#8.619

Tecnologia dei trasporti urbani di massa

Prof. Vukan R. VUCHIC Ph. D. (*)

SOMMARIO – Vengono definiti i differenti modi di trasporto di massa in base alle tre caratteristiche: tipo di sede, tecnologia ed esercizio.

Vengono in particolare analizzati i modi di trasporto di media capacità attraverso un'analisi comparata tra la metropolitana leggera (LRT) ed i sistemi completamente automatizzati (AGT).

Dall'analisi dei risultati si ricava un quadro d'assieme definito in termini quantitativi che permette di comprendere i differenti campi di utilizzazione dei modi considerati.

I trasporti di massa dagli inizi

La rapida crescita delle città nel diciannovesimo secolo creò un crescente fabbisogno di mobilità ed una necessità di miglioramento dei servizi di trasporto urbani. Numerosi inventori tentarono di sviluppare una tecnologia che doveva portare a mezzi di trasporto più veloci, meno costosi e più affidabili degli omnibus e dei tram a cavalli entrati in funzione in tutte le grandi città tra il 1820 e il 1850.

HALLIDIE inventò le tranvie funicolari stradali a San Francisco nel 1873 e mise in funzione il primo efficiente sistema di trasporto a trazione meccanica; gli scienziati tedeschi OTTO (motore a benzina) e DIESEL (motore Diesel) costruirono quei motori che numerose decine di anni più tardi apriranno la strada allo sviluppo degli autobus; ma la svolta determinante avvenne grazie ad una serie di invenzioni nel campo della trazione elettrica. SIEMENS in Germania e SPRAGUE negli Stati Uniti ebbero ruoli fondamentali nello sviluppo tecnico ed economico del tram elettrico e delle metropolitane, che rapidamente sostituirono tutti i veicoli trainati a cavalli intorno al 1900.

Gli autobus e i filobus ebbero il loro pieno sviluppo assai più tardi, durante gli anni '20 e '30. Così al tempo della seconda guerra mondiale la tecnologia dei sistemi di trasporto urbano era già ben sviluppata; consisteva di autobus, filobus, tram, metropolitane e sistemi ferroviari suburbani.

Tuttavia, sarebbe erroneo ritenere che la tecnologia di base del trasporto si sia consolidata negli anni Quaranta e che vi siano stati solo limitati sviluppi da allora ad oggi. Effettivamente i moderni autobus ed i veicoli della metropolitana leggera che scorrono silenziosamente sulle strutture di cemento armato precompresso hanno poco in comune con gli autobus pesanti e rumorosi ed i veicoli su rotaia di 40 anni fa.

Le numerose innovazioni di questi ultimi decenni possono venire classificate in tre categorie:

– *Perfezionamento dei materiali di costruzione* (veicoli, motori, costruzione di gallerie, ecc);

– *Innovazioni operative* dei sistemi di trasporto come corsie separate per autobus, priorità di transito ad incroci segnalati, governo computerizzato delle metropolitane, sistema di obliterazione automatica, migliori comunicazioni a bordo, ecc.;

– *Nuovi sistemi di trasporto*, ad esempio: sistemi di trasporto con veicoli, stazioni, tipi di esercizio ed altri elementi non convenzionali, monorotaie e trasporto a guida automatica.

La tecnologia dei trasporti comprende una grande varietà di componenti, sistemi e modi che indirizza i progettisti ed i pianificatori dei trasporti verso una notevole gamma di scelte che va dagli autobus convenzionali sino a sistemi di metropolitana ad alta capacità ed a governo interamente computerizzato. Di conseguenza esiste attualmente una più ampia selezione di sistemi di trasporto mai verificatasi prima; cosicché il compito di selezionare i modi ed i componenti è diventato molto più complesso.

Scopo di questo studio è il riesame della moderna tecnologia dei trasporti, delle concezioni e dei modi e la individuazione dei problemi più importanti che i pianificatori ed i progettisti dei trasporti devono affrontare. Come punto focale, questa relazione si concentra sui sistemi di trasporto di media portata.

(*) Dipartimento di Ingegneria Civile – Università di Pennsylvania – Philadelphia *(USA)*.

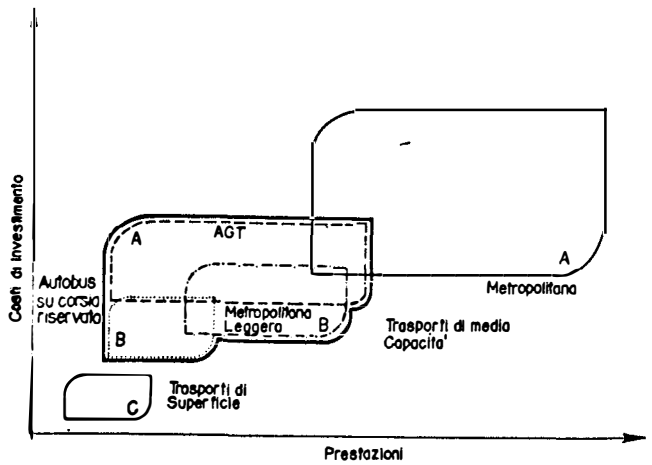

Fig. 1 – Costi di investimento prestazioni di differenti modi di trasporto pubblico.

Tre classificazioni generiche di modi di trasporto

I modi di trasporto vengono definiti da tre caratteristiche base: tipo di sede o via, tecnologia *e tipo di esercizio*. La più im-

portante delle tre, è il tipo di via. Vi sono tre tipi di via: C) strada a traffico promiscuo; B) sede propria con intersezioni a livello; A) sede propria esclusiva e controllo continuo della circolazione. Esse hanno fondamentale impatto sulla tecnologia dei sistemi di trasporto e sul tipo di esercizio. Parimenti, i costi di investimento e i costi di esercizio di un sistema di trasporto dipendono in larga misura dal loro tipo di via.

Quindi tutti i sistemi di trasporto possono essere classificati in tre classi generiche sulla base del tipo di via.

Trasporto stradale: esso include autobus, filobus e tram che operano su vie di tipo C; le sue prestazioni (velocità, portata, affidabilità e sicurezza ecc.) dipendono dalle condizioni stradali.

Trasporto semirapido: esso opera su vie di tipo B, comprende autobus semirapidi e metropolitana leggera; ha una portata media e prestazioni superiori alle precedenti.

Metropolitana essa ha esclusivamente il tipo di via A, e include metropolitana su rotaia e su pneumatici ed alcuni altri modi. Si distingue per le sue altissime prestazioni.

Con il rapido progressivo uso delle automobili private nelle città, particolarmente nel periodo tra la metà degli anni '50 e la metà degli anni '70, la congestione del traffico sulle strade urbane ha portato al deterioramento dei servizi di trasporto pubblico. Divenne evidente che per offrire servizi di trasporto confortevoli ed efficienti, i veicoli dovevano muoversi in corsie completamente separate da ogni altro tipo di traffico. L'ampio uso di autovetture private effettivamente aumentò il fabbisogno di trasporto ad altra prestazione; di conseguenza il numero delle città nel mondo che disponevano di metropolitane cominciò ad aumentare rapidamente. Nel 1950 vi erano 17 città di questo tipo; oggi ve ne sono 65. Comunque molti sistemi di metropolitana cominciarono ad ingrandirsi (vetture più grandi, treni più lunghi, minore distanza tra le stazioni ecc.), mentre il servizio di autobus peggiorò e divenne più lento. Queste tendenze crearono una "polarizzazione" dei sistemi di trasporto: molte città cominciarono ad usare solo autobus a basso investimento/bassa prestazione e metropolitane ad alto investimento/alta prestazione. È evidente la differenza nelle prestazioni e nei costi di esercizio tra questi gruppi, come risulta dal diagramma di fig. 1.

Con la crescente importanza degli ambienti urbani, della vitalità sociale ed economica delle città e l'aumentata attenzione dei governi verso questo problema, che si presentò fin dalla fine degli anni '60, divenne evidente che il grande divario fra queste due concezioni di modi di trasporto doveva essere colmato. *Vi sono molte città che necessitano di servizi di trasporto molto migliori di quelli che possono offrire gli autobus, eppure non possono permettersi l'altissimo investimento che richiederebbe la metropolitana.*

Effettivamente, la maggior parte delle città di media dimensione come pure alcune direttrici di traffico nelle città più grandi appartengono a questa categoria.

Durante gli ultimi 15 anni, ci sono state molte innovazioni ed invenzioni per realizzare questa categoria intermedia tra i modi di trasporto. Questi si possono classificare in tre raggruppamenti principali:

1. *Autobus semirapidi (SRB):* Si tratta dell'autobus migliorato con la predisposizione di corsie e piste riservate, con eventuale precedenza alle intersezioni, con l'immissione di nuovi tipi di veicoli e recentemente con l'introduzione di autobus a guida vincolata che possono procedere sia sulle strade che su speciali sezioni con rotaie di guida (O-Bahn).

2. *Metropolitana leggera (LRT):* Modo sviluppatosi in quei numerosi paesi dell'Europa Occidentale che hanno attuato una consistente politica di miglioramento dei trasporti.

È riconosciuta come una soluzione eccellente, per i sistemi di trasporto a media prestazione. A partire dalla metà degli anni '70, un crescente numero di città ha adottato il nuovo sistema di metropolitana leggera.

Le metropolitane leggere esistenti, si differenziano tra loro per il tipo di prestazione che possono fornire: si va infatti da sistemi a bassa prestazione simili al tram, attraverso sistemi di media portata/moderato costo di investimento sino a sistemi molto simili a quelli della metropolitana convenzionale per la loro prestazione e i costi di investimento.

3. *Sistemi di trasporto a guida automatica (AGT)* Questi sistemi sono stati realizzati con caratteristiche tecniche ed operative differenti. Un certo numero di sistemi (AGT) è in funzione attualmente su linee a breve percorso, principalmente negli aeroporti, ma solo pochi sistemi AGT sono stati adottati per linee regolari di trasporto urbano: i sistemi AGT a Morgantown, Kobe, Osaka e Lilla sono i soli che appartengono a questa categoria e che sono funzionanti da un certo periodo di tempo.

È interessante notare che mentre i processi di sviluppo degli autobus semirapidi e della metropolitana leggera (LRT) vennero iniziati e portati avanti dai pianificatori e dagli operatori dei trasporti, quelli riguardanti i sistemi AGT vennero realizzati dalle industrie che erano nettamente al di fuori dell'ambito precedente.

Ciò creò alcuni problemi: i tecnici ed i produttori del sistema AGT, infatti ricorsero poco alla consulenza degli operatori dei trasporti e credettero di poter risolvere da soli le tecnologie di tali sistemi di trasporto. Il risultato fu una serie di errori nella fase iniziale di sviluppo dei sistemi AGT.

Può essere utile elencare vari esempi di concezioni errate che ebbero un impatto negativo nello sviluppo dei sistemi AGT.

– Venne progettato un tipo di esercizio, a chiamata simile a quello degli ascensori. Tuttavia, a parte i periodi a bassa domanda (durante la notte), orari di marcia fissi e regolari corrispondono ad operazioni più semplici, a più alta capacità ed affidabilità.

– Vennero usati veicoli a piccola capienza con la maggior parte dei passeggeri in piedi. Mentre questo tipo di veicolo può risultare idoneo per brevi percorsi di tipo navetta (aeroporti, parchi di divertimento), non può offrire la capienza e la comodità richieste sulle linee normali di trasporto.

– Venne dato troppo rilievo all'alta frequenza di passaggio. Sono stati fatti enormi sforzi nella ricerca di operazioni con intervalli di pochi secondi; tuttavia non esiste una realistica definizione di un sistema di trasporto che necessiti di questo tipo di intervallo ed in effetti e gli operatori cercano di evitare un tipo di esercizio con intervalli inferiori ai due minuti o ad un minuto e mezzo.

– Il concetto di "trasporto rapido personale" (PRT) venne proposto come trasporto del futuro. Sebbene tale concetto materialmente ed economicamente non sia fattibile, esso ha causato in molte città confusione e ritardi nella pianificazione dei trasporti e non ha permesso di considerare il ruolo di tale sistema come adduttore di traffico e pertanto complementare ai sistemi di trasporto su rotaia ad alta capacità; infatti la maggior parte degli esercenti di grandi sistemi di trasporto ha dovuto affrontare problemi così numerosi nella modernizzazione e nell'espansione dei suoi sistemi di base su rotaia, che ha potuto dedicare poca attenzione e soprattutto fondi per l'introduzione di nuovi modi.

Ciò nonostante, negli ultimi anni i sistemi AGT hanno attirato una sempre maggiore attenzione. Tra i numerosi nuovi sistemi AGT sperimentati a partire dagli anni sessanta, parecchi di essi sono diventati completamente operativi ed il loro sviluppo ha iniziato ad allargarsi dagli aeroporti, dai parchi di divertimento

ed altre aree circoscritte verso le linee regolari di trasporto. Comunque, dal momento che tutti i sistemi operativi AGT attualmente in funzione sono stati finanziati parzialmente o interamente dai governi alla voce "progetti speciali di sviluppo", è necessario esaminare molto attentamente questi sistemi sia dal punto di vista economico che tecnico, prima di adottarli come sistemi validi e sicuri per il trasporto pubblico. Meritano infine un'attenta considerazione molte nuove tecnologie che comprendono alcune innovazioni molto promettenti per i sistemj guidati su rotaia e su pneumatici.

Aspetti dei modi di trasporto a media capacità

L'esigenza fondamentale che deve soddisfare il trasporto a media capacità è quella di poter offrire un livello di servizio molto più alto di quello offerto dal trasporto stradale, ma ad un costo di investimento minore di quello richiesto per un sistema di trasporto rapido ad alta capacità (metropolitana).

Come si può raggiungere questo traguardo?

Il primo passo fondamentale per fornire un più alto livello di servizio consiste nel separare i veicoli di trasporto pubblico dal traffico privato, cioè stabilire delle corsie riservate almeno sulle sezioni critiche delle reti. Da ciò deriva come la soluzione logica ed ottimale sia quella dei sistemi di trasporto a guida vincolata.

I numerosi vantaggi risultanti, riguardano la possibilità di accoppiare veicoli in treni con più bassi costi di esercizio, maggior capienza e sicurezza, possibilità di usare la trazione elettrica con tutti i suoi vantaggi, maggiore affidabilità di servizio e maggiore attrattiva per i passeggeri.

Ci sono due direttive base mediante le quali il costo del trasporto a guida vincolata può essere mantenuto ad un livello più basso di quello della metropolitana classica:

1) Fornire una via di tipo B, cioè avere corsie di percorrenza separate ma con stazioni su strada ed intersezioni a livello disposte in modo che l'impatto sull'esercizio e quindi sulle prestazioni, sia minimo. Questa soluzione è la metropolitana leggera.

2) Fornire una via di tipo A, ma ridurre la dimensione dei veicoli e dei treni, consentendo di conseguenza stazioni più piccole ed, in alcuni casi, degli standards geometrici e di tracciato più bassi di quelli del trasporto rapido. Questa soluzione, risultante dai sistemi AGT, rappresenta in effetti una formula di *trasporto rapido in scala ridotta.*

Entrambi questi metodi offrono una grande varietà di soluzioni e la loro adeguatezza dipende spesso dalle condizioni locali. Vengono ora analizzate entrambe le concezioni, focalizzando con maggiori dettagli, i sistemi AGT e le loro numerose varianti, che sono oggetto di dibattiti ed esperimenti in molte città.

Tipo di via parzialmente riservata. L'unica tecnologia di trasporto che può essere utilizzata sulla via di tipo B ed offrire nel contempo i vantaggi dei grandi veicoli che possono essere colle-

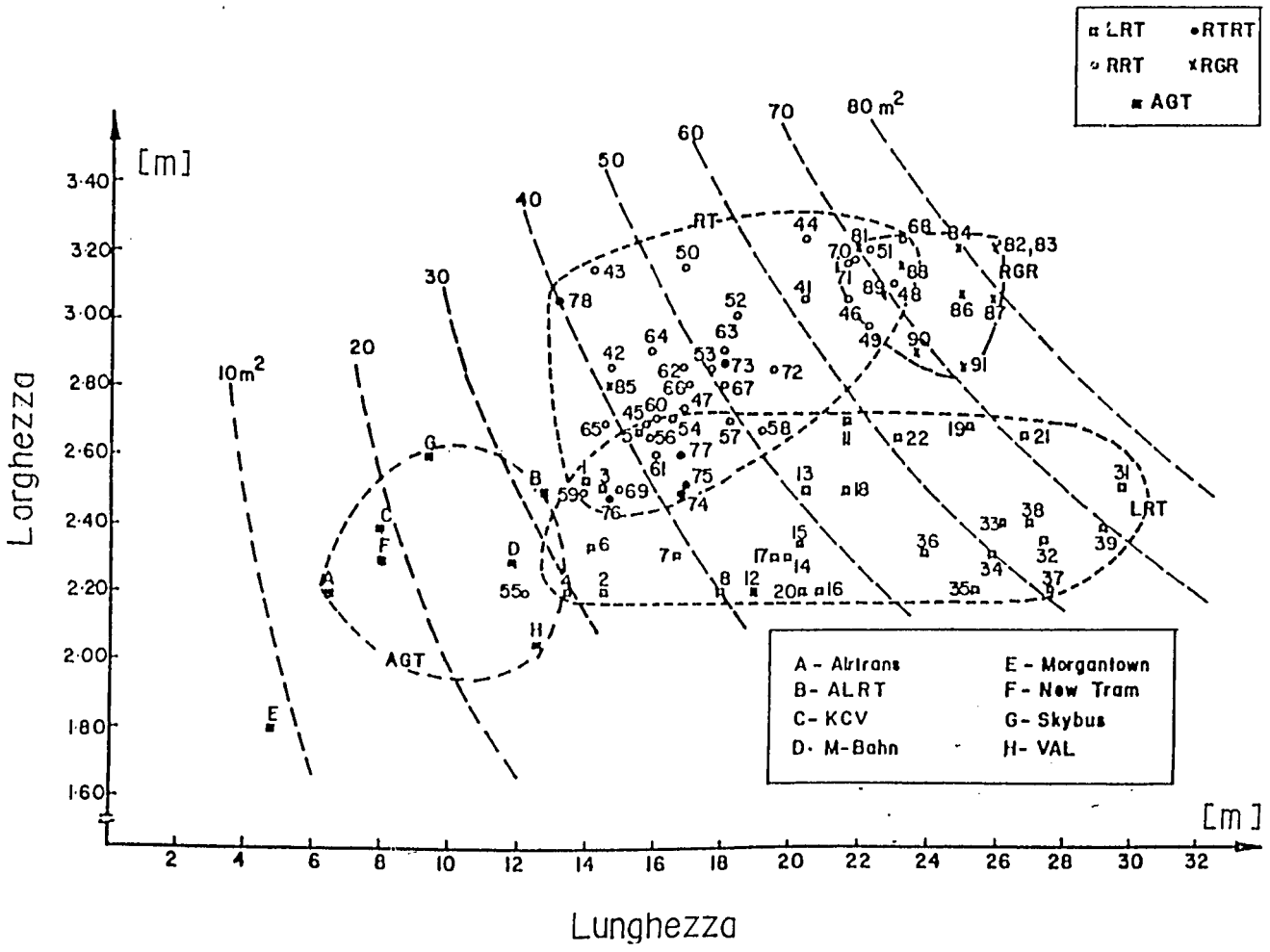

Fig. 2 – Dimensioni (lunghezza, larghezza) di differenti sistemi di trasporto su rotaia e di veicoli AGT.

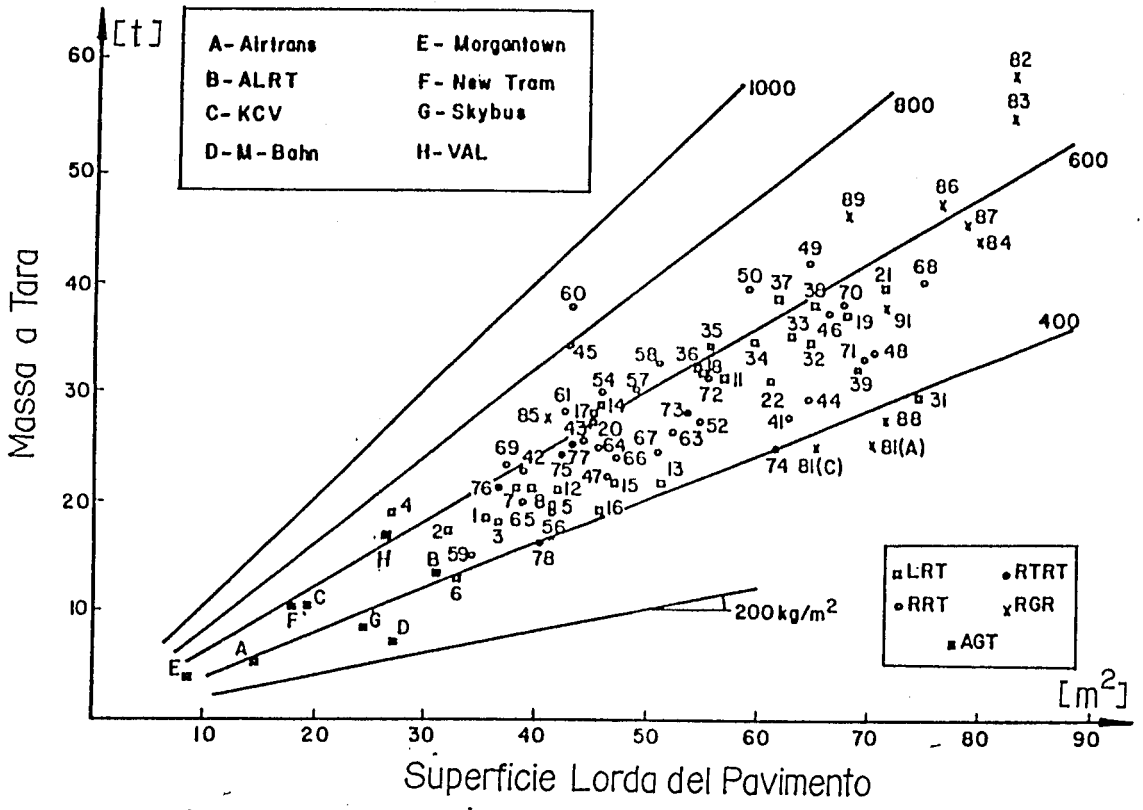

Fig. 3 – Massa a tara – superficie lorda del pavimento di differenti sistemi di trasporto su rotaia e di veicoli AGT.

gati in treni, della trazione elettrica, della lunga durata, della convenienza economica, è quella del binario convenzionale, dal momento che essa solamente permette intersezioni ed eventualmente traffico misto con quello di strade ad alta densità; i sistemi di trasporto su pneumatici invece non permettono nessuna intersezione a livello. La possibilità del binario ferroviario di essere utilizzato su qualsiasi tipo di via, consente una grande diversificazione di applicazioni del sistema LRT; mentre questo modo di trasporto normalmente utilizza la via di tipo B, può anche usare il tipo di via A o C su differenti sezioni della stessa linea. A seconda delle condizioni locali, il sistema LRT può avere differenti tipi di veicolo, differente lunghezza di treni, velocità operative e stazioni diverse (una semplice isola su strada o una stazione sotterranea simile a quella della metropolitana), guida a vista o con segnali a terra. Attraverso numerose innovazioni in queste concezioni a partire dal 1960, la produttività del sistema LRT è considerevolmente aumentata. Mentre nei sistemi tranviari vi erano circa 60 posti per i passeggeri, in un moderno sistema LRT come quello di Francoforte o di Calgary, un conducente guida un treno di circa 600 posti ad una velocità due o tre volte superiore a quella dei vecchi tram. In questo modo la produttività della mano d'opera è di 20-30 volte superiore. I punti di conflitto che il sistema LRT incontra con gli altri tipi di trasporto in alcune intersezioni hanno degli impatti negativi per lo più irrilevanti sull'esercizio; in questi casi il sistema LRT rappresenta una forma di trasporto estremamente economica ed efficiente.

Comunque qualora il tipo di via B presentasse molte intersezioni, tali da impedire un esercizio sicuro e da richiedere alti investimenti per la totale separazione di lunghe sezioni delle reti, allora si renderebbe necessaria la costruzione di una via di tipo A. In questo caso la scelta logica sarebbe quella del sistema AGT o della metropolitana convenzionale.

Tipo di via completamente separata. La distinzione tra i modi di trasporto con tipo di via B ed A è notevole dal momento che riguarda un certo numero di caratteristiche base del sistema:

a) il costo per approntare un tipo di circolazione completamente separata è molto più elevato, poiché deve trovarsi lo spazio non solo per la corsia completamente separata e controllata, ma anche per ogni stazione, per le aree di manutenzione ed altri servizi.

b) fisicamente e geometricamente il tipo di via A tende a produrre una più alta velocità operativa, ma impedisce alla rete di immettersi nelle strade, nelle aree commerciali e governative, nelle aree pedonali, nei parchi, etc.

c) l'automazione completa (per esempio operazioni di treni senza conducente) diventa materialmente possibile.

d) qualsiasi tipo di guida ed alimentazione è possibile dal momento che non ci sono contatti con altri veicoli o con i pedoni.

e) la lunghezza del treno è limitata solo dalla dimensione della stazione piuttosto che dalle condizioni della linea. Come risultato di tutte queste componenti, il tipo di via A offre condizioni di servizio di alta capacità, velocità, affidabilità, sicurezza ed altre caratteristiche che sono comunemente definite come prestazioni del sistema di trasporto. Mentre le città molto estese e popolate come Tokyo, New York, Mosca e Hong Kong, utilizzano questi elementi al massimo e trasportano fino a 60.000 passeggeri all'ora su un singolo binario, il problema per molte città di medie dimensioni è quello di riuscire a semplificare il sistema, diminuirne i costi, dal momento che dovrebbe essere costruito per trasportare solo da 10.000 a 20.000 passeggeri all'ora. Questo è il traguardo da raggiungere per lo sviluppo dei sistemi di media capacità. Riesamineremo ora uno per volta gli adattamenti di tutti i principali componenti per ottenere queste esigenze di ridotte prestazioni.

Tecnologia di guida: Non esiste alcun dubbio che la tecnologia

del binario convenzionale rimane di gran lunga la più alta tecnologia per i sistemi di trasporto urbano a grande capacità, anche se la maggior parte dei sistemi AGT sono stati concepiti per l'impiego su pneumatici. Vengono ora elencate le caratteristiche delle due tecnologie con i relativi vantaggi (+) e svantaggi (–) dei pneumatici sulla rotaia.

+ Migliore aderenza con condizioni di tempo secco, con conseguente completa utilizzazione dell'accelerazione massima e coefficienti di frenatura compatibili con il comfort dei passeggeri;

+ Migliore efficienza in salita;

+ Minor fastidio in curva;

+ Maggiore facilità nella costruzione di piccoli veicoli a due assi;

– Maggior consumo di energia;

– Più alta produzione di calore; problema particolarmente sentito nelle gallerie e nei climi caldi;

– Maggior sensibilità all'umidità, alla neve ed al ghiaccio;

– Minori dimensioni massime delle superfici lorde dei veicoli (unità a due assi $\leqslant 25$ m^2, unità a quattro assi $\leqslant 45$ m^2).

I progetti e le esperienze pratiche degli ultimi 20 anni, hanno disatteso alcune aspettative iniziali. Ad esempio i veicoli su pneumatici non sono meno rumorosi dei veicoli su rotaia (considerando veicoli di ugual dimensione e velocità); i veicoli su rotaia non sono più pesanti per unità di superficie di quelli su pneumatici; ma, d'altro canto, non è nemmeno vero che i veicoli su pneumatici non durano a lungo e devono essere spesso sostituiti. La costruzione più semplice e le sospensioni dei veicoli su pneumatici fanno si che questa tecnologia sia più valida se applicata a piccoli veicoli di circa 10 m di lunghezza; per veicoli più lunghi di 14 m la rotaia è normalmente superiore.

Vi sono parecchie importanti innovazioni nella tecnologia del trasporto su rotaia come ad esempio gli assi sterzanti ed i motori a induzione lineare applicati nel sistema ALRT.

Gli assi sterzanti assicurano una corsa tranquilla anche nelle curve; il motore a induzione lineare elimina tutti i problemi di aderenza poiché assorbe le forze di accelerazione e di frenatura cosicché le ruote servono solo di supporto e guida del veicolo.

Esercizio completamente automatizzato. Il funzionamento dei treni senza conducente può avvenire nei sistemi di trasporto se esistono due condizioni: il tipo di via deve essere completamente separata (A) e deve essere usata una tecnologia di guda su rotaia, pneumatici, sospensione magnetica, ecc. L'automazione non è collegata alle dimensioni del veicolo, tranne che per i sistemi ad alta capacità come la metropolitana, dove risulta in qualche modo meno importante che nei sistemi a media e piccola capacità. L'esercizio di una metropolitana è interamente fattibile senza automazione, mentre i sistemi che operano con piccole unità di trasporto possono essere poco convenienti dal punto di vista economico senza l'automazione (l'unità di trasporto o TU è un gruppo di vetture che procedono insieme – un singolo veicolo o un treno).

Il vantaggio predominante che deriva da un esercizio automatizzato è che, con l'eliminazione del conducente, i costi di esercizio di un gran numero di treni corti sono gli stessi di quelli che operano con un minor numero di unità di trasporto più lunghe. Questo fa si che sia economicamente fattibile offrire un servizio ad alta frequenza anche nelle lore di moderata e bassa domanda di mobilità; consente inoltre una facile adattabilità del servizio per ogni tipo di richiesta (si possono aggiungere treni, eliminarne, allungarli o accorciarli piuttosto facilmente).

Gli altri vantaggi dell'automazione totale, come ad esempio un regime ottimale di guida, un più facile controllo operativo di tutti i treni, la possibilità di regolazione delle tabelle di marcia, sono assai meno significativi.

Occorre tenere in mente che la totale automazione non solo coinvolge costi di investimento più elevati, ma richiede anche una tecnologia più sofisticata di costruzione, di esercizio e manutenzione dei sistemi di trasporto. Così i sistemi automatizzati necessitano di un personale più qualificato per l'esercizio e la manutenzione di quanto sia necessario per i sistemi azionati manualmente. Di conseguenza il problema dell'automazione è particolarmente sentito nelle città che richiedono un livello di servizio di alta qualità, necessitano di un sistema di trasporto a media capacità, dispongono di alti salari e di alta tecnologia. Nelle città che hanno la necessità prioritaria di trasportare grandi masse di persone con sicurezza ed efficienza, con salari medi e poca esperienza nella gestione avanzata dei treni, il problema dell'automazione non è sentito fortemente; comunque è sempre consigliabile creare il terreno per una sua possibile introduzione futura quando alcune di queste condizioni muteranno.

TABELLA I

CARATTERISTICHE STRUTTURALI DEI DIFFERENTI SISTEMI AGT

Cod.	Sistema-città	Produttore Nazione	Lunghezza [m]	Larghezza [m]	Superficie lorda del pavimento [m^2]	Capacita [posti a sedere/totale]	Massa a tara [t]	Massa totale [t]	Potenza [kW]	Massa a tara/superficie lorda del pavimento [t/m^2]	Peso totale/ numero assi vettura [t]	Potenza/ peso a tara [kW/t]
A	Airtrans-Dallas/F.W.	LTV/Vought – USA	6,48	2,24	14,52	16/40	5,350	8,150	56	0,368	4,075	10,47
B	ALRT – Vancouver	UTDC – Canada	12,70	2,50	31,75	40/100	13,600	20,600	(LIM)[a]	0,428	5,150	(LIM)[a]
C	KCV – Kobe	Kawasaki – Japan	8,00	2,39	19,12	20/62	10,500	14,840	90	0,549	7,420	8,57
D	M-Bahn	Siemens – Germany	11,80	2,30	27,14	n.d./70	7,800	12,700	(LIM)[a]	0,287	n.d.	(LIM)[a]
E	Morgantown	Alden/Boeing – USA	4,73	1,83	8,66	8/21	3,900	5,370	45	0,450	2,685	11,54
F	New Tram – Osaka	Niigata/LTV – Japan	8,00	2,29	18,32	20/62	10,000	14,340	90	0,546	7,170	9,00
G	Skybus – Miami	Westinghouse Elec. – USA	9,30	2,59	24,09	28/70	8,600	13,500	90	0,357	6,750	10,47
H	VAL – Lille	Matra – France	12,50	2,06	25,75	34/86	15,600	22,100	120	0,614	11,050	7,59

a – Motore ad induzione lineare

Progetto del veicolo AGT. Per poter esaminare le caratteristiche fisiche e dinamiche dei veicoli AGT costruiti negli anni più recenti, sono stati tratti dal libro *Sistemi e Tecnologia dei Trasporti Pubblici Urbani* [11], quattro diagrammi che illustrano le dimensioni, i pesi e le potenze di vari modi di trasporto su rotaia; in essi sono state aggiunte le caratteristiche dei veicoli AGT per poter effettuare comparazioni ed enunciare vantaggi e svantaggi. I veicoli AGT selezionati sono quelli sia in funzione su alcune linee di trasporto sia in fase avanzata di sviluppo ed in uso per esperimenti; essi sono elencati con le loro caratteristiche fisiche di base nella tabella 1.

La figura 2 mostra in ascisse la lunghezza ed in ordinate la larghezza dei veicoli a guida vincolata; da essa si evince che i veicoli AGT sono sostanzialmente più corti, ma non molto più stretti dei veicoli LRT, con l'eccezione del sistema VAL e del sistema di Morgantown che ha un veicolo estremamente piccolo. Tutti i veicoli AGT sono caratterizzati da una superficie minore di quella dei veicoli convenzionali su rotaia. La figura 3 mostra invece la massa a tara dei veicoli in relazione alla loro superficie. È interessante osservare da questo diagramma che sebbene i veicoli AGT siano più piccoli, non sono più leggeri per unità di superficie dei veicoli convenzionali su rotaia, con l'eccezione del sistema M-Bahn che utilizza la sospensione magnetica, evitando così molti elementi di supporto e sospensione come le ruote e le molle. Lo skybus ha pesi specifici similari al più leggero di tutti i veicoli convenzionali su rotaia riportati.

La conclusione significativa di questo diagramma è che non vi è alcun vantaggio nell'uso di piccoli veicoli su pneumatici in termini di consumo di energia; in altre parole se l'esigenza è tale che il sistema di trasporto richieda sia un veicolo grande o due piccoli, tali veicoli avranno un peso specifico molto simile (e pertanto un analogo consumo di energia se la tecnologia di guida è la stessa); il veicolo grande offrirà comunque maggiori comodità ai passeggeri e maggior comfort di marcia.

Per verificare il fatto che il sistema AGT richieda una struttura di appoggio più leggera a causa del suo peso minore, le vetture del sistema AGT sono state riportate sul diagramma con il massimo carico per asse (con vetture a pieno carico) con riferimento alla superficie lorda del veicolo (figura 4). Questo diagramma mostra che alcuni sistemi AGT come l'Airtrans, l'M-Bahn e l'ALRT hanno minor carico per asse che non quelli convenzionali (il sistema di Morgantown è anche più leggero, ma tale sistema è eccezionale per molti motivi). Gli altri quattro sistemi non sono più leggeri ed effettivamente il sistema VAL ha un peso maggiore per asse di qualsiasi altro veicolo del sistema LRT riportato nel diagramma. Perciò sono pochi sistemi AGT che possono avere strutture più leggere, ma la maggior parte di essi richiedono le stesse strutture usate per i sistemi convenzionali su rotaia.

Infine la figura 5 riporta il diagramma della potenza in funzione della massa a tara dei veicoli, indicando le loro caratteristiche dinamiche (principalmente la capacità di accelerazione).

Questo diagramma mostra che i sistemi AGT hanno lo stesso rapporto potenza-peso di tutti gli altri sistemi su rotaia.

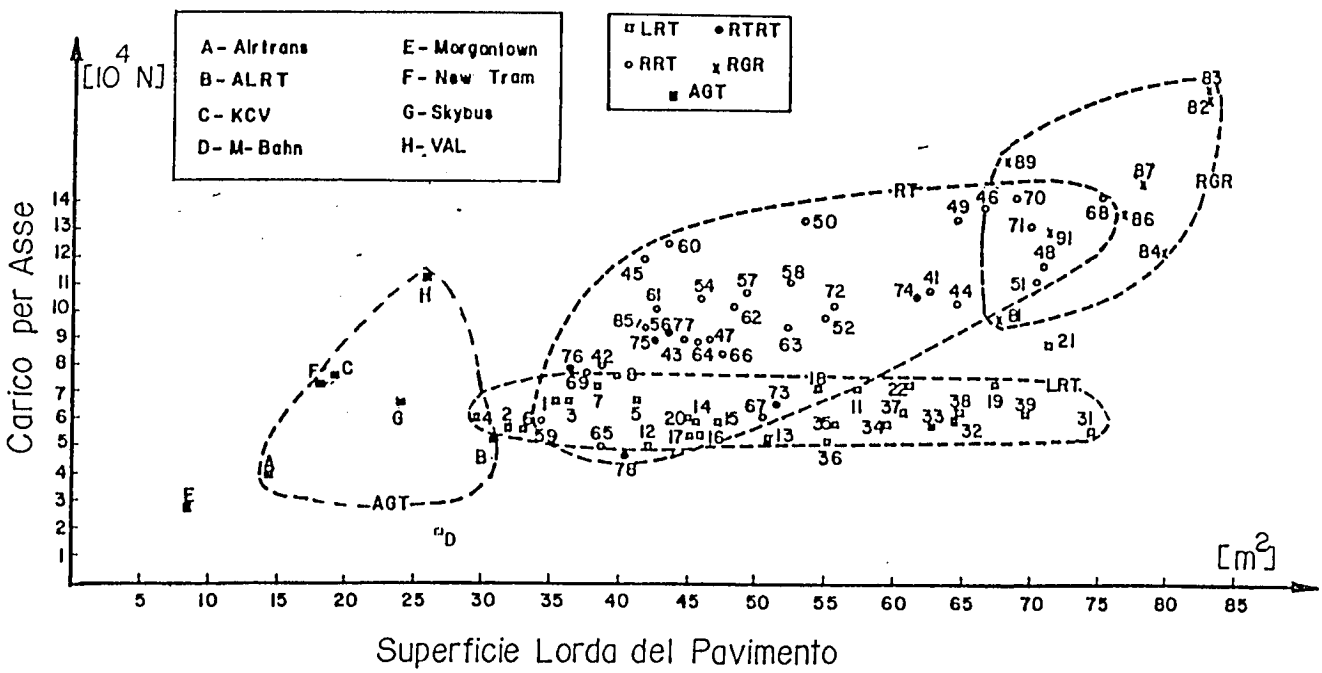

Fig. 4 – Carico per asse – superficie lorda del pavimento di differenti sistemi di trasporto su rotaia e di veicoli AGT.

Dimensioni dei differenti sistemi (TU) – Frequenza di servizio e capacità

Dal momento che esiste una limitata esperienza nell'uso dei sistemi AGT sulle linee di trasporto regolare ad alta densità di traffico, occorre concentrare una particolare attenzione sulla capacità che questi sistemi possono offrire. Effettivamente la dimensione dei veicoli e la possibilità di accoppiare veicoli in convoglio determina due importanti fattori:

– possibilità di offrire la massima capacità di trasporto nelle ore di punta;

– possibilità di utilizzare unità di trasporto (TU) più piccole per ottenere costi di esercizio minori e frequenza più bassa nei periodi di minore afflusso di passeggeri.

Il diagramma di figura 6 mostra le relazioni fra questi due fat-

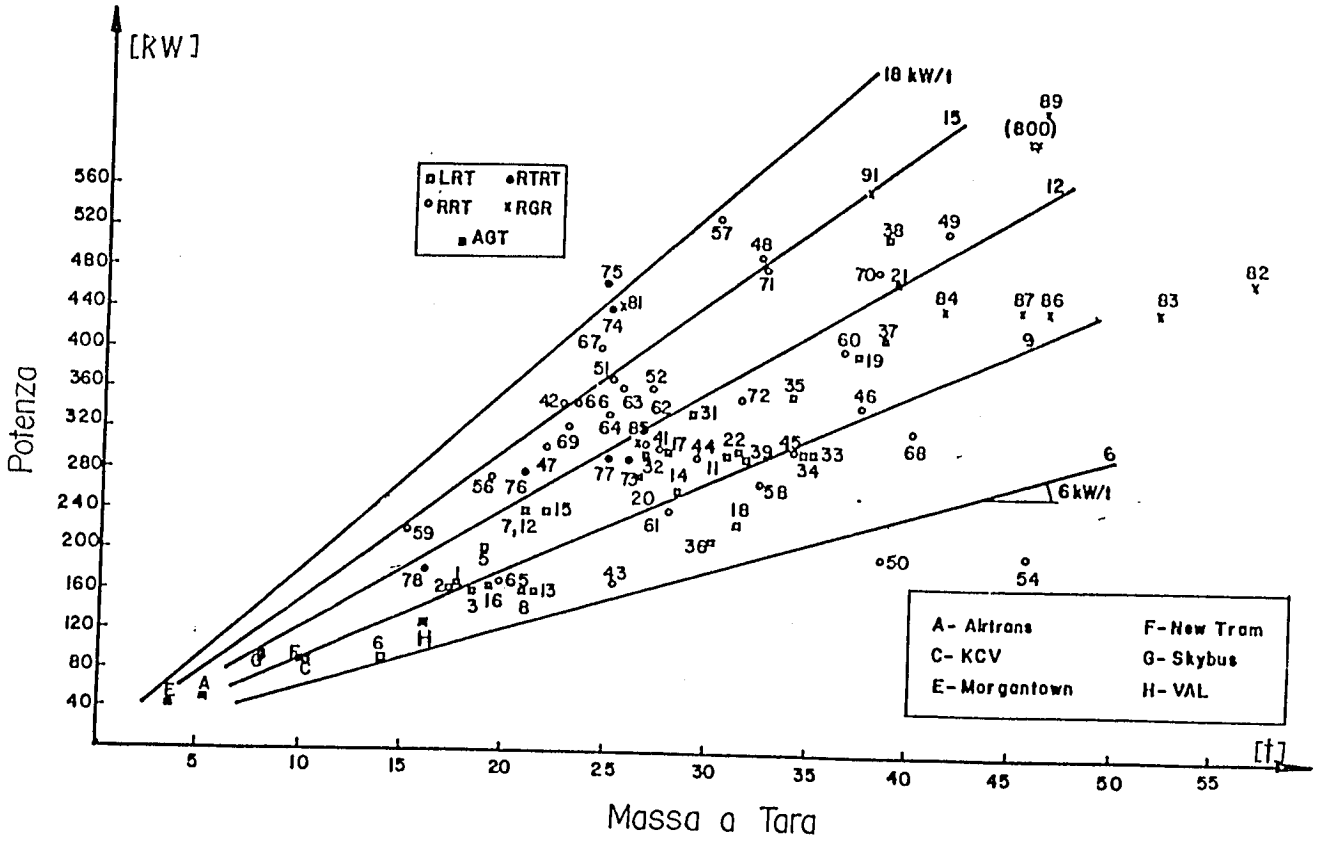

Fig. 5 – Potenza – massa a tara di differenti sistemi di trasporto su rotaia e di veicoli AGT.

tori: le dimensioni delle unità di trasporto (TU) (minime o massime) le frequenze e gli intervalli di servizio, il tipo di frequenza consigliabile, la capacità della linea. Per illustrare queste relazioni, sono stati introdotti nel diagramma cinque sistemi AGT elencati con le loro caratteristiche nella tabella 2. I sistemi rappresentano esempi per illustrare il tipo di analisi condotta, senza entrare in giudizi di merito ed inoltre i valori qui adottati non sono da considerarsi fissi: alcuni sistemi potrebbero essere costruiti con specifiche alquanto differenti. Tuttavia il diagramma mostra le differenze nette tra le loro caratteristiche di base. È illustrata la relazione tra la frequenza di servizio sull'ordinata del diagramma e la capacità della linea, tracciata sull'ascissa; essa mostra una relazione lineare tra tali variabili, con pendenze più basse all'aumentare della capacità dei sistemi.

In relazione alla frequenza, è ovvio che per offrire un buon servizio, viene richiesta una più alta frequenza dello stesso: nel caso di sistema AGT, si può prendere in considerazione il fatto che il servizio dovrebbe avere almeno una frequenza di 10 TU per ora ad intervalli cioè di 6 minuti. È consigliabile diminuire questi intervalli ma solo sino ad un certo livello; una volta che vengono introdotti intervalli di 3, 2.5 o 2 minuti i passeggeri non richiedono ulteriori riduzioni; d'altro canto se gli intervalli vengono ulteriormente diminuiti, l'affidabilità dell'esercizio diminuisce molto rapidamente; pertanto dal punto di vista operativo gli intervalli inferiori ai 2 o 2.5 minuti dovrebbero venir applicati solo quando questo è assolutamente necessario per consentire un maggior afflusso di utenti. Queste due esigenze antitetiche definiscono la gamma di intervalli tra 6 e 2.5 minuti (o le frequenze da 10 a 20 unità di trasporto per ora) come la più consigliabile per operazioni con sistema *AGT*.

Il diagramma mostra infine che, per domanda di trasporto molto bassa vengono usati *TU* di ridotte dimensioni supponendo un coefficiente di occupazione pari a 0.50; all'aumentare della domanda, aumenta la frequenza fino al raggiungimento di 24 *TU* per ora; dopo questo punto, viene mantenuta la stessa frequenza, mentre l'utilizzazione dei veicoli aumenta e, nel caso di sistemi che possono variare le dimensioni, come per esempio il sistema Skybus, ALRT e VAL, vengono gradualmente accoppiate ai treni delle vetture supplementari. Quando si raggiunge il 100% dell'occupazione consentita e la massima dimensione, per poter ulteriormente incrementare la capacità occorre aumentare la frequenza, per esempio gli intervalli devono essere abbreviati fino ai loro valori minimi operativamente fattibili, che variano per questi modi da 1.25 a 2.00 minuti.

È importante valutare un ulteriore fattore e cioè che queste capacità non possono mai venir completamente utilizzate a causa delle oscillazioni nel flusso dei passeggeri durante le ore di punta e della difficoltà di caricare al massimo ogni vettura. Pertanto la massima capacità utilizzabile, risulta l'80% circa dei posti offerti a meno di non voler accettare la possibilità di code e di maggiori attese per gli utenti. Per verificare questi valori, viene tracciata sull'ascissa una scala diversa della capacità utilizzabile espressa come numero dei passeggeri trasportati. Si dovrebbe valutare il flusso dei passeggeri per la linea programmata, sulla base di questa capacità utilizzabile e l'adeguatezza dei sistemi *AGT* dovrebbe essere esaminata in funzione di questi valori.

Investimenti e costi operativi

Ogni sistema di trasporto deve essere valutato nel complesso delle sue prestazioni e dei suoi costi. Un problema importante ri-

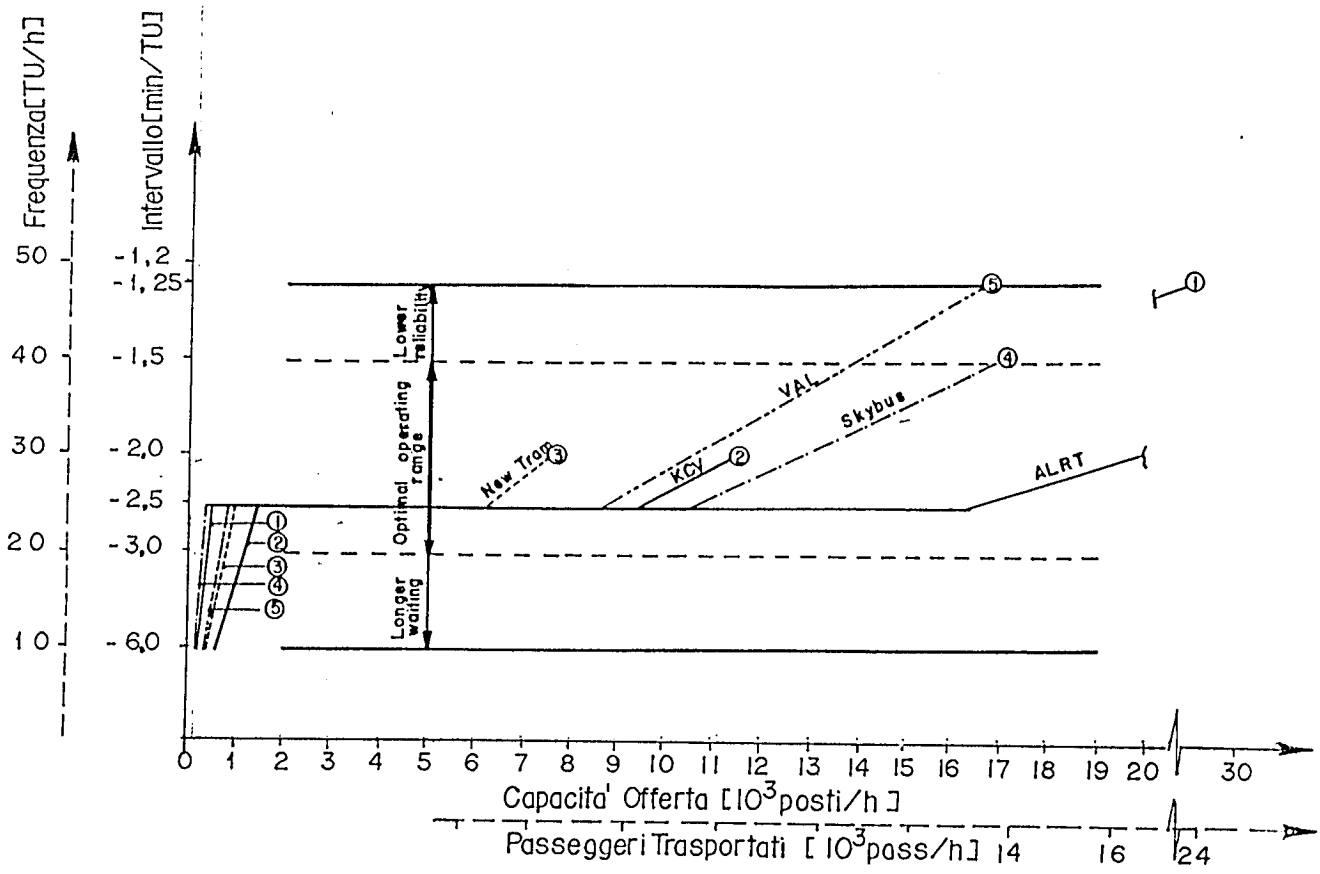

Fig. 6 – Frequenze, intervalli, capacità e passeggeri trasportati dei sistemi AGT.

guardante i sistemi *AGT* è che molte istallazioni fisse sono state finanziate sotto forma di ricerca e sviluppo dai governi o dall'industria privata e di conseguenza i loro reali costi di investimento sono in qualche modo aleatori. Inoltre, vi è una conoscenza limitata dei costi di esercizio e di manutenzione, che possono variare molto a seconda delle condizioni locali come per esempio progetti specifici, sicurezza dei componenti, disponibilità di personale tecnico specializzato ecc.

Fare quindi una stima dei costi è un compito molto serio ed importante per qualsiasi città che intenda introdurre un sistema *AGT* in un reale esercizio commerciale.

Valutazione e selezione dei differenti sistemi di trasporto

È un compito molto importante per ogni città selezionare un sistema di trasporto ad alta prestazione, dal momento che spesso si tratta del più vasto progetto pubblico che la città abbia mai intrapreso ed una tale decisione influenzerà non solamente l'efficienza del servizio di trasporto nel futuro, ma probabilmente il funzionamento e l'uso del territorio dell'intera città nell'arco di molti anni.

Tuttavia questa importante decisione è assai complessa.

CARATTERISTICHE DI SERVIZIO RELATIVE AI DIFFERENTI SISTEMI AGT

TABELLA 2

Sistema Città	Intervallo (min/TU)	Frequenza (TU/h)	Vetture TU	Capacità della vettura (n. pass./vettura)	Capacità offerta (posti/h)
1. ALRT – Vancouver	2.5 Min. 1.25 Max.	24 Min. 48 Max.	1 6	20 100	480 28.800
2. KCV – Kobe	2.5 Min. 2.0 Max.	24 Min. 30 Max.	6 6	10 62	1.440 11.160
3. New Tram – Osaka	2.5 Min. 2.0 Max.	24 Min. 30 Max.	4 4	10 62	960 7.440
4. Skybus – Miami	2.5 Min. 1.5 Max.	24 Min. 40 Max.	1 6	14 70	336 16.800
5. VAL – Lille	2.5 Min. 1.25 Max.	24 Min. 48 Max.	2 4	17 86	816 16.512

Come si possono analizzare oggettivamente tutti i numerosi fattori come il comfort dei veicoli, la frequenza di servizio, i costi, l'immissione delle linee sulle strade, in sopraelevata o in galleria? Quantunque non vi sia un procedimento semplice e preciso per fare una analisi comparata dei differenti modi dal momento che esso varia da una città all'altra, si possono specificare alcuni principi generali e la successione di fasi da seguire.

Selezione di modi. In generale il sistema di trasporto da selezionare dovrebbe rispondere a queste due esigenze fondamentali:

a) è valido tecnologicamente e operativamente;

b) ha un "pacchetto" prestazione/costo per lo meno pari a quello di ogni altro modo.

Tutti i modi convenzionali si adattano al punto a): autobus, metropolitana leggera e metropolitana classica, così come diverse monorotaie ed altri sistemi che sono stati in funzione per lungo tempo.

Negli ultimi anni a questa lista si sono aggiunti svariati modi di trasporto: gli esperimenti e le operazioni effettuate hanno dimostrato che il sistema O-Bahn, Skybus, VAL, KCV e molti altri sistemi soddisfano anche questo tipo di esigenza.

Il secondo tipo di esigenza, e cioè stabilire quale sia il modo migliore, richiede una attenta e sistematica analisi comparata che si può dividere in due parti.

In primo luogo le caratteristiche del modo dovrebbero essere stabilite attraverso una analisi della sequenza delle fasi; iniziando dal trasporto di superficie (autobus regolari) si dovrebbero esaminare le fasi seguenti:

a) È giustificato adottare un tipo di via B?

La risposta a questa domanda è affermativa quando il traguardo è quello di creare un trasporto competitivo rispetto a quello delle automobili private o quando gli autobus non possono soddisfare la domanda di mobilità richiesta. Entrambe queste condizioni sono assicurate nelle città molto grandi. I benefici derivanti dal tipo di via B giustificano facilmente l'investimento richiesto.

Nella maggior parte dei casi quando è giustificato il tipo di via B, la tecnologia ottimale è quella del sistema a guida vincolata (*LRT*).

b) È giustificato adottare il tipo di via A?

Per rispondere a questa domanda dovremmo usare uno studio preliminare per paragonare la linea progettata in alternativa ai due tipi di via B ed A. Come già discusso i modi con tipo di via A offrono un servizio migliore e spesso minori costi di esercizio, ma richiedono un investimento considerevolmente superiore. Quindi il problema consiste nell'accertare se la differenza di prestazione giustifica un esborso supplementare di capitale. Oppure si potrebbe porre la domanda in maniera diversa: premesso che vi sia disponibilità di un ammontare fisso di fondi di investimento, è preferibile costruire una rete di trasporto di 20 km con tipo di via B o una rete di trasporto lunga 12 km con tipo di via A? La decisione dipende dall'importanza relativa che può avere una prestazione più alta rispetto alla copertura di una più vasta area di rete di trasporto. Se viene scelto il tipo di via A, la domanda che si pone è la seguente:

c) È giustificato e necessario un esercizio completamente automatizzato?

Si dovrebbero valutare i benefici di costi di esercizio più bassi lontano dalle ore di punta, il migliore controllo degli orari, il regime ottimale di guida in confronto agli investimenti assai maggiori, alla maggiore complessità del sistema, alle richieste più elevate di personale specializzato. Se si risponde positivamente a questa domanda, allora si devono paragonare i vari sistemi a guida vincolata automizzati che hanno superato il collaudo tecnico di fattibilità come le metropolitane leggere ad esercizio automatizzato, il sistema *ALRT* (con motore a induzione lineare) il KCV, il New Tram, lo Skybus e il VAL.

Selezione del Sistema

L'analisi comparata e la selezione della tecnologia specifica dovrebbe comprendere molti fattori differenti classificati in tre categorie:

– *i passeggeri* che rappresentano il gruppo più importante, richiedono un servizio veloce, affidabile, sicuro, confortevole e piacevole ed una tariffa contenuta;

– *l'operatore del trasporto,* responsabile di offrire il servizio richiesto dai passeggeri, deve gestire un sistema che possa garantire una specifica velocità operativa, capacità, frequenza, affidabilità e sicurezza ad un livello accettabile di costi operativi e di investimento;

– *la società* che include il governo, l'intera città e le comunità che devono utilizzare i sistemi progettati, considera per lo più questi fattori come costi di investimento del progetto; il risultato di ciò sarà un incremento del livello globale del servizio che porterà ad una aumentata mobilità nelle città.

Conclusioni

L'analisi comparata dei sistemi da considerare, dovrebbe consistere nella valutazione di tutti questi aspetti in termini di costi, svariate altre voci (come passeggeri per ora, frequenze di servizio, percentuale di passeggeri seduti, ecc.) ed un numero di fattori qualitativi come il comfort delle vetture, l'immagine del sistema o la facilità dell'esercizio. La scelta ottimale dovrebbe scaturire dal sistema che comprende il miglior "pacchetto" di prestazioni.

BIBLIOGRAFIA

[1] Bundesminister für Verkehr, *"Forschung Stadtverkehr"*, Sonderheft 12; Kirschbaum Verlag, 1976; Bonn-Bad Godesberg, F.R. Germany.

[2] CALVERLEY, H.B., *"Developments for medium-capacity urban public transport"; Proc. IEE,* Vol. 126, No. 11R, pp. 1097-1125; November 1979, *IEE Review, England.*

[3] CHUNG, C.C., *"Preliminary Data Base for Existing Automated Guideway Transit Systems"*; TSC report to UMTA/U.S. DOT, Dec. 1977; Washington, D.C., *USA.*

[4] FERBECK, Daniel and FREY Henri, *"Die automatische U-Bahn in Lille"; Der Nahverkehr,* pp. 62-75; 0/82. Alba Buchverlag, Düsseldorf, F.R. Germany.

[5] KRETTEK, Otmar, *"Rollen Schweben Gleiten"*; Alba Buchverlag, 1975; Düsseldorf, F.R. Germany.

[6] MÜLLER, Siegfried, *"Die H-Bahn"; Nahverkehrsforschung* 79, pp. 166-209; BMFT, Bonn, F.R. Germany.

[7] *"Osaka and Kobe pioneer automated people movers"; Railway Gazette International,* April 1980, pp. 288-290; London, England.

[8] TCO-Traction Cem-Oerlikon, *"Lille's Val Metro a new concept in fully automated transit system"*; Techniques CEM Nr. 115, Paris, France.

[9] VUCHIC, Vukan R., *"Place of Light Rail in the Family of Transit Modes"; TRB Special Report 161,* "Light Rail Transit", pp. 62-76, 1975. Washington, D.C., *USA.*

[10] VUCHIC, Vukan R., *"Rapid transit automation and the last crew member" – Railway Gazette International,* October 1973, pp. 382-385; London, England.

[11] VUCHIC, Vukan R., *"Urban Public Transportation Systems and Technology"*; Prentice Hall, 1981; Englewood Cliffs, NJ, *Usa.*

(Vedi sommari a pag. 780)

d'impianti (nei nodi soprattutto) che al sistema del trasporto combinato devono adeguarsi.

E quel che possiamo rilevare è che l'individuazione di questi interporti è stata sinteticamente espressa nello schema di Piano, con 5 grandi interporti e con un complesso (da 10 a 15) d'impianti di minore portata. Quanto alle stazioni, si profilano altresì dei mutamenti, sul cui conto si può essere facilmente d'accordo, tranne a rilevare la complessità e l'impegno dei problemi che si vengono a prospettare nelle grandi aree urbane al riguardo, con l'espansione che esse hanno avuto in passato.

E sono tutti temi, questi, che vanno segnalati per l'interesse che presentano, non solamente ai fini della programmazione dei trasporti vista nei suoi termini generali, ma altresì per le connessioni che si pongono nello studio di quanto dovrà essere fatto con una riforma delle ferrovie.

E su questo val la pena pertanto di richiamare i lettori, e soprattutto gli specialisti dei vari settori, per una attenta meditazione di quanto è già emerso in sede di programmazione e di quanto emergerà dagli studi che la verranno a completare, con gli aspetti di rilievo che verrà ad assumere un nuovo assetto dei servizi delle ferrovie, e per primo di quello merci, affinché possano meglio operare nell'ambito del territorio.

Alcuni orientamenti per la politica dei trasporti

Nello Schema di piano generale non mancano infine delle indicazioni che riguardano la politica dei trasporti, e perfino veri e propri programmi articolati di misure d'intervento per la politica statale di questo o di quel settore. Di cose cioè che direttamente non hanno da fare con la programmazione dei trasporti, e quindi con gli obiettivi primari di un Piano generale inteso in senso pieno.

In questa parte, di rilievo è certamente tutta la normativa per l'autotrasporto merci, l'assetto degli aeroporti, lo sviluppo dell'aviazione civile, le innovazioni da apportare ai servizi doganali, la problematica relativa alla marina mercantile ed ai porti. In argomenti cioè ai quali si deve dare un notevole peso per se stessi, ma – per il traffico via mare – anche per la posizione che si pensa di dare al cabotaggio nell'assetto futuro del traffico merci, come "fattore di cambiamento di tutto l'assetto" che ha oggi.

Indipendentemente da quanto può riguardare più direttamente la programmazione delle infrastrutture, abbiamo qui un vero e proprio piano d'azione per la politica dei trasporti, che da per sé sarebbe tale da cambiare, e di non poco, i connotati del quadro, complesso com'è, che oggi ci va presentando.

(Sommari art. Vuchic da pag. 775)

Sommaire

TECHNOLOGIE DES TRANSPORTS URBAINS DE MASSE

On définit les différents moyens de transport de masse sur la base des trois caractéristiques: type de site, technologie et exploitation.

On analyse en particulier les modes de transport de capacité moyenne à travers une analyse comparée entre le métropolitain léger *(LRT)* et les systèmes complètement automatisée *(AGT)*.

De l'analyse des résultats on tire un tableau d'ensemble défini dans des termes de quantité qui permet de comprendre les différents domaines d'utilisation des moyens considérés.

Summary

TECHNOLOGY OF URBAN MASS TRANSPORT

A definition is given of the different mass transport systems on the basis of the three characteristics: bed, technology and operation.

An analysis is made in particular of the medium capacity transport systems by means of a comparative analysis between the light metropolitan railway *LRT)* and the fully automated systems *(AGT)*.

From an analysis of the results an overall picture is obtained, defined in quantitative terms, which makes it possible to understand the different fields of utilisation of the systems taken into consideration.

Zusammenfassung

TECHNOLOGIE DES MASSENSTADTVERKEHRS

Es werden die verschiedenen Arten des Massenverkehrs auf Grund von drei Charakteristiken überprüft: Fahrbahn – Technologie – Betrieb.

Im einzelnen werden die Beförderungsarten durchschnittlicher Transportkapazität durch eine Vergleichsanalyse zwischen der leichten U-Bahn *(LRT)* und den völlig automatisierten Systemen *(AGT)* überprüft.

Aus der Analyse der Ergebnisse geht ein Gesamtbild hervor, das unter dem Gesichtspunkt der Quantität bewertet wird und die verschiedenen Verwendungsbereiche der im Betracht gezogenen Beförderungsarten zu verstehen erlaubt.