POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Automated People Movers with rope traction: engineering and modelling an innovative hybrid solution to optimise energy use / Automated People Mover con trazione a fune:

*Original*
Automated People Movers with rope traction: engineering and modelling an innovative hybrid solution to optimise energy use / Automated People Mover con trazione a fune: progettazione e modellizzazione di una soluzione ibrida innovativa finalizzata al risparmio energetico / Affatato, M., Blengini, S., DALLA CHIARA, B., Ermanno, V.. - In: INGEGNERIA FERROVIARIA. - ISSN 0020-0956. - STAMPA. - LXX:11(2015), pp. 901-923.

*Availability:*
This version is available at: 11583/2648863 since: 2016-09-14T09:46:07Z

*Publisher:*
CIFI

*Published*
DOI:

*Terms of use:*

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

*Publisher copyright*

(Article begins on next page)

14 October 2026

02_IF_11_2015 pag_901_926__ 07/12/15 09:17 Pagina 901



# Automated People Mover con trazione a fune: progettazione e modellizzazione di una soluzione ibrida innovativa finalizzata al risparmio energetico

## *Automated People Movers with rope traction: engineering and modelling an innovative hybrid solution to optimise energy use*

*Ing. Mauro* AFFATATO[(*)(**)]
*Ing. Sergio* BLENGINI[(*)]
*Prof. Bruno* DALLA CHIARA[(**)]
*Ing. Ermanno* VAIR[(*)]

**Sommario -** Agli inizi del XXI secolo, vari studi scientifici misero in luce l'insostenibilità dell'utilizzo massiccio dei combustibili fossili quale fonte globale principale di energia e ciò condusse le organizzazioni pubbliche internazionali ad avviare vari progetti intesi a contenere le emissioni di gas serra risultanti. In questo contesto, i cosiddetti *Automated People Mover* possono svolgere un ruolo importante, trattandosi di sistemi di trasporto ad automazione integrale che operano su una sede fissa - o ad impianto fisso - lungo la quale i veicoli possono essere movimentati da una o più funi in acciaio. Questa caratteristica consente di costruire veicoli più leggeri a minor consumo energetico in virtù dell'assenza di elementi di propulsione, di trasmissione e di accumulo di energia a bordo, con un conseguente alleggerimento degli elementi strutturali. L'utilizzo di energia elettrica per alimentare questi sistemi di trasporto consente d'impiegare fonti energetiche che non dipendono necessariamente dal petrolio.

L'aspetto energetico è stato analizzato utilizzando un modello originale di simulazione, sviluppato con *MATLAB®*, in cui si sono considerate diverse variabili, compreso il fattore di carico del veicolo.

I risultati, espressi in termini di *gep/(pass·km)*[(1)], sono stati confrontati con il consumo energetico specifico di sistemi alternativi per il trasporto urbano, conformemente alla letteratura tecnica più recente.

***Summary -*** *At the beginning of the 21st century, several scientific studies drew attention to the unsustainability of the massive use of fossil fuels as the main global source of energy and this led to international public organisations starting numerous projects aimed at containing the resulting greenhouse gas emissions. In this context,* Automated People Movers *can play an important role, as they are fully automated transport systems operating on a fixed track, along which the vehicles can be pulled by one or more steel wire ropes. This feature makes it possible to manufacture lighter and* less energy consuming *vehicles because of the on-board absence of propulsion, transmission and energy accumulation elements, with a consequent lightening of the structural parts. The use of electric energy to power these transport systems makes it possible to take advantage of energy sources that are not necessarily black-oil dependent.*

*The energy aspect has been analysed using an original simulation model, developed with* MATLAB®, *in which several variables, including the vehicle load factor, have been considered.*

*The results, expressed in terms of* gep/(pass·km)[(1)], *have been compared with the specific energy consumption of alternative urban transit systems, according to the most recent technical literature.*

(*) Dimensione Ingenierie Srl.

(**) Politecnico di Torino, Ingegneria, Dipartimento DIATI - Sistemi di Trasporto.

(1) *gep* sta per *equivalent grams of petroleum ("grammi equivalenti di petrolio"),* che è un'unità di misura per il consumo energetico; *1 gep ≈ 5.35 Wh.*

(*) *Dimensione Ingenierie srl.*

(**) *Politecnico di Torino, Engineering, Dept. DIATI-Transport systems.*

(1) gep *stands for* equivalent grams of petroleum ("grammi equivalenti di petrolio"), *which is a measurement unit for energy consumption;* 1 gep ≈ 5.35 Wh.

02_IF_11_2015 pag_901_926__ 07/12/15 09:17 Pagina 902



## 1. Premessa

L'elevato livello di automazione che può essere ottenuto mediante gli impianti di trasporto a fune consente intervalli tra i veicoli anche molto brevi, che possono essere variati durante l'esercizio, e perciò permette di sincronizzare i flussi dei veicoli per meglio soddisfare la domanda di mobilità giornaliera. Su questa base, considerando anche le linee guida più recenti sulla progettazione e l'esercizio di sistemi di trasporto persone ad automazione integrale con trazione a fune - o *Automated People Mover* (APM) a fune - richiamate qui di seguito, è possibile progettare soluzioni innovative al fine di ridurre il consumo specifico di energia nel settore del trasporto pubblico.

Nel 2011 la *Commissione Europea* redigette il cosiddetto *Transport 2050,* nel quale sono illustrati provvedimenti per ridurre la dipendenza dal monopolio del petrolio grezzo e si promuovono anche soluzioni innovative per contenere le emissioni d $CO_2$ riguardanti il settore dei trasporti. Fin dagli anni ottanta del secolo scorso, il petrolio e le emissioni di $CO_2$ rappresentano una delle cause principali dell'inquinamento dell'aria [11], oltre ad essere associati al consumo, da parte dei trasporti, di circa la metà del petrolio grezzo estratto nel mondo.

Per quanto riguarda i sistemi di trasporto pubblico, la maggior parte dei *fattori* che influenzano il consumo energetico, pertanto le emissioni, riguardano soprattutto i veicoli, le loro prestazioni e la progettazione delle loro linee [9] [21], una volta stabiliti la distanza da coprire o il loro tempo di utilizzo. Questi fattori attengono a:

- il tipo di propulsione adottato per la trazione dei veicoli (motore a combustione interna o MCI a bordo; motore elettrico rotativo o lineare, a bordo; con funi d'acciaio traenti o portanti traenti, non a bordo) e per la linea;
- la massa dei veicoli e l'inerzia delle componenti dell'impianto, così pure le loro relative dimensioni ed aerodinamica;
- parametri di prestazione, ovvero accelerazione e massima velocità;
- la capacità ed il fattore di carico dei veicoli;
- lo stile di guida, nel caso in cui vi sia un conducente o macchinista;
- *sistemi di trasporto intelligenti* (con riferimento qui alla sincronizzazione semaforica al transito dei veicoli con priorità, alla gestione di flotte, ai supporti informativi) nel caso in cui tali sistemi di trasporto possano di fatto usufruire di applicazioni ICT.

Altri aspetti possono anche influenzare il consumo energetico dei sistemi di trasporto; questi dipendono essenzialmente della *programmazione* del servizio. Si tratta tuttavia di variabili che non possono essere modificate in modo significativo poiché sono vincolate a soddisfare i volumi di traffico nelle ore del giorno, preventivamente definiti, ed a garantire un livello di servizio adeguato o minimo.

## *1. Introduction*

*The high level of automation that can be reached by rope transport installations enables very short headways, which can be varied during operation, to be obtained and therefore allows vehicle flows to be fine-tuned in order to better satisfy the daily mobility demand. On this basis, and considering the most recent guidelines on APM engineering and operation - hereafter recalled - it is possible to design innovative solutions with the aim of reducing the specific energy consumption in the public transport sector.*

*In 2011, the* European Commission *drew up the so-called* Transport 2050, *in which measures to reduce the dependence on the monopoly of black oil were illustrated, and innovative solutions to contain $CO_2$ emissions related to the transport sector were promoted. Since the Eighties black oil and $CO_2$ emissions have represented one of the main causes of air pollution [11], besides being associated with the consumption of approximately half of the world's extracted black oil used for transportation.*

*As far as public transport systems are concerned, most of the* factors *that affect energy consumption – and therefore emissions - are mainly related to vehicles, their performances and to the design of their lines [9] [21], once the travelled distance or their time of usage have been fixed. These factors pertain to:*

- *the type of the powertrain adopted for the traction of the vehicles (Internal Combustion Engine or ICE, on-board; rotating or linear electric motor, on-board; with hauling or carrying-hauling steel ropes, out-board) and for the track;*
- *the mass of the vehicles and the inertia of the components of the system, as well as their related dimensions and aerodynamics;*
- *performance parameters, namely acceleration and the maximum speed;*
- *the capacity and load factor of the vehicles;*
- *driving style, for the case in which there is a driver;*
- intelligent transport systems *(here referring to the synchronisation of transit with traffic lights, fleet management, information supports) in the case of those public transport systems that can take advantage of ICT applications.*

*Other aspects can also affect the energy consumption of transport systems; these are essentially dependant on service* scheduling. *However, these are variables that frequently cannot be modified significantly since they are constrained to satisfy previously defined volumes of traffic in the daytime and to guarantee an adequate or a minimum level of service.*

*These considerations point out the necessity of investing in the innovation of transport systems, as well as in their regular maintenance, considering alternative modes of transport [1] [7] [9]. This assumption has led to the so-*

02_IF_11_2015 pag_901_926__ 07/12/15 09:17 Pagina 903



Queste condizioni evidenziano la necessità d'investire nell'innovazione dei sistemi di trasporto, ed anche nella loro regolare manutenzione, tenendo in considerazione modalità alternative di trasporto [1] [7] [9]. Queste ipotesi hanno indotto a prendere in considerazione i cosiddetti *Automated People Mover* (*APM*), con un'attenzione crescente negli anni più recenti. Secondo le *Norme tecniche APM Standards – ASCE,* gli APM sono [3]: "Sistemi interamente automatizzati ad impianto fisso, operanti su distanze brevi o medie, i cui veicoli possono trasportare da qualche decina a qualche centinaia di passeggeri"; gli *Automated People Mover a fune* (cable-APM) sono *APM* con la caratteristica particolare per cui i veicoli sono trainati da una o più funi d'acciaio, alle quali sono collegati o ammorsati in modo permanente o temporaneo, invece di procedere per auto-propulsione.

Secondo le linee guida italiane per la progettazione degli APM[2], un APM è un sistema di trasporto ad automazione integrale, accessibile al pubblico, caratterizzato da veicoli che operano su vie di transito riservate, con pendenza e tortuosità variabili; quando si ha a che fare con un APM a fune, la trazione dei veicoli è affidata a uno o più anelli, che normalmente hanno lungo la linea una velocità fino a 12 m/s, che può essere oltrepassata in applicazioni specifiche, per servizi a navetta; altrimenti fino a 6 o 7 m/s. Tuttavia, questa velocità deve poter essere ridotta a un valore nullo nelle stazioni, al fine di consentire anche ai passeggeri lenti di entrare o uscire e alle eventuali merci di essere caricate o scaricate.

I principali vantaggi di questa soluzione di trazione sono brevemente riassunti qui di seguito [8] [13] [14].

- La presenza di una pendenza genera un effetto di contro bilanciamento fra i veicoli in salita e in discesa, il che consente un risparmio energetico.
- È possibile ottenere un basso costo del ciclo di vita (*LCC*, *Life Cycle Cost*) per l'impianto grazie all'utilizzo di un singolo motore per la fune di trazione, ovvero un anello di fune in acciaio, che trasporta più di un veicolo e per via della conseguente assenza di tutti gli elementi di propulsione, di trasmissione cinematica e di frenata che sono normalmente presenti sui veicoli ad auto-propulsione.
- L'assenza degli impianti di propulsione sul veicolo rende possibile progettare unità di traporto più leggere dei veicoli ad auto-propulsione. Questa caratteristica chiave comporta chiaramente *efficienza energetica,* poiché la massa del veicolo è uno dei fattori principali che influenzano il consumo energetico in un sistema di trasporto. In questo modo, infatti, non vi sono mo-

*called* Automated People Movers (APM) *being taken into account more and more in recent years. According to* APM Standards – ASCE, *APMs are [3]: "Fully automated systems with fixed tracks that operate on short to medium distances, whose vehicles can carry from some tens to some hundreds of passengers";* Cable Automated People Movers (CAPM) *are* APMs *with the particular feature of having the vehicles pulled by one or more steel wire ropes, to which they are permanently or temporary linked or gripped, instead of being self-propelled.*

*According to the Italian guidelines for the engineering and design of APMs[2], an APM is a fully automated transport system for passengers, accessible to the public, that is characterised by vehicles that operate on segregated ways, with both a variable grade and horizontal layout, or tortuosity; when dealing with a cable APM, the traction of the vehicles is assigned to one or several rings, which usually have a speed of up to 12 m/s along the line, which can be exceeded in specific applications, for example, for to-and-fro (shuttle) services; otherwise, they have a speed of up to 6 or 7 m/s. However, this speed should be reducible to a null value in stations, to allow slow passengers to enter or exit the vehicle and goods to be loaded or unloaded.*

*The main advantages of this traction solution are synthesised hereafter [8] [13] [14].*

- *The presence of a gradient causes a* counterbalancing effect *between upward and downward vehicles, and therefore leads to energy savings.*
- *A low* LCC (Life Cycle Cost) *of the system is pursuable thanks to the use of a single motor for a traction cable, or steel wire rope ring, which carries more than one vehicle, and because of the consequent absence of all the propulsion, kinematic transmission and braking elements that are usually present on self-propelled vehicles.*
- *The absence of propulsion systems on the vehicles makes it possible to engineer lighter transport units than the self-propelled ones. This key feature clearly implies* energy efficiency *as the vehicle mass is one of the main factors of influence on energy consumption in a transport system. In this way, in fact, there is no engine, transmission, tank or battery to be moved with the vehicle, unlike self-propelled units. A* CAPM *vehicle is merely constituted by the frame, which is used to accommodate the passengers, and by a simple bogie with both the supporting and the guiding wheels, besides a fixed or a detachable grip (fig. 1). It is important to note that not having the aforementioned elements on board the vehicles also makes it possible to design lighter bogie frames, thus further reducing the total unit mass.*

[2] UNI, "Linee guida per la progettazione dei sistemi di trasporto persone ad automazione integrale con trazione a fune", 2015/16.

[2] *UNI, "Linee guida per la progettazione dei sistemi di trasporto persone ad automazione integrale con trazione a fune", 2015/16.*

02_IF_11_2015 pag_901_926__ 07/12/15 09:17 Pagina 904



tori, trasmissione, serbatoi o batterie che si spostino con il veicolo, a differenza dei veicoli ad auto-propulsione. Un veicolo per *APM* a fune consiste semplicemente nel telaio, che è utilizzato per poi alloggiarvi i passeggeri, e da un semplice carrello dotato delle ruote di sostegno e di guida, oltre a un ammorsamento fisso o automatico (fig. 1). È importante osservare che, poiché il veicolo non è dotato degli elementi di cui sopra, è possibile progettare carrelli con telai più leggeri, riducendo così ulteriormente la massa totale della singola unità.

- Per la trazione a fune si possono utilizzare motori elettrici. Questi hanno una maggiore efficienza in termini di *tank-to-wheel* (fino a circa 90%[3]) rispetto ad un MCI di veicoli tradizionali, la cui efficienza è del 30% circa.
- I gruppi motore di trazione del sistema sono posizionati in un singolo punto lungo la linea e non su ciascun veicolo; ciò comporta un sistema meno rumoroso e meno inquinante.

Lo stesso vale per gli *APM* a fune aerei, poiché il concetto di spostare i veicoli da una stazione a un'altra utilizzando l'impianto di trazione rimane lo stesso.

Il livello di automazione di questi impianti consente il servizio "a chiamata" - che si utilizza normalmente per gli ascensori - da utilizzarsi durante le ore di morbida, quando vi è una domanda di traffico più debole. In questo caso il sistema è gestito allo stesso modo dell'attività usuale, ma le partenze dei veicoli non sono programmate; il veicolo rimane disponibile all'interno delle stazioni fino a che il servizio non è attivato dagli utenti mediante un apposito pulsante. Questa modalità di servizio consente un ulteriore risparmio energetico [9].

Lo svantaggio principale degli *APM* a fune sta nel limite della velocità massima che i veicoli possono raggiungere (circa 12 m/s), dovuto alle forze dinamiche che si generano sulla fune di trazione [6] [12] [16]. Tuttavia, questo limite è efficacemente compensato, per quanto attiene la *capacità oraria della linea*, dalla frequenza, ovvero agli *headway* o intervalli tra veicoli che gli *APM* possono ottenere grazie alla loro completa automazione. Nel caso dell'*APM* a fune ideato presso *Dimensione Ingenierie* - che è oggetto del presente studio - si può raggiungere una potenzialità oraria massima di 4800 passeggeri per direzione lungo una linea che utilizza cabine a otto posti ed un intervallo di 6"; questa potenzialità è ben superiore a quelle delle linee di autobus tradizionali. Esiste tuttavia un limite al di sopra del quale è impossibile far funzionare un *APM* a fune [4] [6] [22].

Fig. 1 - Esempio di un carrello per un APM con trazione a fune o CAPM.

*Fig. 1 - Example of a bogie for an APM with rope traction or CAPM.*

- *Electric motors can be used for rope traction. They have higher tank-to-wheel efficiency (up to nearly 90%[3]) than the ICE of traditional cars, which has an efficiency of about 30%.*
- *The motor units of the system are located at a single point along the line and not on each vehicle; this implies a less noisy polluting system.*

*The same applies to aerial CAPMs, as the concept of moving vehicles from station to station using the propulsion system remains the same.*

*The high level of automation of these systems allows the* "on-demand" service, *which is currently used for elevators, to be used during off-peak demand hours, when there is less traffic. In this case, the system is operated in the same way as during normal activity, but the vehicle departures are not scheduled; the vehicles remain available inside the stations until the service is activated by users through a dedicated button. This service mode allows further energy savings to be obtained [9].*

*The main disadvantage of CAPM is the limited maximum speed the vehicles can reach about 12 m/s, due to the dynamic forces that are generated on the tractive rope [6] [12] [16]. However, this limitation is effectively compensated, as regards the hourly capacity of the line, by the frequency, i.e. the very low headways that APM can reach thanks to their full automation. In the case of the* CAPM *that was conceived and then designed by* Dimensione Ingenierie *– the subject of this study – it is possible to reach a maximum hourly capacity of 4800 passengers per direction along a line using 8-seat cabins and a headway of 6 s; this capacity is well above those of traditional urban bus lines. However, a limit exists above which it is impossible to operate a* CAPM *[4] [6] [22].*

[3] Per esempio, EIA calcola che le perdite a monte, nella trasmissione e distribuzione elettrica, negli Stati Uniti costituiscono in media circa il 6% dell'elettricità trasmessa e distribuita ogni anno.

[3] *For example, EIA estimates that preceding national electricity losses, for transmission and distribution, on average constitute about 6% of the electricity that is transmitted and distributed in the United States each year.*

02_IF_11_2015 pag_901_926__ 07/12/15 09:17 Pagina 905



Le caratteristiche chiave degli *APM* a fune riflettono ampiamente le ipotesi e gli obiettivi definiti in *Transport 2050* per il trasporto sostenibile. Per questa ragione, si è considerato appropriato condurre uno studio per valutare quantitativamente la competitività degli *APM a fune* per quanto attiene all'efficienza energetica rispetto ad altre modalità tradizionali di trasporto urbano (quali metropolitane su rotaia, autobus, auto private, ecc.) [5].

Tuttavia, data la grande varietà di soluzioni per i sistemi di trasporto, un semplice confronto del consumo energetico totale non sarebbe adeguato per stabilire quale sia il migliore in termini di efficienza. Al fine di ottenere una valutazione significativa, occorre considerare il rapporto fra il consumo energetico e il servizio fornito che ne risulta, cioè il numero di passeggeri moltiplicato per la distanza percorsa [21]. È chiaro che il confronto debba prendere in considerazione la quantità di energia necessaria per trasportare un passeggero per un chilometro. La dimensione del parametro considerato è perciò:

$$\frac{\text{kW}}{\text{pass} \cdot \text{km}}$$

oppure:

$$\frac{\text{gep}}{\text{pass} \cdot \text{km}} \; ; \; \frac{\text{Btu}}{\text{pass} \cdot \text{mi}}$$

In questo modo è possibile confrontare l'efficienza energetica di vari analoghi sistemi di trasporto.

Il consumo energetico specifico definito in questo modo varia in funzione della percentuale di utilizzo della massima capacità della linea, quindi in funzione del *fattore di carico medio* dei veicoli [21]. Perciò, se il fattore di carico è basso, l'energia necessaria per spostare la tara del veicolo viene divisa per un numero inferiore di persone (il cui trasporto è l'effetto utile) aumentando così *il consumo specifico dell'energia*.

Il modello *people mover* preso in considerazione nel presente articolo è un sistema che è stato progettato e sviluppato dalla società *Dimensione Ingenierie*, con sede a Torino (Italia), che da decenni progetta impianti a fune [10].

## 2. Un sistema innovativo di trasporto: CableSmart

Sebbene l'innovativo sistema di trasporto oggetto dell'analisi, che qui di seguito sarà identificato come CableSmart, adotti i principi specifici e le soluzioni tecnologiche delle tradizionali *cabinovie* ad ammorsamento automatico, risolve i problemi noti di questo tipo d'impianti [6] con soluzioni innovative.

Per quanto attiene al sistema funiviario, si è scelta la soluzione con doppia fune portante-traente, che è stata introdotta nel corso degli anni ottanta del secolo scorso. Questa soluzione consente di realizzare linee con funi a prova di vento ed intemperie, utilizzando specifiche rulliere che consentono al sistema di continuare l'esercizio

*The aforementioned key features of* CAPM *largely reflect the assumptions and aims stated in* Transport 2050 *for sustainable transportation. For this reason, it has been considered appropriate to conduct a study to quantitatively assess the energy efficiency competitiveness of* CAPM *compared to other traditional urban transit modes (such as metro-rail, bus, private cars, etc.) [5].*

*However, given the great variety of solutions for transport systems, a simple comparison of the total energy consumption would not be appropriate to establish whether one of them is better or worse than the others in terms of efficiency. In order to obtain a meaningful assessment, it is necessary to consider the ratio between energy consumption and the resulting provided service as well as the number of passengers multiplied by the travelled distance [21]. It is clear that the comparison should consider the quantity of energy necessary to transport one passenger along one kilometre and the dimension of the parameter considered is therefore:*

$$\frac{\text{kW}}{\text{pass} \cdot \text{km}}$$

or:

$$\frac{\text{gep}}{\text{pass} \cdot \text{km}} \; ; \; \frac{\text{Btu}}{\text{pass} \cdot \text{mi}}$$

*In this way, it is possible to compare the energy efficiency of different analogous transport systems.*

*The thus defined specific energy consumption varies as a function of the percentage of use of the maximum line capacity, therefore as a function of the* average load factor *of the vehicles [21]. Then, if the load factor is low, the energy necessary to move the vehicle tare weight is divided by a smaller number of people - the transportation of which is the useful effect – thus increasing the* specific energy consumption.

*The* people mover model *considered in this paper is a system that was engineered and patented by the* Dimensione Ingenierie *company, based in Turin (Italy), which has been designing cableway systems for some decades [10].*

## *2. The innovative transport system: CableSmart*

*The innovative transport system under analysis – identified as CableSmart hereafter - while adopting the specific principles and technological solutions of the traditional detachable* gondola lifts, *has faced the specific known problems of these systems [6] with innovative solutions.*

*As regards the cableway system, the double carrying-hauling rope mode, which was introduced during the Eighties, was chosen. This solution allows windproof rope lines to be realised using specific roller sets which permit the system to continue moving, even in the case of roller failure. Double carrying-hauling rope systems were designed during the Eighties with the aim of replacing bi-cable gondolas - with one carrying rope and one hauling rope*

02_IF_11_2015 pag_901_926__ 07/12/15 09:17 Pagina 906



anche nel caso di guasto di un rullo. I sistemi con doppia fune portante-traente sono stati introdotti negli anni ottanta con lo scopo di sostituire le cabinovie bifune - con una fune portante e una di trazione o traente - e sono state utilizzate per cabine di capacità elevata (fino a 25 passeggeri) e per lunghe campate (fino a 1 km). Com'è noto, gli impianti con fune portante-traente funzionano al meglio con carichi distribuiti, ma la situazione diviene critica nel caso di carichi concentrati. Questo problema non emerge quando si adotta un impianto con funi portanti - utilizzate per sostenere il carico verticale – e funi traenti distinte, utilizzate solo per la trazione. Questa è la ragione per la quale nel passato si sceglievano cabinovie a doppia fune per applicazioni speciali che richiedevano una capacità elevata e lunghe distanze. Tuttavia, l'utilizzo della soluzione tecnologica a fune portante-traente con cabine da otto a dieci passeggeri e di distanze fino ad alcune centinaia di metri consentono di superare le criticità legate ai carichi concentrati.

Utilizzare una fune doppia per sostenere il carico dei veicoli permette di conseguire vari vantaggi:

a) i veicoli sono molto più stabili dei sistemi a fune singola; l'oscillazione trasversale è limitata e diviene nulla durante la transizione sui sostegni;

b) l'oscillazione così ridotta consente di progettare linee ad intervia ridotta, sostegni più bassi e stazioni più strette;

c) il fatto di avere il veicolo in una posizione stabile durante il passaggio sulle rulliere consente di utilizzare un dispositivo di presa e di guida sull'esterno, in modo da evitare lo scarrucolamento in qualunque condizione (durante il servizio e non);

d) la doppia fune forza il veicolo a rimanere nella giusta posizione durante la fase di transizione sui sostegni e nelle stazioni e, di conseguenza, non possono generarsi oscillazioni pericolose, anche nel caso di forte vento o di comportamento scomposto dei passeggeri;

e) in particolare, il fatto di avere un veicolo gradualmente orientato dall'impianto a doppia fune mentre entra nella stazione consente di evitare il cosiddetto impatto da "terza ruota", che si genera quando s'impegna la rotaia specifica per stabilizzare il veicolo; ciò consente di aumentare la velocità operativa massima rispetto alle cabinovie a fune singola.

Tuttavia, la differenza principale di CableSmart rispetto alle cabinovie tradizionali consiste nella possibilità di rendere i *veicoli auto-motori* dotandoli di motori elettrici e di un comando a distanza per il loro movimento quando sono disammorsati dalle funi d'acciaio, ovvero di dotarli di *trazione ibrida*. Le unità di trasporto si muovono autonomamente all'interno delle stazioni, si arrestano in prossimità degli accessi dei passeggeri, possono viaggiare per distanze relativamente lunghe sostenute da una propria guida o rotaia e possono seguire percorsi specifici definiti dagli utenti. Inoltre, i veicoli in ingresso alle stazioni e in

*- and were then used for high capacity cabins (up to 25 passengers) and for long spans (up to 1 km). As known, carrying-hauling rope systems work best when dealing with distributed loads, but the situation becomes critical for concentrated loads. This issue does not emerge when a system with carrying ropes - used to bear the vertical load - and separate hauling ropes, used only for traction purposes, is adopted. This is why bi-cable gondolas were chosen in the past for special applications requiring high line capacity and long spans. However, the use of the double carrying-hauling rope technology for 8/10 passenger cabins and the adoption of spans of some hundreds of meters long allow the issues related to wind and roller failure to be overcome: these issues are typical of traditional single carrying-hauling rope detachable gondolas.*

*Using a double rope to bear the load of the vehicles leads to several advantages:*

*a) the vehicles are much more stable than a single rope system; transversal swinging is limited and becomes null during transition in the towers;*

*b) the thus reduced swinging allows a narrower distance to be designed between the line centres (inter-axle), and thereafter lower towers and narrower stations;*

*c) having the vehicle in a stable position during the passage on the roller-assembly allows a rope catching and guiding device to be used on the outside, so that exiting from the roller assembly seat is not possible in any condition (whether during service or not);*

*d) the double rope forces the vehicle to stay in the right position during the transition phase on the towers and at the stations and, as a result, dangerous swinging cannot occur, even in the case of strong winds or unsettled passenger behaviour;*

*e) in particular, the fact of having a vehicle that is gradually oriented by the double rope system as it enters the station avoids the well-known "third wheel" impact, which occurs when engaging the specific track to stabilise the vehicle; this allows the maximum operating speed to be increased, compared to that of single rope gondolas.*

*However, the main difference of the CableSmart from that of traditional detachable gondola lifts consists in the possibility of making the* vehicles self-powered *by equipping them with* electric motors *and a* remote control *for their movement when they are detached from the steel ropes, that is, with* hybrid traction. *The units move into the stations by themselves, stop near the passenger accesses, can travel for rather long distances supported by a proper track or rail and they can follow a specific path chosen, according to the circumstances, by the users. Furthermore, vehicles entering and exiting from the stations are decelerated and accelerated, respectively, during the rope detaching/attaching phases through the on-board electric motors; therefore, regenerative braking during deceleration is also pursuable. When the vehicles are detached from the cable-*

02_IF_11_2015 pag_901_926__ 07/12/15 09:17 Pagina 907



uscita da esse sono decelerati e accelerati, rispettivamente, durante le fasi di disammorsamento ed ammorsamento della fune mediante motori elettrici a bordo; perciò è anche possibile ottenere un recupero di energia in frenata. Quando i veicoli sono disammorsati dalla fune, sono alimentati mediante una linea di contatto specifica; viceversa, quando sono ammorsati un pacco di batterie garantisce l'energia necessaria per i servizi ausiliari (illuminazione, aria condizionata, ecc.). Il veicolo (fig. 2) consiste di un carrello-morsa, di una sospensione e di una cabina che può contenere fino a 8 passeggeri, bagagli ed una bicicletta o una sedia a rotelle. È munito di una serie di batterie per l'accumulo di energia, con impianti d'illuminazione e di condizionamento, sistemi di comando e di comunicazione e, naturalmente, morse per il collegamento alle funi di acciaio. Il carrello-morsa è composto da due semi-carrelli con quattro ruote di gomma alimentate da quattro motori indipendenti, due morse per il collegamento del veicolo alla fune portante-traente, che sono stati specificamente progettati per garantire un livello elevato di affidabilità e per richiedere una bassa forza di apertura, e di un telaio per collegare i due semi-carrelli. La ganascia mobile è rivolta verso l'interno, mentre i perni delle sospensioni puntano verso l'esterno.

I due semi-carrelli sono muniti di:

- ruote di guida ad asse verticale;
- un pattino di trascinamento che si accoppia ai dispositivi di sicurezza nelle stazioni;
- contatti striscianti che corrispondono alle linee di alimentazione elettrica nelle stazioni;
- antenne e trasduttori per l'impianto di comando, comunicazione e sicurezza.

I quattro motori indipendenti, alimentati se necessario dal gruppo batterie, consentono al veicolo di completare il ciclo funzionale anche in caso di avaria di un motore.

La cabina (fig. 3), che può contenere fino ad otto passeggeri seduti, ha un'altezza interna del veicolo di oltre 2,20 m e può contenere bagagli ed oggetti ingombranti, quali biciclette e sedie a rotelle per i diversamente abili. Vi sono due banchi, di quattro sedili ciascuno, posti l'uno di fronte all'altro e che possono essere piegati per aumentare lo spazio disponibile. La cabina è munita di porte automatiche su ambo i lati in modo da consentire accesso al veicolo dall'esterno e dall'interno della linea; le porte

*way, they are powered by a specific contact line, while being attached to a battery pack provides the energy necessary for auxiliary services (lighting, air-conditioning, etc.). The vehicle (fig. 2), which is composed of a bogie-grip, a dampening device and a cabin, can accommodate up to eight passengers, luggage, and a bike or a wheelchair. It is equipped with a battery pack to store energy, with lighting and air-conditioning systems, control and communication systems and of course grips to join it to the steel ropes. The bogie-grip is composed of two semi-bogies with four rubber wheels, which are powered by four independent electric motors, two grips for the vehicle for carrying-hauling rope linking, which have specifically been designed to have a high level of reliability and to require a low opening force, as well as a frame to connect the two semi-bogies. The mobile clamp of the grips points inward, while the dampening pivots point outward.*

*The two semi-bogies are equipped with:*

- *vertical axis guiding wheels;*

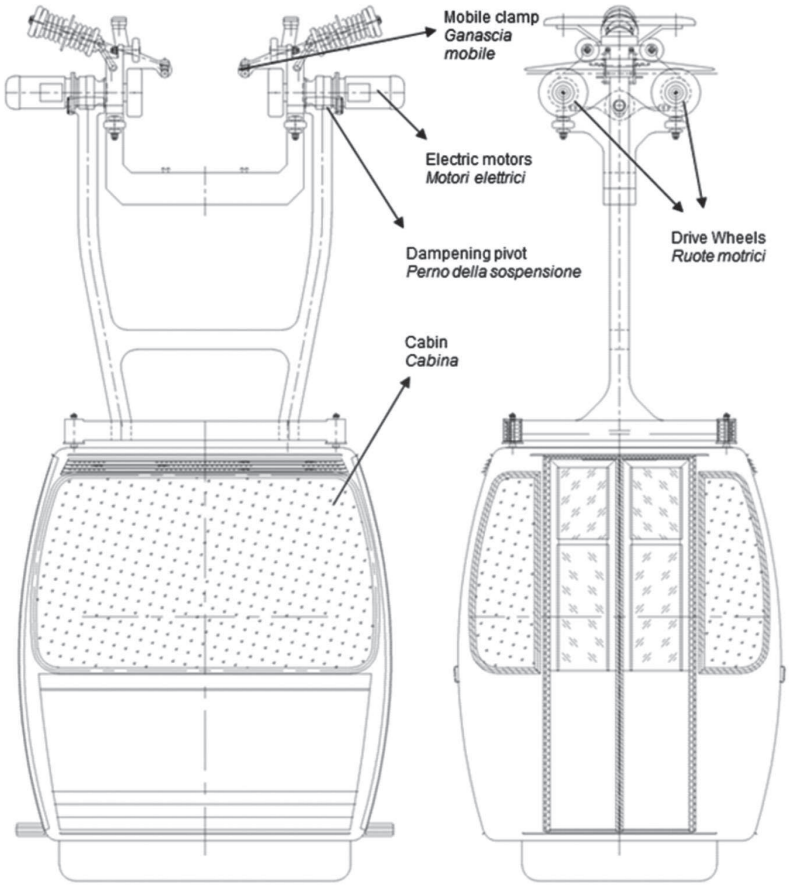


Fig. 2 - Il veicolo del sistema APM progettato.
*Fig. 2 - The engineered and designed APM system vehicle.*

02_IF_11_2015 pag_901_926__ 07/12/15 09:17 Pagina 908



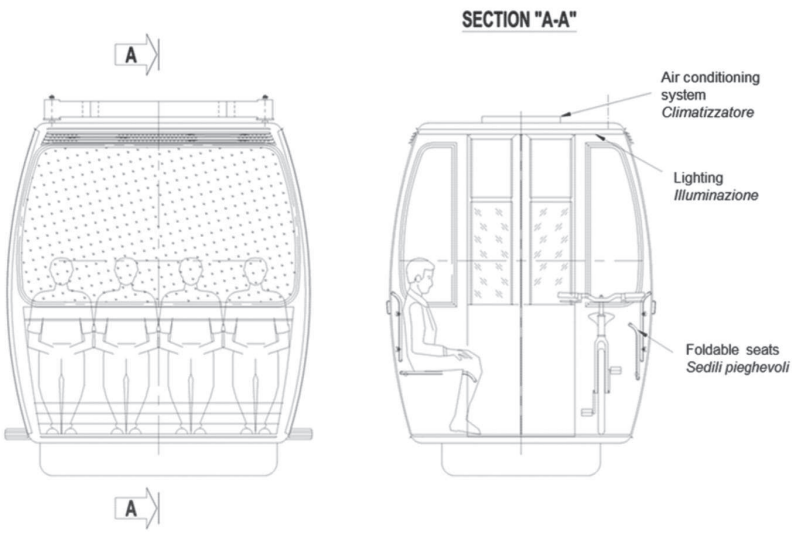


Fig. 3 - Dettagli della cabina CableSmart.
*Fig. 3 - Details of the cabin CableSmart.*

hanno ampie finestre al fine di garantire una vista panoramica durante il percorso. Le batterie per l'accumulo dell'energia sono contenute sul fondo della cabina; vi sono modelli di ultima generazione che, sebbene siano di peso molto contenuto, possono sostenere vari cicli con efficienza di ricarica elevata. Gli spigoli della cabina sono dotati di sistemi di comunicazione audio-video e di tastiere che consentono ai passeggeri di comunicare con il sistema centrale e con la videosorveglianza. L'impianto di apertura e chiusura delle porte, i dispositivi elettronici, gli impianti d'illuminazione e di climatizzazione sono posizionati sulla parte alta della cabina.

Essenzialmente, questi veicoli possono essere definibili "smart", perché possono accumulare energia, e hanno le caratteristiche seguenti:

- sono illuminati (luci principali e di emergenza);
- sono muniti di videosorveglianza;
- sono muniti di altoparlanti e di pannelli informativi a LCD;
- è possibile avere una comunicazione bi-direzionale (utente verso unità di controllo e viceversa) al fine di massimizzare l'efficienza e l'efficacia del sistema di trasporto;
- consentono agli utenti di personalizzare il viaggio lungo percorsi complessi all'interno della rete funiviaria [8], all'interno di edifici ed infrastrutture specifiche.

Ciò consente di ottenere una significativa semplificazione delle stazioni e la massima indipendenza di ciascun veicolo nelle stazioni.

Poiché la funzione complessa ed energeticamente dispendiosa di accelerazione, decelerazione e di movimento dei veicoli nelle stazioni è stata trasferita dalle stazioni

- *an upper skid that matches the safety devices in the stations;*
- *sliding contacts that match the electric power lines in the stations;*
- *antennas and transducers for the control, communication and safety system.*

*The four independent electric motors - powered by the battery pack if necessary - allow the vehicle to complete the functional cycle, even in the case of failure of a motor.*

*The cabin (fig. 3) can accommodate up to 8 seated passengers, has an internal vertical space above 2.20 m and can hold bulky luggage and objects, such as bikes and wheelchairs for disabled people. There are two four-seat benches facing each other that can be folded in order to increase the available space. The cabin is provided with automatic doors on both sides so that it is possible to access the vehicle from the exterior and from the interior of the line; the doors have wide windows in order to guarantee a panoramic view during the trip. The batteries for storing energy are housed in the bottom of the cabin; they are cutting edge models that, while having a really low weight, can undergo many charging cycles with high charging efficiency. The corners of the cabin are equipped with audio and video communication systems and with keyboards to allow the passengers to communicate with the main system and the video-surveillance. The door opening/closing system, the electronic devices and the lighting and air-conditioning systems are all placed in the upper part of the cabin.*

*Ultimately, the vehicles can be considered "smart vehicles" as they are able to store energy and have the following features:*

- *they are illuminated (principal and emergency lights);*
- *there is video surveillance;*
- *they are equipped with speakers and informative LCD panels;*
- *bi-directional communication is possible (user towards the CU and vice versa) in order to maximise the efficiency and efficacy of the transport system;*
- *they allow users to customize the journey along complex paths within the cableway grid [8] as well as within specific buildings and infrastructures.*

*In this way, it is possible to obtain a significant simplification of the stations and the maximum travel independence of a single vehicle in the stations.*

*Since the complex and energy consuming function of accelerating, decelerating and moving the vehicles into the stations has been transferred from the stations to the vehi-*

02_IF_11_2015 pag_901_926__ 07/12/15 09:17 Pagina 909



ai veicoli stessi, le stazioni divengono strutture metalliche semplici, dotate di rotaie di supporto e di guida, rulli e pulegge per spostare e deviare le funi d'acciaio, e di un impianto di alimentazione.

In questo modo si risolvono i due svantaggi più critici degli impianti ad ammorsamento automatico tradizionali. Il primo è che una singola avaria di un singolo componente dei vari impianti che, nelle stazioni, sono dedicati a movimentare i veicoli provoca l'arresto dell'intero impianto. Il secondo svantaggio riguarda l'aspetto energetico, poiché le tratte di accelerazione e di decelerazione del veicolo consumano, anche in assenza di un veicolo, varie decine di kW fornite dalla fune d'acciaio. Inoltre, il fatto di dover mettere in sequenza varie stazioni, ciascuna con due tratte di accelerazione e due di decelerazione, genera un processo incrementale di consumo energetico per via degli aumenti nella tensione della fune, con intensificazione delle dissipazioni, e un ulteriore consumo energetico, che rende impraticabile la soluzione tradizionale.

Diversamente dai sistemi tradizionali, nei quali la linea funiviaria prevale rispetto ai veicoli, collegati alla fune per la maggior parte del tempo, con CableSmart il fatto che i veicoli siano alimentati autonomamente quando non sono fissati alla fune consente la massima libertà di viaggio per gli utenti.

I veicoli "smart" possono essere arrestati nelle stazioni d'interesse, possono seguire percorsi differenti, possono spostarsi alla zona di stoccaggio o raggiungere la linea funiviaria quando la domanda di trasporto cresce; possono anche arrestarsi alla zona di manutenzione quando necessario (fig. 4).

In breve, il sistema APM è stato progettato come una cabinovia tradizionale con doppia fune portante-traente e veicoli con alimentazione autonoma e controllo in remoto.

Questi veicoli si muovono indipendentemente nelle stazioni, si arrestano vicino ai punti di accesso e possono anche seguire lunghi percorsi personalizzati, sostenuti da apposite guide, conformemente alle necessità degli utenti. Inoltre, i veicoli che entrano nelle stazioni e ne escono sono accelerati o decelerati mediante i gruppi motore a bordo e sono progettati per la frenata rigenerativa, per ammorsarsi e disammorsarsi automaticamente alle funi. Quando non sono fissati alle funi d'acciaio, sono alimentati da una linea specifica a contatto, mentre, quando sono fissati a essa, l'energia è fornita dalle batterie.

## 3. Analisi del consumo energetico

Al fine di analizzare il consumo energetico, è necessario considerare

*cles themselves, the stations become simple metallic structures, equipped with supporting and guiding rails, with rolls, with sheaves for moving and deviating the steel ropes and with the power supply system.*

*In this way, the two most critical drawbacks of traditional detachable systems are overcome. The first drawback is that a single failure of a single component of the various systems in the stations dedicated to moving the vehicles causes the whole system to stop. The second drawback is related to the energy aspect, since the vehicle acceleration and deceleration segments consume – even in the absence of a vehicle - several tenths of kW that are provided by the steel rope itself. Moreover, the fact of having to put several stations in sequence, each with two acceleration and two deceleration segments, generates an incremental energy consumption process, due to the increases in rope tension - with intensification of the dissipations - and a further energy consumption, which makes the traditional solution impracticable.*

*Unlike traditional systems, in which the cable line prevails with respect to the vehicles, which are linked to the rope most of the time, with CableSmart the fact that the vehicles are self-powered when they are not attached to the rope allows the maximum freedom of travel for the users.*

*The "smart" vehicles can be stopped in the station of interest, can follow different paths, can go to the storing area - when the transport demand decreases - or they can join the cable line - when the demand increases - or they can even stop at the maintenance area if necessary (fig. 4).*

*In short, the APM system has been designed as a traditional gondola ropeway with a double carrying-hauling rope and self-powered back-end controlled vehicles.*

*These vehicles move independently in the stations, stop near the access points, and can follow even long custom-built paths, supported by the specific tracks, according the users' needs. Moreover, the vehicles that enter and exit the stations are accelerated or decelerated by the on-board mo-*

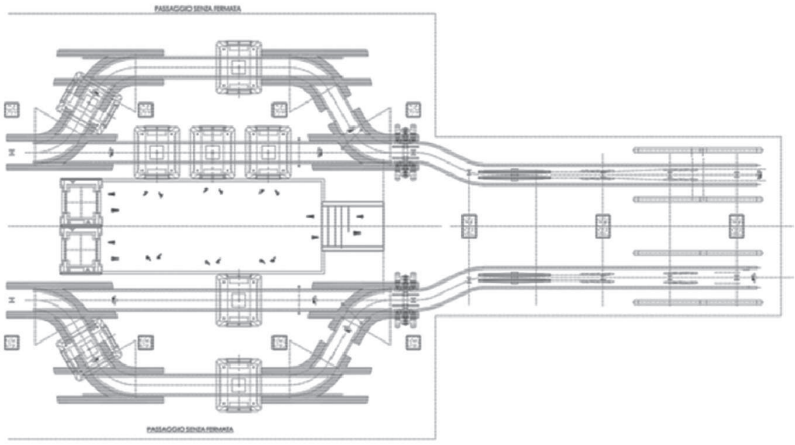

Fig. 4 - Esempio di layout di una stazione intermedia di CableSmart.
*Fig. 4 - Example of the layout of an intermediate station of the CableSmart.*

02_IF_11_2015 pag_901_926__ 07/12/15 09:17 Pagina 910



separatamente le due modalità di trazione del veicolo, ovvero i motori elettrici a bordo per il transito nelle stazioni e la doppia fune portante-traente per il trasporto lungo la linea.

I parametri del sistema sono stati forniti dai progettisti di *Dimensione Ingenierie* e sono i seguenti [10]:

| | | | |
|---|---|---|---|
| – | lunghezza orizzontale della linea (L) | m | 3000 |
| – | numero di stazioni intermedie | - | 5 |
| – | distanza fra le stazioni intermedie | m | 500 |
| – | lunghezza della corsia all'interno della stazione ($L_i$) | m | 10 |
| – | velocità della linea (v) | m/s | 5 |
| – | *headway* (dt) | s | 6 |
| – | equidistanza (e) | m | 30 |
| – | numero di sedili/veicolo | - | 8 |
| – | massa del veicolo ($mv_v$) | kg | 1450 |
| – | peso lordo del veicolo (mv) | kg | 2050 |
| – | altezza del veicolo (hv) | m | 4,7 |
| – | inclinazione dell'elica di apertura ($\alpha$) | ° | 5 |
| – | distanza fra il *volet* e le ruote motrici (h) | m | 0.35 |
| – | distanza fra le rotaie e il baricentro del veicolo (H) | m | 3,5 |
| – | interasse (i) | m | 0,7 |
| – | diametro delle ruote motrici (d) | m | 0,3 |
| – | efficienza della frenata rigenerativa ($\zeta$) | - | 60% |
| – | capacità della linea | passaggi/ora per direzione | 4800 |
| – | diametro della puleggia | mm | 4000 |
| – | interasse | mm | 4600 |
| – | forza verticale di apertura della morsa (FMV[4]) | N | 15000 |
| – | efficienza media del motore elettrico ($\eta_m$) | - | 0,9 |
| – | efficienza media riduttore ($\eta_r$) | - | 0,8 |
| – | efficienza media di un gruppo motore-riduttore ($\eta$) | - | 0,72 |

Utilizzando questi dati è stato possibile analizzare la dinamica del veicolo durante le diverse fasi di movimento (movimento accelerato, decelerato e a velocità costante, fig. 5) al fine di valutare la massima accelerazione che il veicolo può sostenere conformemente al coefficiente di

*tor units, which are also designed for regenerative braking and for attaching or detaching the cabin from the moving rope. When they are not attached to the steel rope, they are powered by a specific contact power line, while when they are attached to it, energy is provided by the batteries.*

### *3. Energy consumption analysis*

*In order to analyse the energy consumption, it is necessary to consider separately the two modes of vehicle traction, that is, the on-board electric motors, for transit in the stations, and the double carrying-hauling rope, for transit along the line.*

*The parameters of the system were provided by the designers of* Dimensione Ingenierie *and are as follows [10]:*

| | | | |
|---|---|---|---|
| – | *horizontal length of the line (L), considered section* | *m* | *3000* |
| – | *number of intermediate stations* | *-* | *5* |
| – | *distance between intermediate stations* | *m* | *500* |
| – | *length of the lane inside the stations ($L_i$)* | *m* | *10* |
| – | *line speed (v)* | *m/s* | *5* |
| – | *headway (dt)* | *s* | *6* |
| – | *distance between the vehicles (e)* | *m* | *30* |
| – | *number of seats/vehicle* | *-* | *8* |
| – | *vehicle mass ($mv_v$)* | *kg* | *1450* |
| – | *gross vehicle weight (mv)* | *kg* | *2050* |
| – | *height of the vehicle (hv)* | *m* | *4.7* |
| – | *grip guideway inclination ($\alpha$)* | *°* | *5* |
| – | *distance between the grip roll and the drive wheels (h)* | *m* | *0.35* |
| – | *distance between rail track plane and barycentre of vehicle (H)* | *m* | *3.5* |
| – | *axle spacing (i)* | *m* | *0.7* |
| – | *drive wheel diameter (d)* | *m* | *0.3* |
| – | *regenerative braking efficiency ($\zeta$)* | *-* | *60%* |
| – | *line capacity* | *pass/h per direction* | *4800* |
| – | *sheave diameter* | *mm* | *4000* |
| – | *distance between the centres of the lines (inter-axle)* | *mm* | *4600* |
| – | *vertical opening grip force (FMV[4])* | *N* | *15000* |
| – | *average electric motor efficiency ($\eta_m$)* | *-* | *0.9* |
| – | *average gear box efficiency ($\eta_r$)* | *-* | *0.8* |
| – | *average efficiency of a motor unit ($\eta$)* | *-* | *0.72* |

[4] Forza della molla verticale.

[4] *Vertical component of the spring force.*

02_IF_11_2015 pag_901_926__ 07/12/15 09:17 Pagina 911



attrito della ruota di gomma e garantendo standard di comodità per i passeggeri (1,8 m/s² [21]). In questo caso, il valore massimo dell'accelerazione del veicolo è limitato dalla massima aderenza delle ruote alla guida ed è:

$$a_{max} = 1.29 \frac{m}{s^2}$$

Il valore scelto per l'accelerazione è stato di 1 m/s² al fine di ridurre le dimensioni ed il peso dei motori elettrici. Valutando la coppia necessaria e la velocità angolare, è stato quindi possibile calcolare la coppia e la potenza all'asse della ruota durante il transitorio (fig. 6).

Utilizzando questi parametri, è stato possibile condurre un'analisi energetica per il transito nelle stazioni. Le cause del consumo considerate nel modello sono riportate qui di seguito [21].

*Forza inerziale* (definita dalla seconda legge di Newton):

$$F_i = ma$$

*Attrito volvente:* ovvero la resistenza al movimento provocata dalla deformazione delle ruote che scorrono sulla rotaia. Le ruote motrici sul veicolo sono connesse ai motori e alle piccole ruote che fanno aprire le morse durante l'ingresso nelle stazioni. Questa resistenza è calcolata mediante una formula lineare semplificata:

$$R = c \cdot F_N$$

ove $F_N$ è la forza che agisce perpendicolarmente al piano di rotolamento mentre *c* è un coefficiente funzione dei materiali delle ruote e della superficie di rotolamento. Il valore considerato per questo coefficiente è lo stesso utilizzato per gli pneumatici - di cui sono muniti i veicoli - che scorrono sull'acciaio ed è uguale a 0,0076 [21].

La forza perpendicolare che agisce sulle ruote motrici è la somma del peso e delle forze verticali delle molle della morsa. La resistenza di rotolamento è perciò:

$$R_{drive_wheels} = c(mg + 2F_{MV})$$

La forza che agisce sulle ruote della morsa e sulle relative guide è $F_M$. In questo modo si ottiene il valore seguente:

$$R_{grip_wheels} = c \cdot 2 \cdot F_M$$

*Componente orizzontale della forza agente sulla morsa:* questa è generata dall'inclinazione dell'elica di apertura e, considerando la presenza di due morse, è uguale a:

$$2F_{MO} = 2F_{MV} \tan \alpha$$

*Resistenza aerodinamica:* dalla relativa teoria, si ottiene:

$$R_A = c_a A v^2$$

*Using these data, it has been possible to analyse the dynamics of the vehicle during the different phases of motion (accelerated, decelerated and constant speed motion, fig. 5) in order to evaluate the maximum acceleration the vehicle can undergo in compliance with the friction coefficient of the rubber wheel and with the comfort standards for the passengers (1.8 m/s² [21]). In this case, the maximum magnitude of the acceleration of the vehicle is limited by the maximum adhesion of the wheels to the guide-way and is:*

$$a_{max} = 1.29 \frac{m}{s^2}$$

*The value of the chosen acceleration was 1 m/s² in order to reduce the dimension and the weight of the electric motors. By evaluating the necessary torque and angular velocity, it was then possible to calculate the torque and the power at the wheel axis during transient (fig. 6).*

*Using these parameters, it was possible to conduct an energy analysis for transit in the stations. The causes of consumption considered in the model are reported hereafter [21].*

Inertia force: *which is defined by Newton's second law:*

$$F_i = ma$$

Rolling resistance: *which is the resistance to motion caused by the deformation of the wheels rolling on the track. The drive wheels on the vehicle are connected to the motors and the wheels, which make the grips open during transit into the stations. This resistance is calculated through a simplified linear formula:*

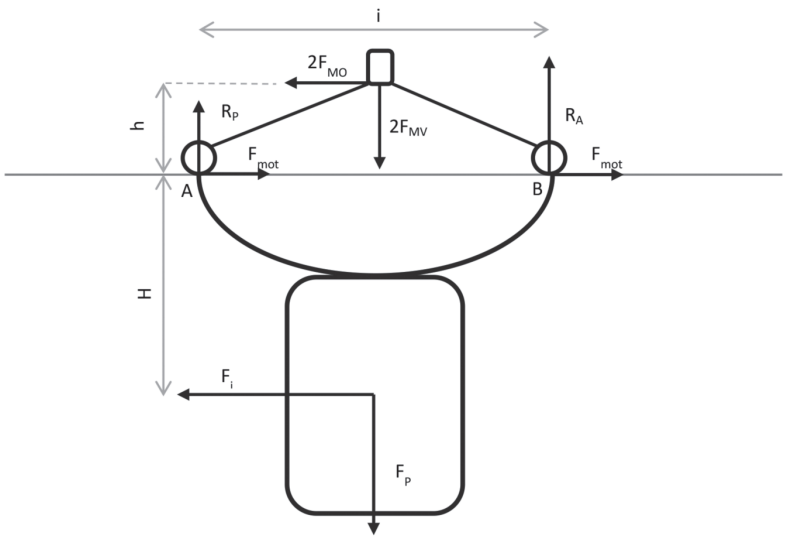


Fig. 5 - Schema semplificato delle forze che agiscono sul veicolo durante la fase di accelerazione.

*Fig. 5 - Simplified scheme of the forces acting on the vehicle during the acceleration phase.*

02_IF_11_2015 pag_901_926__ 07/12/15 09:17 Pagina 912



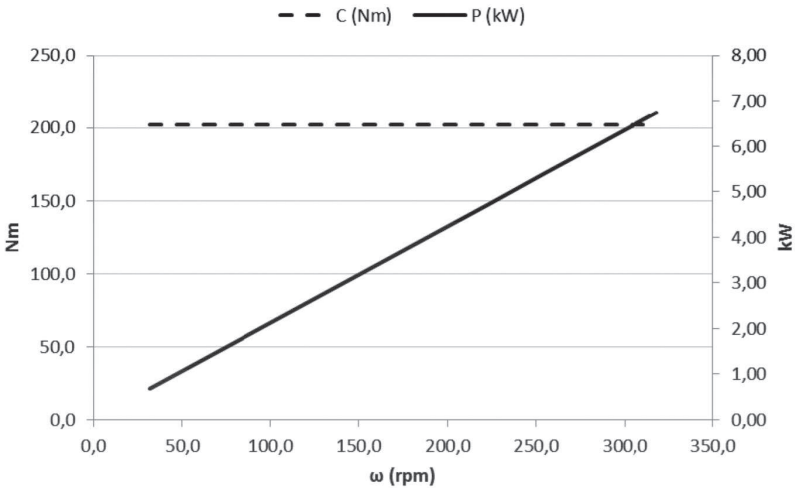


Fig. 6 - Coppia e potenza di ogni motore durante l'accelerazione in funzione della velocità angolare.

*Fig. 6 - Torque and power of each motor during acceleration in function of angular velocity.*

$c_a$: il valore medio utilizzato per l'industria automobilistica è 0,025 [21]. Il valore di $c_a$ per il veicolo considerato è sconosciuto e, di conseguenza, si stima sia due volte quella utilizzata per le automobili $c_a$ = 0,05.

A: area della sezione trasversale del veicolo in direzione del movimento. La cabina ha una base di 1,8 m e un'altezza di 2,5 m perciò, tralasciando il carrello e la sospensione, si ottiene A = 4.5 m$^2$.

*v*: si deve considerare la velocità massima poiché provoca la massima residenza aerodinamica, che è uguale a 5 m/s. Nella formula di cui sopra, la velocità deve essere espressa in km/h e risulta dunque *v* = 18 km/h.

La resistenza totale è la somma delle resistenze parziali:

$$R_{TOT} = F_i + R_{drive_wheels} + R_{grip_wheels} + 2F_{MO} + R_A$$

Ogni resistenza al movimento genera un contributo al consumo energetico, che deriva dall'integrazione della sua espressione lungo lo spazio durante i movimenti di accelerazione e decelerazione; i risultati di quest'operazione, espressi in *Joule,* sono indicati alla fig. 7 e alla fig. 8 per il caso di un veicolo a pieno carico.

Considerando un segmento a velocità constante durante il transito in stazione, si è ottenuto che la quantità di energia necessaria per movimentare il veicolo in stazione è *0,0129 kWh* (*46,4 kJ*).

Lo scopo del progetto è stato quello di creare una linea con anello di fune lungo 3 km (lunghezza della linea) e con stazioni intermedie per consentire agli utenti l'accesso al sistema mentre i veicoli sono scollegati dalla doppia fune e con movimentazione autonoma, prima di essere ricollegati successivamente. Lo spazio fra le stazio-

$$R = c \cdot F_N$$

*where $F_N$ is the force acting perpendicular to the rolling plane and c is a coefficient function of the wheel and rolling plane materials. The value considered for this coefficient is the same one that is used for tyres (with which the vehicles are equipped) rolling on steel and is equal to 0.0076 [21].*

*The perpendicular force acting on the drive wheels is the sum of the weight force and vertical forces of the grip springs. The rolling resistance is therefore:*

$$R_{drive_wheels} = c(mg + 2F_{MV})$$

*The force acting on the grip wheels and the related guideways is $F_M$. Thus, the following value is obtained:*

$$R_{grip_wheels} = c \cdot 2 \cdot F_M$$

Horizontal component of the force acting on the grip: *this is caused by the inclination of the guideway/guideline and, considering its two grips, is equal to:*

$$2F_{MO} = 2F_{MV} \tan \alpha$$

Aerodynamic resistance: *from the aerodynamics theory we obtain:*

$$R_A = c_a A v^2$$

*$c_a$: the average value used for the car sector is 0.025 [21]. The value of $c_a$ for the considered vehicle is unknown and as a result it was estimated to be twice that used for cars $c_a$ = 0.05.*

*A: this is the area of the cross section of the vehicle in the direction of the motion. The cabin has a base of 1.8 m and a height of 2.5 m. Therefore, ignoring the bogie and the suspension, we obtain A = 4.5 m$^2$.*

*v: the maximum speed should be considered because it causes the maximum aerodynamic resistance, which is equal to 5 m/s. In the abovementioned formula, the speed has to be expressed in km/h and in this way v = 18 km/h.*

*The total resistance is the sum of the partial resistances:*

$$R_{TOT} = F_i + R_{drive_wheels} + R_{grip_wheels} + 2F_{MO} + R_A$$

*Each motion resistance generates a contribution to energy consumption, which is derived from the integration of its expression along the space during the accelerated and decelerated motions; the results of this operation - expressed in* Joules *- are shown in fig. 7 and fig. 8 for the case of a fully loaded vehicle.*

*Considering a constant speed segment during station transit, it has been found that the net amount of energy necessary to move the vehicle into the station is* 0.0129 kWh (46.4 kJ).

02_IF_11_2015 pag_901_926__ 07/12/15 09:17 Pagina 913



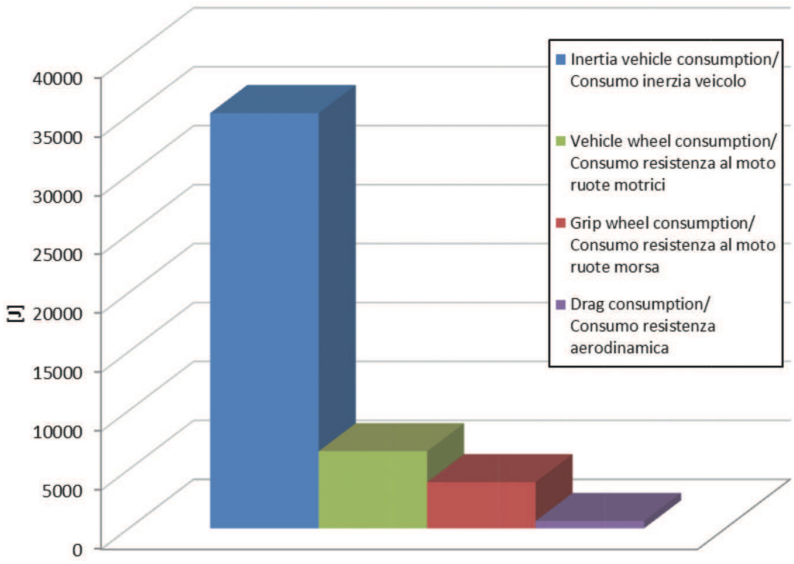


Fig. 7 - Consumo energetico in stazione durante l'accelerazione.
*Fig. 7 - Energy consumption in the station during acceleration.*

ni intermedie deve essere considerato di *500 m*, ovvero il valore medio utilizzato per questo tipo di sistema di trasporto [9], e in questo modo vi saranno *7 stazioni* per ogni anello di fune, comprese le stazioni terminali. Ciascuno dei segmenti risultanti avrà tre sostegni, con un totale di quattro campate. Il numero totale di campate per ogni anello di fune sarà 24. Naturalmente, ogni anello di fune può essere variato e installato in sequenza ad altri.

Come profilo altimetrico del terreno si è considerata una linea orizzontale poiché le zone urbane, che sono l'obiettivo per questo APM, si sono sviluppate soprattutto su territori pianeggianti. Tuttavia, gli impianti a fune, considerando il modo in cui sono progettati, possono operare su quasi qualunque profilo, anche su quelli con pendenze molto elevate.

Al fine di valutare il consumo energetico del sistema funiviario, è stato necessario definire delle ipotesi sulla linea poiché la sua configurazione, ovvero l'altezza dei sostegni, il profilo altimetrico, ecc., dipende dalla localizzazione dell'impianto.

Il franco *fr* fra il fondo del veicolo e il suolo deve essere come minimo di 5 m [15]. La freccia della catenaria deve essere sovrastimata del 25% per il caso delle funi portanti-traenti, per via delle azioni dinamiche che avvengono durante l'avviamento e l'arresto, come suggerito dalle linee guida e

*The aim of the research has been to create a line with 3 km long rope rings (horizontal length of the line) and with intermediate stations to allow the users access to the system while the vehicles are detached from the double rope and self-powered moving, before being reattached later on. The spacing between intermediate stations has been considered to be* 500 m, *that is, the average value used for this kind of transport system [9], and in this way there will be 7 stations for each rope ring, including the terminal stations. Each of the resulting segments will have 3 towers with a total of 4 spans each. The total number of spans for each rope ring will be 24. Each rope ring can of course be varied and installed in sequence to one another.*

*The ground profile was considered to be a horizontal line because urban areas, which are the target location for this APM, have mainly been developed over flat territories. However, the cableway systems, considering the way they are designed, can operate on almost any ground profile, even those with steep inclinations or grades.*

*In order to evaluate the energy consumption of the cableway system, it was necessary to make hypotheses on the line because its configuration – i.e. the height of the towers, the distance between the towers, the ground profile, etc. - depends on the specific localisation of the system.*

*The gap fr between the bottom of the vehicle and the ground must be of a minimum of 5 m [15].The sag of the catenary should be overestimated by 25% for the case of*

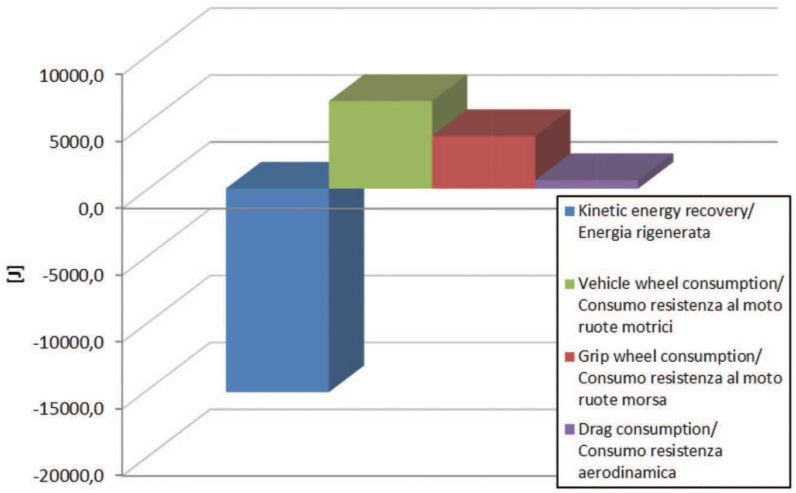


Fig. 8 - Consumo energetico durante le fasi di frenata.
*Fig. 8 - Energy consumption during the braking phase.*

02_IF_11_2015 pag_901_926__ 07/12/15 09:17 Pagina 914



dalle normative UNI [15] [20]. Considerando una deflessione della fune di 4 m, l'altezza minima dei sostegni deve essere:

$$s = v + fr + 1.25 \cdot freccia = 4.7 + 5 + 1.25 \cdot 4 = 14.7 \text{ m}$$

L'altezza dei sostegni *hs* considerata in questo studio è stata perciò di 15 m; tuttavia, questo valore deve essere verificato rispetto al profilo reale della catenaria in ciascuna campata.

La velocità *v* del veicolo quando è fissato alla fune, e della fune stessa, è di 5 m/s, mentre la velocità del veicolo all'interno delle stazioni (quando auto-motore) $v_{int}$ è di 0.5 m/s, come prescritto nella normativa [15]. L'intertempo *i* tra i passaggi dei veicoli è 6 s; questo valore deve essere verificato considerando il sistema di monitoraggio di volta in volta utilizzato conformemente alle normative [15].

Se si suppone di utilizzare rulli con gomma all'interno delle gole, il coefficiente di resistenza del rotolamento *attr* contro la fune, utilizzato per valutare l'aumento della tensione della fune durante il passaggio dei rulli, deve essere considerato uguale al 3%. Questo valore, conformemente a uno studio ancora in corso, può essere ridotto [15]. Secondo le norme, il coefficiente minimo di sicurezza k per questo tipo di sistemi è 4, mentre il coefficiente di attrito, *f*, della fune sulle pulegge è 0,2 [15].

Nel caso di un profilo altimetrico orizzontale, la peggiore condizione di lavoro, sia per l'attrito fra la fune e la puleggia motrice sia per la tensione massima della fune stessa, è quando i veicoli sono a pieno carico. La tensione all'interno della fune che entra - o si avvolge - nella puleggia motrice, che è la più elevata lungo l'intero anello della fune, è data dalla somma della tensione imposta dal contrappeso e le resistenze dei rulli in rotazione, che è una funzione del peso lineare equivalente della fune, ovvero il peso lineare della fune sommato alla densità lineare media del veicolo lungo la linea. La condizione di aderenza è peggiore se il rapporto fra la tensione in ingresso e in uscita della puleggia motrice è più elevato; il primo, come già citato, aumenta con l'aumentare del carico percentuale del veicolo, mentre il secondo diminuisce se aumenta il peso specifico equivalente della fune perché il movimento è opposto a quello dell'altro ramo della fune e la tensione si riduce dalla stazione di rinvio alla stazione motrice. Questi due fenomeni producono nuovamente un peggioramento della condizione di aderenza con l'aumento del carico percentuale dei veicoli.

Un sistema a doppia fune portante-traente viene utilizzato come supporto e per la trazione dei veicoli, come indicato alla fig. 9. Questo tipo di sistema comporta l'utilizzo di due pulegge motrici indipendenti (M1 e M2), una per ogni anello di fune. Utilizzare un motore singolo comporterebbe la stessa velocità angolare delle pulegge, che, non avendo esattamente lo stesso diametro per via delle tolleranze di fabbricazione, provocherebbero velocità delle funi differenti, provocando così una velocità re-

*carrying-hauling ropes, due to the dynamic actions that occur during the start and the stop, as suggested in the UNI technical guidelines and normative [15] [20]. Considering a deflection of the rope* (freccia) *of 4 m, the minimum height of the towers should be:*

$$s = v + fr + 1.25 \cdot freccia = 4.7 + 5 + 1.25 \cdot 4 = 14.7 \text{ m}$$

*The height of the tower, hs, considered in this study was therefore 15 m; however, this value should be checked by verifying the real sag profile in each span.*

*The speed of the vehicle v when attached to the rope (and of the rope itself) is 5 m/s, while the speed of the vehicle entering the stations (when self-powered)* $v_{int}$ *is 0.5 m/s, as prescribed in normative [15]. The headway i of the vehicles is 6 s; this value should be checked considering how the system for monitoring the vehicle motion is set up according to normative [15].*

*If we suppose that rollers with rubber inside are used, the rolling resistance coefficient attr against the rope - used to evaluate the rope tension increase during the passage on the rollers - should be considered equal to 3%; this, according to a study still in progress, may be reduced [15]. According to the norm, the minimum safety coefficient k for this kind of systems is 4, while the coefficient of friction, f, of the rope on the sheaves is 0.2 [15].*

*In the case of a horizontal ground profile, the worst working condition - both for the friction between the rope and the motor sheave and for the maximum tension of the rope itself - is when the vehicles are all fully loaded. The tension within the rope entering the motor sheave - which is the highest along the whole rope ring - is given by the sum of the tension imposed by the counterweight and the resistances of the rolling rolls, which is a function of the equivalent linear weight of the rope, that is, the linear weight of the rope added to the average linear density of the vehicle along the line. The adhesion condition is worse if the ratio between the entering and exiting rope tension of the motor sheave is higher; the first one, as already mentioned, rises as the percentage load of the vehicles rises, while the latter decreases if the specific equivalent weight of the rope increases because the motion is opposite that of the other rope branch, and the tension reduces from the return station to the drive station. These two phenomena again result in a worsening of the adhesion condition as the load percentage of the vehicles increases.*

*A double carrying-hauling rope system is used to support and for the traction of the vehicles, as shown in Fig. 9. This kind of system involves the use of two independent drive sheaves (M1 and M2) for each rope ring. Using a single motor would involve the same angular velocity as for the pulleys which, not having exactly the same diameter because of the manufacturing tolerance, would mean that the ropes would have different speeds, thus causing a relative speed between them. The calculation of the span along the catenary was then carried out considering an equivalent system with a single rope in which a vehicle with half the weight of the real one would be present (because the weight*

02_IF_11_2015 pag_901_926__ 07/12/15 09:17 Pagina 915



lativa fra esse. Il calcolo della catenaria nelle campate è stato quindi eseguito considerando un sistema equivalente con fune singola in cui sarebbe presente un veicolo con metà del peso effettivo (perché il peso sarebbe diviso in parti uguali fra le due funi, per ragioni di simmetria).

Considerando che il calcolo della linea necessita di una risoluzione iterativa, per via dell'equazione della catenaria [6], l'analisi è stata eseguita utilizzando il software di calcolo numerico MATLAB®. Sono disponibili vari software creati espressamente per la progettazione di impianti a fune, *in primis* il SIF/CDP (Software Impianti a Fune, *Cableway Design Package*); tuttavia, l'utilizzo di un programma personalizzato rende possibile generare parametri di uscita che siano direttamente in relazione al consumo energetico, che è stato l'obiettivo di questo studio. Poiché la differenza di quota fra le estremità di tutte le campate è nulla, si riducono le incognite per ogni campata perché, considerando la loro simmetria, vi saranno le stesse tensioni di fune ($T_i$) e la stessa inclinazione della fune ($\alpha_i$) alle estremità oltre al parametro della catenaria ($c$) (fig. 10). Il sistema di equazioni che definisce i parametri della catenaria in ciascuna campata è:

$$(T_{i-1} + T_i) \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2}\right) - S_i = 0$$

$$T_{i-1} + attr \cdot S_i - T_i = 0$$

$$c_i \cdot \cos\left(\frac{l}{2c_i}\right) - \frac{T_i}{pl} = 0$$

$$\cos^{-1}\left(\frac{c_i \cdot pl}{T_i}\right) - \alpha_i = 0$$

Ove il vettore delle incognite è:

$$x = (T_i, \alpha_i, S_i, c_i)$$

Il programma è stato progettato per valutare la fune con il minimo diametro che verifichi il sistema, conformemente ai vincoli delle normative tecniche [15]. Lo scopo della presente procedura è di ridurre ulteriormente il consumo energetico poiché le funi, nonostante siano elementi a bassa inerzia, generano una dissipazione che dipende soprattutto dalla loro densità lineare. L'algoritmo di ottimizzazione dell'efficienza energetica è mostrato nello schema della fig. 11. I dati d'ingresso della fune nell'algoritmo sono riassunte in una matrice:

$$rope = \begin{bmatrix} d_1 & d_2 \ldots & d_f \\ CR_1 & CR_2 \ldots & CR_f \\ p_1 & p_2 \ldots & p_f \end{bmatrix}$$

*d*: diametro della fune (mm);

*CR*: carico di rottura minimo della fune (N);

*p*: densità lineare della fune (kg/m).

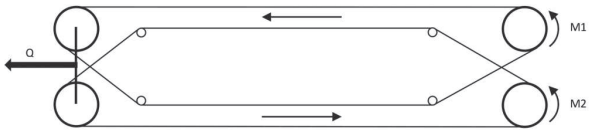


Fig. 9 - Schema del sistema funiviario con doppia fune portante traente.

*Fig. 9 - Scheme of a cableway system with a double carrying-hauling rope.*

*force will be divided equally between the two ropes, for symmetry reasons).*

*Considering that the calculation of the line requires an iterative resolution, because of the catenary equation [6], the analysis was carried out using the MATLAB® numerical calculation software. Several software packages, expressly created for the design of cableway systems, are actually available, firstly the SIF/CDP* (Software Impianti a Fune, *Cableway Design Package); however, the use of a custom-built calculation programme makes it possible to generate output parameters that are related directly to the energy consumption, which has been the aim of this study. As the height difference between the ends of all of the spans is null, the unknowns for each span are reduced because, considering their symmetry, there will be the same rope tensions ($T_i$) and the same rope inclination ($\alpha_i$) at the ends furthest from the catenary constant (c) (fig. 10). The system of equations that defines the parameters of the catenary in each span is:*

$$(T_{i-1} + T_i) \cdot \sin\left(\frac{\alpha_{i-1} + \alpha_i}{2}\right) - S_i = 0$$

$$T_{i-1} + attr \cdot S_i - T_i = 0$$

$$c_i \cdot \cos\left(\frac{l}{2c_i}\right) - \frac{T_i}{pl} = 0$$

$$\cos^{-1}\left(\frac{c_i \cdot pl}{T_i}\right) - \alpha_i = 0$$

*where the array of the unknowns is:*

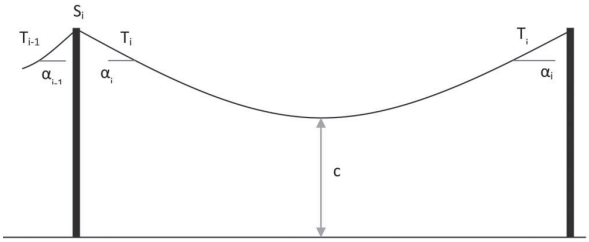


Fig. 10 - Configurazione della catenaria per un intervallo di misura generico.

*Fig. 10 - Configuration of a catenary for a generic span.*

02_IF_11_2015 pag_901_926__ 07/12/15 09:17 Pagina 916



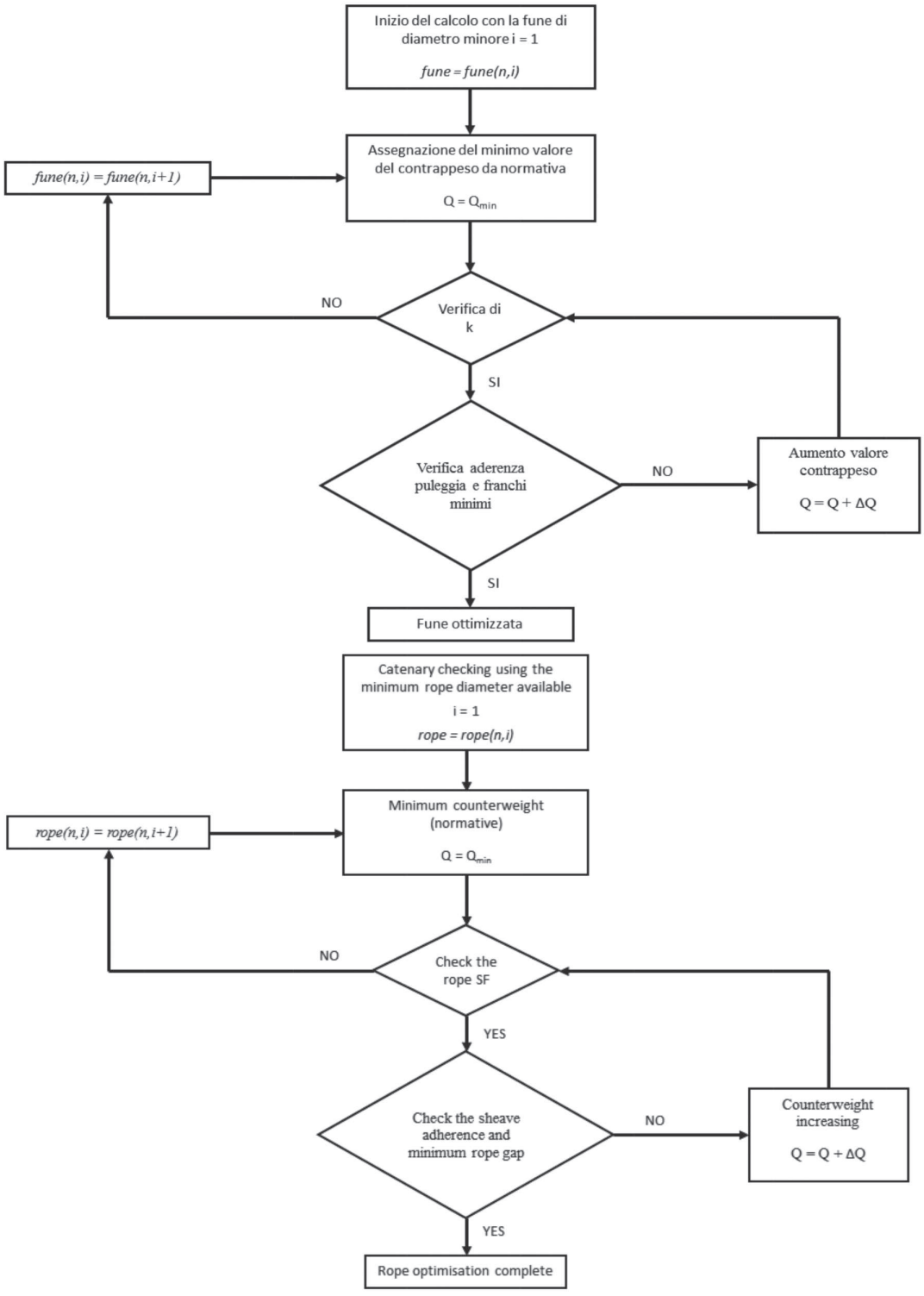


Fig. 11 - Algoritmo di ottimizzazione per l'efficienza energetica.
*Fig. 11 - Optimisation algorithm for energy efficiency.*

02_IF_11_2015 pag_901_926__ 07/12/15 09:17 Pagina 917



Uno degli *output* più importanti di questo nuovo algoritmo è la potenza richiesta all'asse delle pulegge motrici. Il programma è stato concepito per calcolare questo parametro in funzione del fattore di carico medio dei veicoli e poi in funzione della percentuale media di utilizzo della capacità della linea al fine di valutare il *consumo energetico specifico* (*kWh/passeggero-km*). Considerando un utilizzo della capacità della linea al 100%, è necessario avere una potenza totale netta agli assi delle pulegge motrici di:

$$P_{M1} + P_{M2} = 2[T_{and}(n) - T_{rit}(n)] \cdot v = 675 \text{ kW}$$

A titolo di esempio, la configurazione della catenaria nella dodicesima campata nel ramo di salita è indicata nella fig. 12.

È necessario impostare un periodo durante il quale il consumo totale di energia del sistema di trasporto può essere valutato come consumo per ogni chilometro percorso da una singola utenza. Il tempo considerato è stato il cosiddetto *tempo ciclo* (*tc*), ovvero il tempo impiegato da un veicolo per compiere un ciclo completo del sistema.

Al fine di semplificare la procedura di calcolo, è stato utile considerare l'aspetto seguente del modello: sebbene alcuni veicoli possano effettivamente accumularsi nelle stazioni, il flusso dei veicoli in ingresso deve essere uguale a quello dei veicoli in uscita, al fine di mantenere costante l'accumulo. La conseguenza è che ogni 6" un veicolo transiterà nella stazione. Ciò rende la stazione equivalente - dal punto di vista energetico - a quella di un sistema nel quale il veicolo non si disammorsa dalla fune ed al quale si attribuisce un consumo energetico uguale a quello calcolato qui sopra.

Una volta conosciute le quantità seguenti:

– energia consumata da ogni veicolo in transito alla stazione,
– frequenza delle partenze ed arrivi dei veicoli,
– potenza necessaria per movimentare i veicoli lungo la linea,

è possibile valutare l'energia totale consumata dal sistema durante un *tempo ciclo*, *tc*. Tuttavia, il consumo energetico e la potenza utilizzata dal sistema dipendono dalla massa di ciascun veicolo e tale massa dipende evidentemente dal numero di passeggeri trasportati. Il passo successivo è stato quello di definire una procedura di calcolo per valutare il consumo del sistema durante *tc* in funzione dell'effettiva *percentuale media di utilizzo della capacità della linea*; al fine di semplificare il calcolo, si è ipotizzato che tutti i veicoli funzionanti avessero lo stesso fattore di carico, così che, se si considerasse una percentuale di

$$x = (T_i, \alpha_i, S_i, c_i)$$

*The programme was designed to evaluate the rope with the minimum diameter that verifies the system according to the aforementioned technical standard constraints [15]. The aim of this protocol is to further reduce the energy consumption, because the ropes, despite being low weight elements, generate dissipation that mainly depends on their linear density. The energy efficiency optimisation algorithm is shown in the scheme of fig. 11. The input data on the rope for the algorithm are resumed in a matrix:*

$$\text{rope} = \begin{bmatrix} d_1 & d_2 \ldots & d_f \\ CR_1 & CR_2 \ldots & CR_f \\ p_1 & p_2 \cdots & p_f \end{bmatrix}$$

– *d: diameter of the rope (mm),*
– *CR: minimum breaking load of the rope (N),*
– *p: r linear density of the rope (kg/m),*

*one of the most important outputs of this new algorithm is the power of the axle drive sheaves at constant speed. The programme was designed to calculate this parameter in function of the average load factor of the vehicles and then in function of the average percentage use of the line capacity in order to evaluate the* specific energy consumption (kWh/pass-km). *Considering a* 100% *line capacity usage, it is necessary to have a total power at the drive sheaves axles of:*

$$P_{M1} + P_{M2} = 2[T_{and}(n) - T_{rit}(n)] \cdot v = 675 \text{ kW}$$

*As an example, the catenary configuration in the 12th span in the outward branch is shown in fig. 12.*

*It is necessary to set a period of time during which the total energy consumption of the transport system can be evaluated as well as the consumption for each km travelled by a single user. The time considered was the so-called* cy-

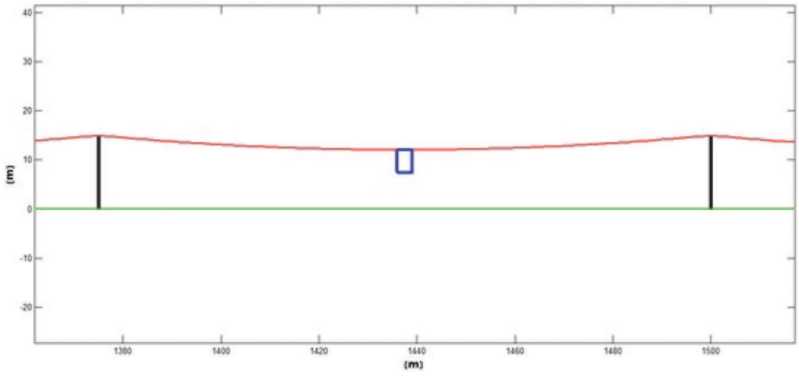


Fig. 12 - Configurazione della catenaria nella dodicesima campata del ramo di salita.
*Fig. 12 - Configuration of the catenary in the 12th span of the outward branch.*

02_IF_11_2015 pag_901_926__ 07/12/15 09:17 Pagina 918



utilizzo della linea del 50%, ogni veicolo ospiterebbe quattro passeggeri al suo interno rispetto agli otto posti disponibili.

La procedura di calcolo, per ciascun valore del fattore di carico medio, comporta pertanto quanto segue.

1. Calcolo del peso lordo del veicolo per un certo valore medio del fattore di carico:

$$mv = mv_v + np \cdot 75$$

   – np: numero medio di passeggeri per veicolo;

   – $mv_v$: tara del veicolo.

2. Calcolo della catenaria in ciascuna campata, conformemente alla procedura descritta in precedenza.

3. Calcolo della lunghezza dell'anello di fune:

$$sv_{tot} = \sum sv(i, j)$$

   – i: lato a monte;

   – j: lato a valle.

4. Calcolo del tempo ciclo:

$$tc = \frac{sv_{tot}}{v}$$

5. Calcolo del numero di veicoli sulla linea:

$$veh_{tot} = \frac{sv_{tot}}{e}$$

   e: equidistanza.

6. Calcolo del consumo energetico lordo della linea durante il tempo ciclo:

$$En_{tot,linea} = \frac{Pot \cdot tc}{\eta_{pul}}$$

   $\eta_{pul}$: efficienza del sistema motore-riduttore.

7. Calcolo del consumo energetico in una stazione nel tempo ciclo:

$$En_{tot,staz} = En_{staz} \cdot veh_{tot} \cdot 2 \cdot (n_{staz} - 1)$$

8. Calcolo del consumo energetico totale del sistema:

$$En_{tot} = En_{tot,staz} + En_{tot,linea}$$

I risultati della valutazione sono indicati alla fig. 13. Quindi, dividendo l'energia totale assorbita per numero totale di passeggeri trasportati lungo la linea e per la lunghezza del ciclo, si è trovato il consumo energetico specifico in funzione dell'utilizzo percentuale della capacità, che è stato l'obiettivo di questo studio (fig. 14):

$$En_{spec} = \frac{En_{tot}}{np \cdot veh_{tot} \cdot (2L)}$$

cle time (tc), *that is, the time spent by a vehicle to make a full cycle of the system.*

*In order to simplify the calculation procedure, it was useful to consider the following aspect of the model: although a few vehicles can actually accumulate in the stations, the flow of entering vehicles must be equal to the flow of exiting vehicles in order to keep the accumulation constant. The consequence is that a vehicle will transit the station each 6 seconds. This makes the station equivalent (from the energy point of view) to that of a system in which the vehicle does not detach from the rope and to which an energy consumption equal to the one calculated above is assigned.*

*Once the following quantities are known:*

– *the energy consumed by each vehicle transiting the station;*

– *the frequency of the departures/arrivals of vehicles;*

– *the power necessary to move the vehicles along the line.*

*It is possible to evaluate the energy globally consumed by the system during one* cycle time, *tc. However, the energy consumption and the power used by the system depend on the mass of each vehicle, and this mass obviously depends on the number of transported passengers. The next step was to define a calculation procedure to evaluate the consumption of the system during tc in function of the actual* average percentage use of the line capacity; *in order to simplify the calculation, it was hypothesised that all the operating vehicles had the same load factor, so that if a percentage of use of the line of 50% was considered, each vehicle accommodated 4 passengers inside against the 8 seats that were available.*

*The calculation procedure, for each value of the average load factor, therefore involves:*

1. *Calculation of the gross weight of the vehicle for a certain average value of the load factor:*

$$mv = mv_v + np \cdot 75$$

   – *np: average number of passengers per vehicle;*

   – $mv_v$*: vehicle tare.*

2. *Calculation of the catenary in each span according to the previously described procedure.*

3. *Calculation of the length of the rope ring:*

$$sv_{tot} = \sum sv(i, j)$$

   – *i: upstream side;*

   – *j: downstream side.*

4. *Calculation of the time cycle:*

$$tc = \frac{sv_{tot}}{v}$$

5. *Calculation of the number of vehicles on the line:*

02_IF_11_2015 pag_901_926__ 07/12/15 09:17 Pagina 919



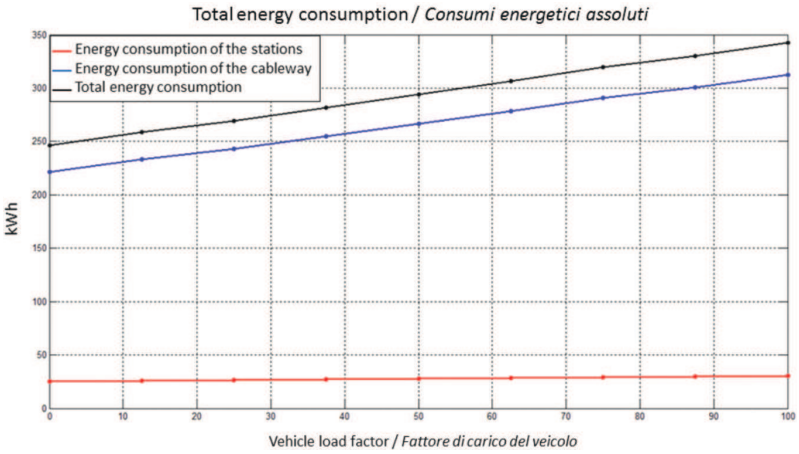


Fig. 13 - Consumo energetico totale del sistema CableSmart.
*Fig. 13 - Total energy consumption of the CableSmart.*

## 4. Confronto del consumo energetico rispetto ad altre modalità di transito

Nella letteratura tecnica sono disponibili varie pubblicazioni che trattano del consumo energetico dei sistemi di trasporto; questo, come citato in precedenza, ha assunto sempre più importanza nel corso degli ultimi trent'anni, nell'ottica del trasporto sostenibile [17] [18] [19]. Una delle ricerche più esaustive è *"Updated comparison of energy use and $CO_2$ emissions from different transportation modes"* [2] di recente pubblicazione da parte dell'*American Bus Association*. Tuttavia, il consumo energetico dei sistemi presi in considerazione in questo studio non è stato associato al corrispondente fattore di carico medio delle unità di trasporto - probabilmente poiché tali valori non sono conosciuti - e spesso sono stati forniti in campi molto vasti (fig. 15). Ne consegue che non è possibile effettuare un confronto affidabile con il sistema preso in considerazione nel presente documento.

Il consumo energetico totale riferito alle persone che vengono effettivamente trasportate, ovvero il consumo specifico, è in stretta relazione con il numero di passeggeri nelle unità di trasporto [21]. Perciò, al fine di condurre un'analisi più accurata, è necessario considerare anche questo parametro, ma ciò non è stato fatto nella maggioranza degli studi in cui il consumo specifico è generalmente espresso dalla quantità:

$$\frac{\text{Consumo energetico}}{\text{posto} \cdot \text{km}}$$

$$veh_{tot} = \frac{sv_{tot}}{e}$$

*e: vehicle spacing.*

6. *Calculation of the gross line energy consumption in the time cycle:*

$$En_{tot,linea} = \frac{Pot \cdot tc}{\eta_{pul}}$$

$\eta_{pul}$*: efficiency of the motor-gear box system*

7. *Calculation of the energy consumption in a station in the time cycle:*

$$En_{tot,staz} = En_{staz} \cdot veh_{tot} \cdot 2 \cdot (n_{staz} - 1)$$

8. *Calculation of the total energy consumption of the system:*

$$En_{tot} = En_{tot,staz} + En_{tot,linea}$$

*The results of the evaluation are shown in fig. 13. Then, dividing the total energy absorbed by the total number of passengers transported along the line and by the length of the cycle, the specific energy consumption was found in function of the percentage use of the capacity, which has been the aim of this study (fig. 14):*

$$En_{spec} = \frac{En_{tot}}{np \cdot veh_{tot} \cdot (2L)}$$

## *4. Comparison of the energy consumption with other transit modes*

*Several publications are available in the technical literature that deal with the energy consumption of transport systems which, as previously mentioned, has assumed*

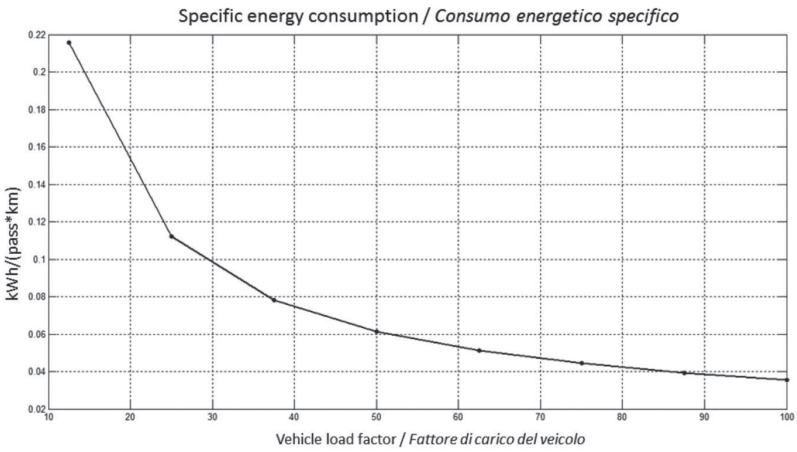


Fig. 14 - Consumo energetico specifico del sistema CableSmart.
*Fig. 14 - Specific energy consumption of the CableSmart.*

02_IF_11_2015 pag_901_926__ 07/12/15 09:17 Pagina 920



| MODE | Pass-mi/Gal** | | | Btu/pass-mi | | | CO2 g/pass-mi | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | low | AVG | high | low | AVG | high | low | AVG | high |
| Motorcoach | 225.1 | **239.8** | 251.2 | 549 | **575** | 613 | 41 | **43** | 46 |
| Van Pool | 60.3 | **106.1** | 203.8 | 677 | **1,300** | 2,289 | 50 | **97** | 170 |
| Heavy Rail | 55.0 | **190.6** | 245.5 | 562 | **724** | 2,510 | 99 | **127** | 442 |
| Commuter Rail | 32.1 | **90.3** | 169.5 | 814 | **1,528** | 4,297 | 143 | **183** | 320 |
| Intercity Rail (AMTRAK) | 73.0 | **85.2** | 150.3 | 918 | **1,619** | 1,892 | 162 | **147** | 141 |
| Car Pool - 2 person | 36.3 | **55.9** | 121.1 | 1,140 | **2,470** | 3,800 | 85 | **184** | 283 |
| Light Rail | 6.2 | **92.0** | 209.6 | 658 | **1,500** | 22,212 | 116 | **264** | 3,910 |
| Trolley Bus | 55.1 | **106.6** | 125.2 | 1,103 | **1,294** | 2,505 | 194 | **228** | 441 |
| Domestic Air Travel | | **54.8** | | | **2,519** | | | **188** | |
| Car - Avg Trip | 25.2 | **38.8** | 84.1 | 1,641 | **3,555** | 5,470 | 122 | **265** | 407 |
| Transit Bus | 3.6 | **70.5** | 250.0 | 552 | **1,957** | 37,884 | 40 | **136** | 2,767 |
| Car - 1 Person | 18.2 | **27.9** | 60.5 | 2,280 | **4,939** | 7,600 | 170 | **368** | 566 |
| Ferry Boat | 2.0 | **12.5** | 27.1 | 5,085 | **11,003** | 70,704 | 379 | **819** | 5,264 |
| Demand Response | 1.6 | **8.6** | 59.5 | 2,317 | **15,957** | 86,746 | 167 | **1,151** | 5,823 |

**Passenger miles per Diesel Equivalent gallon

Fig. 15 - Valori indicativi di consumo energetico e di emissioni per varie modalità di trasporto (*American Bus Association, 2014*).

*Fig. 15 - Indicative values of energy consumption and emissions for several transport modes* (American Bus Association, 2014).

che è quindi indipendente dal fattore di carico effettivo dei veicoli, ovvero dai passeggeri che sono effettivamente trasportati.

Occorre fare un'altra considerazione per quanto attiene al confronto fra differenti modalità di trasporto. Il calcolo del consumo specifico dei sistemi di trasporto che utilizzano alimentazione elettrica, compreso quello oggetto di questo studio, non considera la dissipazione relativa alla sua generazione (efficienza *Tank-to-Wheel*), rendendo così inaffidabile ogni confronto con le modalità di trasporto che utilizzano direttamente derivati dal petrolio grezzo come fonte di energia. Un confronto della quantità di $CO_2$ emessa alle fonti primarie (analisi di efficienza *Well-to-Wheel*) è più affidabile per stabilire quali sia il sistema più efficiente [2].

Considerare le emissioni di $CO_2$ alle fonti primarie di energia consente di eseguire un confronto più accurato, grazie allo studio chiamato *Public transportation's role in responding to climate change* (U.S. Department of Transportation, 2010) [19]. In questo documento, il dipartimento dei trasporti degli Stati Uniti d'America mostra i risultati delle emissioni di $CO_2$/(passeggero-km) di vari sistemi di trasporto urbano, considerando anche il parametro dell'*effettivo utilizzo medio dei veicoli* per ogni sistema. I risultati dello studio sono riassunti alla fig. 16.

In questo modo è stato possibile paragonare le emissioni di CableSmart, considerando un utilizzo medio (fig.

*more and more relevance over the last thirty years from the sustainable transportation point of view [17] [18] [19]. One of the most comprehensive researches is the recently published* "Updated Comparison of Energy Use and $CO_2$ Emissions From Different Transportation Modes" *[2] by the* American Bus Association. *However, the energy consumption of the systems considered in this study have not been associated to the corresponding average load factor of the transport units (probably because they are unknown) and they have been provided in often very wide ranges (fig. 15). As a result, a reliable comparison with the system considered in this paper is not possible.*

*The total energy consumption of a system referred to the people actually transported - that is, the specific one - is closely related to the number of passengers in the transport units [21]. Therefore, in order to conduct a more accurate analysis, it is also necessary to consider this parameter, but this has not been done in the majority of studies in which the specific consumption is generally expressed by the quantity:*

$$\frac{Energy\ consumption}{seats \cdot km}$$

*then independent from the actual load factor of the vehicles, that is from the passengers effectively transported.*

*A further consideration should be made concerning the comparison between different transport modes. The calculation of the specific consumption of transport systems that use electrical power, including the here analysed one, is based on the energy taken directly from the electric grid and does not consider the dissipation related to its generation (Tank-to-Wheel efficiency), thus making any comparison with transport modes that directly use black oil derivatives as an energy source unreliable. A comparison of the $CO_2$ quantity emitted at the primary sources (Well-to-Wheel efficiency) is more suitable to establish the most efficient system [2].*

*Considering the $CO_2$ emission at the primary sources of energy allows a more accurate comparison to be performed, thanks to the study named Public Transportation's Role in Responding to Climate Change (U.S. Department of Transportation, 2010) [19]. In this paper, the department of transportation of the United States of America shows the results of a research on the emission of $CO_2$/(pass-km) of several urban transport systems, also considering the important average actual utilization of the*

02_IF_11_2015 pag_901_926__ 07/12/15 09:17 Pagina 921



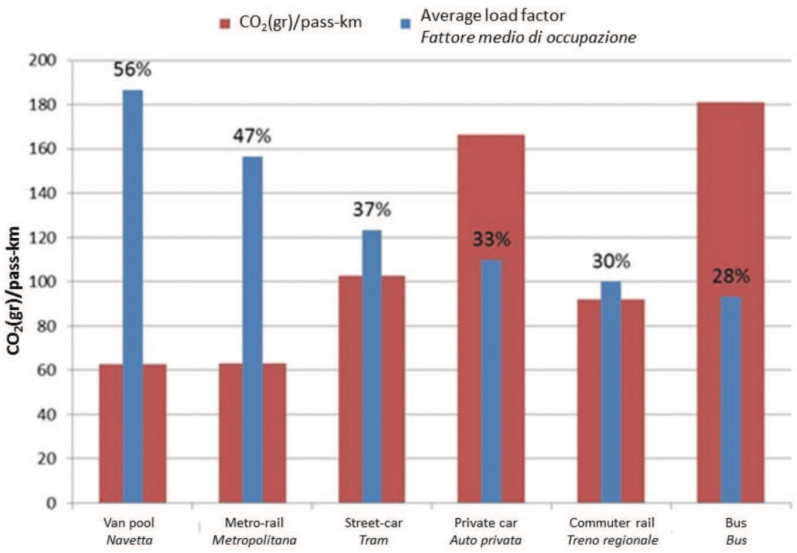


Fig. 16 - Emissioni di $CO_2$ alle fonti primarie per vari sistemi di trasporto (elaborazione dal Dipartimento USA dei Trasporti).

*Fig. 16 - $CO_2$ emissions at the primary sources for different transport systems (elaboration from the U.S. Dept. of Transportation).*

14) che è lo stesso di quello della modalità di trasporto presa di volta in volta in considerazione. Al fine di convertire i dati ottenuti dalla fig. 14, espressa in kWh, nelle emissioni di $CO_2$ alle fonti primarie di energia, si è presa in considerazione la miscela energetica mista degli USA, perché i dati presenti nell'articolo del relativo Dipartimento dei Trasporti fanno riferimento a questo valore. Nel 2007, negli USA si sono generati *600,6 grammi di* $CO_2$ per ogni kWh consegnato agli utenti [2]. Mediante una conversione appropriata, è stato possibile valutare il rapporto fra le emissioni di CableSmart e quelle di altri sistemi (fig. 17).

## 5. Conclusioni

I risultati presentati nel presente documento indicano che:

– il modello matematico basato sull'innovativa cabinovia progettata da *Dimensione Ingenierie* ha consentito di stimare il consumo energetico specifico per questo tipo di sistema di trasporto. Detto consumo energetico è risultato inferiore a quello di altre modalità di trasporto, in particolare quello dei sistemi urbani. Il risultato può essere attribuito soprattutto alla tara

*vehicles parameter for each system. The results of the study are summarised in fig. 16.*

*In this way, it was possible to compare the emission of CableSmart, considering an average use (fig. 14) which is the same as that of the transport mode considered. In order to convert the data obtained from, fig. 14, expressed in kWh, to the $CO_2$ emissions at the primary energy sources, the USA average energy mix was considered, because the data present in the U.S. Department of Transportation's paper refers to this value. In 2007, in the USA, 600.6 grams of $CO_2$ were generated for each kWh delivered to the users [2]. With an appropriate conversion, it was possible to estimate the ratio between the emission of CableSmart and the emission of the other systems (fig. 17).*

## *5. Conclusions*

*The results presented in this paper show that:*

– *the mathematical model based on the innovative gondola ropeway designed by* Dimensione Ingenierie *has allowed the specific energy consumption for this kind of transport system to be estimated. This energy consumption has resulted to be lower than that of other transport modes, in particular that of urban systems. This result is mainly attributable to the low vehicle tare of*

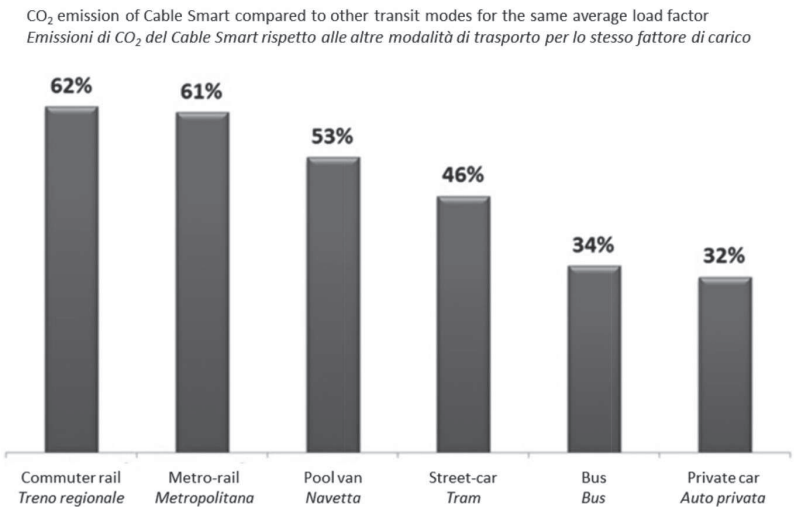


Fig. 17 - Emissioni di $CO_2$ di CableSmart paragonate ad altre modalità di trasporto per lo stesso carico veicolo.

*Fig. 17 - $CO_2$ emission of CableSmart compared to other urban transport modes for the same vehicle load.*

02_IF_11_2015 pag_901_926__ 07/12/15 09:17 Pagina 922



ridotta dei veicoli degli impianti a fune, per via dell'assenza d'impianti di propulsione principale a bordo;

– la possibilità di ridurre la capacità della linea durante periodi in cui la domanda di trasporto è ridotta - non studiata nel presente documento - comporta la possibilità di un ulteriore risparmio energetico. Inoltre, la possibilità di utilizzare fonti energetiche rinnovabili, grazie all'alimentazione elettrica, rende possibile ridurre ulteriormente le emissioni di $CO_2$ rispetto a modalità che sono tradizionalmente alimentate con derivati del petrolio.

Tali principali aspetti, unitamente agli altri vantaggi dell'*APM* a fune, vale a dire:

– il basso costo per il ciclo di vita dell'impianto[5],
– la possibilità di un servizio a richiesta, grazie al livello elevato d'automazione, che conduce a un'ulteriore riduzione del consumo energetico,
– l'assenza d'inquinamento locale, grazie all'alimentazione elettrica,
– la limitazione dell'inquinamento da rumore, per via della collocazione delle stazioni di motorizzazione,
– la possibilità di creare una linea aerea (per impianti aerei) con ridotta impronta al suolo, così da evitare interferenze con altri sistemi terresti e con barriere naturali,

rendono il sistema una soluzione appropriata alle questioni sollevate nel documento *Trasporti 2050,* in merito alle tecnologie innovative finalizzate a garantire un trasporto sostenibile.

Il presente studio fornisce una fonte di dati sul consumo energetico riguardante gli APM basati su trazione a fune o CAPM che, come indicato, presentano un numero piuttosto limitato di installazioni e mancano pressoché di altri studi sull'argomento.

*ropeway systems, due to the on-board absence of the main propulsion;*

– *the possibility of reducing the line capacity during low transport demand periods - which was not studied in this paper - entails the possibility of a further energy saving. Moreover, the possibility of renewable energy source usage, due to the electric powering of the system, makes it possible to further reduce the $CO_2$ emissions with respect to modes which are traditionally fuelled with black oil derivatives.*

*These main aspects, together with the other advantages of* CAPM*, that is:*

– *the low life cycle cost of the installation[5];*
– *the possibility of "on demand" service, thanks to the high level of automation, which leads to a further reduction in energy consumption;*
– *the absence of local pollution, thanks to the electric powering;*
– *the limitation of noise pollution, due to the location of the drive stations;*
– *the possibility of creating an aerial line (for aerial systems) with a very low ground footprint so that intersection with other terrestrial systems and with natural barriers can be avoided;*

*make this system a proper solution to the issues pointed out in the* Transport 2050 *paper concerning innovative technologies in order to guarantee sustainable transportation.*

*This study provides a source of data on energy consumption related to Automated People Movers based on rope traction or CAPM, which, as mentioned, result in a limited number of installations and which are lacking in almost every other study on the topic.*

BIBLIOGRAFIA - *REFERENCES*

[1] Alshalalfah B., Shalaby A., Dale S., Othman F.M.Y., *"Aerial ropeway transportation systems in the urban environment: State of the art",* Journal of Transportation Engineering, 138 (3), pp. 253-262, 2012

[5] Va considerato che, mentre una metropolitana tradizionale costa attualmente da 120 a 150 milioni di Euro per chilometro d'investimenti e che una metropolitana automatica senza conducente e con un percorso inaccessibile, può costare tra 60 e 80 milioni di Euro/km, un APM con trazione a fune può rimanere al di sotto dei 30-50 milioni di Euro per chilometro; la soluzione qui concepita e descritta può costare dai 10 ai 15 milioni di Euro al chilometro, data l'assenza di costosi sistemi per la decelerazione e l'accelerazione dei veicoli alle stazioni, che sono sostituiti piccoli motori elettrici al di sopra della cabina, la cui manutenzione può essere affidata a personale non specializzato e che sono anche ridondati in una logica di sicurezza intrinseca.

[5] *It should be considered that, while a traditional underground currently costs something like 120-150 million Euros/km of investment and an automated underground, unmanned and with an inaccessible pathway, may cost up to 60-80 million Euros/km, an APM with rope traction can remain below 30-50 million Euros/km; the conceived and here described hybrid solution may cost between 10-15 million Euros/km, given the absence of the expensive systems for decelerating and accelerating vehicles at the stations, which are substituted by small electric motors above the cabin that can easily be maintained by non - specialised staff, and are also redundant in a fail-safe logic.*

02_IF_11_2015 pag_901_926__ 07/12/15 09:17 Pagina 923




[2] American Bus Association, *"Updated Comparison of Energy Use and $CO_2$ Emissions From Different Transportation Modes",* prepared by M.J. Bradley and Associates, April 2014.

[3] ASCE, *"Automated People Mover Standards",* ASCE 21-05, Published 2006.

[4] ASCE, *"Automated People Movers 2009: Connecting People, Connecting Places, Connecting Modes",* Edited by R. R. Griebenow, 12th International Conference of Automated People Movers, Atlanta, Georgia, United States, May 31-June 3, 2009, ISBN: 978-0-7844-1038-7, American Society of Civil Engineers, 2009.

[5] Bruno F., Coviello N., Dalla Chiara B., Di Paola A., Pagliero P., Viktorov V., *"The energy consumption of trains in operation: simulation, a methodology for the analysis and influence of the driving style / Il consumo energetico di treni in esercizio: simulazione, metodologia di analisi ed influenza dello stile di condotta",* Ingegneria Ferroviaria, vol. LXX, ISSN: 0020-0956. N. 4, pp. 327-357, April 2015.

[6] Crotti A., Alberto D., Dalla Chiara B., Vallana M., *"Impianti a fune - Elementi costitutivi, progettazione ed esercizio",* pp. 1-256, Edizioni MarioGros, Torino, ISBN 9788890202704, 2006.

[7] Dalla Chiara B., Degioanni P., Fumarola F.P., *"Riepilogo di sistemi di trasporto innovativi",* Ingegneria Ferroviaria, anno LXIII, n. 1, 1/2008.

[8] Dalla Chiara B., Degioanni P., *"Un* Automated People Mover *(APM) con trazione a fune e struttura a rete",* Ingegneria Ferroviaria, anno LXII, numero 5, pp. 417-431, maggio 2007.

[9] Dalla Chiara B., *"Sistemi Innovativi per il Trasporto Metropolitano".* Lecturer notes. Dispense per gli insegnamenti di *"Sistemi di trasporto"* e *"Progettazione ed esercizio dei sistemi di trasporto",* Torino, Centro Stampa, Politecnico di Torino, 2012.

[10] Dimensione Ingenierie, *"Sistema Innovativo di Trasporto Urbano",* progetto interno, internal design, Torino, Febbraio 2014.

[11] European Commission, Transport 2050 – *"The White Paper",* Bruxelles, 2011.

[12] Hofmann G., *"Ropeway Technology",* pp. 834, Garaventa, 2015.

[13] Jakes A.S., *"Trends in airport Automated People Movers",* Proceedings of the International Conference on Automated People Movers, pp. 81-90, 2005.

[14] Mineta Transportation Institute, *"Automated Transit Networks (ATN): A Review of the State of the Industry and Prospects for the Future"* authors Furman B., Fabian L., Ellis S., Muller P., Swenson R., September 2014.

[15] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (I). Direzione Generale per il Trasporto Pubblico Locale. Italia, 2012, Novembre 1, R.D. 337 - 08.09, Allegato Tecnico al D. D. n. 337 del 16 novembre 2012, *"Disposizioni e prescrizioni tecniche per le infrastrutture degli impianti a fune adibiti al trasporto di persone",* pp. 121, Roma, 2012.

[16] Neumann E. S., *"The past, present, and future of urban cable propelled people movers",* Journal of Advanced Transportation, 33: 51–82, 1999.

[17] Sinha K., *"Sustainability and Urban Public Transportation",* Journal of Transportation Engineering, 129(4), 331–341, Volume 129, Issue 4, July 2003.

[18] Siu L.K., *"Innovative Lightweight Transit Technologies for Sustainable Transportation",* Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 7(2):63-70, April 2007.

[19] U.S. Department of Transportation, Public Transportation's Role in Responding to Climate Change, January 2010.

[20] UNI Gruppo di lavoro / Working Group, *"Linee Guida per la Progettazione dei sistemi di trasporto persone ad automazione integrale con trazione a fune",* 2015/16.

[21] Vuchic V., *"Urban Transit: Systems and Technology",* 624 pages, Wiley, ISBN: 978-0-471-75823-5, March 2007.

[22] VV.AA., *"Automated People Movers and Transit Systems 2013: Half a Century of Automated Transit - Past, Present, and Future",* Proceedings of the 14th International Conference, 597 p., 2013.