

**Umberto PETRUCCELLI**

---

## La teoria del deflusso nei trasporti a fune

# La teoria del deflusso nei trasporti a fune

Umberto PETRUCCELLI (\*)

**SOMMARIO** – La teoria del deflusso studia la funzione di produzione di tutti i sistemi di trasporto, siano essi a densità libera o controllata, e dà luogo, nei due casi, a differenti andamenti delle curve flusso-velocità. Se nello studio del deflusso in un sistema a densità controllata si tiene conto che alcuni parametri dell'esercizio variano con ben precise leggi e comunque devono essere contenuti entro campi di valori stabiliti dalle normative specifiche o definiti dalle caratteristiche intrinseche del sistema, si possono ottenere curve di deflusso reali molto diverse, per valori e andamento, da quelle teoriche.

Il presente studio affronta in questa visione i sistemi di trasporto a fune che, come è noto, sono a densità controllata intrinsecamente e che, per questo motivo, presentano una elevata rigidità di esercizio. In particolare si specializza l'equazione generale del deflusso per questi sistemi, nel rispetto dei valori imposti al distanziamento, sia dalle norme costruttive e di esercizio, sia dalle caratteristiche dei sistemi di volta in volta esaminati. Questi sono stati suddivisi, per chiarezza espositiva in tre categorie: gli impianti a moto continuo (cabinovie e seggiovie ad aggancio permanente e temporaneo), gli impianti a moto alternato (funivie classiche e ferrovie funicolari) e gli ascensori in servizio di estremità. Questi ultimi, sostanzialmente inquadrabili fra gli impianti a fune a moto alternato, presentano tuttavia alcune specificità non trascurabili ai fini dello studio del deflusso.

## 1. Concetti introduttivi

La curva di deflusso di un generico sistema di trasporto è espressa dalla relazione

$$H = v * \delta (v) \quad (0)$$

in cui

$H = [\text{veicoli/s}]$  – flusso di veicoli che attraversano una sezione del percorso nell'unità di tempo;

$\delta (v) = [\text{veicoli/m}]$  – densità dei veicoli nel tratto di percorso considerato;

$v = [\text{m/s}]$  – media delle velocità di transito dei veicoli attraverso la sezione.

Essa è caratterizzata nei diversi sistemi dallo specifico andamento della funzione

$$[\delta = \delta (v)].$$

In generale la densità ( $\delta$ ) è funzione della distanza di sicurezza che i veicoli incolonnati devono mantenere per evitare la collisione in caso di arresto di quello che precede e pertanto, almeno in teoria, essa è funzione del quadrato della velocità di marcia.

Questa relazione fra densità ( $\delta$ ) e velocità ( $v$ ) si mantiene sempre concettualmente valida per i sistemi di trasporto a densità libera per i quali il distanziamento dal veicolo che precede è mantenuto a cura del conducente del veicolo che segue, pari almeno alla distanza di sicurezza nel

valore, stimato dallo stesso conducente, sufficiente a arrestare il veicolo alla velocità di marcia.

Nei sistemi a densità controllata, cioè in quei sistemi in cui il distanziamento fra i veicoli è preordinato e mantenuto nei valori stabiliti da un sistema di regolazione e controllo, come nelle ferrovie, o da un legame fisico fra i veicoli, come nei trasporti funicolari, si è soliti distinguere due momenti caratterizzati da una diversa struttura della funzione densità ( $\delta$ ). In fase di progetto del sistema, cioè quando i parametri caratteristici dello stesso sono ancora da stabilire, la densità è ancora funzione dello spazio di arresto e quindi del quadrato della velocità di marcia, mentre in fase di esercizio la densità è generalmente un parametro invariabile calcolato sulla velocità massima in linea e non modificabile se non apportando modifiche al sistema di regolazione e controllo e/o all'infrastruttura.

Pertanto poiché la funzione densità assume una forma differente nelle due fasi di progetto del sistema e di progetto dell'esercizio, è pure diversa nelle due fasi la curva di deflusso  $H = H (v)$ . Come è noto infatti essa conserva nella prima fase l'andamento pressoché parabolico tipico dei sistemi a densità libera, mentre diventa rettilinea nella seconda fase per effetto della costanza della funzione ( $\delta$ ).

La costanza del valore della densità è un forte vincolo nei sistemi a densità controllata per i quali, una volta progettato e costruito l'impianto, la variazione del valore del distanziamento fra i veicoli richiede costose modifiche alla linea.

Nel seguito ci si riferisce in particolare ai sistemi di trasporto a fune trattando direttamente il flusso non in

(\*) Dipartimento di Architettura, Pianificazione e Infrastrutture di Trasporto – Università della Basilicata – Potenza.

termini di veicoli ma di passeggeri nell'unità di tempo, che è poi l'unità di maggior interesse per la funzione di produzione del trasporto.

Si utilizza la seguente simbologia:

$H = [\text{veic./s}]$  – flusso massimo di veicoli;

$C = [\text{passeggeri/h}]$  – capacità del sistema;

$L = [m]$  – lunghezza della linea (impianti a vai e vieni);

$dm = [m/\text{veic.}]$  – distanziamento metrico tra le cabine (impianti a moto continuo);

$d = [s/\text{veic.}]$  – distanziamento temporale delle cabine in linea;

$n = [\text{passeggeri}]$  – capienza di ciascuna cabina;

$a = [m/s^2]$  – accelerazione media nelle fasi di moto vario,

in base alla quale sono scritte le relazioni fisiche appresso riportate:

$$dm = 1/\delta \quad (1)$$

$$d = 1/H \quad (2)$$

Il flusso massimo di veicoli ( $H$ ) e la capacità ( $C$ ) del sistema sono legati dalla relazione valida in linea generale:

$$C = 3600 H * n \quad (3)$$

*Nel caso di impianti a moto continuo,*

essendo

$$d = dm/v$$

e tenendo conto della (2), risulta

$$C = 3600 v * n/dm \quad (4)$$

*nel caso di impianti a moto alternato*

è sempre valida la (3) e la seguente relazione dedotta dalla (2):

$$H = 1/d$$

ma il distanziamento temporale fra le cabine ( $d$ ) si esprime diversamente, secondo quanto trattato più avanti nel paragrafo relativo a questo tipo di impianti.

## 2. Gli impianti a moto continuo

La (4), di applicazione immediata negli impianti a moto continuo, pone la capacità in funzione di soli tre parametri ( $v$ ), ( $n$ ) e ( $dm$ ). Poiché ( $n$ ) e ( $dm$ ) sono parametri generalmente invariabili in un impianto esistente, la capacità risulta funzione lineare della sola velocità, come avviene in tutti i sistemi a densità controllata una volta fissato il valore di quest'ultima e quindi del distanziamento fra i veicoli.

In sede di progetto del sistema è invece possibile scegliere i valori di tutti e tre i parametri da cui dipende la capacità. Tali parametri tuttavia non sono fisicamente indipendenti fra loro. Infatti il distanziamento fra le vetture

( $dm$ ) è connesso allo spazio di arresto dell'impianto e pertanto è funzione della velocità; la velocità d'altra parte deve mantenersi entro valori molto contenuti, negli impianti con veicoli a collegamento fisso, per consentire la discesa e la salita in corsa e, negli impianti con cabine a collegamento temporaneo, per consentire alle stesse di accelerare in uno spazio contenuto prima di agganciarsi alla fune.

La normativa stabilisce che, per gli impianti con cabine a collegamento permanente, i valori minimi del distanziamento metrico delle cabine siano da ricavarsi, in funzione della velocità di linea, dalle relazioni

$$dm = k * v^2 \text{ per cabinovie e seggiovie;}$$

$$dm = k * v \text{ per sciovie}$$

essendo ( $k$ ) un coefficiente, il cui valore è stabilito in funzione delle caratteristiche dell'impianto e che è dimensionalmente diverso nelle due relazioni. Infatti, attraverso l'analisi dimensionale si ricava per ( $k$ ) la dimensione [ $s^2/(m*veic.)$ ] nella prima relazione e la dimensione [ $s/veic.$ ] nella seconda.

Si riporta per memoria, nella tabella 1, quanto stabilito dalla normativa in proposito.

TABELLA 1

IMPIANTI MONOFUNE CON CABINE A COLLEGAMENTO PERMANENTE (da normativa)

Tipo di impianto	Velocità massima (m/s)	Distanziam. minimo (m)
Cabinovie e seggiovie: • monoposto • biposto	2,0 2,0	$4*v^2$ e comunque $\geq 5$ $7*v^2$ e comunque $\geq 10$
Seggiovie per sciatori con sci ai piedi: • monoposto • biposto	2,5 2,5	$3*v^2$ $4*v^2$
Sciovie • monoposto • biposto	4,0 2,5	$6*v$ ( $5*v$ se con traini elastici) $10*v$ ( $8*v$ se con traini elastici)

Tenendo conto delle formule date dalla normativa per il calcolo del distanziamento metrico minimo in funzione della velocità, è possibile specificare la (4) per i diversi tipi di impianto, ottenendo le relazioni

$$C = 3600 * n/(k * v) \text{ per cabinovie o seggiovie} \quad (5)$$

$$C = 3600 * n/k \text{ per sciovie} \quad (6)$$

Esse naturalmente non sono valide per quel campo di velocità in corrispondenza del quale i valori del distanziamento metrico ( $dm$ ) calcolati, in funzione della velocità di esercizio attraverso le relazioni fornite dalla normativa, risultano inferiori ai valori minimi imposti

dalla stessa (5 e 10 m rispettivamente per impianti monoposto e biposto). In quest'ultima eventualità conviene applicare direttamente la (4) assumendo per (dm) detti minimi.

La rappresentazione grafica della (4) e della (5) riportata in figura 1, per una cabinovia monoposto e per una biposto, per gli intervalli di velocità per i quali ciascuna di esse è applicabile, è particolarmente interessante. Si rileva infatti un primo tratto crescente linearmente fino ad una velocità di circa 1,1 m/s, lungo il quale la capacità di un impianto monoposto e di un impianto biposto assume gli stessi valori; successivamente la capacità decresce descrivendo una curva con concavità verso l'alto che è stata arrestata in corrispondenza del valore massimo della velocità consentita per i tipi di impianto analizzati (2 m/s).

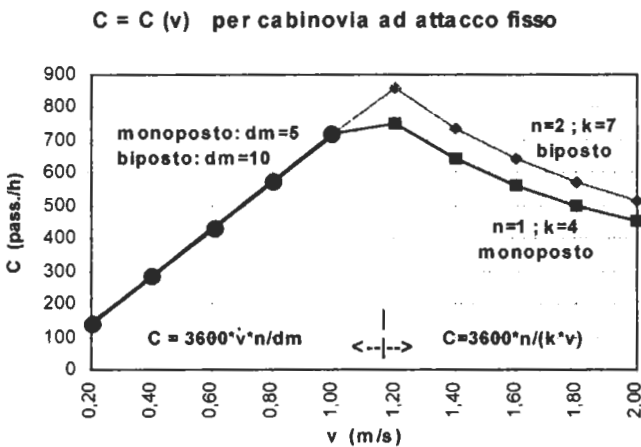


Fig. 1 - Grafico della funzione C = C(v) con i valori del distanziamento minimo imposti dalla normativa per una cabinovia monoposto e per una biposto con cabine a collegamento permanente.

Il primo tratto (la retta) è rappresentativo della (4) nella quale è stato assunto il valore minimo del distanziamento metrico (dm = 5 m per l'impianto monoposto e dm = 10 m per il biposto), dal momento che il distanziamento calcolato con le formule della normativa in corrispondenza di valori ridotti della velocità fornisce valori inferiori ai minimi consentiti. Il secondo tratto (la curva) è la graficizzazione della (5) che deriva dalla (4) sostituendo al valore del distanziamento (dm) la formula data dalla normativa; in tutto questo tratto del diagramma la capacità dell'impianto biposto si mantiene di circa il 7 + 15% superiore a quella del monoposto.

La presenza di un massimo nella capacità rende inutili, ai fini della stessa, velocità maggiori di un certo valore. La velocità a cui corrisponde la massima capacità può definirsi, per analogia con il deflusso stradale, velocità critica v<sub>c</sub>; a differenza del caso stradale però, la velocità critica non separa il ramo stabile della curva di deflusso dal ramo instabile che, come è noto, esiste nei sistemi a densità controllata.

Il valore della velocità critica v<sub>c</sub> si ottiene ponendo

$$4 * v^2 = 5 \text{ per cabinovie e seggiovie monoposto}$$

$$7 * v^2 = 10 \text{ per cabinovie e seggiovie biposto}$$

da queste si ricava

$$v_c = (5/4)^{1/2} = 1,12 \text{ m/s per cabonovie e seggiovie monoposto (7)}$$

$$v_c = (10/7)^{1/2} = 1,20 \text{ m/s per cabonovie e seggiovie biposto (8)}$$

in corrispondenza di questi valori della velocità si raggiunge la capacità massima dell'impianto che vale

$$C_{max} = 805 \text{ pass./h per cabonovie e seggiovie monoposto (9)}$$

$$C_{max} = 860 \text{ pass./h per cabonovie e seggiovie biposto (10)}$$

La maggiore capacità massima consentita dagli impianti biposto è quindi, a parità delle altre condizioni, solo del 7% maggiore di quella relativa ai monoposto; questi ultimi presentano indubbi vantaggi di ordine statico per la migliore distribuzione dei carichi sulla fune, ma il gradimento dell'utenza è certamente maggiore nei confronti degli impianti biposto.

### 3. Gli impianti a moto alternato

In questo tipo di impianti, essendoci solo due cabine, il distanziamento temporale fra l'arrivo in stazione di una cabina e l'arrivo dell'altra è dato dalla somma di tre tempi: un tempo di marcia (tr) che sarebbe sufficiente a percorrere la linea se si marciasse sempre a velocità costante, cioè se non esistessero le fasi di avviamento e di arresto, un tempo di marcia aggiuntivo (ta) per tenere conto della presenza di queste fasi di moto, assunto uniformemente accelerato per semplicità di trattazione, e un tempo di sosta in stazione (ts); quindi

$$d = tr + ta + ts \tag{11}$$

pertanto, essendo come già detto

$$H = 1/d$$

la (3) assume la forma

$$C = 3600 * n/d$$

$$C = 3600 * n / (tr + ta + ts) \tag{12}$$

È possibile esplicitare sotto certe ipotesi i termini in parentesi come segue.

- Il tempo (tr), per come è stato definito, è dato da

$$tr = L/v \tag{13}$$

• Per quanto attiene al tempo connesso alle fasi di accelerazione (ta), esso altro non è che la differenza fra il tempo effettivo impiegato a percorrere la linea ed il tempo che sarebbe stato necessario se non ci fossero state le fasi di moto vario cioè se la velocità si fosse mantenuta costante o l'accelerazione fosse stata infinita. Poiché inoltre, in ogni viaggio si hanno due fasi di moto vario (ta<sub>1</sub>) e (ta<sub>2</sub>) (rispettivamente all'avviamento e all'arresto) a cui compete solitamente la stessa accelerazione media, possiamo scrivere

$$ta = ta_1 + ta_2$$

$$ta_1 = ta_2 = tv - tc$$

dove:

$t_v$  = tempo di durata della fase di accelerazione durante la quale le cabine percorrono lo spazio  $s_a$ ;

$t_c$  = il tempo necessario a percorrere lo spazio di accelerazione ( $s_a$ ) a velocità costante ( $v$ ).

Dalla cinematica si ricava

$$t_v = v/a$$

$$s_a = v^2/(2 * a)$$

$$t_c = s_a/v = v/(2 * a)$$

quindi per ogni fase di moto vario vale la relazione

$$t_{a1} = t_{a2} = t_v - t_c = v/(2 * a)$$

e complessivamente per ciascun viaggio ( $t_a$ ) vale

$$t_a = t_{a1} + t_{a2} = v/a \tag{14}$$

• Il tempo necessario al carico e scarico è direttamente proporzionale al numero di passeggeri da movimentare e quindi alla capienza ( $n$ ) delle vetture e inversamente proporzionale alla dimensione e al numero delle porte della vettura che determinano il numero di passeggeri che possono entrare o uscire dalla vettura nello stesso istante. Pertanto considerando un tempo medio di movimentazione di (1 s) per ciascun passeggero su ogni varco e tenendo presente che ad ogni posto in cabina corrispondono un passeggero che sale ed uno che scende, è possibile scrivere

$$t_s = 2 * n/p \tag{15}$$

essendo ( $p$ ) il numero di varchi ossia il prodotto del numero delle porte che si aprono contemporaneamente e del numero di passeggeri di cui ciascuna porta consente il passaggio contemporaneo.

Per quanto detto è possibile scrivere

$$C = 3600 * n / (L/v + v/a + 2 * n/p) \tag{16}$$

La capacità così espressa è quella per ciascun senso di marcia nel caso comune in cui le cabine siano due; infatti ad ogni viaggio arriva una cabina a ciascuna stazione. Qualora esista una sola cabina, come accade negli ascensori, tale capacità è da considerarsi complessiva nei due sensi di marcia; in tal caso infatti, nell'ipotesi di un impianto avente solo due fermate di estremità, perché l'unica cabina ritorni alla fermata di partenza, è necessario che la stessa percorra la linea due volte, una in andata e una in ritorno.

Per la (15), il rapporto ( $n/p$ ) presente al denominatore della (16) ha la dimensione di un tempo, appunto il tempo di sosta necessario per lo sbarco e l'imbarco dei passeggeri.

Lo studio della (16) consente di valutare la capacità di un impianto a fune a due cabine a moto alternato, sia esso aereo o terrestre, in funzione dei parametri in gioco.

Considerando variabile solo la capienza delle cabine ( $n$ ) si può graficizzare la (16) come in figura 2.

È possibile notare come la capacità è funzione non lineare della capienza delle cabine in condizione di costanza

Impianto a moto alternato:  
 $C = C(n)$  per differenti valori di  $L$ .

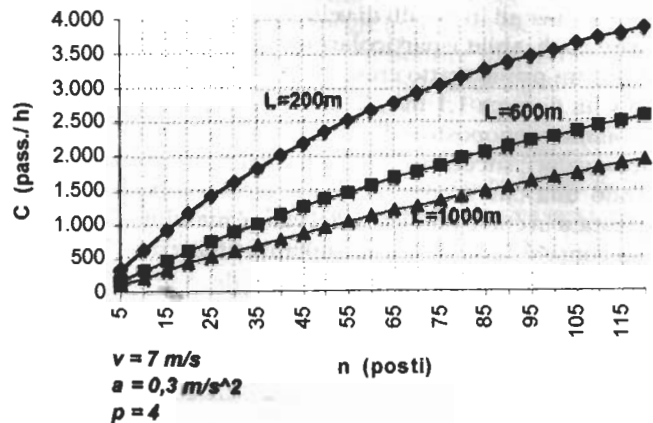


Fig. 2 -  $C = C(n)$ ; influenza della capienza ( $n$ ) delle cabine sulla capacità ( $C$ ) per senso di marcia del sistema, a pari numero dei varchi ( $p$ ) e per differenti valori della lunghezza ( $L$ ) dell'impianto.

del numero dei varchi, ossia del numero di porte della cabina. La curva presenta una concavità verso il basso sensibile solo per impianti di lunghezza molto ridotta, in quanto per questi ultimi il tempo di sosta ( $t_s$ ) in stazione per l'effettuazione del carico e scarico dei passeggeri può impegnare una parte rilevante del tempo di giro se si è in presenza di cabine capienti ma sprovviste di un numero adeguato di porte.

La graficizzazione della  $C = C(n)$  per differenti valori della velocità di viaggio a regime (figura 3), conferma l'andamento non lineare della funzione sebbene in modo meno evidente che nello studio precedente.

Impianto a moto alternato:  
 $C = C(n)$  per differenti valori di  $v$

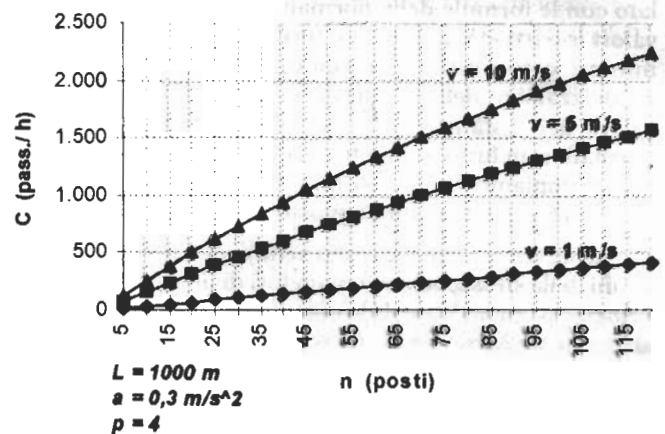


Fig. 3 -  $C = C(n)$ ; influenza della capienza ( $n$ ) delle cabine sulla capacità ( $C$ ) per senso di marcia del sistema, a pari numero dei varchi ( $p$ ) e per differenti valori della velocità ( $v$ ).

Interessanti risultano gli andamenti della capacità (C) in funzione della capienza delle cabine (n) per valori costanti del rapporto (n/p = capienza/varchi). Infatti è pensabile che una buona progettazione delle cabine consenta di avere un numero di porte proporzionato alla capienza così da contenere i tempi di incarrozzamento. È da rilevare una elevata incidenza del rapporto (n/p) sulla capacità per impianti di limitata lunghezza (figura 4).

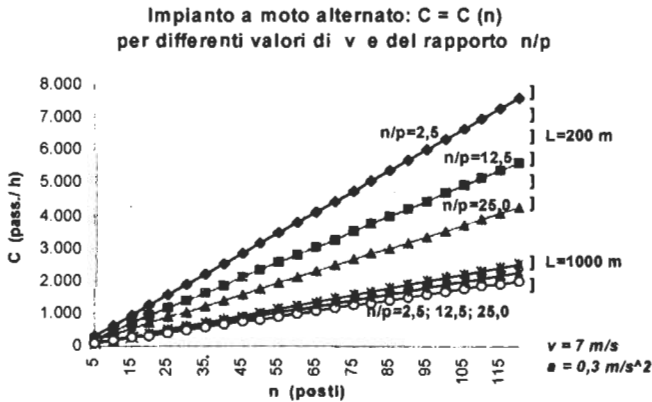


Fig. 4 - C = C (n); influenza della capienza (n) delle cabine sulla capacità (C) per senso di marcia del sistema, per differenti valori della velocità e del rapporto (n/p = capienza/numero di varchi).

In questo caso, rimanendo costante il tempo di sosta al crescere della capienza, la capacità è funzione lineare di quest'ultima grandezza.

L'andamento della capacità (C) al variare della velocità è invece più complesso e certamente non lineare come risulta più evidente trasformando la (16) nella

$$C = 3600 * n * v / (L + v^2/a + 2 * n * v/p) \quad (17)$$

Nella (17) infatti, (v) compare alla prima potenza e al quadrato rispettivamente al numeratore e al denominatore; ha senso pertanto la ricerca di un punto di massimo per la funzione C=C (v).

$$dC/dv = 3600 * n * (L - v^2/a) / (L + v^2/a + 2 * n * v/p)^2$$

Essendo il denominatore > 0, la derivata prima (dC/dv) è positiva per valori di (L), (v), ed (a) tali che risulti

$$L > v^2/a \quad (18)$$

e pertanto, per valori delle variabili in gioco che soddisfano tale disequazione, la funzione C=C (v) è crescente; è decrescente in caso contrario. Per quanto si dirà più avanti, il tratto crescente della curva è il solo tratto reale, in quanto il tratto discendente corrisponde a valori della velocità irraggiungibili per gli assegnati valori dell'accelerazione e della lunghezza della linea.

Ponendo poi la (dC/dv) = 0 si ottiene l'equazione

$$L - v^2/a = 0$$

da cui si ricava il valore della velocità in corrisponden-

za della quale si realizza la massima capacità del sistema e che, mutuando la terminologia dalla teoria del deflusso stradale, è possibile chiamare velocità critica (vc)

$$v_c = (a * L)^{1/2} \quad (19)$$

La capacità del sistema che si realizza in corrispondenza della velocità critica (vc) si ottiene dalla (16) o dalla (17) sostituendo il valore della velocità critica.

$$C_{max} = 3600 * n / [2 * [(L/a)^{1/2} + n/p]] \quad (20)$$

La rappresentazione grafica della C=C (v) riportata in figura 5 conferma quanto ricavato analiticamente.

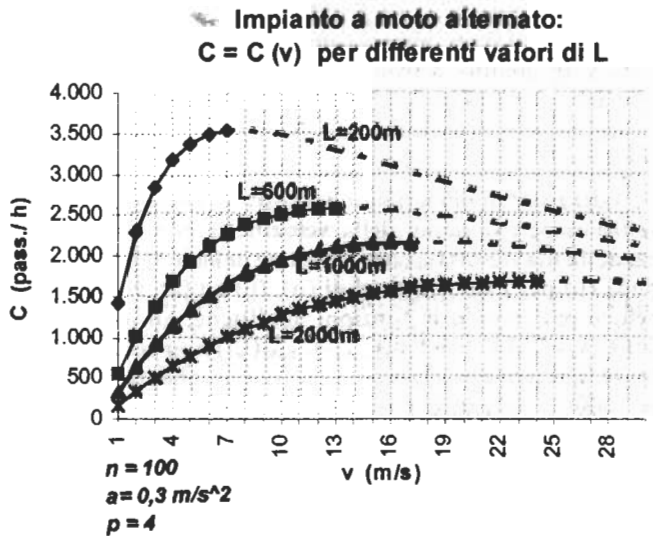


Fig. 5 - C = C (v); influenza della velocità (v) sulla capacità (C) per senso di marcia del sistema, per differenti valori della lunghezza (L) dell'impianto.

La presenza di un massimo nella capacità in corrispondenza di un determinato valore della velocità scaturisce dall'aver assunto costante il valore dell'accelerazione media nelle fasi di moto vario (avvio ed arresto). Ciò comporta che più è alta la velocità di regime maggiore è la durata delle fasi di moto vario. In altri termini esiste un valore della velocità di regime in corrispondenza del quale il diagramma del moto (tempo-velocità) da trapezoidale diventa triangolare annullando la fase di moto uniforme (a regime). Questo valore, che corrisponde alla velocità critica data dalla (19), rappresenta la massima velocità di regime raggiungibile per dati valori dell'accelerazione di avviamento e frenatura e della lunghezza della linea.

D'altronde il valore delle accelerazioni trova dei limiti ben precisi nella necessità di garantire la sicurezza e il comfort anche ai passeggeri che viaggiano in piedi. Comunque è da tenere presente che l'essere sospesi nel vuoto rende i passeggeri psicologicamente più sensibili nei confronti delle accelerazioni sia orizzontali che verticali.

Anche nel caso degli impianti a moto alternato, come

per quelli a moto continuo, la velocità critica  $v_c$ , benché sia la velocità di flusso massimo, differisce dall'analogo termine usato nel campo stradale in quanto non divide la curva di deflusso in un ramo stabile ed uno instabile. Per gli impianti a moto alternato, a differenza anche di quanto accade per gli impianti a moto continuo, la velocità critica è proprio la velocità massima che le cabine possono raggiungere per determinati valori della lunghezza della linea e dell'accelerazione attribuita alle fasi di moto vario. Pertanto il valore dato dalla (19) divide la curva  $C=C(v)$  in un tratto reale e naturalmente stabile, che va da 0 a  $v_c$ , ed uno immaginario in quanto rappresentativo di valori della velocità irraggiungibili.

L'andamento della  $C=C(v)$  rende evidente la convenienza a mantenersi almeno un po' al di sotto della velocità critica, in quanto, a fronte di una capacità leggermente inferiore di quella massima, si ottiene una sensibile riduzione dei costi di esercizio relativamente alle voci energia e manutenzioni.

I diagrammi della figura 6 mostrano l'andamento ed i valori rispettivamente della velocità critica ( $v_c$ ) e della capacità massima ( $C_{max}$ ) in funzione della lunghezza della linea ( $L$ ) per i valori fissati di ( $n$ ), ( $p$ ) ed ( $a$ ): come già si evince osservando le funzioni analitiche, gli andamenti della [ $v_c=v_c(L)$ ] e della [ $C_{max}=C_{max}(L)$ ] non sono lineari. Dalla figura 6 si nota peraltro che per lunghezze superiori ai 1000 m, con un'accelerazione di 0,3 m/s<sup>2</sup>, la velocità critica supera i valori fino ad oggi raggiungibili nei trasporti a fune e quindi in questi casi il problema della capacità massima non si pone nella pratica.

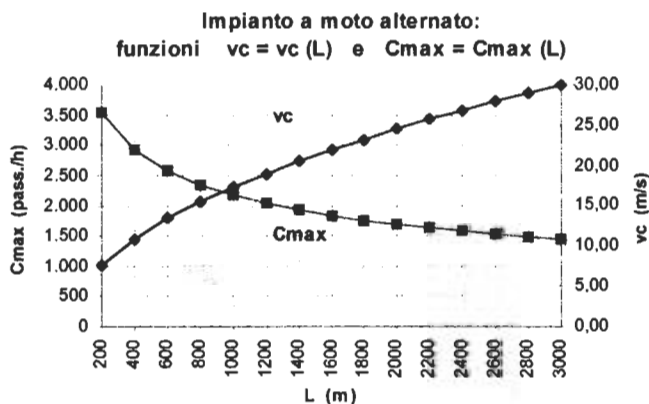


Fig. 6 -  $v_c = v_c(L)$   $C_{max} = C_{max}(L)$ ; influenza della lunghezza della linea ( $L$ ) sulla velocità critica e sulla capacità massima per un impianto a fune a moto alternato.

4. Gli ascensori in servizio di estremità

Ai fini del calcolo della capacità è possibile assimilare gli ascensori in servizio di estremità alle funicolari aeree o terrestri a moto alternato; pertanto le formule sopra esposte possono applicarsi anche agli ascensori tenendo presente che questi ultimi hanno una sola cabina anziché due.

Ne consegue che fra un arrivo dell'unica cabina ed il successivo alla stessa stazione deve trascorrere un tempo tale da consentire alla cabina stessa di percorrere due volte la linea (in andata e ritorno) e di effettuare due volte le operazioni di carico e scarico, una in ciascuna stazione.

La capacità espressa dalla (16) è valida anche per gli ascensori con l'accortezza di considerarla complessiva nei due sensi di marcia, anziché per ciascun senso come quando la si riferisce alle funicolari aeree o terrestri. In alternativa la formula che esprime la capacità per ciascun senso di marcia negli ascensori può ricavarsi direttamente dalla (16) semplicemente raddoppiando il termine al denominatore che è rappresentativo del distanziamento temporale.

$$C = 3600 * n / \{2 * (L/v + v/a + 2 * n/p)\} \tag{21}$$

Nella (21) non è portato in conto il tempo di apertura e chiusura delle porte. Quest'ultimo si aggira intorno ad 1 s per ogni azionamento, se si tratta di porte che consentono il passaggio di una persona per volta, ma è maggiore per porte più grandi, dato che la normativa impone che la velocità di apertura e chiusura delle porte automatiche degli ascensori non superi il valore di 0,3 m/s. Il tempo di azionamento delle porte, che è trascurabile per gli impianti funiviari dove il tempo di sosta in stazione è comunque una parte molto piccola del tempo di viaggio, può incidere sensibilmente negli impianti di ascensore che presentano una via di corsa molto breve. Nella formulazione proposta, per semplicità si è considerato tale tempo compreso nel tempo di incarozzamento dei passeggeri introducendo così un'approssimazione tanto più vicina alla realtà quanto maggiore è il tempo di viaggio rispetto al tempo di sosta della cabina in stazione, ovvero quanto più grande è il tempo necessario ad effettuare il carico e scarico dei passeggeri.

Con lo stesso procedimento adottato per le funicolari si può ricavare la velocità critica e la capacità massima. La velocità critica è identica a quella degli impianti funicolari, e come per quest'ultimi, rappresenta la massima velocità raggiungibile; la capacità massima è invece la metà di quella calcolata per le funicolari.

$$v_c = (a * L)^{1/2} \text{ (identica alla (19))} \tag{22}$$

$$C_{max} = 3600 * n / \{4 * [(L/a)^{1/2} + n/p]\} \tag{23}$$

La graficizzazione della (22) e della (23) riportate in figura 7 dà l'ordine di grandezza delle velocità critiche (cioè massime) e dei corrispondenti valori massimi della capacità che un ascensore può raggiungere per differenti lunghezze della via di corsa ( $L$ ).

La figura 8 evidenzia come, all'aumentare della capienza della cabina ( $n$ ), la capacità dell'impianto cresce sempre meno velocemente quanto minore è la lunghezza della corsa ( $L$ ); infatti le curve [ $C = C(n)$ ] relative a diverse combinazioni di ( $L$ ) e ( $v$ ) presentano concavità verso il basso.

Il fenomeno, già rilevato per le funicolari, è più evidente negli ascensori che presentano generalmente lunghezze

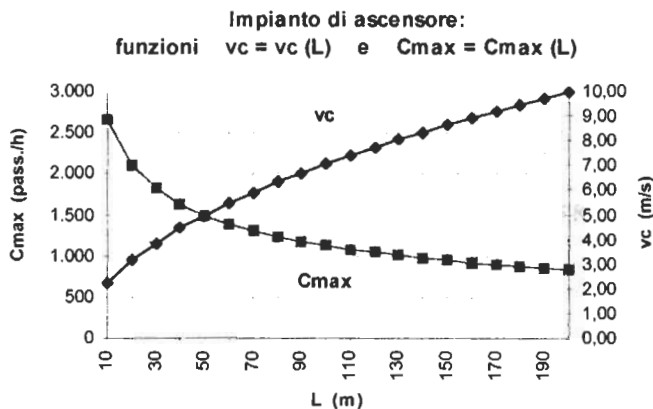


Fig. 7 -  $v_c = v_c(L)$   $C_{max} = C_{max}(L)$ ; influenza della lunghezza della linea (L) sulla velocità critica e sulla capacità massima per un ascensore da 21 posti (portata = 1.600 kg) con due porte ad apertura contemporanea da un passeggero l'una (o con una porta da due passeggeri) [n = 21 p = 2], avente accelerazione media  $a = 0,5 \text{ m/s}^2$  ( $a_{max} = 1,0 \text{ m/s}^2$ ).

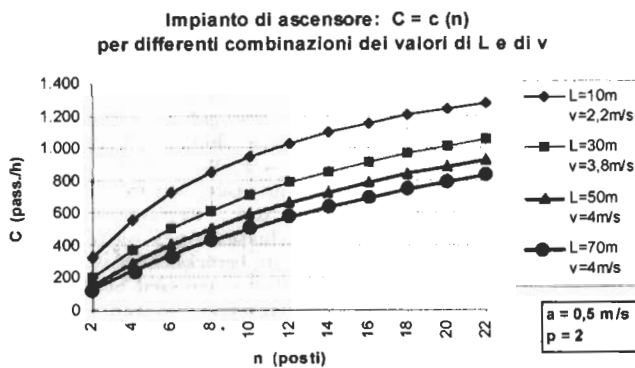


Fig. 8 -  $C = C(n)$ ; influenza della capienza (n) delle cabine sulla capacità (C) per senso di marcia del sistema a pari numero dei varchi (p) per diversi valori della lunghezza del percorso (L) e con velocità (v) differenti.

della via di corsa (L) molto più contenute ed è causato dalla maggiore incidenza che in questo tipo di impianti ha il tempo di sosta in stazione rispetto al tempo di marcia. Ne consegue che un aumento della capienza della cabina (n) senza un proporzionale incremento del numero di varchi rende meno efficace il provvedimento relativamente alla capacità raggiungibile. Se ne trae in sostanza l'importanza che il numero delle porte e la loro dimensione hanno sulla capacità dell'impianto, soprattutto in presenza di una via di corsa molto ridotta che generalmente compete agli impianti di ascensori in servizio pubblico urbano.

5. Considerazioni complessive

Lo studio delle curve di deflusso dei diversi sistemi funicolari consente di mettere in evidenza l'influenza, sulla capacità e sulla velocità massima, di vincoli imposti

all'esercizio dalle caratteristiche proprie dei diversi impianti e dalle norme in vigore.

Di un certo rilievo è l'andamento della curva di deflusso per gli impianti a moto continuo. Per essi infatti le norme impongono un distanziamento minimo, da calcolarsi in funzione della velocità di esercizio, ma che non può essere comunque inferiore ad un valore minimo di soglia. Ciò comporta che il distanziamento deve essere mantenuto costante per l'intervallo di velocità in corrispondenza delle quali, dalla formula dettata dalla normativa, scaturisce un valore del distanziamento inferiore al valore minimo di soglia; al contrario, per velocità superiori, il distanziamento aumenta con il quadrato della velocità (fatta eccezione per le sciovie). L'applicazione di questi vincoli dà luogo ad una curva di deflusso che per il primo tratto è rettilinea come nei sistemi a densità controllata in fase di esercizio (a densità costante) e nel secondo tratto è di tipo parabolico discendente tipico dei sistemi a densità controllata in fase di progetto e dei sistemi a densità libera. Peraltro i valori di soglia del distanziamento imposti dalle norme per gli impianti monoposto e biposto fanno risultare uguale la capacità dei due sistemi lungo il primo tratto del diagramma.

Le elaborazioni svolte relativamente ai sistemi funicolari in moto alternato, nei quali rientrano anche le ferrovie funicolari e, con le differenze evidenziate, gli ascensori in servizio di estremità, hanno mostrato l'influenza, sulla capacità, di alcuni parametri specifici e delle modalità di esercizio. Infatti la funzione della curva di deflusso dei viaggiatori [ $C=C(v)$ ] che, per effetto del distanziamento costante, ci si sarebbe aspettata lineare secondo la teoria del deflusso applicata in sede di esercizio ai sistemi a densità controllata, presenta invece un andamento pressoché parabolico per effetto dell'incidenza sempre maggiore delle fasi di moto vario all'aumentare della velocità di esercizio. Tale andamento evidenzia l'esistenza, a parità degli altri parametri, di un valore massimo per la capacità e per la velocità raggiungibile, oltre il quale la curva di deflusso presenta un ramo decrescente e comunque irreali in quanto corrispondente ad un intervallo di velocità fisicamente non raggiungibili.

Una riflessione sui valori raggiunti dalla capacità per i diversi campi di velocità, lunghezza della linea, capienza e numero di varchi delle cabine permette di percepire la sensibilità delle funzioni esaminate rispetto a questi parametri relativamente agli impianti di trasporto a fune, delineando un approccio metodologico sintetico al problema della progettazione preliminare del sistema.

BIBLIOGRAFIA

- [1] E. CASCETTA, A. NUZZOLO, *Un modello analitico per il calcolo della capacità di circolazione di linee ferroviarie*, Ingegneria Ferroviaria n. 2/1980;
- [2] F. CORRIERE, *Potenzialità e regolarità di esercizio nelle linee ferroviarie*, Ingegneria Ferroviaria n. 1-2/1984;



- [3] P. D'ARMINI, *Elementi di progetto per impianti a fune*, E.S.A. editrice, Roma 1981;
- [4] M. DI GANGI, A. NUZZOLO, *Un modello di deflusso per linee di trasporto collettivo* in NUZZOLO, RUSSO, "Metodi e modelli per la pianificazione e la gestione dei sistemi di trasporto collettivo", Franco Angeli, collana Trasporti, 1995;
- [5] D. MAROCCHI, *Trasporti a fune*, Editore Levrotto & Bella, 1992;
- [6] G.F. NEWELL, *Unstable brownian motion of a bus trip*, in "Statistical mechanics and statistical methods in theory and application", Plenum Press, 1977.
- [7] A. RECUPITO, *I trasporti a fune*, Editore Masson, 1983.

Sommaire

LA THEORIE DU REFLUX DANS LES TRANSPORTS A CABLE

La théorie du reflux étudie la fonction de production de tous les systèmes de transport, soit à densité libre soit à densité contrôlée, et donne lieu, dans les deux cas, à des marches différentes des courbes flux-vitesse. Si dans l'étude du reflux dans un système à densité contrôlée on tient compte que quelques paramètres de l'exploitation varient avec des lois bien précises et que de toute façon ils doivent être contenus dans le domaine de valeurs établies par des règles spécifiques ou définies par les caractéristiques intrinsèques du système, on peut obtenir des courbes de reflux réelles très différentes, pour valeur et marche, des courbes théoriques.

Cette étude aborde sous cette vision les systèmes de transport à câble qui, comme il est notoire, sont à densité contrôlée intrinsèquement et qui, pour cette raison, présentent une rigidité d'exploitation élevée. En particulier on spécialise l'équation générale du reflux pour ces systèmes, dans le respect des valeurs imposées à l'espacement, aussi bien par les règles constructives et d'exploitation que par les caractéristiques des systèmes au fur et à mesure examinés. Ces derniers ont été divisés, pour clarté d'exposition, en trois catégories: les installations à mouvement continu (cabines et télésièges à attelage permanent et temporaire), les installations à mouvement alterné (téléfériques classiques et chemins de fer funiculaires) et les ascenseurs en service d'extrémité. Ces derniers, essentiellement situés parmi les installations à câble à mouvement alterné, présentent toutefois quelques spécificités non négligeables par rapport à l'étude du reflux.

Summary

THE FLOW THEORY IN CABLE TRANSPORTS

The flow theory studies the production function of all the transport systems, both of free and controlled density, and leads, in the two cases, to different trends of the flow-speed curves. If the flow study of a controlled density system takes into account that some operation parameters vary according to definite laws and must in any case be contained within ranges of values established by specific regulations or defined by the characteristics inherent to the system, then it is possible to obtain real flow curves which are very different, as regards values and trend, from the theoretic ones.

The present article studies from this angle the cable transport systems which are notoriously, of intrinsically controlled density and present therefore a high operating rigidity. In particular, the study defines the general flow equation for these systems, in observance of the values assigned for distance keeping, both by the constructing and operating regulations and by the characteristics of the systems which are studied. These have been divided, for a clearer description, into three categories: the continuous motion systems (cableways and chairlifts with permanent or temporary catching), the alternate motion systems (classic cableways and funiculars) and the terminal service lifts. The latter, which can be included in the alternate motion cable systems, present however some peculiarities that cannot be neglected in a flow study.

Zusammenfassung

DIE THEORIE DES BEFÖRDERUNGSFLUSSES BEI SEILBETRIEBENEN TRANSPORTMITTELN

Die Theorie des Beförderungsflusses untersucht die Produktionsleistung der Transportsysteme, unabhängig davon, ob es sich um Transportmittel mit freier oder begrenzter Beförderungsdichte handelt, wobei sich in diesen beiden Fällen ein unterschiedlicher Verlauf der Kurve Beförderungsfluss-Geschwindigkeit ergibt. Wenn bei der Betrachtung des Beförderungsflusses eines Systems mit begrenzter Dichte berücksichtigt wird, dass sich gewisse Betriebsgrößen nach ganz bestimmten Gesetzen verändern bzw. innerhalb von Grenzen gehalten werden müssen, die durch spezifische Vorschriften oder durch systemeigene Charakteristiken festgelegt sind, erhält man tatsächliche Fließkurven, die sowohl im Wert als auch im Verlauf von den theoretischen stark abweichen.

Die vorliegende Studie befasst sich unter diesem Gesichtspunkt mit den seilbetriebenen Transportmitteln, die ja bekanntlich eine begrenzte Beförderungsdichte haben und daher im Betrieb hochgradig unflexibel sind. Insbesondere wird die allgemeine Fließgleichung für diese Systeme spezialisiert, wobei die durch konstruktive und betriebliche Normen sowie durch die jeweiligen Systemeigenschaften bedingten Werte für die Verkehrsabstände eingehalten werden. Die Systeme selbst wurden zur besseren Klarheit der Darstellung in drei Kategorien eingeteilt: Anlagen in kontinuierlicher Bewegung (Kabinenbahnen und Sessellifte in ständigem oder zeitweisem Eingriff), Anlagen mit alternierender Bewegung (klassische Seilschwebebahnen und Standseilbahnen) und Aufzüge zwischen zwei Endpunkten. Letztere sind im wesentlichen unter die Anlagen mit alternierender Bewegung einzureihen, weisen jedoch einige Besonderheiten auf, die beim Studium des Beförderungsflusses nicht vernachlässigt werden können.