere i progetti delle guide modulari e universali per essere prodotti in serie, abbattendo così i costi di costruzione e permettendo a veicoli di diverse aziende produttrici di proporsi come mezzi per circolare su di esse, o di utilizzare funzioni di ottimizzazione che considerino tutti i fattori in gioco, non solo i costi economici ma anche i costi temporali. Si propone ancora di utilizzare strategie di *routing* che nell'assegnare i percorsi ai veicoli che trasportano passeggeri considerino la presenza in rete dei veicoli vuoti e viceversa, di elaborare procedure per i test sulla sicurezza e sull'affidabilità che possano essere condivise dai committenti dei progetti, e di adattare gli algoritmi alle singole situazioni, con la possibilità di personalizzare la flotta dei veicoli a disposizione che potrebbero non possedere tutti le stesse caratteristiche. Possono inoltre essere inseriti diversi punti per la carica delle batterie di bordo, o ancora introdotti nodi ulteriori rispetto a quelli rappresentativi delle stazioni nella fase di progettazione della rete. Si può considerare anche l'opportunità di far uso di differenti funzioni obiettivo rispetto alla minimizzazione dei tempi medi d'attesa, imponendo ad esempio limitazioni al tempo massimo d'attesa. Inoltre può essere approfondita la modalità di gestione degli abbonamenti e delle tariffe che possono essere imposte al singolo passeggero o al veicolo, incentivando o meno la condivisione del mezzo. Si è poi fatto cenno in queste pagine alla possibilità e all'opportunità di incrementare la capacità di linea accoppiando i veicoli per poi separarli al momento opportuno: anche quest'aspetto potrebbe essere ulteriormente approfondito.

In conclusione, rispetto al sistema PRT sono state sviluppate conoscenze ed esperienze preliminari che consentono di investire nella sua realizzazione, come dimostrano i casi di Heathrow e Masdar, e se questo dovesse accadere ci sarà la possibilità di approfondire e migliorare quanto realizzato. Sulle difficoltà citate che ne rallentano la diffusione dovrebbero decisamente prevalere i vantaggi che questo sistema comporta sia all'utenza che alla collettività. Scenari in cui sarebbe possibile introdurre oggi il PRT sono ad esempio gli aeroporti ed in particolare quelli di nuova costruzione, con la possibilità come ipotizzato per



l'aeroporto londinese, di far correre i veicoli anche all'interno dei terminal, il che non comporterebbe grandi interventi ma solo il posizionare magneti sotto il pavimento e l'isolamento della via di corsa per motivi di sicurezza. I porti e i collegamenti tra punti nodali di diverse forme di trasporto, siano essi stazioni ferroviarie o piazzali degli autobus, ben si presterebbero alla realizzazione del PRT. Infine, questo potrebbe essere realisticamente adottato come mezzo di trasporto in ambiti urbani vocati all'innovazione tecnologica, senza dimenticare la variante dei FRT per il trasporto di piccoli quantitativi di merci.



Bibliografia

2getthere. 2getthere.eu.

Anderson, J. E. «Control of Personal Rapid Transit Systems.» *Journal of Advanced Transportation* 32, n. 1 (2010): 57-74.

—. «Evolution of Personal Rapid Transit.» 2009.

Anderson, J. E. *How to design a Guideway*. faculty.washington.edu/jbs/itrans/prt-guideway-design.pdf, Reston, Virginia: American society of civil engineers publications, 2009.

Anderson, J. E. *Personal Rapid Transit: matching Capacity to Demand*. ATRA Information Paper 1998, ATRA Advanced Transit Association, 1998.

Anderson, J. E. «Some Lessons from the History of Personal Rapid Transit.» washington.edu/jbs/itrans/history.htm, 1996.

Anderson, J. Edward. «High Capacity Personal Rapid Transit: Rationale, Attributes, Status, Economics, Benefits.» January 2007.

Andréasson, Ingmar J. «Personal Rapid Transit as Feeder–Distributor to Rail.» *Transportation Research Record* 2275, n. 2 (2012): 88-93.

Buchnan, M., J. E. Anderson, G. Tegnér, L. Fabian, e J. Schweizer. «Emerging Personal Rapid Transit Introduction, State of the Art, Applications.» *Proceedings of the AATS conference*. Bologna, Italy, 2005.

Cerulli Prof. – Dott.ssa Gentili. Lezioni di Ricerca Operativa Corso di Laurea in Informatica ed Informatica Applicata, Università di Salerno. «Lezione n° 19: 18-19 Problema del Trasporto: algoritmo risolutivo Anno accademico 2008/2009 .» dmi.unisa.it. Maggio 2009.

Chebbi, Olfa, e Jouhaina Chaouachi. «An elitist multi-objective genetic algorithm for minimizing vehicle numbers and energy consumption in the context of Personal Rapid Transit.» *International Conference on Advanced Logistics and Transport (ICALT)*. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2014. 270-274.

citymobil-project.eu.

Destination Green. site.destinationgreen.com/the-worlds-newest-greenest-city-can-it-work/.

Father Pitt. fatherpitt.wordpress.com/2013/02/08/a-ride-on-the-prt-in-morgantown/.

fatherpitt.wordpress.com.

Foster+partners. fosterandpartners.com.

Gasparini, Luca. «JPods: it costs less to move less.» jPods.com. 2005.

Gerland, Horst, e Hermann Zemlin. «Development Status of automated guideway transit (ACT) systems in Europe and Japan.» *30th vehicular technology conference, 1980*. IEEE, 1980. 448-456.

Gustafsson, Jo`rgen. «Vectus-Intelligent Transport.» *Proceedings of the IEEE (IEEE)* 97, n. 11 (2009): 1856-1863.

Hwang, Jong-Gyu, Baek-Hyun Kim, Seok-Won Kang, e Rak-Gyo Jeong. «Operation Scenario on Passenger Car Calling for Personal Rapid Transit.» *2013 International Conference on Electrical Machines and Systems, Oct. 26-29, 2013*. Busan, Korea: IEEE, 2013. 1380-1382.

iuav. iuav.it.

Jones, W.D. «Made-to-Measure Mass Transit.» *IEEE Spectrum* 44, n. 6 (2007): 14-16.

Juster, Reuben, e Paul Schonfeld. «Comparative Analysis of Personal Rapid Transit as an Urban Transportation Mode.» *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* (Transportation Research Board of the National Academies) 2350, n. 1 (2013): 128-135.

Karray, Fakhreddine, e Jin-Myung Won. «A Genetic Algorithm with Cycle Representation and Contraction Digraph Model for Guideway Network Design of Personal Rapid Transit.» *Cogress on Evolutionary Computation 2007 (CEC 2007)*. IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2007. 2405-2412.

Lees-Miller, John D. *Minimising average passenger waiting time in personal rapid transit systems*. Annals of Operations Research, 2013.

Li, Hao, Yusen Chen, Jie-Henk Li, J. van Zuylen, e Bart van Arem. «Demand Modeling of Innovative Transport System PRT at the Rotterdam Port Area.» *2010 13th International IEEE Annual Conference on Intelligent Transportation Systems*. Madeira Island, Portugal, September 19-22, 2010: IEEE, 2010. 137-142.

MAcKinnon, D. «High Capacity Personal Rapid Transit System Developments.» *IEEE Transactions on vehicular Technology* (IEEE) 24, n. 1 (February 1975): 8-14.

personalrapidtransit.com.

Peters, Alan, Torquil Ross-Martin, e Alin Achim. «Vision-Based Detection of Personal Rapid Transit Guideway.» *Proceedings of 6th international symposium on image and signal processing and analysis 2009 (ISPA 2009)*. IEEE, 2009. 164-169.

Presbyterian College. web.presby.edu/~jtbell/transit/Morgantown/.

progressiveengineer. progressiveengineer.com.

PRT Consulting. prtconsulting.com.

Puterman, M. L. *Markov decision processes: discrete stochastic dynamic programming*. New York: Wiley-Interscience, 2005.

Quattroruote.

http://www.quattroruote.it/news/eco_news/2010/01/15/consumi_ed_emissioni_per_capirne_di_pi%C3%B9.html.

RailSystem.net. railsystem.net/prt.htm.

Schupach, K., e R. Zenklusen. «An adaptive routing approach for personal rapid transit.» *Mathematical Methods of Operations Research* 77, n. 3 (2013): 371-380.

Taxi2000 Corporation. *SkyWeb Express Feasibility Study Results Summary*. faculty.washington.edu/jbs/itrans/big/SWEfeasibilitystudy.pdf, 2007.

TAXI2000. taxi2000.com.

The city of Morgantown. *morgantownwv.gov*.

Treehugger. *treehugger.com*.

UK airports information blog. *airportsinformationblog.co.uk/heathrow-airport/heathrow-pod-transport-system-features-at-global-business-summit-on-infrastructure/*.

ULTra. «*ultraglobalprt.com*.»

University of Washington. *faculty.washington.edu/jbs/itrans/gavle.htm*.

—. *faculty.washington.edu/jbs/itrans/morg.htm*.

—. «*faculty.washington.edu/jbs/itrans/SWE%20marketing%20intro.pdf*.»

van Dijke, Jan P., e Margriet van Schijndel. «CityMobil, Advanced Transport for the Urban Environment.» *Intelligent transportation System and Vehicle Highway Automation* (Transportation Research Board of the National Academies) 2324 (2012): 29-36.

«Viability of Personal Rapid Transit in New Jersey (Final Report).» Presented to governor Jon S. Corzine and the New Jersey State Legislature. February 2007, 2007.

West Virginia University. *transportation.wvu.edu/prt*.

—. *transportation.wvu.edu/prt*.

wikipedia. *en.wikipedia.org/wiki/Personal_rapid_transit*.

—. *Floyd-Warshall Algorithm*.

—. *genetic algorithm*.

Wilson, R. Eddie, e John D. Lees-Miller. «Sampling of Redistribution of Empty Vehicles for Personal Rapid Transit.» *Transportation Research Board of the National Academies* 1, n. 2216 (2011): 174-181.

Won, Jin-Myung, e Fakhreddine Karray. «Personal Rapid Transit Network Design Using Genetic Algorithm and Ant Colony System Hybridization.» *International Conference on Control, Automation and Systems (ICCAS 2008) Oct 14-17*. Seoul, Korea: IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2008. 406-411.

Won, Jin-Myung, Hyojeong Choe, e Fakhreddine Karray. «Optimal Design of Personal Rapid Transit.» *Proceedings of the IEEE 2006 Intelligent Transportation Systems Conference (ITSC '06)*. Toronto, Canada, September 17-20, 2006: IEEE Intelligent Transportation Systems Magazine, 2006. 1488-1494.

Won, Jin-Myung, Ki-Moon Lee, Jin S. Lee, e Fakhreddine Karray. «Guideway Network Design of Personal Rapid Transit System: A Multiobjective Genetic Algorithm Approach.» *2006 IEEE Congress on Evolutionary Computation, July 16-21, 2006*. Vancouver, BC, Canada: IEEE Intellifent Transportation Systems Magazine, 2006. 2215-2221.

Zheng, Pengjun, David Jeffery, e Mike McDonald. «Development and Evaluation of Traffic Management Strategies for Personal Rapid Transit.» *Proc. Industrial Simulation Conference 2009*. Loughborough, UK, 2009. 191-195.



Citazioni indirette

Adan, I., & Resing, J. (2002). *Queueing theory*. Course Notes, Eindhoven University of Technology.

advancedtransit.org

Aggarwal, K. K. Y. C. Chopra, and J. S. Bajwa, "Topological layout of links for optimising the overall reliability in a computer communication system," *Microelectronics and Reliability*, vol. 22, no. 3, pp. 347–351, 1982.

Anderson, J. E. 1978. *Transit Systems Theory*, Lexington Books, D. C. Heath and Company.

Anderson, J. E. 1992. Dependability as a Measure of On-Time Performance of Personal Rapid Transit Systems, *Journal of Advanced Transportation*. 26:201-212.

Anderson, J. E. "The Future of High-Capacity PRT," Advanced Automated Transit Systems 22 Conference, Bologna, Italy, November 7-8, 2005. <http://www.gettherefast.org/documents/FutureofHCPRT-Jan606.doc>

Anderson, J. E. "Fundamentals of personal rapid transit," in *Pmc. 4th Int Con\$ Automated People Movers* 1993, pp. 51G524.

Anderson, J. E. "Life-Cycle Costs and Reliability Allocation in Automated Transit," *High Speed Ground Transportation*, 11:1(1977):1-18.

Anderson, J. E. "Safe Design of Personal Rapid Transit Systems," *J. Adv. Trans.* 28:1(1988): 1-15."

Anderson, J. E. (Ed.). 1974. *Personal Rapid Transit II*, Audio Visual Library Services, University of Minnesota.

Anderson, J. E. "Automated Transit Vehicle Size Considerations," *Journal of Advanced Transportation*, 20:2(1986):97-105.

Anderson, J. E. "Estimates of Ridership on Personal Rapid Transit Systems," *Transit Systems Theory* (2), 2006.

Anderson, J. E. "Failure Modes and Effects Analysis," www.skyloop.org/cals/rebuttal/06-07-Failure-Modes-&-Effects-Analysis.pdf

Anderson, J. E. 1978. Get Out on the Guideway and Walk. *Advanced Transit News*, 2:5

Anderson, J. E. 1996. Synchronous or Clear-Path Control in Personal Rapid Transit Systems, *Journal of Advanced Transportation*. 30:1-3.

Anderson, J. E. 1997. Longitudinal Control of a Vehicle. *Journal of Advanced Transportation*. 31:237-247.

Anderson, J. E. 1997. The Design of Guideways for PRT Systems. www.archive.org

Anderson, J. E. 2000. A Review of the State of the Art of Personal Rapid Transit. *Journal of Advanced Transportation*, 34:1:3-29.

Anderson, J. E. 2007. Fifteen Rules of Engineering Design. www.prtinz.com.


Anderson, J. E. 2007. How does Dual Mode Compare with Personal Rapid Transit? www.prtinternational.com

- Anderson, J. E. 2007. The Structural Properties of a PRT Guideway. Available on request.
- Anderson, J. E. 2008. An Intelligent Transportation Network System. www.prtinternational.com.
- Anderson, J. E. 2008. Maglev vs. Wheeled PRT. www.prtinz.com.
- Anderson, J. E. 2008. The Tradeoff between Supported vs. Hanging Vehicles. www.prtinz.com.
- Anderson, J. E. "Optimization of Transit-System Characteristics," *J. Adv. Trans.*, 18:1(1984):77-111.
- Anderson, J. E. "What Determines Transit Energy Use," *J. Adv. Trans.*, 22:2(1988):108-132.
- Anderson, J.E. *Simulation of the operation of personal rapid transit systems*. 1998; Available from: <http://faculty.washington.edu/~jbs/itrans/jeasim.htm>.
- Andréasson, I. J. "Quasi-optimum redistribution of empty PRT vehicles," in *Proc. of the 6th Int. Conf. Automated People Movers*, 1997, pp. 541–550.
- Andréasson, I. J. Extending PRT Capabilities. *Proc., 12th Automated People Movers Conference*, Atlanta, Ga., 2009.
- Andréasson, I. J. Ridership Effects of PRT with Mass Transit. Presented at 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 2011.
- Andréasson, I. Ride-Sharing on PRT. *Proc., 10th Automated People Movers Conference*, 2005.
- Andréasson, I., S. Andersson, K.-J. Tomczak, L.-E. Lindenberg, K. Wahlberg, B. Löfgren, and E. Westerberg. *Spårbilar i Södertälje—Teknik, gestaltning, kostnad*. WSP Report, Stockholm, Sweden, 2009.
- Ben-Akiva, M. and S.R. Lerman, *Discrete choice analysis: theory and application to travel demand*. 1985: The MIT Press Cambridge, Mass.
- Bent, R. W., & Van Hentenryck, P. (2004). Scenario-based planning for partially dynamic vehicle routing with stochastic customers. *Operations Research*, 52(6), 977–987.
- Bertsimas, D. J., & Levi, D. S. (1996). A new generation of vehicle routing research: robust algorithms, addressing uncertainty. *Operations Research*, 44(2), 286–304.
- Blake, L. R. 1966. "A Public Transport System Using Four-Passenger, Self-Routing Cars," *Inst. Mech. Eng. Convention on Guided Land Transport*. Vol. 181, Pt. 3G.
- Bliemer, M.C.J. and J.M. Rose. *Efficiency and sample size requirements for stated choice experiments*. In *88th TRB*. 2009. Washington DC.
- Bly, P. H., & Teychenne, P. (2005). Three financial and socio-economic assessments of a personal rapid transit system. In *Proceedings of the tenth international conference on automated people movers* (p 39). Reston: American Society of Civil Engineers. <http://link.aip.org/link/?ASC/174/39>.
- Boxma, O. J., Cohen, J. W., & Huffers, N. (1979). Approximations of the mean waiting time in an M/G/s queueing system. *Operations Research*, 27(6).
- Chou, H., G. Premkumar, and C.-H. Chu, "Genetic algorithms for communications network design-an empirical study of the factors that influence performances," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 5, no. 3, 2001.

-
- Christos Xithalis, 2008, PRT Hermes (http://students.ceid.upatras.gr/~xithalis/index_en.html)
- City Application Manual*. Deliverable D2.2.4c. European Commission, Nov. 2011. <http://www.citymobil-project.eu/downloadables/Deliverables/D2.2.4c-%20PU-CityMobil-City%20Application%20Manual-Final.pdf>.
- Cottrell, W. D. 2008. "New-generation Personal Rapid Transit Technologies – Overview and Comparison" *Transportation Research Record*, Vol. 2042, 101-108
- Cottrell, W. D. (May 1–4, 2005). "Moving to the Mainstream". Proceedings of the 10th International Conference on Automated People Movers. aip.org. Retrieved 2007.
- Daly, R. F., R. J. Komerska, and G. Anspach, "Station capacity: an issue in PRT system planning," in *Proc. 6th Int. Conf. Automated People Movers*, 1997, pp. 519–528.
- Deb, K.A. Pratap, S. Agarwal, and T. Meyarivan, "A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II," *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, vol. 6, no. 2, 2002.
- Dijkstra, E. W. "A note on two problems in connection with graphs," *Numerische Math.*, vol. 1, pp. 269–271, 1959.
- Fichter, Donn 1964. *Individualized Automated Transit and the City*, B. H. Sikes, 1430 East 60th Place, Chicago, Illinois 60637.
- Fichter, Donn 1974. "Veyar: Small Cars as the Key to Urban PRT," *Personal Rapid Transit II*.
- Garrard, W. L., Caudill, R. J., Kornhauser, A. L., MacKinnon, D., and Brown, S. J., State-of-the-Art of Longitudinal Control of AGT Vehicles. 1978. Proceedings - Conference on Advanced Transit and Urban Revitalization - An International Dialogue, Advanced Transit Association, Indianapolis.
- Gary, D. A., Garrard, W. L., and Kornhauser, A. L. 1976 (Ed.). 1976. *Personal Rapid Transit III*, Audio Visual Library Services, University of Minnesota.
- Glover, F., M. Lee, and J. Ryan, "Least-cost network topology design for a new service: An application of a tabu search," *Annals of Operations Research*, vol. 33, pp. 351–362, 1991.
- Hamilton William F. and Dana K. Nance, 1969. "Systems Analysis of Urban Transportation," *Scientific American*, 221:19-27.
- Heathrow T5. Website (2011). <http://www.ultraglobalprt.com/wheres-it-used/heathrow-t5/>
- Horn, M. (2002). Fleet scheduling and dispatching for demand-responsive passenger services. *Transportation Research. Part C, Emerging Technologies*, 10(1), 35–63.
- Hvattum, L. M. Løkketangen, A., & Laporte, G. (2006). Solving a dynamic and stochastic vehicle routing problem with a sample scenario hedging heuristic. *Transportation Science*, 40(4), 421–438.
- Irving, Jack H. Harry Bernstein, and Jon Buyan, 1978. *Fundamentals of Personal Rapid Transit*, Lexington Books, D. C. Heath and Company.
- Jan, R.-H. F.-J. Hwuang, and S.-T. Chen, "Topological optimization of a communication network subject to a reliability constraint," *IEEE Transactions on Reliability*, vol. 42, no. 1, pp. 63–70, 1993.

-
- Johnson, E. W. 1993. *Avoiding the Collision of Cars and Cities*, Urban Transportation Project, 200 E. Randolph Drive, Suite 5600, Chicago, Illinois 60601.
- Johnson, R. E. 2005. “Doubling Personal Rapid Transit Capacity with Ridesharing” *Transportation Research Record*, Vol. 1930, 107-112
- Kai, C.; Matsuda, R.; Yano, Y.; Hamamatsu, Y. 2005. “An Analysis of Double Queue on PRT System and a Control Strategy for Merging” *Transactions of the Institute of Electrical Engineers of Japan*, Vol. 125-D, No. 6, 645-651
- Kerr, J. P., and A. Craig. *Infrastructure Cost Comparison for PRT and APM*. Presented at 10th International Conference on Automated People Movers, special sessions on PRT, Orlando, Fla., 2005.
- Kim CW, Tanchoco JMA (1991) Conflict-free shortest-time bidirectional AGV routing. *Int J Prod Res*
- Kornhauser, A. L. (Ed.). 1978. *Proceedings - Conference on Advanced Transit and Urban Revitalization – An International Dialogue*, Advanced Transit Association, Indianapolis.
- Korte B, Vygen J (2008) *Combinatorial optimization, theory and algorithms*. 4. Springer, Berlin
- Krishnamurthy NN, Batta R, Karwan MH (1993) Developing conflict-free routes for automated guided vehicles. *Oper Res* 41(6):1077–1090
- KRRI Research Report, “Development of Technologies for On-demand Circulator Transit System(PRT)”, Korea Railroad Research Institute, 2012.
- Latour , Bruno 1996. *Aramis or the Love of Technology*, Harvard University Press.
- Lee, D. H., Wang, H., Cheu, R., & Teo, S. (2004). Taxi dispatch system based on current demands and Realtime traffic conditions. *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board*, 1882, 193–200.
- Lees-Miller, J. D. (2011). *Empty vehicle redistribution for personal rapid transit*. PhD thesis, University of Bristol.
- Lees-Miller, J. D., & Wilson, R. E. (2012). Proactive empty vehicle redistribution for personal rapid transit and taxis. *Transportation Planning and Technology*.
- Lees-Miller, J. D., Hammersley, J. C., & Wilson, R. E. (2010). Theoretical maximum capacity as benchmark for empty vehicle redistribution in personal rapid transit. *Transportation Research Record*, 2146, 76–83.
- Lees-Miller, J. D., Hammersley, J., & Davenport, N. (2009). Ride sharing in personal rapid transit capacity planning. In R. R. Griebenow (Ed.), *Automated people movers 2009* (pp. 321–332). Reston: American Society of Civil Engineers.
- Li, S. (2006). *Multi-attribute taxi logistics optimization*. Master’s thesis, Massachusetts Institute of Technology.
- Lowson, M. 2005. “Personal Rapid Transit for Airport Applications” *Transportation Research Record*, Vol. 1930, 99-106
- Lowson, M. V., and J. C. Hammersley. Maximum Capacity of PRT Stations. Presented at 90th Annual Meeting of the Transportation Research Board, Washington, D.C., 2011.

-
- Ma J. and J. B. Schneider, "Designing personal rapid transit networks," *Journal of Advanced Transportation*, vol. 25, no. 3, pp. 247–268, 1991.
- Mouth, D. U. 1984. Investigation of Structural Design Criteria for Automated Transit Aerial Guideways. N. D. Lea & Associates, Inc. Report No. UMTA-IT-06-0311-84-1.
- Navin, F. P. D. 1974. Time Costs in Personal Rapid Transit. *Personal Rapid Transit II*. Audio Visual Library Services, University of Minnesota, Minneapolis, Minnesota.
- Pierre S. and G. Legault, "A genetic algorithm for designing distributed computer network topologies," *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part B: Cybernetics*, vol. 28, no. 2, pp. 249–258, 1998.
- Pierre, S., M.-A. Hyppolite, J.-M. Bourjolly, and O. Dioume, "Topological design of computer communication networks using simulated annealing," *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, vol. 8, pp. 61–69, 1995.
- Pushkarev, B. S., Zupan, J. M., and Cumella, R. S. 1982. Urban Rail in America; An Exploration of Criteria for Fixed-Guideway Transit. Indiana University Press. Bloomington, Indiana.
- Puterman, M. L. (2005). *Markov decision processes: discrete stochastic dynamic programming*. New York: Wiley-Interscience.
- Randall, M., G. McMahon, and S. Sugden, "A simulated annealing approach to communication network design," *Journal of Combinatorial Optimization*, vol. 6, pp. 55–65, 2002.
- Schüpbach K, Zenklusen R (2011) Approximation algorithms for conflict-free vehicle routing. In: Proceedings of the 18th Annual European Symposium on Algorithms (ESA), pp 640–651
- Schweizer, J. Analytical Capacity Limits of Personal Rapid Transit Stations. *Proc., 13th Automated People Movers Conference*, Paris, 2011.
- Shladover S., "Automated vehicle control developments in the PATH program" *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, Vol. 40, Issue 1, Feb. 1991.
- Sir Peter Hall: "The Sustainable City: A Mythical Beast?" Transcript from planning.org
- Snyder, J. E., III, Wormley, D. N., and Richardson, H. H. 1975. Automated Guideway Transit Systems Vehicle-Elevated Guideway Dynamics: Multiple-Vehicle Single Span System. Report No. UMTA MA-11-0023-75-1
- Stevens, R. D., Silletto, J. G., Wormley, D. N., and Hedrick, J. K. 1979. AGT Guideway and Station Technology, Volume 6, Dynamic Model. Report No. UMTA-IT-06-0152-79-5.
- Swihart, M. R., & Papastavrou, J. D. (1999). A stochastic and dynamic model for the single-vehicle pick-up and delivery problem. *European Journal of Operational Research*, 114(3), 447–464.
- Tegnér, G. PRT Costs Compared to Bus, LRT and Heavy Rail, Some Recent Findings. Presented at Advanced Automated Transit Systems European Conference, Bologna, Italy, 2005.
- Tegnér, G. and G. Andréasson: *Personal Automated Transit for Kungens Kurva, Sweden - a PRT system evaluation within the EDICT project*. 9th APM2003 Conference, Singapore, September 2003.
- Tijms, H. (2006). New and old results for the M/D/c queue. *AEÜ. International Journal of Electronics and Communications*, 60(2), 125–130.



Vis, I. F. A. (2006). Survey of research in the design and control of automated guided vehicle systems. *European Journal of Operational Research*, 170(3), 677–709.

Wilde, W. A. “The Simple, Compelling Case for PRT,” *J. Adv. Trans.*, 32:1(1998).

Won J.-M., J. S. Lee, and F. Karray, “An Evolutionary Computing Based Approach for Directed Graph optimization: An Application to Guideway Network Design of Personal Rapid Transit,” *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* (submitted).

