POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Energy load analysis of a fully automated hybrid cable-driven public transport system: simulation with a photovoltaic system and storage / Analisi del carico energetico di un

Original
Energy load analysis of a fully automated hybrid cable-driven public transport system: simulation with a photovoltaic system and storage / Analisi del carico energetico di un sistema di trasporto pubblico ibrido a fune ad automazione integrale: simulazione con impianto fotovoltaico ed accumulo / Bazzolo, Stefano; Blengini, Sergio; DALLA CHIARA, Bruno. - In: INGEGNERIA FERROVIARIA. - ISSN 0020-0956. - STAMPA. - LXXIV:12(2019), pp. 963-989.

Availability:
This version is available at: 11583/2800764 since: 2024-03-26T15:30:13Z

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)

05 May 2024

Analisi del carico energetico di un sistema di trasporto pubblico ibrido a fune ad automazione integrale: simulazione con impianto fotovoltaico ed accumulo

Energy load analysis of a fully automated hybrid cable-driven public transport system: simulation with a photovoltaic system and storage

Stefano BAZZOLO[(*)(**)]
Sergio BLENGINI[(*)]
Bruno DALLA CHIARA[(**)]

Sommario - Ricordando che i vantaggi del trasporto su fune sono essenzialmente riconducibili a minore dispendio energetico specifico rispetto a quelli con trazione a bordo e a superare ostacoli naturali quali fiumi o colline, a sorvolare aree urbanizzate, grazie alla snella infrastruttura di cui necessitano ed alla possibilità di avere una distanza tra sostegni nell'ordine di 100-200 m, si è voluto investigare nello specifico il carico energetico effettivo di un tal sistema in una soluzione di tipo ibrido. L'analisi di simulazione energetica e il modello analitico adottati hanno dimostrato come sia possibile, tramite l'installazione di un impianto fotovoltaico che sfrutti unicamente le superfici dell'infrastruttura, dei veicoli e delle stazioni del sistema di trasporto a fune analizzato (CableSmart), ridurre l'impatto energetico e l'energia prelevata dalla rete elettrica fino a più del 50% in un caso studio. Ciò porta un *people mover* urbano a fune di tipo ibrido, che già a livello di carico energetico appare più efficiente rispetto ai sistemi tradizionali di mobilità urbana, ad essere energeticamente meno impattante sulla rete elettrica, con un conseguente ulteriore risparmio in termini di emissioni di sostanze inquinanti e di CO_2.

1. Introduzione

L'esperienza in tema di impianti automatici con trazione a fune per il trasporto pubblico (*Automated People Movers*, APM, a fune) è relativamente limitata, poiché ad oggi non sono stati realizzati numerosi impianti. Tuttavia, la loro importanza è oggi molto più significativa che in passato per via della loro notevole competitività per quanto attiene al consumo energetico per passeggero al

(*) Dimensione Ingenierie srl.
(**) Politecnico di Torino, Dip. DIATI-Trasporti.

Summary - *Bearing in mind that the advantages of cable-driven transport are basically due to its specific lower energy requirements than those of vehicles with traction aboard, to its capacity to overcome natural obstacles such as rivers or hills, to its possibility of flying over urban areas, as a result of the lean infrastructure it requires and to the possibility of having distances between the supports that indicatively span between 100 and 200 m, an attempt has here been made to estimate the actual energy load of such a system in a hybrid solution. In this case study, the analysis of the simulation of energy use and the adopted analytical model have shown how it is possible, through the installation of a solar storage system that only takes advantage of the surfaces of the infrastructure, of the vehicles and of the stations of the analysed cable-driven system (CableSmart), to reduce the energy impact and the energy withdrawn from the electricity grid by as much as 50%. This leads to an urban cable* people mover *of a hybrid type that, already at an energy load level, appears more efficient than traditional urban transport systems, to reduce the energy impact on the electric grid, and to have a further consequent saving in terms of pollutants and CO_2 emissions.*

1. Introduction

Experience in the field of automated ropeways for public transport (cable driven Automated People Movers*, C-APM) is relatively limited, as to date not many installations have been realized. However, their importance is now much more significant than in the past, due to their considerable competitiveness in terms of energy consumption per passenger and per km, since they do not require an engine on*

(*) Dimensione Ingegnerie.
(**) Politecnico di Torino (I), Dept DIATI-Transport systems.

km, poiché non necessitano di motore a bordo né, di conseguenza, di trasmissione meccanica alle ruote o di una struttura adeguata per reggere i relativi carichi: la trasmissione della potenza è lasciata ad un componente meccanico con poca inerzia al moto, quale una fune in acciaio. Pertanto, tali impianti presentano una notevole attrattiva anche dal punto di vista ambientale, poiché il motore e le relative emissioni di rumore possono essere confinate in una zona protetta, la stazione.

Il passaggio evolutivo rispetto a tali impianti è quello illustrato in [1] vale a dire un sistema ibrido, denominato CableSmart: la sua differenza principale 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 verso le stazioni, si arrestano in prossimità degli accessi dei passeggeri, possono viaggiare per distanze relativamente lunghe sostenute da una propria guida su fune o rotaia e possono seguire percorsi specifici definiti, nel caso, dagli utenti. Inoltre, i veicoli in ingresso alle stazioni e in 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 fine di questo articolo è pertanto l'analisi energetica dei carichi dell'innovativo sistema di trasporto urbano "CableSmart" nelle sue tratte con supporto su rotaia, il confronto con i carichi dello stesso sistema nelle sue tratte su fune, e lo studio di un'eventuale sinergia tra un trasporto urbano di questo tipo e un impianto di produzione energetica da fonte solare.

2. Stato dell'arte

Nessun altro sistema di trasporto motorizzato è altrettanto competitivo in termini di consumo energetico e di emissioni di rumore quanto gli APM [1]. In un impianto con trazione a fune, una parte importante delle perdite di energia proviene dai rulli, in particolare dall'interazione fra la fune metallica (in acciaio) e la puleggia o la banda in gomma sul singolo rullo [2] [3]. Le perdite energetiche rimanenti sono originate dalla deformazione della fune durante le fasi di contatto [4], dall'interazione aerodinamica del vento con l'impianto (fune e veicolo) e dall'efficienza del gruppo motore-trasmissione. Alcuni dettagli possono essere utili a chiarire la questione: la perdita di energia su ogni rullo non è molto elevata, poiché ammonta a poche centinaia di watt, rispetto alle centinaia di kilowatt richiesti dalla potenza di un motore. Tuttavia, in un impianto si possono contare centinaia di rulli ed è per

board, any mechanical transmission to the wheels or an adequate structure to support the resulting loads: the power transmission is left to a mechanical component with low inertia to motion, i.e. a steel wire rope. Therefore, such systems also have a considerable attractiveness from the environmental point of view, since the electric motor and the related noise emissions can be confined to a protected area, the station.

The evolutionary transformation of such a consolidated cable-driven installation is illustrated in [1], a hybrid system, named CableSmart: the main difference between this one and the traditional cableways is the possibility of making the vehicles self-movable by equipping them with electric motors and remote control devices for their movement when they are un-gripped from the steel wire rope, in other words, endowing them with hybrid traction. The single vehicles move autonomously towards the stations, can stop in the proximity of the passenger access points, can travel for relatively long distances supported by their own guides on ropes or rails, and can follow specific routes defined, when necessary, by the users. Moreover, the vehicles entering or exiting from the stations are decelerated or accelerated, respectively, during the disconnection from and connection to the cable by means of electric motors on board; therefore, it is also possible to recover energy during braking phases. When the vehicles are un-gripped from the steel wire rope, they are powered through a specific contact line; vice versa, when they are gripped to the rope, a battery pack guarantees the energy necessary for the ancillary services (illumination, air conditioning, etc.).

Therefore, the aim of this paper has been to perform an energy analysis of the loads of an innovative urban transport system ("CableSmart") for its stretches with rail support, to perform a comparison with the loads of the same system in its stretches with cable support and to conduct a study on the possible synergy between urban transport of this type and a solar source energy production system.

2. State of the Art

No other motorised transport system is so competitive, in terms of specific energy consumption and noise emissions, as APMs [1]. An important part of the loss of energy in a cable-driven system can be attributed to the rollers, in particular to the interaction between the steel wire ropes and the pulleys or the bands of rubber on each single roller [2] [3]. The remaining losses originate from the deformation of the cable during the contact phases [4], from the aerodynamic interactions of the wind with the plant (cable and vehicles) and from the efficiency of the powertrain units. Some details may be useful to clarify this aspect: the loss of energy on each roller is not so high, as it amounts to a few hundred watts, compared to the hundreds of kilowatts required to power an engine. However, there may be hundreds of rollers in a cableway; for this reason, rollers are important, especially in an urban installation that works continuously throughout the entire day and

questo che i rulli sono così importanti, soprattutto in un impianto urbano che funzioni in servizio continuativo durante tutta la giornata e tutto l'anno. Per esempio, in una cabinovia in esercizio, la Aosta-Pila, dalla progettazione della linea si può osservare che circa l'80% degli assorbimenti energetici è generato dalle perdite energetiche dei rulli. In una semplice seggiovia, il consumo energetico associato ai rulli è pari circa all'85%, considerando sempre la progettazione della linea [5].

Le norme tecniche [6] [7] forniscono informazioni sul consumo energetico dei rulli: la norma UNI EN 12930: 2007 "Requisiti di sicurezza per gli impianti a fune progettati per il trasporto di persone– Calcolo" e, in Italia, il D.D. n. 337 – 16.11.2012, "Disposizioni e prescrizioni tecniche per le infrastrutture degli impianti a fune adibiti al trasporto di persone" stabiliscono che l'attrito dei rulli deve essere calcolato come il 3% del carico verticale [6] se la fascia è costituita da una mescola di gomma. Si tratta di un valore convenzionale, che è fornito anche nei regolamenti preesistenti in Italia. Così, come emerge in [5], si tratta di un valore che si pone molto dalla parte della sicurezza; ciò è ottimo per la progettazione dell'impianto a fune, ma è troppo elevato per un effettivo confronto fra sistemi di trasporto urbani in termini energetici.

In [5] gli autori sono stati in grado di affermare che per valutare il consumo energetico per un APM con trazione a fune – in condizioni di regime – occorre utilizzare un massimo del 2% del carico verticale invece del 3% dato dalle prescrizioni normative. Sulla base di tale ricerca, gli autori hanno ritenuto che il miglior valore che corrisponda al comportamento reale debba essere fra l'1 e l'1,5%.

Per il trasporto urbano [8] è necessario contenere il consumo di energia dei rulli [1], stante la loro abbondanza, un obiettivo plausibile è di contenerlo entro l'1% del carico verticale. Tale risultato può essere ottenuto progettando e sviluppando un prodotto specifico – sia come rullo sia come guarnizione – e lo studio qui presentato può rappresentare la base per la modellazione del comportamento sia energetico sia funzionale dei rulli.

Si è quindi cercato di analizzare come il sistema in analisi (CableSmart) non solo sia energeticamente più efficiente e meno impattante rispetto ai tradizionali sistemi di trasporto urbano, come già dimostrato in [1], ma anche come si possa ulteriormente diminuirne l'impatto energetico inserendo nel suo mix energetico l'energia prodotta da un impianto fotovoltaico installato sull'infrastruttura e sui veicoli del CableSmart, energia eventualmente transitante attraverso un sistema di accumulo energetico che ha lo scopo di disaccoppiare temporalmente la produzione energetica dal suo consumo.

Il tema appare quindi essere di stretta attualità, considerando gli sforzi di molti Paesi di ridurre le emissioni di agenti inquinanti e di CO_2, testimoniati tra gli altri dalla firma di quasi la totalità della comunità internazionale degli accordi "Cop21" di Parigi, che impegnano gli stati firmatari ad una riduzione delle emissioni inquinanti.

throughout the entire year. Take, for example, a cableway that is already in operation, the Aosta-Pila gondola system; from the design of the line, it can be observed that 80% of the energy consumption is due to energy losses related to the friction of the rollers. The energy loss of, for example, a simple chairlift associated with the rollers, can be equal to about 85%, always in relation to the design of the line [5].

Technical standards [6] [7] provide information about the electrical consumption of the rollers: the UNI EN 12930: 2007 standard "Safety requirements for cable cars designed for the transport of people – Calculation" and, in Italy, decree D.D. no. 337 – 16.11.2012, "Instructions and technical prescriptions for the infrastructures of cable systems used for the transport of people", establish that the friction of rollers should be calculated as 3% of the vertical load [6], if the covering material of the rollers is made up of a mixture of rubber. This is obviously a conventional value, which was also available in the standards and regulations previously compulsory in Italy. Therefore, as can be seen in [5], this is a value that clearly falls on the safe side; this is optimal for the design of a cable system, but it is too high for an effective comparison of urban transport systems in energetic terms.

In [5], the authors were able to affirm that, in order to assess the energy consumption of a C-APM – under regular load conditions- it was necessary to use a maximum of 2% of the vertical load instead of the 3% suggested in the technical standards. On the basis of that research, the authors stated that the best value that corresponds to real behaviour should fall between 1 and 1.5%.

As far as urban transport is concerned [8], it is necessary to curb the energy consumption of the rollers [1], in consideration of their abundance, and a plausible objective would be to restrict it to within 1% of the vertical load. This result could be obtained by designing and developing a specific product – as far as both the roller and the rubber compound (gasket) are concerned – and the here presented study may constitute the basis for the modelling of both the energetic and working behaviour of the rollers.

An attempt has therefore been made to analyse how the system under analysis (CableSmart) is not only more energetically efficient than traditional urban transport systems, as already demonstrated in [1], but also how it would be possible to further diminish the energetic impact by introducing energy produced by means of a solar system, installed on the infrastructure and on the vehicles, into the energy mix, that could possibly pass through an energy accumulation system and enable the temporary disconnection of the energetic production from its consumption.

This theme therefore seems to be highly topical, considering the efforts many countries are currently making to reduce the emissions of polluting agents and CO_2, as witnessed by the signing of the "Cop21" agreements in Paris by almost the entire international community, agreements that self-oblige the signing parties to reduce polluting emissions.

The whole transport sector is currently responsible for about 25-30% of the anthropic CO_2 emissions in Europe,

Il settore dei trasporti incide oggi in Europa per circa il 25-30% delle emissioni di origine antropica di CO_2, ed è quindi improbabile che il rispetto degli accordi internazionali prima citati possa avvenire senza una spinta verso l'efficientamento energetico nel settore dei trasporti stesso.

3. Iter di analisi

Lo studio di simulazione energetica è stato effettuato prendendo in considerazione quattro città. Le variabili funzione della città incorporate nel modello sono:

- radiazione solare e matrice di produzione specifica da fonte fotovoltaica in funzione del mese e dell'ora;
- temperatura e ore di luce, da cui dipende in modo diretto l'energia necessaria per il comfort della cabina;
- matrice del coefficiente di traffico. Il coefficiente di traffico è stato preso come indicatore sintetico della domanda di mobilità urbana, da cui dipende il numero di cabine circolanti.

La scelta delle città sui cui parametri è stata effettuata la simulazione energetica dipende dalle motivazioni seguenti e da una scelta di una varietà di scale urbane differenti.

- Torino - Città sede degli autori e che ospita la sede operativa di Dimensione Ingegnerie; è una metropoli di circa 800/900.000 abitanti. Il sistema ibrido potrebbe contribuire a migliorare la qualità della mobilità urbana in città di medio-grandi dimensioni come Torino, in cui è presente una linea di metropolitana (una seconda linea urbana è in fase di progetto), e in cui è forte la domanda di mobilità urbana.
- Londra - Un sistema come quello in analisi potrebbe essere installato a Londra, megalopoli inglese sulle rive del Tamigi. L'innovativo sistema permette infatti di superare fiumi o altri ostacoli naturali con bassi costi infrastrutturali e tempi di costruzione contenuti. Dal punto di vista climatico, il clima a Londra presenta temperature rigide e relativamente bassa insolazione. Ciò rappresenta una sfida in termini di soddisfazione del carico energetico richiesto per il funzionamento del sistema tramite fonte fotovoltaica.
- Dubai City - Si tratta di una città di 3,2 milioni di abitanti, costruita sulle rive del Golfo Persico, che gode di alta energia di irradiazione solare, quindi di alta energia attesa da fonte solare. Il clima, molto caldo e umido, comporta un'elevata spesa energetica in termini di condizionamento e comfort della cabina.
- New Delhi - Megalopoli indiana il cui conglomerato urbano conta circa 26,4 milioni di abitanti, definita una delle città più trafficate e inquinate del mondo, in cui il sistema ibrido potrebbe costituire una modalità economica e ambientalmente sostenibile per contribuire a risolvere i problemi della città legati a traffico e inquinamento.

and it is therefore highly unlikely that respecting the aforementioned international agreements will be achieved without specific efforts to improve energy efficiency in the transport sector itself.

3. Analysis procedure

The energy simulation study was performed taking four cities into consideration. The functional variables of the cities incorporated in the model are:

- *solar radiation and a specific production matrix for solar sources, based on months and hours;*
- *temperature and hours of light, on which the energy necessary to guarantee comfort in the cabin depends directly;*
- *the traffic coefficient matrix. The traffic coefficient was considered as a synthetic indicator of the urban mobility request on which the number of circulating cabins depends.*

The choice of the cities on whose parameters the energy simulation was performed depends on the following motivations and on the choice of a variety of different urban scales.

- *Turin - The city the Authors come from – which hosts the operative headquarters of Dimensione Ingegnerie; it is a city of about 800/900.000 inhabitants. Hybrid systems may contribute towards improving the quality of urban mobility of a medium-large sized city, such as Turin, which has an underground line (with a second urban line currently in the engineering phase) and with a relevant request for urban mobility.*
- *London - A system such as the one being analysed could be installed in London, the English megalopolis on the banks of the River Thames. This innovative system would in fact allow rivers and other natural obstacles to be surpassed with low infrastructural costs and contained construction times. From the climatic point of view, London has a rigid temperature and a relatively low level of solar irradiance. This represents a challenge, in terms of being able to satisfy the requested energy demand through solar panels.*
- *Dubai City - This city has 3.2 million inhabitants and has been constructed on the banks of the Persian Gulf; it has a high level of solar irradiance and therefore an expected high level of energy from solar sources. The climate, which is very hot and humid, requires an elevated energy expenditure in terms of air conditioning and comfort of the cabins.*
- *New Delhi - This Indian megalopolis, whose urban conglomerate has about 26.4 million inhabitants, has been defined as the busiest and most polluted city in the world, therefore hybrid systems could constitute an economical and environmentally sustainable way of contributing towards solving the problems of the city related to traffic and pollution.*

4. Breve descrizione del sistema a fune concepito

Il sistema ibrido in questione (CableSmart) [1] deriva dagli impianti a fune, di progettazione ed esercizio ormai consolidati da decenni, soprattutto per applicazioni in aree montane, in anni recenti anche in aree urbane (in Italia, dal 2000: Milano, Perugia, Venezia e Pisa); l'innovazione rispetto a quelli esistenti deriva dall'esperienza sugli impianti realizzati e dalle desunzioni di ricerca di cui allo stato dell'arte sopra riportato, svolte con analisi nella società di ingegneria italiana Dimensione Ingegnerie con supporto, all'occasione, del Politecnico di Torino (area Trasporti). Il sistema prevede di potere trasmettere il moto al veicolo con due modalità alternative:

- tramite una fune traente, in modo analogo ad una tradizionale funivia,
- tramite quattro moto-ruote.

Ciò permette di aggiungere ai punti di forza di una generica funivia – infrastruttura snella, possibilità di sorvolare ostacoli naturali – quelli di un sistema a ruote, quindi possibilità di effettuare curve con un raggio minore di 3 m e piccole stazioni.

La Figura 1 mostra, a titolo di esempio, una simulazione di installazione del sistema (CableSmart): il segmento in fune, rappresentato in rosso, è in grado di superare importanti dislivelli [9] [10], mentre la tratta in rotaia, evidenziata in blu, può presentare tratti curvilinei con raggio minore di 3 m. Il passaggio da una modalità operativa all'altra avviene all'interno della stazione, nella quale lo stesso veicolo può migrare in modo completamente automatico da una linea all'altra.

L'analisi riportata in questo articolo è svolta considerando la cabina rappresentata nella Figura 2.

Il veicolo può in prima approssimazione essere considerato formato da:

- due facce perpendicolari alla direzione del moto di forma esagonale ed area 4,51 m^2, composte al 50% da alluminio e al 50% da vetro;
- due facce parallele alla direzione del moto di forma esagonale ed area 3,68 m^2, composte anche esse al 50% di alluminio e al 50% da vetro;
- soffitto e pavimento, di pianta rettangolare ed area 4,76 m^2, costruiti interamente in alluminio.

Il volume di ogni veicolo, considerando le approssimazioni di forma prima descritte, è V=11,78 m^3

5. Analisi del carico energetico

L'analisi per il calcolo del prelievo energetico del CableSmart è stata ef-

4. Brief description of the conceived cable system

The hybrid system in question (CableSmart) [1] derives from cableways, whose engineering, design and working conditions are by now well consolidated above all in mountainous areas although, in recent years, also in urban areas (in Italy, since 2000: in Milan, Perugia, Venice and Pisa); the innovation, originates from the experience gained on the already existing systems and from scientific deductions, including the above mentioned State of the Art, which has been carried out through analysis by the Italian Dimensione Ingegnerie company with the help, when useful, of the Politecnico di Torino (Transport systems area). The system allows movement to be transmitted to the vehicle in two alternative ways:

- *through a hauling cable, in a similar way to a traditional cableway;*
- *through four powered wheels.*

This allows a motorised-wheel system to be added to the strong points of a generic cableway, i.e. a lean infrastructure with the possibility of flying over natural obstacles, thereby allowing curves with a radius of less than 3 m to be covered and enabling the construction of small stations.

Figure 1 shows, as an example, a simulation of an installation of the CableSmart system: the cable segment, shown in red, is able to overcome notable differences in height [9] [10], while the part on the tracks, shown in blue, can have curvilinear sections with a radius of less than 3 m. The passage from one operational modality to another takes place inside the station, where the same vehicle can change from one line to the other in a completely automatic manner.

Fig. 1 - Bozzetto rappresentante le due modalità di funzionamento del sistema (CableSmart). In rosso è rappresentato il segmento in fune, in blu la tratta in rotaia.

Fig.1 - Sketch showing the two functioning modes of the CableSmart system. The cable section is shown in red and the track section in blue.

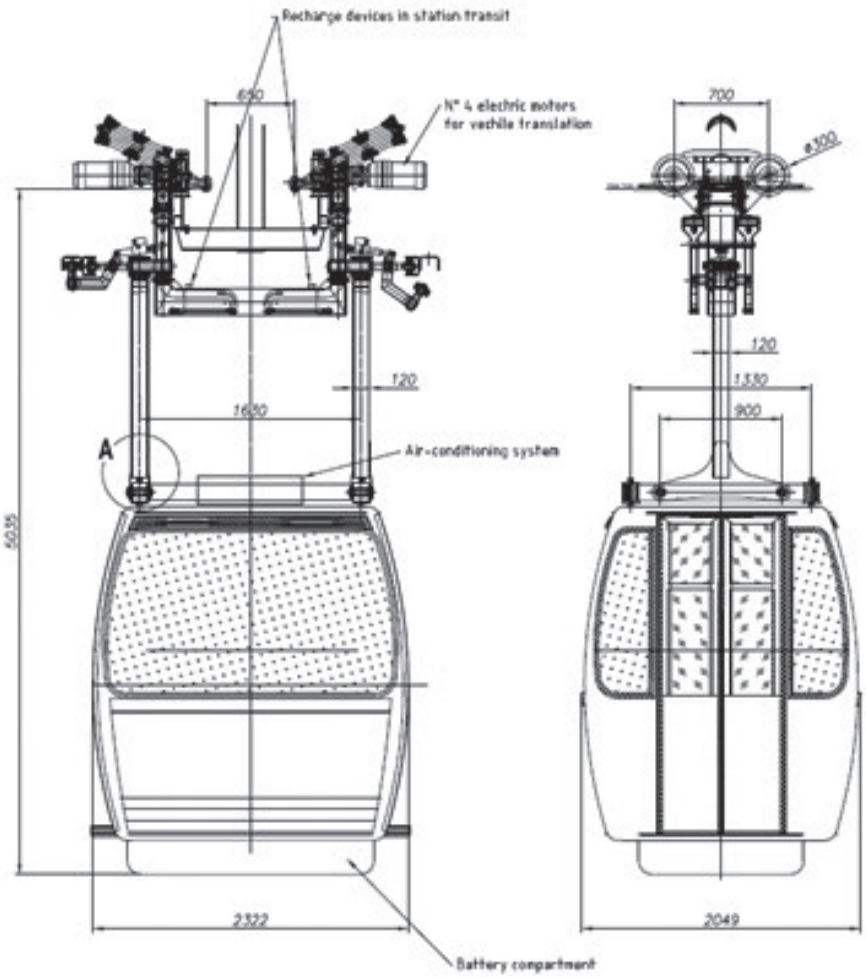


Fig. 2 - Esempio di cabina del sistema in analisi.
Fig. 2 - Example of a cabin of the analysed system.

fettuata prendendo in considerazione un tratto di monorotaia (monorail). I parametri di tale linea sono riassunti nella Tabella 1.

Dai parametri di linea citati nella Tabella 1, si è proceduto a calcolare i parametri cinematici riassunti nella Tabella 2, assumendo l'ipotesi che il veicolo si muova di moto rettilineo uniformemente accelerato durante le fasi di accelerazione e di decelerazione, e di moto rettilineo uniforme durante le fasi di crociera tra stazioni consecutive. Inoltre, la distanza tra stazioni è supposta costante.

5.1. Carico energetico di un veicolo

5.1.1. Fase di accelerazione

Dopo aver definito le variabili cinematiche della tratta di CableSmart analizzata, si è proceduto all'analisi del carico energetico associato a ciascuna cabina.

L'energia media che deve fornire un motore elettrico per soddisfare la richiesta energetica di una cabina in

The analyses that have been carried out to produce this paper were conducted considering the cabin shown in Figure 2.

As a rough approximation, the vehicle can be considered to consist of:

- *two hexagonal faces perpendicular to the direction of movement of an area of 4.51 m², composed of aluminium (50%) and of glass (50%);*
- *two hexagonal faces parallel to the direction of movement of an area of 3.68 m², also composed of aluminium (50%) and glass (50%);*
- *a rectangular ceiling and floor of an area of 4.76 m², constructed entirely in aluminium.*

The volume of each vehicle, considering the previously described shape approximations, is V=11.78 m³

5. Analysis of the energy load

The analysis conducted to calculate the energy consumption of CableSmart was performed taking into consideration a stretch of the monorail. The parameters of this line are summarised in Table 1.

The kinematic parameters summarised in Table 2 were calculated using the parameters of the line given in Table 1, under the hypothesis that the vehicle moves in a uniform manner along a straight line during the acceleration and deceleration phases and in a uniform manner along a straight line during the cruising phase between consecutive stations. Moreover, the distance between stations has been considered constant.

5.1. Energy load of the vehicle

5.1.1. Acceleration phase

After having defined the kinematic variables of the analysed CableSmart stretch, the analysis of the energy load of each cabin was performed.

The mean energy that an electric motor must supply to satisfy the energy requirements of a cabin in each acceleration phase, to accelerate a cabin at rest to a cruising velocity v is:

$$K_{1ACC} = \frac{{}^{1}/_{2}\, M_{TOT} v^2}{\mu_{MOT}} = 25.878 \text{ J} = 7{,}18 \text{ Wh}$$

where the yield of the electric motor μ_{MOT} *is valued as 93%.*

Tabella 1 – *Table 1*

Parametri di linea monorotaia
Parameters of the monorail line

Lunghezza tratta ***Lenght of the stretch***	L_{TOT}	[m]	1.500
Velocità di crociera ***Cruising speed***	v	[m/s]	4,5
Accelerazione massima ***Maximum acceleration***	a	[m/s²]	1
Tempo di fermata ***Stopping time***	t_{stop}	[s]	16
Decelerazione massima ***Maximum deceleration***	-a	[m/s²]	-1
Numero stazioni intermedie ***Number of intermediate stations***	N_{IS}		2
Numero stazioni capolinea ***Number of terminus stations***	N_{TS}		2
Lunghezza stazioni intermedie ***Lenght of the intermediate stations***	L_{IS}	[m]	36
Lunghezza stazioni capolinea ***Lenght of the terminus stations***	N_{TS}	[m]	25
Massa a vuoto cabina ***Mass of the empty cabin***	M_0	[kg]	1.977
Massa cabina media[1] ***Mean mass of the cabin[1]***	M_{TOT}	[kg]	2.377

[1] La massa media è stata calcolata considerando una portata media di 5 passeggeri a cabina (fattore medio di riempimento pari al 62%, in quanto ogni cabina può ospitare al massimo 8 passeggeri) di 80 kg ognuno.
[1] The mean mass was calculated considering a mean load of 5 passengers per cabin (mean filling factor equal to 62%, in that each cabin can host a maximum of 8 passengers) of 80 kg each.

ogni fase di accelerazione, per accelerare una cabina da velocità nulla alla velocità di crociera v è:

$$K_{1ACC} = \frac{{}^1/_2\, M_{TOT} v^2}{\mu_{MOT}} = 25.878 \text{ J} = 7{,}18 \text{ Wh}$$

Since the system is symmetrical in the acceleration and deceleration phases, the previous formula is not only valid for the energy required for the acceleration phase, but also for the energy lost during the deceleration phase.

$$K_{1DEC} = \frac{1}{2} * M_{TOT} * v^2 = 24.067 \text{ J} = 6{,}68 \text{ Wh}$$

Let us suppose it is possible to collect and store a known part of the energy dispersed during the deceleration phase and that such energy is available during the acceleration phase; the energy required for each acceleration results to be:

$$E_{1ACC} = K_{1ACC} - K_{1DEC}\,(\mu_{BATT} * \mu_{REC}) = 2{,}88 \text{ Wh}$$

where μ_{BATT} *=0.92 and* μ_{REC} *=0.7 are the yield of the battery system and the yield of the energy recovery system, respectively.*

The energy necessary to accelerate the vehicle in a cycle is equal to:

$$E_{ACC,1Ciclo} = (E_{1ACC} * (1 + N_{IS})) * 2 = 17{,}28 \text{ Wh}$$

The mean hourly power necessary to accelerate a vehicle, and which numerically corresponds to the energy dissipated in an hour, measured in Wh, is:

$$P_{ACC} = E_{ACC,1Ciclo} * f = 81{,}56 \text{ W}$$

where f is the frequency, measured in cycles/hour, of the transport supply.

Tabella 2 – *Table 2*

Parametri cinematici
Kinematic parameters

Lunghezza fase accelerazione ***Length of the acceleration phase***	L_{ACC}	[m]	$L_{ACC} = \frac{v^2 - 0}{2a}$	10,12
Lunghezza fase decelerazione ***Length of the deceleration phase***	L_{DEC}	[m]	$L_{DEC} = \frac{0 - v^2}{2 * (-a)}$	10,12
Lunghezza segmento tra stazioni ***Length of the stretches between stations***	L_{SEG}	[m]	$L_{SEG} = \frac{L_{TOT} - N_{IS} * L_{IS} - N_{TS} * L_{IS}}{N_{IS} + N_{TS} - 1}$	459
Tempo fase accelerazione ***Time of the acceleration phase***	t_{ACC}	[s]	$t_{ACC} = \frac{v - 0}{a}$	4,5
Tempo fase decelerazione ***Time of the deceleration phase***	t_{DEC}	[s]	$t_{DEC} = \frac{0 - v}{-a}$	4,5
Tempo fase crociera ***Time of the cruising phase***	t_{SEG}	[s]	$t_{SEG} = \frac{L_{SEG}}{v}$	102
Tempo ciclo ***Cycle time***	T_c	[s]	$T_c = (t_{ACC} + t_{SEG} + t_{DEC} + t_{stop} + t_{ACC} + t_{SEG} + t_{DEC} + t_{stop} + t_{ACC} + t_{SEG} + t_{DEC} + t_{stop}) * 2$	762
Frequenza ***Frequency***	f	[cicli/h] *[cycles/h]*	$f = \frac{1}{T_c} * 3600$	4,72

Dove il rendimento del motore elettrico μ_{MOT} è valorizzato al 93%.

Poiché il sistema è simmetrico nelle fasi di accelerazione e di decelerazione, la formula precedente è valida non solo per l'energia richiesta nella fase di accelerazione, ma anche per l'energia dispersa nella fase di decelerazione.

$$K_{1DEC} = \frac{1}{2} * M_{TOT} * v^2 = 24.067 \text{ J} = 6{,}68 \text{ Wh}$$

Supponendo che sia possibile recuperare una quota parte dell'energia dispersa nella fase di decelerazione e che tale energia sia disponibile nella fase di accelerazione, il carico energetico richiesto in ogni fase di accelerazione risulta essere:

$$E_{1ACC} = K_{1ACC} - K_{1DEC}\,(\mu_{BATT} * \mu_{REC}) = 2{,}88 \text{ Wh}$$

Dove μ_{BATT} =0,92 e μ_{REC} =0,7 sono rispettivamente il rendimento del sistema di batterie e il rendimento del sistema di recupero energetico (*energy recovery*).

L'energia necessaria per accelerare il veicolo in un ciclo è pari a:

$$E_{ACC,1Ciclo} = (E_{1ACC} * (1 + N_{IS})) * 2 = 17{,}28 \text{ Wh}$$

La potenza media oraria necessaria per l'accelerazione di un veicolo, numericamente corrispondente all'energia dissipata nell'ora misurata in Wh è:

$$P_{ACC} = E_{ACC,1Ciclo} * f = 81{,}56 \text{ W}$$

Dove f è la frequenza, misurata in cicli/ora, dell'offerta di trasporto.

5.1.2. Resistenze ordinarie

Si è proceduto al calcolo delle resistenze ordinarie agenti su ciascun veicolo. La resistenza al rotolamento dovuta all'attrito volvente tra la rotaia e le quattro moto ruote di ciascun veicolo è:

$$R_{ROT} = c * M_{TOT} * g = 232{,}95 \text{ N}$$

Dove c= 0,01 è il coefficiente di resistenza al rotolamento tra la moto ruota e la rotaia, e 9,81 m/s² è l'accelerazione di gravità.

Si è poi proceduto a calcolare la potenza dissipata a causa delle resistenze ordinarie durante la fase di regime, in cui la velocità è costantemente pari a v=4,5 m/s, e durante le fasi di accelerazione e decelerazione, in cui si è utilizzata una velocità di riferimento pari alla media tra 0 e la velocità v di regime.

$$P_{ROT,SEG} = R_{ROT} * v = 1.048{,}28 \text{ W}$$

$$P_{ROT,ACC/DEC} = R_{ROT} * \frac{v+0}{2} = 524{,}14 \text{ W}$$

5.1.2. Ordinary resistances

The ordinary resistances acting on each vehicle were then calculated. The rolling resistance due to rolling friction between the tracks and the four motorised wheels of each vehicle is:

$$R_{ROT} = c * M_{TOT} * g = 232{,}95 \text{ N}$$

where c= 0.01 is the rolling coefficient between the wheel and the track, and g=9.8 m/s² is the gravity acceleration.

The power dissipated as a result of the ordinary resistances during the regime phase, whose velocity was considered constant and equal to v=4,5 m/s, and that dissipated during the acceleration and deceleration phases, in which a reference velocity equal to the mean value between 0 and the regime velocity v, was then calculated.

$$P_{ROT,SEG} = R_{ROT} * v = 1.048{,}28 \text{ W}$$

$$P_{ROT,ACC/DEC} = R_{ROT} * \frac{v+0}{2} = 524{,}14 \text{ W}$$

As the length of each phase was known, it was also possible to calculate the energy dissipated because of the rolling resistance in the regime phase and in the acceleration and deceleration phases:

$$E_{ROT,SEG} = P_{ROT,SEG} * t_{SEG} = 106.924 \text{ J} = 29{,}70 \text{ Wh}$$

$$E_{ROT,ACC/DEC} = P_{ROT,ACC/DEC} * t_{ACC} = 2.358 \text{ J} = 0{,}65 \text{ Wh}$$

Finally, the energy dissipated in an hour of vehicle operation, which, expressed in Wh, numerically corresponds to its power on average dissipated during a time horizon of one hour, was calculated:

$$E_{ROT} = \left(E_{ROT,SEG} * (N_{IS}+1) + E_{ROT,ACC/DEC} * (N_{IS}+1)) * 2\right) * f = 859{,}51 \text{ Wh}$$

By proceeding in the same way as just described for the rolling resistance, the entity of the resistance due to viscose friction with the air was defined:

$$R_{AER} = \frac{1}{2} * \rho * C_f * A * v^2$$

where:

- *ρ=1.2 kg/m³ is the density of the air;*
- *C_f=1.05 is the shape coefficient. A very high shape coefficient, corresponding to a square surface, was conservatively adopted;*
- *A=4.51 m² is the surface of the frontal face of the cabin;*
- *v is the velocity of the cabin. Again, in the aerodynamic resistance case, the regime velocity was considered for the uniform straight–line movement stretches, and a mean value of between 0 and the regime velocity was considered for the acceleration and deceleration stretches.*

Conoscendo inoltre la durata di ciascuna fase è stato possibile calcolare l'energia dissipata a causa della resistenza al rotolamento nella fase di regime e in quelle di accelerazione e decelerazione:

$$E_{ROT,SEG} = P_{ROT,SEG} * t_{SEG} = 106.924 \text{ J} = 29{,}70 \text{ Wh}$$

$$E_{ROT,ACC/DEC} = P_{ROT,ACC/DEC} * t_{ACC} = 2.358 \text{ J} = 0{,}65 \text{ Wh}$$

Infine, si è calcolata l'energia dissipata in un'ora di funzionamento da un veicolo, che, se espressa in Wh, corrisponde numericamente alla sua potenza mediamente dissipata con orizzonte temporale pari a un'ora.

$$E_{ROT} = \left(E_{ROT,SEG} * (N_{IS}+1) + E_{ROT,ACC/DEC} * (N_{IS}+1)) * 2)\right) * f = 859{,}51 \text{ Wh}$$

Procedimento analogo a quanto appena descritto per la resistenza al rotolamento è stato seguito per definire l'entità della resistenza dovuta all'attrito viscoso con l'aria:

$$R_{AER} = \frac{1}{2} * \rho * C_f * A * v^2$$

dove:

- ρ=1,2 kg/m³ è la densità dell'aria (prevalentemente tra 1,26 e 1,29 in relazione alla temperatura dell'aria);
- C_f=1,05 è il coefficiente di forma. È stato cautelativamente adottato un coefficiente di forma molto alto, corrispondente ad una superficie maestra quadrata;
- A=4,51 m² è la superficie della facciata frontale della cabina;
- *v* è la velocità della cabina. Anche nel caso della resistenza aerodinamica, si è considerata la velocità di regime per i tratti di moto rettilineo uniforme, e la media tra 0 e la velocità di regime per i tratti di accelerazione e decelerazione.

$$R_{AER,SEG} = 57{,}53\ N \text{ e } R_{AER} = 14{,}38\ N$$

Seguendo poi lo stesso procedimento delle resistenze al rotolamento, è stata definita una potenza media oraria della resistenza aerodinamica.

$$P_{AER} = 211{,}56 \text{ W}$$

5.1.3. Climatizzazione e comfort

Riscaldamento

Il modello definito considera l'energia utilizzata per il riscaldamento delle vetture come somma di due addendi: l'energia termica che è necessario reimmettere nel veicolo a causa di fenomeni di conduzione termica, per cui il calore fluisce attraverso la superficie della cabina dall'interno all'esterno quando la temperatura interna è superiore alla temperatura esterna, e l'energia termica che è necessario reimmettere nel veicolo a causa del ricircolo

$$R_{AER,SEG} = 57{,}53\ N \text{ e } R_{AER} = 14{,}38\ N$$

By following the same procedure used for the rolling resistance, a mean hourly power of the aerodynamic resistance was defined:

$$P_{AER} = 211{,}56 \text{ W}$$

5.1.3. Air-conditioning and comfort

Heating

The defined model considers the energy used to heat the vehicle as the sum of two addenda: the thermal energy necessary to reintroduce into the vehicle as a result of thermal conduction, for which the heat flows from the inside to the outside through the surfaces of the cabin when the internal temperature is higher than the external temperature, and the thermal energy that is necessary to replace in the vehicle because of air recycling, which leads to external air being introduced inside the vehicle.

Both quantities are functions of the winter hour degrees, and are thus defined according to a period of time of one hour:

$$GO_{INV} = \max(0;\ \tau_{int} - \tau_{ext})$$

Given the extreme variability of the energy produced from solar sources during daylight hours, an analysis was conducted on an hourly basis and it was extended to include each season of the year. For this reason, a different solution was adopted from the one which foresees the use of daily degrees (DD), which are defined as the accumulated difference of the internal and external temperatures of an office and which are used to estimate the energy necessary to heat buildings, as specified by the EN ISO 15927-6 standard.

The energy consumed to reintroduce thermal energy that flows towards the inside of the vehicle, because of conduction phenomena, was calculated as:

$$E_{risc,cond} = \frac{\sum_{i=1}^{N} UiAi * \int_{open}^{close} GO_{inv}\, dt}{COP}$$

where:

- *the extreme integration terms represent the starting and finishing times of operation;*
- *COP is the performance coefficient of the heat pump, which was hypothesised equal to 4.5;*
- *U_i is the thermal conduction coefficient of each of the two materials that make up the surface of the cabins;*
- *A_i is the surface corresponding to each material.*

Considering the dimensions and materials of the aforementioned cabin, Table 3 summarises the values of the area and of the thermal conduction:

dell'aria, che porta ad immettere aria esterna all'interno del veicolo.

Entrambe le quantità sono funzione dei gradi ora invernali, così definiti su granularità temporale pari a un'ora:

$$GO_{INV} = \max(0;\ \tau_{int} - \tau_{ext})$$

Data l'estrema variabilità dell'energia prodotta da fonte solare durante le ore del giorno, è stata effettuata un'analisi con granularità oraria, estesa ad ogni stagione dell'anno. Per tale motivo si è optato per una soluzione differente rispetto a quella che prevede l'utilizzo dei gradi giorno GG, definiti come la differenza cumulata delle temperature interna ed esterna ad un edificio, e utilizzati per stimare l'energia necessaria per il riscaldamento di edifici, come specificato dalla norma EN ISO 15927-6.

La spesa energetica per reimmettere l'energia termica che fluisce verso l'esterno del veicolo a causa di fenomeni di conduzione è stata calcolata come

$$E_{risc,cond} = \frac{\sum_{i=1}^{N} UiAi * \int_{open}^{close} GO_{inv}\, dt}{COP}$$

Dove:

- gli estremi di integrazione rappresentano rispettivamente l'orario di inizio e di fine esercizio;
- COP è il coefficiente di prestazione della pompa di calore, ipotizzato uguale a 4,5;
- U_i è il coefficiente di conduzione termica di ciascuno dei due materiali che compongono la superficie delle cabine;
- A_i è la superficie corrispondente a ciascun materiale.

Considerando dimensioni e materiali della cabina precedentemente descritti, la Tabella 3 riassume i valori di area e di coefficiente di conduzione termica:

Anche l'energia termica che è necessario immettere nel veicolo per riscaldare l'aria inserita dal sistema di ventilazione è funzione dei gradi giorno invernali:

$$E_{risc,vent} = \frac{N * V * \rho * c_p * \int_{open}^{close} GO_{inv}\, dt}{COP * 3.600}$$

Dove:

- N=10 [h^{-1}] è il numero di completi cambi di aria che vengono effettuati ogni ora;
- V è il volume della cabina;
- ρ= 1,2 kg/m³ è la densità dell'aria;
- c_p è il calore specifico costante a pressione costante dell'aria. Nonostante il calore specifico a pressione costante sia funzione della temperatura, la relazione tra le due variabili è trascurabile. È stato quindi considerato il calore specifico dell'aria a temperatura di 20°C, pari a c_p=1,0045 J/(kg*°C).

  3.600 è il fattore di conversione da J a Wh.

Tabella 3 – *Table 3*

Parametri della cabina
Cabin parameters

	Superficie [m²] ***Surface [m²]***	**Coefficiente di scambio termico [W/(K*m²)]** ***Thermal exchange coefficient [W/(K*m²)]***
Alluminio ***Aluminium***	17,70	6
Vetro ***Glass***	8,18	5,6

The thermal energy that is necessary to introduce into the vehicle to heat the air inserted by the ventilation system is also a function of the winter days:

$$E_{risc,vent} = \frac{N * V * \rho * c_p * \int_{open}^{close} GO_{inv}\, dt}{COP * 3.600}$$

where:

- *N=10 [h^{-1}] is the number of complete changes in air that are carried out each hour;*
- *V is the volume of the cabin;*
- *ρ= 1,2 kg/m³ is the density of the air (mainly between 1,26-1,29 as a function of the temperature);*
- *c_p is the constant specific heat under constant air pressure. Although the specific heat under constant pressure is a function of the temperature, the relationship between the two variables is negligible. Therefore, a specific heat of the air at a temperature of 20°C equal to c_p=1,0045 J/(kg*°C) was considered.*

  3.600 is the conversion factor of J to Wh.

The energy necessary to heat the vehicle for each hour of operation is given by

$$E_{risc} = E_{risc,cond} + E_{risc,vent}$$

Air-conditioning

A similar procedure to that described for the energy necessary to heat the cabin was used to analyse the energy necessary to air condition the cabin.

$$E_{cond} = E_{cond,cond} + E_{cond,vent}$$

$$E_{Cond} = \frac{\sum_{i=1}^{N} UiAi * \int_{open}^{close} GO_{est}\, dt}{EER} + \frac{N * V * \rho * c_p * \int_{open}^{close} GO_{inv}\, dt}{3.600 * EER}$$

where the summer hour degrees are measures of how hot it is and for how long, and the energy efficiency relation (EER) was considered equal to 3.5.

The previously described procedure was calculated for each hour, for each season and for each city. For example, the graph in Figure 3 shows the energy necessary for heat-

L'energia necessaria in ogni ora di esercizio per riscaldare il veicolo è data da

$$E_{risc} = E_{risc,cond} + E_{risc,vent}$$

Condizionamento

Un procedimento analogo a quello descritto per l'energia necessaria per il riscaldamento è stato utilizzato per l'analisi dell'energia necessaria per il condizionamento della cabina.

$$E_{cond} = E_{cond,cond} + E_{cond,vent}$$

$$E_{Cond} = \frac{\sum_{i=1}^{N} UiAi * \int_{open}^{close} GO_{est}\, dt}{EER} + \frac{N*V*\rho*c_p*\int_{open}^{close} GO_{inv}\, dt}{3.600 * EER}$$

Dove i gradi ora estivi GO_{EST} = max(0; $\tau_{ext} - \tau_{int}$) sono misura di quanto fa caldo e per quanto tempo, e il rapporto di efficienza energetica EER del sistema di condizionamento stato supposto uguale a 3,5.

Il procedimento descritto è stato calcolato per ogni ora, per ora stagione e per ogni città. A titolo di esempio, il grafico di Figura 3 mostra l'energia per il riscaldamento e quella per il condizionamento in ogni ora del giorno corrispondente ad un giorno medio estivo a Torino.

La Tabella 4 riassume i valori giornalieri (dalle 00:00 alle 24:00), misurati in Wh, di energia richiesta per il riscaldamento e per il condizionamento di una cabina in un giorno medio di ogni stagione.

Servizi ancillari

Il modello considera inoltre i seguenti servizi ancillari.

- Illuminazione: 4 riflettori da 7,5 W ciascuno accesi unicamente durante le ore di buio. Anche le ore del giorno in cui le luci sono accese ed è presente il carico energetico dovuto all'illuminazione sono dunque funzione della stagione, poiché dipendono dall'ora dell'alba e del tramonto;
- Computer: Carico continuo di E_{COMP} =200 W;
- Audio: Carico continuo di E_{AUDIO}=50 W;
- Monitor: Carico continuo di E_{MON}=150 W.

ing and that necessary for air-conditioning for each hour of the day corresponding to an average summer day in Turin.

Table 4 summarises the daily values (from 00:00 to 24:00), measured in Wh, of the energy requested to heat and air-condition a cabin for an average day in each season.

Ancillary services

The model also considered the following ancillary services:

- *Lighting: 4 spotlights of 7.5 W each, which are only turned on during the hours of darkness. The hours of the day during which the lights are turned on, and when there is therefore an energy load due to lighting, are also a function of the season, as they depend on the dawn and sunset hours;*
- *Computer: Continuous load of E_{COMP} =200 W;*
- *Audio: Continuous load of E_{AUDIO}=50 W;*
- *Monitor: Continuous load of E_{MON}=150 W.*

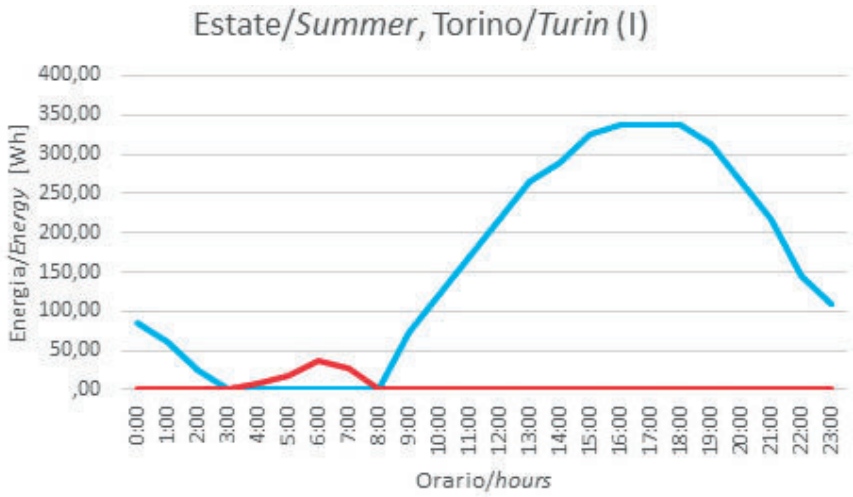


Fig. 3 - Energia per il riscaldamento (rosso) e per il condizionamento (azzurro) in ogni ora del giorno corrispondenti ad un giorno medio estivo a Torino.
Fig. 3 - Energy used for heating (red) and air-conditioning (light blue) for each hour of the day for an average summer day in Turin.

Tabella 4 – *Table 4*

	Energia per condizionamento [Wh] ***Energy necessary for air-conditioning [Wh]***	**Energia per riscaldamento [Wh]** ***Energy necessary for heating [Wh]***
Inverno ***Winter***	0	14.353,0
Primavera ***Spring***	0	6.167,4
Estate ***Summer***	3.693,2	93,9
Autunno ***Autumn***	0	5.294,4

5.1.4. Carico complessivo cabina

Si è così definito un profilo di carico orario di ogni cabina, per ogni stagione e per ogni località analizzata.

$$P_{carico,1\ cabina} = P_{ACC} + E_{ROT} + E_{AER} + E_{RISC} + E_{COND} + \\ + E_{ILL} + E_{COMP} + E_{AUDIO} + E_{MON}$$

A titolo di esempio, viene citato che in un giorno medio primaverile a Torino, la potenza media sulle 24 ore ammonta a 1.851 W, distribuiti come indica l'istogramma di Figura 4.

Ogni cabina assorbe, durante l'anno, una potenza media di 1,90 kW. Utilizzando un fattore di conversione di 400gCO_2/kWh, pari alla media delle emissioni di anidride carbonica per kWh elettrico in Italia, il sistema CableSmart presenta emissioni di CO_2 pari a 53,47 gCO_2/km.

Finora è stato supposto, in relazione alla massa del sistema veicolo-passeggeri, che il valore atteso di passeggeri per veicolo sia 5 rispetto ad 8 posti di capienza massima (fattore di riempimento $\eta_{Riempimento}$=62,5%). Con tale ipotesi il consumo specifico di un veicolo CableSmart, in termini di gCO_2/(passeggero*km) è 10,69 gCO_2/(pass*km).

Aumentando il fattore medio di riempimento di ogni veicolo, il consumo in termini di gCO_2/(pass*km) diminuisce. La curva che lega il consumo [gCO_2/(pass*km)] al fattore di riempimento è leggermente maggiore rispetto ad un ramo di iperbole equilatera poiché, aumentando il fattore di riempimento, non solo aumenta linearmente il denominatore della relazione, ma aumenta leggermente anche l'energia consumata che, per quanto riguarda i contributi relativi all'inerzia e alle resistenze ordinarie è funzione crescente della massa del sistema cabina-passeggeri (Fig. 5).

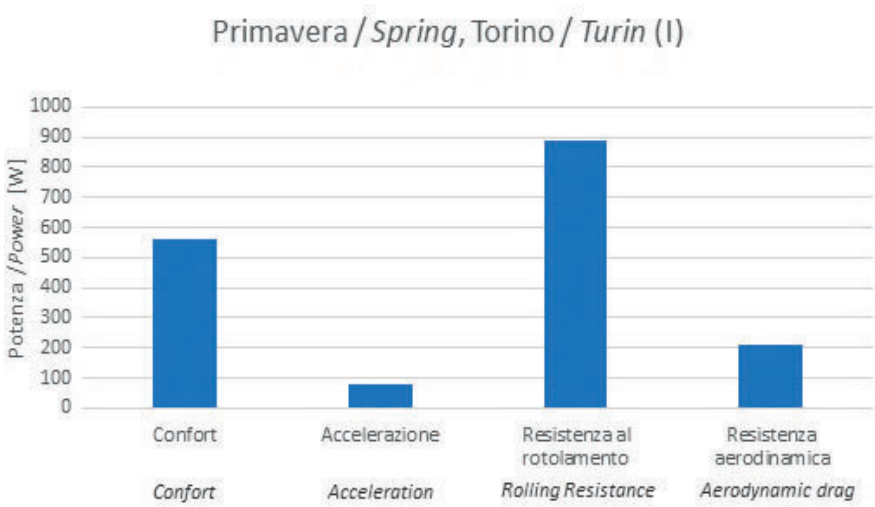


Fig. 4 - Potenza media sulle 24 ore in un giorno medio primaverile (1.851W), distribuita nell'istogramma.

Fig. 4 - Mean power over 24 hours in an average Spring day (1.851W), as distributed in the histogram.

5.1.4. Overall load of the cabin

An hourly load profile was thus defined for each cabin, for each season and for each analysed location.

$$P_{carico,1\ cabina} = P_{ACC} + E_{ROT} + E_{AER} + E_{RISC} + E_{COND} + \\ + E_{ILL} + E_{COMP} + E_{AUDIO} + E_{MON}$$

It is here shown, as an example, that on an average Spring day in Turin, the mean power over 24 hours amounts to 1.851 W and is distributed as indicated in the histogram in Fig. 4.

During the year, each cabin absorbs a mean power of 1.90 kW. By considering a conversion factor of 400gCO_2/kWh, which is equal to the mean value of the carbon dioxide emissions per kWh of electricity in Italy, the CableSmart system has CO_2 emissions equal to 53.47 gCO_2/km.

*Until now, it has been supposed, in relation to vehicle-passenger mass, that the expected number of passengers is 5 out of the 8 possible passengers that would indicate full capacity (filling factor $\eta_{Riempimento}$=62.5%). Under such a hypothesis, the specific consumption of a CableSmart vehicle, in terms of gCO_2/(passenger*km), is 10.69 gCO_2/(pass*km).*

*By increasing the mean filling factor of each vehicle, the consumption, in terms of gCO_2/(pass*km), decreases. The curve that connects the consumption [gCO_2/(pass*km)] to the filling factor is slightly greater than a branch of the equilateral hyperbola. This is because, if the filling factor is increased, not only does the denominator of the relation increase linearly, the consumed energy also increases slightly, and this, as far as the contributions relative to inertia and to the ordinary resistance are concerned, is a growing function of the cabin-passenger mass. (Fig. 5)*

*Compared to the CableSmart cable stretch, whose electric energy consumption was dealt with in depth in the aforementioned paper [1] and whose specific consumption is of the order of 0,05 kWh/(pass*km), the stretch on the track results to be less energy-hungry, as it has a specific consumption of about 0,0269 kWh/(pass*km). Both these results are relative to a filling factor of 62.5%.*

5.2. Overall load of the system

An analysis of how many cabins would be necessary to satisfy the estimated mobility request was then conducted. In order to approximately estimate the mobility requests in the analysed cities, a commercial database, which makes data available on the traffic situation on an hourly basis, was used. This traffic index is defined as:

Rispetto alla tratta CableSmart su fune, il cui consumo energetico è stato approfonditamente analizzato nel già citato articolo [1] e il cui consumo specifico è nell'ordine di 0,05 kWh/(pass*km), la tratta su rotaia risulta meno energivora, avendo un consumo specifico di circa 0,0269 kWh/(pass*km). Entrambi i risultati sono relativi ad un fattore di riempimento del 62,5%.

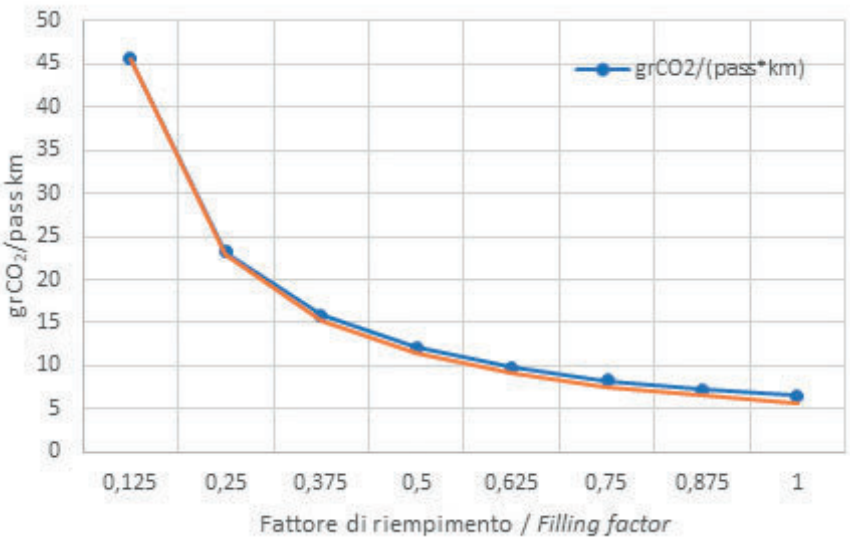


Fig. 5 - Relazione tra fattore di riempimento ed emissioni stimate.
Fig. 5 - Relationship between the filling factor and the estimated emissions.

5.2. Carico complessivo sistema

Si è proceduto all'analisi di quante cabine sono necessarie per soddisfare la domanda di mobilità stimata. Per una stima di larga massima della domanda di mobilità urbana nelle città analizzate è stato utilizzato un data base commerciale che rende disponibili dati di indice di traffico con granularità oraria. Tale indice di traffico è definito come espresso nella seguente formula:

$$TI = \frac{t_{reale} - t_{ideale}}{t_{ideale}}$$

Dove:

- TI è l'indice di traffico;
- t_{reale} è il tempo medio di spostamento tramite automobile nei percorsi monitorati in condizioni di scorrevolezza;
- t_{ideale} è il tempo medio di spostamento tramite automobile nei percorsi monitorati in condizioni di traffico reale.

Un indice di traffico dell'X% è dunque sintomo di un aumento dell'X% del tempo atteso del viaggio in automobile.

Viene riportato in Fig. 6, a titolo di esempio, il grafico corrispondente all'indice di traffico atteso per la città di Torino in un tipico giorno feriale; i due massimi relativi alle ore 09:00 e alle ore 18:00, corrispondono ai picchi di traffico dovuti alla domanda di mobilità urbana da parte dei pendolari.

Si è poi convertito l'indice di traffico nella percentuale di veicoli necessari per soddisfare la domanda di mobilità utilizzando la logica di conversione descritta in Tabella 5.

Il procedimento sopra descritto è stato applicato per ogni città analiz-

$$TI = \frac{t_{reale} - t_{ideale}}{t_{ideale}}$$

where:

- *TI is the index of the traffic;*
- t_{reale} *is the mean travelling time by automobile along the monitored routes under smooth running conditions;*
- t_{ideale} *is the mean travelling time by automobile along the monitored routes under real traffic conditions.*

An index of the traffic of X% is therefore a sign of an increase of X% of the expected travelling time by automobile.

A graph corresponding to the index of the expected traffic for the city of Turin for a typical weekday is reported in

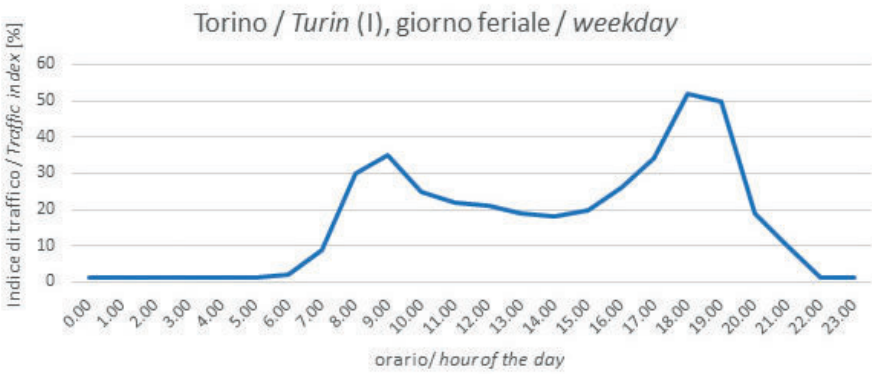


Fig. 6 - Indice di traffico in funzione dell'ora in un tipico giorno feriale nella città di Torino.
Fig. 6 - Index of the traffic as a function of the hour for a typical weekday in the city of Turin.

Tabella 5 – *Table 5*

Tasso di traffico, percentuale di cabine, numero di cabine
Traffic rate, percentage of cabins and number of cabins

Tasso di traffico TI ***Traffic rate TI***	**Percentuale di cabine** ***Percentage of cabins***	**Numero di cabine N_{CAB} (si precisa che la linea considerata ha un numero massimo di cabine di 135)** ***Number of cabins N_{CAB} (it should be pointed out that the considered line has a maximum number of 135 cabins)***
TI>=30%	100%	135
20%<=TI<30%	90%	122
10%<=TI<20%	80%	108
5%<=TI<10%	70%	95
TI<5%	60%	81

zata e per ogni tipologia di giorno (feriale, prefestivo o festivo).

Moltiplicando il carico corrispondente a ciascuna cabina per il numero di cabine necessarie per soddisfare la domanda di mobilità urbana, si è definito il carico totale della linea. Tale carico è funzione dell'ora della stagione, del giorno della settimana (feriale, prefestivo o festivo) e della città considerata.

6. Produzione da fonte fotovoltaica

Parte della richiesta energetica necessaria per il funzionamento del sistema CableSmart potrà essere soddisfatta da un impianto fotovoltaico installato sugli stessi componenti del sistema. In particolare, si è ipotizzato di poter installare:

- vetri fotovoltaici sul tetto della cabina, che ha una superficie utile di 4,75 mq, cui corrisponde una potenza installabile di 475 Wp, dove Wp indica i "Watt picco", unità di misura della potenza teorica massima producibile da un generatore elettrico; nel caso di un impianto fotovoltaico, tale potenza massima verrà raggiunta durante l'ora dell'anno nella quale è massima l'insolazione e sono minime le perdite da sovratemperatura. Ipotizzando che circa il 50% delle celle fotovoltaiche della vetrata installata sul tetto siano ombreggiate dalla stessa struttura del veicolo e dalla rotaia sovrastante, il modello prevede una potenza utile di 238 Wp sul tetto di ogni cabina. L'orientamento della vetrata fotovoltaica posta sulla copertura della cabina è orizzontale;
- pannelli fotovoltaici installati sulla rotaia, con angolo di tilt nullo. Installando i pannelli come mostrato in Figura 7, e considerando un lato corto del pannello di lunghezza pari ad 1 m e di potenza nominale di 330 Wp, la densità lineare di potenza è di 330 Wp/m. Poiché nel segmento considerato la tratta di rotaia esterna alle stazioni è di 1.378 m, l'installazione di fotovoltaico sulla rotaia ha potenza 455 kWp;
- pannelli fotovoltaici sulla copertura delle stazioni. Nella tratta considerata sono previste due stazioni in-

Fig. 6 as an example; the maximum levels, relative to the hour 09:00 and to the hour 18:00, correspond to the peaks in traffic due to the urban mobility request of the commuters.

The traffic index was then converted into the percentage of vehicles necessary to satisfy the mobility request using the conversion logic described in Table 5.

The above described procedure was applied to each of the considered cities and to each type of day (weekday, the day before a holiday and a holiday).

By multiplying the load corresponding to each cabin by the number of cabins necessary to satisfy the urban mobility request, it was possible to define the total load of the line. Such a load is a function of the hour, of the season and of the day of the week (weekday, the day before a holiday or holiday) of the considered city.

6. Production from solar panels

A part of the energy necessary for the CableSmart system could be satisfied by installing solar panels on the components of the system. The following has been hypothesised.

- *Solar panels on the roof of the cabin, with a usable surface area of 4.7 5 m², which corresponds to an installable power of 475 Wp, where Wp indicates "Watt peak", that is, a measure of the theoretical maximum power of an electric generator; in the case of a solar panel system, such a maximum power is reached during the hours of the year in which the solar irradiance is maximum and the over-temperature losses are minimum. By hypothesising that 50% of the solar panel cells of the glass area installed on the roof are in the shadow of the vehicle itself and of the rails above, the model foresees a useful power of 238 Wp on the roof of each cabin. The solar panel glass is placed horizontally on the roof of the cabin;*
- *Solar panels installed on the rails, with a zero-tilt angle. If the panels are installed as shown in Figure 7, and considering a short side of the panel of a length equal to 1 m and a nominal power of 330 Wp, the linear density of power is 330 Wp/m. Considering that the stretch of track outside the station in the considered segment is 1.378 m long, the solar panel installation on the rails has a power of 455 kWp;*
- *Solar panels on the roof of the stations. Two intermediate stations (each with a plant area of 360 m²) and two terminus stations (each with a plant of 592 m²) are foreseen for the considered stretch. By hypothesising a power density of 175 W/m², which is consistent with the high-performance panels that are currently sold, and an occupation coefficient of 90%, each intermediate station can house 56.7 kWp of solar panel power, and each terminus*

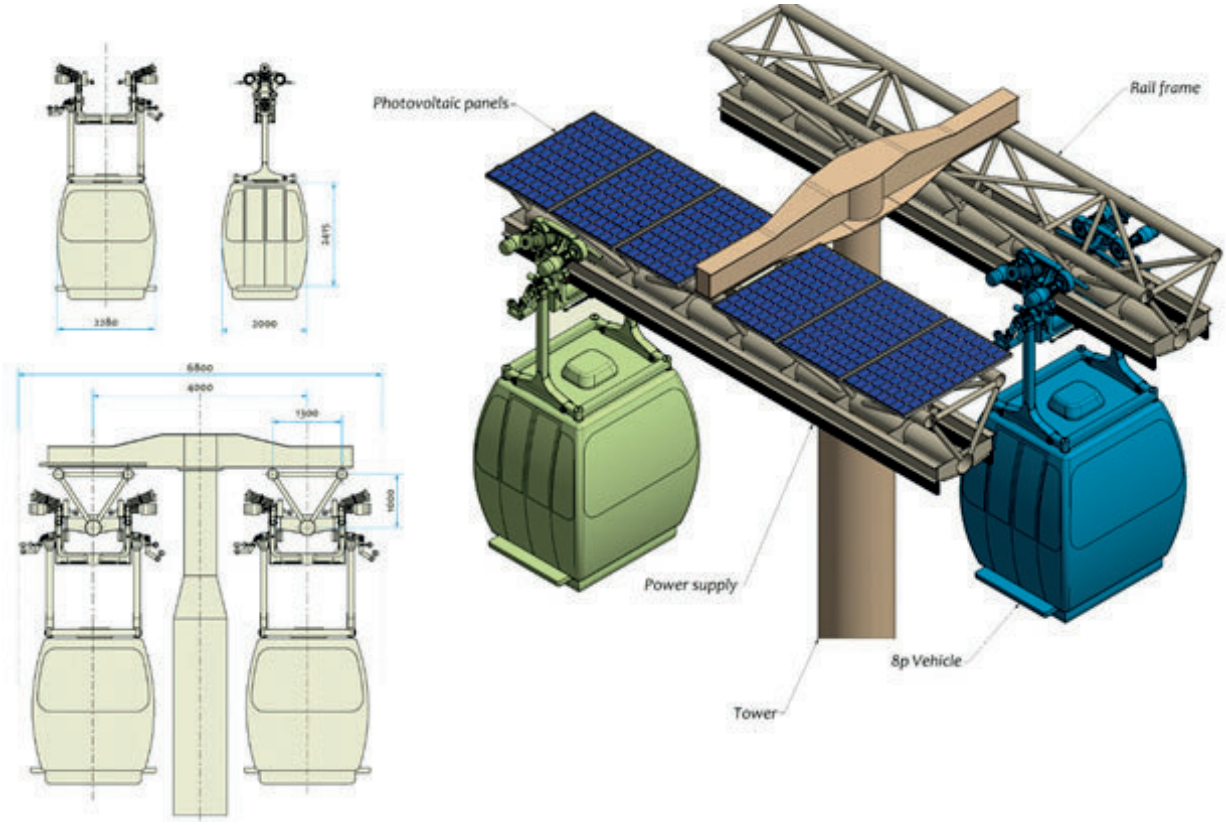


Fig. 7 - Installazione dei pannelli fotovoltaici sull'impianto.
Fig. 7 - Installation of the solar panels on the system.

termedie (ognuna di area di pianta di 360 m²) e due stazioni capolinea (ognuna con area di pianta pari a 592 m²). Ipotizzando una densità di potenza di 175 W/m², coerente con quella di pannelli ad alta performance attualmente in commercio, e un coefficiente di occupazione del 90%, ogni stazione intermedia può ospitare 56,7 kWp di fotovoltaico e ogni stazione terminale può ospitare 92 kWp di potenza fotovoltaica. Si è ipotizzato che i pannelli siano orientati, sia in termini di angolo di tilt sia in termini di angolo di Azimut, in modo da massimizzare la produzione su orizzonte annuale.

La Tabella 6 riassume le installazioni di pannelli e vetri fotovoltaici. Si sottolinea che la produzione specifica, misurata in kWh/kWp, è la produzione annuale energetica attesa per ogni anno per ogni kWp di potenza installata.

7. Simulazione energetica (città di Torino)

Dopo aver definito un profilo di carico e un profilo di produzione da impianto fotovoltaico,

$$E_{carico} = f\left(ora, tipo_{giorno}, citta', stagione\right)$$
$$E_{PV} = f(ora, mese, citta')$$

station can house 92 kWp of solar panel power. It has been hypothesised that the panels are oriented, both in terms of tilt angle and of azimuth angle, in such a way as to maximise the production on a yearly basis.

Tabella 6 – *Table 6*

Installazioni di pannelli fotovoltaici sulla struttura e sui veicoli del sistema CableSmart
Installation of the solar panels on the structure and on the vehicles of the CableSmart system

Installazione ***Installation***	**Potenza** ***Power***	**Tilt [deg]** ***Tilt [deg]***	**Prod. Specifica [kWh/kWp]** ***Specific producion [kWh/kWp]***
Copertura stazioni *Station roof*	297,4 kWp	35,2 (ottimo) *(optimal)*	1.287
Copertura cabina *Cabin roof*	238 Wp/veicolo (50% ombreggiata) *238 Wp/vehicle (50% in the shadow)*	0	1.086
Rotaia *Rails*	455 kWp	0	1.086

Tabella 7 – *Table 7*

Parametri dell'impianto di generazione da fonte fotovoltaica e del sistema di accumulo energetico

Parameters of the photovoltaic generation plant and of the energy accumulation system

Potenza fotovoltaica (PV) stazioni ***Solar power per station (PV)***	PV_{staz} PV_{stat}	kWp	297,4
Energia specifica PV stazioni ***Specific energy per station PV***	ξ_{staz}	kWh/kWp	1.287
Potenza PV veicolo ***Power per vehicle PV***	$PV_{veicolo}$ $PV_{vehicle}$	Wp	238
Energia media specifica PV veicolo ***Mean specific energy per vehicle PV***	ξ_v	kWh/kWp	1.086
Potenza carica batterie ***Battery charging power***	PC_{Batt}	kW	250
Potenza scarica batterie ***Battery discharging power***	PS_{Batt}	kW	150
Rendimento batterie ***Battery yield***	μ_{BATT}	%	92%

si è infine proceduto ad una simulazione energetica con orizzonte un anno e granularità temporale un'ora, effettuata tramite un programma in Excel ideato per questa simulazione.

I parametri tecnici dell'impianto di generazione da fonte fotovoltaica e del sistema di accumulo energetico sono riassunti nella Tabella 7.

Nella Tabella 7 non è esplicitamente citato il rendimento del sistema fotovoltaico, in quanto l'energia specifica fa riferimento a valori in corrente alternata, quindi già al netto di perdite dei pannelli, dei cavi e degli inverter.

La logica di simulazione energetica prevede che l'energia prodotta dall'impianto fotovoltaico sia utilizzata dapprima per soddisfare i carichi. Se l'energia da fonte fotovoltaica eccede l'energia richiesta dai carichi, la quota parte in surplus viene utilizzata per caricare le batterie:

$$E_{Batt,t}=\begin{cases}\min\left(Capacit\grave{a}_{Batt}*\mu_{Batt},E_{Batt,t-1}+Carica-Scarica\right) & if>0\\ 0 & else\end{cases}$$

dove

$$Carica=\min_{E_{PV}-E_{carico}>0}(E_{PV}-E_{carico},PC_{Batt})$$
$$Scarica=\min_{E_{PV}-E_{carico}<0}(E_{carico}-E_{PV},PS_{Batt})$$

Se anche le batterie sono completamente cariche, l'energia prodotta dall'impianto viene venduta alla rete elettrica e appare inutilizzabile ai fini della soddisfazione del carico CableSmart.

$$E_{venduta}=\int_{produzione>carico}(E_{PV}(t)-E_{carico}(t)-(E_{batt.t}-E_{batt,t-1}))dt$$

Quando l'energia dei carichi eccede la produzione da fonte solare, viene utilizzata l'energia accumulata nelle batterie che, scaricandosi, permettono di disaccoppiare temporalmente produzione e soddisfazione del carico; se le batterie sono completamente scariche la domanda energetica dei carichi viene esaudita dalla rete elettrica.

Table 6. Summary of the installation of the solar panels and solar glass. It should be pointed out that the specific production, measured in kWh/kWp, is the yearly energy production expected for each year for each kWp of installed power.

7. *Energy simulation (for the city of Turin)*

After having defined a load profile and a solar panel production profile,

$$E_{carico}=f\left(ora,tipo_{giorno},citta',stagione\right)$$
$$E_{PV}=f(ora,mese,citta')$$

an energy simulation was carried out considering a time horizon of a year and for time granularity of one hour, using an Excel programme designed for this kind of simulation.

The technical parameters of the solar panel source generation plant and of the energy accumulation system are summarised in Table 7.

The yield of the solar panel system is not explicitly mentioned in Table 7 as the specific energy refers to alternating current values, therefore already net of losses from the panels, from the cables and from the inverters.

The energy simulation logic foresees that the energy produced by the solar panel system is first used to satisfy the loads. If the solar panel source energy exceeds the energy required for the loads, the surplus part is used to charge the batteries:

$$E_{Batt,t}=\begin{cases}\min\left(Capacit\grave{a}_{Batt}*\mu_{Batt},E_{Batt,t-1}+Carica-Scarica\right) & if>0\\ 0 & else\end{cases}$$

where

$$Carica=\min_{E_{PV}-E_{carico}>0}(E_{PV}-E_{carico},PC_{Batt})$$
$$Scarica=\min_{E_{PV}-E_{carico}<0}(E_{carico}-E_{PV},PS_{Batt})$$

If the batteries are completely charged, the energy produced by the plant is then sold to the electricity grid and appears unusable to satisfy the CableSmart load.

$$E_{venduta}=\int_{produzione>carico}(E_{PV}(t)-E_{carico}(t)-(E_{batt.t}-E_{batt,t-1}))dt$$

When the energy from the loads exceeds the production from solar sources, the energy accumulated in the batteries is used. This is energy which, discharging, allows the production to be temporarily connected and the load to be satisfied; if the batteries are completely discharged, the energy request of the loads is satisfied by the electric grid.

$$E_{da\ rete}=\int_{carico>produzione}(E_{carico}(t)-E_{PV}(t)-(E_{batt.t-1}-E_{batt,t}))dt$$

In funzione della scelta del parametro di capacità delle batterie variano le performance energetiche dell'impianto.

La scelta del dimensionamento delle batterie dovrebbe essere effettuata in funzione di due esigenze contrapposte:

- un'esigenza puramente tecnica, che per minimizzare l'energia venduta alla rete (quindi sovraprodotta dall'impianto fotovoltaico ma non utilizzabile perché il carico non la richiede e perché le batterie sono già completamente cariche), e l'energia che deve essere prelevata da rete (perché l'impianto fotovoltaico non produce abbastanza energia per soddisfare il carico e le batterie sono già completamente scariche) porta ad aumentare indeterminatamente la capacità massima delle batterie;
- un'esigenza economica, per cui il costo delle batterie sale linearmente in funzione della capacità massima.

Una dettagliata analisi economica non è nell'intento di questo articolo, per cui ci si è limitati a scegliere il dimensionamento del sistema di accumulo sulla base di variabili tecniche.

Si è dapprima scelto di dimensionare il sistema di accumulo sulla base del mese di aprile, mese di media produzione da fotovoltaico. Si è quindi dimensionata la taglia delle batterie in modo che la carica effettiva delle batterie durante un giorno feriale del mese di aprile fosse tangente alla capacità massima, definendo quindi la minima capacità del sistema di accumulo per cui non vi è energia sovraprodotta e immessa in rete in un giorno feriale del mese di aprile, come mostrato dalla Figura 8.

Ovviamente, scegliendo una soluzione non massimale – poiché definita sulla base del mese di produzione media – come quella descritta, nei mesi in cui la produzione energetica da fonte solare è maggiore si ha una quota parte di energia venduta alla rete. Dal punto di vista grafico, ciò si declina in una curva di carica delle batterie piatta in corrispondenza del suo valore massimo: la carica non può diminuire, poiché l'energia prodotta è maggiore rispetto a quella richiesta dal carico, né aumentare, poiché ha raggiunto il vincolo di capacità massima. Viene riportato nella Figura 9 il grafico relativo al mese di luglio, si noti che i quattro cicli completi sono relativi:

$$E_{da\ rete}=\int_{carico>produzione}(E_{carico}(t)-E_{PV}(t)-(E_{batt.t-1}-E_{batt,t}))dt$$

The energy performances of the system vary according to the choice of battery capacity parameters.

The choice of the sizing of the batteries should be made on the basis of two opposing requirements:

- *a purely technical requirement which, in order to minimise the energy sold to the grid (therefore overproduced by the solar panel system but not useable because it is not required for the load and because the batteries are already completely charged) and the energy that has to be taken from the grid (because the solar panel system does not produce enough energy and the batteries are already completely discharged) leads to the maximum capacity of the batteries being increased endlessly;*
- *an economic requirement, for which the cost of the battery increases linearly as a function of the maximum capacity.*

It was not the aim of this study to include a detailed economic analysis and it was therefore decided to limit it to the sizing of the accumulation system on the basis of the technical variables.

It was initially decided to size the storage system on the basis of the month of April, a month of average photovoltaic production. The batteries were therefore sized so that the actual charge of the batteries during a working day in April was tangent to the maximum capacity, thus defining the minimum capacity of the storage system so that no overproduced or injected energy is introduced into the network on a weekday in April, as shown in Figure 8.

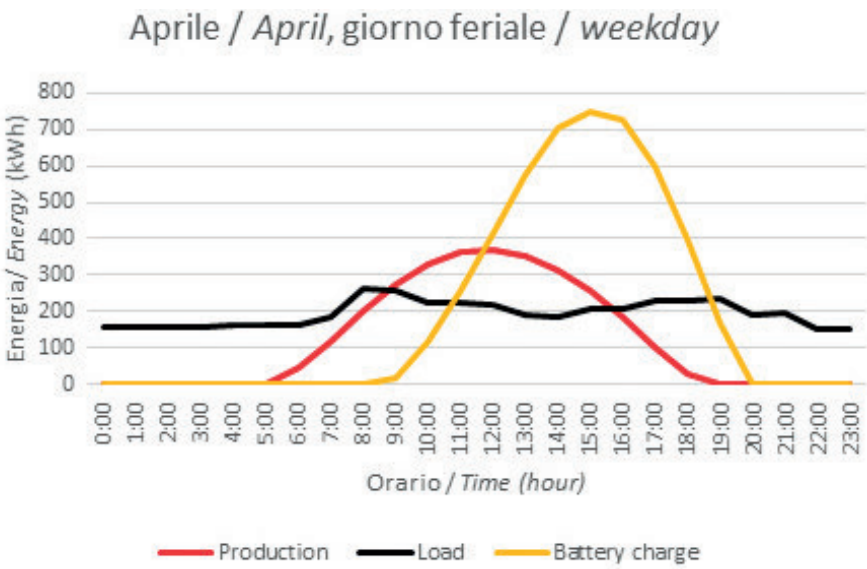


Fig. 8 - Energia vs. orario del giorno, per carica effettiva delle batterie durante un giorno feriale del mese di aprile.

Fig. 8 - Energy vs. hours during the day, for the actual charging of the batteries during a weekday in the month of April.

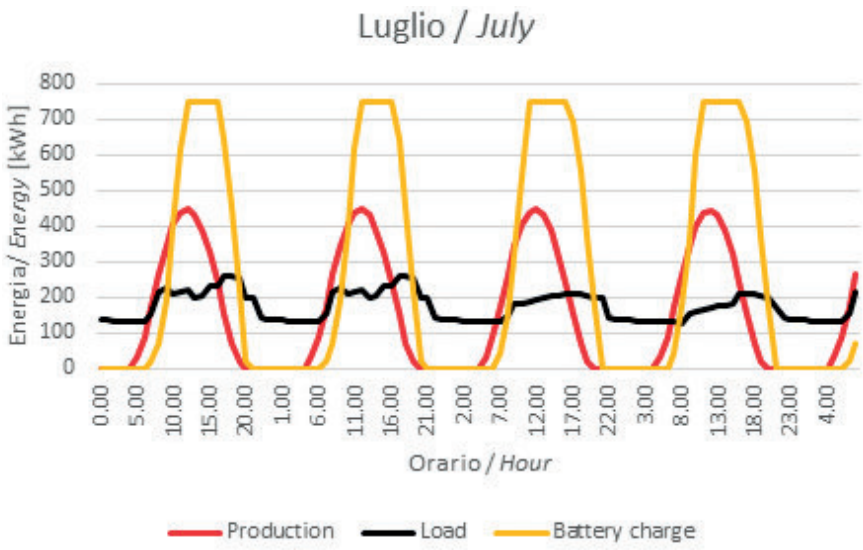


Fig. 9 - Produzione, carico e ricarica nel mese di luglio.
Fig. 9 - Production, charging (load) and recharging (battery charge) in the month of July.

- al giorno feriale di transitorio, in cui le batterie sono scariche al mattino, corrispondente ad un giorno feriale nel cui precedente c'è stato cielo nuvoloso e le batterie si sono completamente scaricate;
- al giorno feriale di regime, in cui potenzialmente le batterie hanno al mattino una carica residua. In questo caso, poiché un ciclo di carica-scarica delle batterie si conclude interamente all'interno della giornata, non vi è differenza tra le performance energetiche delle due tipologie di giorno feriale definite;
- al giorno di sabato di regime;
- al giorno di domenica di regime.

Lo stesso procedimento è stato seguito dimensionando la taglia del sistema di accumulo rispetto ai mesi di gennaio (produzione minima) e luglio (produzione massima), ottenendo i risultati riassunti nella seguente Tabella 8 in cui i valori riassuntivi sono stati calcolati come media ponderata delle performance nelle quattro tipologie di giorno (feriale di transitorio, feriale di regime, sabato e domenica). Si sottolinea che la produzione annuale e il carico annuale sono costanti in funzione del mese di riferimento per il dimensionamento delle batterie, mentre le *performance* energetiche dell'impianto in termini di energia venduta e energia da rete dipendono dal dimensionamento del sistema di accumulo: maggiore è la capacità di quest'ultimo, maggiore è il possibile disaccoppiamento temporale tra produzione e consumo, quindi minori sono sia l'energia venduta sia quella che è necessario reperire dalla rete.

Le emissioni specifiche sono state calcolate utilizzando un fattore di riempimento del veicolo di 62.5%, e considerando che ogni kWh utilizzato proveniente da fonte fotovoltaica produca 25 gCO_2.

Obviously, by choosing a solution that is not optimal – as it is defined on the basis of a month of mean production – such as that described herein, a portion of the energy is sold to the grid in the months in which the energy production from solar sources is greater. From the graphic point of view, this results in a flat battery charge curve in correspondence to its maximum value: the charge cannot diminish, as the produced energy is greater than that requested for the charging, and cannot increase, as it has reached the constraint of maximum capacity. The graph concerning the month of July is reported in Figure 9, where it may be noted that the four complete cycles are related to:

- *a transitory weekday, in which the batteries are discharged in the morning, corresponding to a weekday in which the sky was cloudy on the previous day and the batteries were completely discharged;*
- *a day of holiday regime, in which the batteries potentially have some charge left. In this case, as an entire charging-discharging cycle takes place within the period of a day, there is no difference in the energy performance of the two defined typologies of weekdays;*
- *a Saturday regime;*
- *a Sunday regime.*

The same procedure was adopted for the sizing of the accumulation system, considering the months of January (minimum production) and July (maximum production), and the results summarised in Table 8 were obtained. The summarised values were calculated as the weighted averages of the performances in the four types of days (transitional weekday, weekday regime, Saturday and Sunday regimes). It should be pointed out that the yearly production and the yearly load are constant, as a function of the reference month for the sizing of the batteries, while the energy performances of the plant, in terms of sold energy and grid energy, depend on the sizing of the accumulation system: the greater the capacity of the accumulation system is, the greater the possibility of a temporary connection between production and consumption, and therefore of less energy being sold and less energy being taken from the grid.

The specific emissions were calculated using a filling factor of the vehicle of 62.5% and considering that each used kWh coming from a solar source produces 25 gCO_2.

8. Energy study according to the city

The energy production and the production from solar

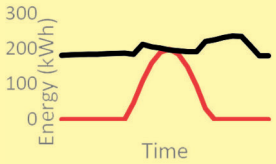
Tabella 8 – *Table 8*

Valori energetici riassuntivi della simulazione svolta nella città di Torino
Summary of the energy values of the simulation carried out for the city of Turin

	Gennaio *January*	**Aprile** *April*	**Luglio** *July*
Carico annuale [kWh] $LOAD = \sum_{M=1}^{12} \sum_{h=apertura}^{chiusura} N_{cab,M,h} * Carico_{cab,M,h}$ **Dove:** • **M e h rappresentano rispettivamente mese e ora** • **$N_{cab,h}$ è il numero di cabine circolanti in ogni ora in ogni mese** **$Carico_{cab,M,h}$ è il carico energetico richiesto da una cabina nel mese M nell'ora h** ***Yearly load [kWh]*** $LOAD = \sum_{M=1}^{12} \sum_{h=apertura}^{chiusura} N_{cab,M,h} * Carico_{cab,M,h}$ ***Where:*** • ***M and h represent the month and hour, respectively*** • ***$N_{cab,h}$ is the number of cabins circulating in each hour in each month*** ***$Carico_{cab,M,h}$ is the energy load required for a cabin in month M in hour h***	1.700.768	1.700.768	1.700.768
Produzione annuale [kWh] $PROD = PV_{staz} * \xi_{staz} + PV_{rail} * \xi_{rail} + PV_{cab} * \sum_{M=1}^{12} \sum_{h=alba}^{tramonto} N_{cab,h,M} * \xi_{cab}$ **Dove:** • **PV_X è la potenza fotovoltaica installabile in X (copertura della stazione, rotaia oppure una cabina)** • **ξ_X è la produzione specifica della frazione di impianto fotovoltaico installato in X** • **$N_{cab,h}$ è il numero di cabine circolanti in ogni ora in ogni mese** ***Yearly production [kWh]*** $PROD = PV_{staz} * \xi_{staz} + PV_{rail} * \xi_{rail} + PV_{cab} * \sum_{M=1}^{12} \sum_{h=alba}^{tramonto} N_{cab,h,M} * \xi_{cab}$ ***Where:*** • ***PV_X is the installable solar panel power in X (roof of the station, rail or cabin)*** • ***ξ_X is the specific production of the fraction of the solar panel system installed in X*** • ***$N_{cab,h}$ is the number of cabins circulating in each hour in each month***	905.891	905.891	905.891

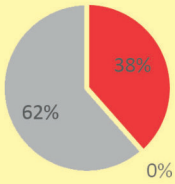
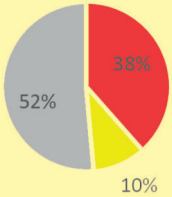
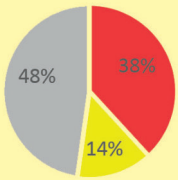
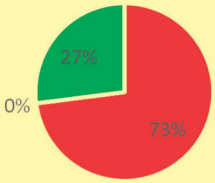
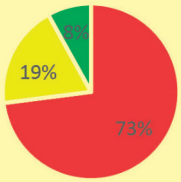
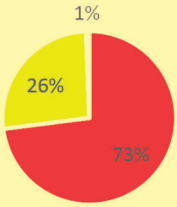
(segue... - *follows...*)

(segue tab. 8 - *follows tab. 8*)

Capacità batterie [kWh] **La capacità delle batterie è stata definita, per ogni mese di dimensionamento, come la minima capacità che permetta nel giorno medio mese di riferimento la totale indipendenza dalla rete elettrica.** ***Battery capacity [kWh]*** ***The battery capacity was defined, for each month of sizing, as the minimum capacity that allows total independence from the electric grid for each average day in the reference month***	0 Nel mese di gennaio, la curva di produzione da fonte fotovoltaica è in ogni ora minore della curva di carico, e dunque non viene sovra-prodotta energia che può essere stoccata nelle batterie *In the month of January, the solar panel production curve is below the load curve for each hour, and therefore there is no overproduction of energy that could be stored in the batteries* 	817	1.479
En. in batterie [kWh] ***En. in the batteries [kWh]***	0	171.946	239.063
En. da rete [kWh] ***En. From the grid [kWh]***	1.046.650	874.704	812.318 L'energia da rete diminuisce in modo sub-lineare con il crescere del dimensionamento delle batterie, poiché il collo di bottiglia è rappresentato dall'impianto fotovoltaico che, nei mesi invernali, non riesce a soddisfare tutto il carico. Tale collo di bottiglia non è superabile agendo sulla taglia delle batterie, ma l'unica leva è rappresentata dall'aumento della potenza fotovoltaica installata. *The energy from the grid diminishes in a sub-linear manner as the size of the batteries increases, because the bottleneck is represented by the solar panel system, which is not able to satisfy all the loads in the winter months. Such a bottleneck cannot be overcome by acting on the size of the batteries alone, and the only lever is that of increasing the installed solar system power.*
E. venduta [kWh] ***E. sold [kWh]***	244.780 Poiché le batterie sono state dimensionate sul mese di gennaio, mese di minima produzione da fonte solare, l'energia che viene sovraprodotta in tutti gli altri mesi viene venduta alla rete *As the batteries were sized considering the month of January, that is, the month with the least production from the solar source, the energy that is overproduced in all the other months is sold to the grid*	72.834	5.717

(segue... - *follows...*)

(segue tab. 8 - *follows tab. 8*)

Mix energetico **Solare** **Batterie** **Da rete** ***Energy mix*** ***Solar*** ***Batteries*** ***From the grid***			
Utilizzo energia da PV **Usata direttamente** **Batterie** **Venduta alla rete** ***Use of energy from PV*** ***Direct use*** ***Batteries*** ***Sold to the grid***			
Emissioni specifiche [gCO_2/(pass*km)] ***Specific emissions [gCO_2/(pass*km)]***	6,88	5,88	5,48

8. Studio energetico in funzione della città

Si è proceduto ad analizzare il carico energetico, la produzione da fonte fotovoltaica e ad effettuare una simulazione energetica come quella descritta nel capitolo 7 per ognuna delle città analizzate.

Carico

I dati utilizzati come input del modello atto a calcolare l'energia richiesta da ciascuna cabina che sono funzione della città considerata sono:

- Matrice di temperatura, che raccoglie le temperature medie per ogni ora per ogni mese, da cui dipende direttamente l'energia necessaria per il condizionamento e il riscaldamento della cabina;
- Ora di alba e tramonto di ogni mese, da cui dipende l'energia necessaria per l'illuminazione della cabina

La Tabella 9 mostra le componenti del carico energetico (misurate in kWh/giorno) funzione della città, espresse per ogni città considerata e per ogni stagione.

Poiché l'energia richiesta per garantire il comfort all'interno della cabina varia in funzione della stagione e della località considerata, anche la suddivisione dell'energia richiesta dal carico tra comfort e meccanica dipende dalla stagione e dalla città di installazione. La Tabella 10 riassume la percentuale di carico del sistema utilizzato per garantire il comfort nella cabina e la percentuale di carico richiesto per garantire il movimento del veicolo.

Si sottolinea che una parte consistente dell'energia domandata dal carico è relativa al comfort in cabina: fino a quasi il 50% dell'energia richiesta dal carico è infatti

panel sources were then analysed and an energy simulation, such as the one described in section 7, was conducted for each of the analysed cities.

Charging

The data considered as input for the model used to calculate the required energy of each cabin, and which are functions of the considered city, are:

- *the temperature matrix, which collects the mean temperature for each hour and for each month, and on which the energy necessary for air conditioning and heating of the cabin depends;*
- *the dawn and sunset times of each month, on which the energy necessary for lighting the cabin depends.*

Table 9 shows the energy load components (measured in kWh/day) as a function of the city, expressed for each considered city and for each season.

As the energy requested to guarantee comfort inside a cabin varies according to the season and the considered location, the subdivision of the requested energy between the load for comfort and for the mechanical part also depends on the season and on the city where the system is installed. Table 10 summarises the percentage of load of the system utilised to guarantee comfort in the cabin and the percentage of load required to guarantee movement of the vehicle.

It should be underlined that a substantial part of the energy required is relative to comfort in the cabin: almost 50% of the energy required is in fact used to guarantee comfort inside the cabin.

utilizzata per garantire il comfort all'interno della cabina.

Poiché l'energia richiesta per il comfort è funzione crescente dei gradi ora estivi e dei gradi ora invernali, questa è massima nelle stagioni estreme: in inverno nei luoghi freddi in cui il riscaldamento prevale sul condizionamento (Londra e Torino) e in estate nei luoghi caldi (Dubai City a New Delhi).

Anche la curva dell'indicatore di traffico rispetto al tempo, utilizzata come misura indiretta della domanda di mobilità urbana, dunque del numero di cabine utilizzate e del carico complessivo dell'impianto, varia in funzione della città. La Figura 10 mostra, a titolo di esempio, i grafici di confronto tra la curva di traffico di un giorno feriale nella città di Torino confrontata con quella relativa alla città di New Delhi.

Tabella 9 – *Table 9*

Carichi energetici di riscaldamento, condizionamento e illuminazione di una cabina per ogni città per ogni stagione

Energy load for heating, air-conditioning and lighting of a cabin for each city and for each season

		Torino *Turin*	Londra *London*	Dubai City	Nuova Delhi *New Delhi*
Inverno *Winter*	Riscaldamento [kWh] *Heating [kWh]*	14.353	11.067	1.718	5.407
	Condizionamento [kWh] Air-conditioning *[kWh]*	0	0	929	0
	Illuminazione [kWh] *Lighting [kWh]*	446	440	396	420
Primavera *Spring*	Riscaldamento [kWh] *Heating [kWh]*	6.167	7.754	0	0
	Condizionamento [kWh] *Air-conditioning [kWh]*	0	0	7.133	9.136
	Illuminazione [kWh] *Lighting [kWh]*	299	305	339	336
Estate *Summer*	Riscaldamento [kWh] *Heating [kWh]*	94	2.544	0	0
	Condizionamento [kWh] *Air-conditioning [kWh]*	3.693	567	15.282	11.490
	Illuminazione [kWh] *Lighting [kWh]*	263	264	263	295
Autunno *Autumn*	Riscaldamento [kWh] *Heating [kWh]*	5.294	5.811	0	0
	Condizionamento [kWh] *Air-conditioning [kWh]*	0	0	9.704	5.866
	Illuminazione [kWh] *Lighting [kWh]*	404	401	371	397

Produzione

La produzione da fonte fotovoltaica varia in funzione del luogo geografico non solo per quanto concerne la produzione specifica annuale [kWh/kWp], ma anche per quanto riguarda la curva di produzione infra-giornaliera.

La Tabella 11 riassume le produzioni specifiche annuali, misurate in kWh/kWp, relative alle quattro città considerate, mentre la Figura 11 riporta, a titolo di esempio, il confronto tra le produzioni specifiche orarie nel mese di gennaio relative alle città di Londra e Dubai City.

As the energy required for comfort grows as a function of the outside temperature, the request is at its highest in the extreme seasons: in winter in the cold locations, where heating prevails over air conditioning (London and Turin) and in summer in the hot locations (Dubai City and New Delhi).

Tabella 10 – *Table 10*

Ripartizione percentuale dell'energia richiesta dal carico

Percentage division of the energy required for charging

	Torino *Turin*	Londra *London*	Dubai City	Nuova Delhi *New Delhi*
Inverno *Winter*	Comfort= 47% Movimento=53% *Comfort= 47%* *Movement=53%*	Comfort=43% Movimento=57% *Comfort=43%* *Movement=57%*	Comfort=31% Movimento=69% *Comfort=31%* *Movement=69%*	Comfort=36% Movimento=64% *Comfort=36%* *Movement=64%*
Primavera *Spring*	Comfort=37% Movimento=63% *Comfort=37%* *Movement=63%*	Comfort=39% Movimento=61% *Comfort=39%* *Movement=61%*	Comfort=38% Movimento=62% *Comfort=38%* *Movement=62%*	Comfort=41% Movimento=59% *Comfort=41%* *Movement=59%*
Estate *Summer*	Comfort=33% Movimento=67% *Comfort=33%* *Movement=67%*	Comfort=32% Movimento=68% *Comfort=32%* *Movement=68%*	Comfort=47% Movimento=53% *Comfort=47%* *Movement=53%*	Comfort=43% Movimento=57% *Comfort=43%* *Movement=57%*
Autunno *Autumn*	Comfort=35% Movimento=65% *Comfort=35%* *Movimento=65%*	Comfort=36% Movimento=64% *Comfort=36%* *Movement=64%*	Comfort=41% Movimento=59% *Comfort=41%* *Movement=59%*	Comfort=36% Movimento=64% *Comfort=36%* *Movement=64%*

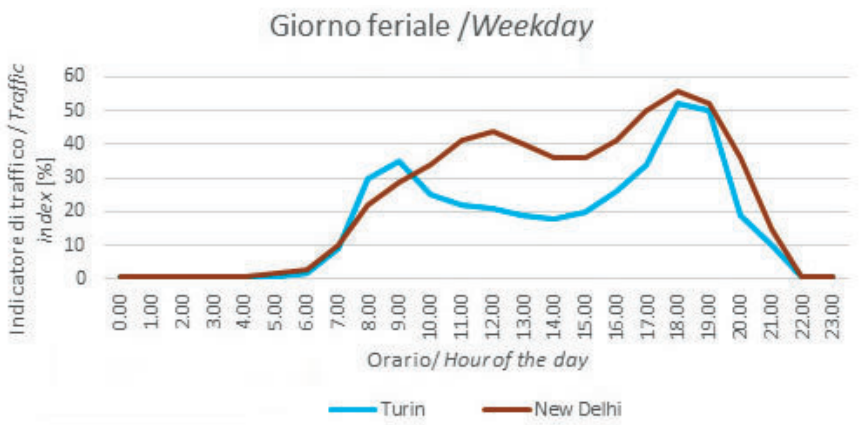


Fig. 10 - Indice di traffico in funzione del tempo misurato in un giorno feriale in Torino e in New Delhi.
Fig. 10 - Traffic index as a function of the time measured in a weekday in Turin and New Delhi.

Tabella 11 – *Table 11*

Produzioni specifiche annuali [kWh/kWp] di un impianto fotovoltaico
Yearly specific production [kWh/kWp] of a solar panel system

Produzione specifica [kWh/kWp] ***Specific production [kWh/kWp]***	**Ottimale, in cui l'angolo di tilt massimizza la produzione specifica. In prima approssimazione, l'angolo di tilt ottimale è definibile come uguale all'angolo di latitudine della località considerata. Per maggiore precisione, l'angolo ottimale è stato ricavato utilizzando software di simulazione energetica.** ***Optimal, where the tilt angle maximises the specific production. As a first approximation, the optimal tilt angle may be defined as being equal to the latitude angle of the considered location. The optimal angle was also obtained using energy simulation software to obtain more precise information.***	**Orizzontale, in cui l'angolo di tilt è nullo.** ***Horizontal, where the tilt angle is zero.***
Torino ***Turin***	1.287	1.086
Londra ***London***	1.001	850
Dubai City	1.773	1.642
Nuova Delhi ***New Delhi***	1.533	1.380

Simulazione Energetica

Con i dati in input relativi alle quattro città analizzate, è stato effettuato uno studio di simulazione energetica, in modo analogo a quanto descritto nel capitolo 8 per la città di Torino.

La seguente Tabella 12 riassume i risultati ottenuti.

In città come Dubai City e New Delhi si verifica, rispetto a quanto descritto per la città di Torino nel capitolo 7, un'inversione della taglia delle batterie rispetto al mese: mentre normalmente la sovra-produzione energetica è massima nei mesi estivi, dunque il dimensionamento delle batterie effettuato sulla base dei mesi estivi è più in-

The curve that indicates the traffic with respect to time, which is utilised as an indirect measure of the request for urban mobility as a result of the number of cabins used and of the overall load of the system, varies according to the city.

Figure 10 shows, as an example, the comparison graphs between the traffic curves for a weekday in the city of Turin and with that relative to the city of New Delhi.

Production

The production from the solar panel sources varies according to the geographic location, not only as far as the yearly specific production [kWh/kWp] is concerned, but also for the interim daily production curve.

Table 11 summarises the yearly specific production, measured in kWh/kWp, in relation to the four considered cities, while Figure 11 reports, as an example, a comparison between the hourly specific productions for the month of January relative to the cities of London and Dubai.

Energy simulation

An energy simulation was performed, in a similar way to what was described in section 8 for the city of Turin, with the input data concerning the four analysed cities.

Table 12 summarises the obtained results.

An inversion of the size of the batteries, with respect to the month, may be observed for the cities of Dubai and New Delhi, compared to what was described for the city of Turin in section 7: although the energy overproduction is usually maximum in the summer months, and the sizing of the batteries carried out on the basis of the summer months is therefore more significant, the sizing of the batteries in Dubai City and New Delhi is at a maximum in the winter months.

This is due to the fact that the summer load is much greater in these cities than the winter load, because of the higher load due to air-conditioning and, since these cities

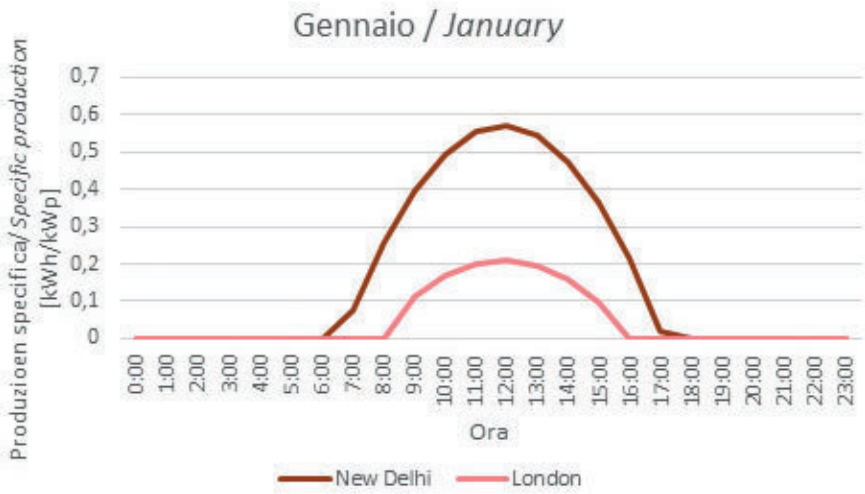


Fig. 11 - Curva di produzione energetica infra-giornaliera da fonte fotovoltaica nel mese di gennaio nelle località di New Delhi e Londra.

Fig. 11 - Interim daily energy production curve of the solar panels for the month of January for New Delhi and London.

are located at a relatively low latitude, the increase in the production from solar sources in the summer months, compared to the winter ones, is rather limited.

Figure 12 reports the trend of the load and of the production throughout the year for Dubai City.

9. Conclusions

The study of the energy load of the innovative cable-driven urban transport system (named CableSmart), as analysed along its rail section, has shown how this transport systems is more energy efficient than the same one along the rope hauled section. Since the comparison of the results of this paper, which is focused on the

Tabella 12 – *Table 12*

Risultati della simulazione energetica in funzione della città di installazione
Results of the energy simulation as a function of the city in which the system is installed

	Torino *Turin*	**Londra** *London*	**Dubai City**	**Nuova Delhi** *New Delhi*
Carico annuale [kWh/kWp] *Yearly load [kWh/kWp]*	1.700.768	1.784.386	1.696.745	1.866.929
Produzione annuale [kWh/kWp] *Yearly production [kWh/kWp]*	905.891	712.207	1.305.974	1.117.848
Dimensionamento batterie gennaio **Batterie [kWh]** **Mix energetico** ***Sizing of the batteries for January*** ***Batteries [kWh]*** ***Energy mix***	0 PV: 38% Batt: 0% Rete: 62% *0* *PV: 38%* *Batt: 0%* *Grid: 62%*	0 PV: 34% Batt: 0% Rete: 63% *0* *PV: 34%* *Batt: 0%* *Grid: 63%*	1.260 PV: 46% Batt: 24% Rete: 30% *1.260* *PV: 46%* *Batt: 24%* *Grid: 30%*	676 PV: 47% Batt: 10% Rete: 43% *676* *PV: 47%* *Batt: 10%* *Grid: 43%*
Dimensionamento batterie aprile **Batterie [kWh]** **Mix energetico** ***Sizing of the batteries for April*** ***Batteries [kWh]*** ***Energy mix***	817 PV: 38% Batt: 10% Rete: 52% *817* *PV: 38%* *Batt: 10%* *Grid: 52%*	355 PV: 34% Batt: 3% Rete: 63% *355* *PV: 34%* *Batt: 3%* *Grid: 63%*	1.816 PV: 46% Batt: 30% Rete: 24% *1.816* *PV: 46%* *Batt: 30%* *Grid: 24%*	1.032 PV: 47% Batt: 12% Rete: 41% *1.032* *PV: 47%* *Batt: 12%* *Grid: 41%*
Dimensionamento batterie luglio **Batterie [kWh]** **Mix energetico** ***Sizing of the batteries for July*** ***Batteries [kWh]*** ***Energy mix***	1.479 PV: 38% Batt: 14% Rete: 48% *1.479* *PV: 38%* *Batt: 14%* *Grid: 48%*	631 PV: 34% Batt: 5% Rete: 61% *631* *PV: 34%* *Batt: 5%* *Grid: 61%*	1.358 PV: 46% Batt: 26% Rete: 28% *1.358* *PV: 46%* *Batt: 26%* *Grid: 28%*	144 PV: 47% Batt: 3% Rete: 50% *144* *PV: 47%* *Batt: 3%* *Grid: 50%*

gente, in Dubai City e in New Delhi il dimensionamento delle batterie trova un suo massimo nei mesi invernali. Ciò è dovuto al fatto che il carico estivo è in queste città di molto maggiore rispetto a quello invernale, a causa dell'alta quota-parte del carico dovuto al condizionamento e poiché queste città hanno una latitudine relativamente bassa, l'aumento di produzione da fonte fotovoltaica nei mesi estivi rispetto a quelli invernali è contenuto. La Figura 12 riporta l'andamento durante l'anno del carico e della produzione nella città di Dubai City.

9. Conclusioni

L'analisi del carico energetico dell'innovativo sistema di trasporto a fune urbano qui analizzato (CableSmart), nella sua tratta su rotaia invece che su quelle su fune, ha dimostrato come questo sia energeticamente più efficiente rispetto allo stesso sistema nella sua tratta sospesa. Poiché il confronto tra i risultati di questo articolo, che si concentra sulla tratta su rotaia, e quelli riportati in [1] – dove gli autori si sono occupati dell'analisi energetica su fune – è stato effettuato a parità di sistema, veicoli ed altre condizioni al contorno, si conclude che in tratte piane la trazione tramite fune è sub-ottimale e meno efficiente dal punto di vista energetico rispetto a quella su rotaia; questo avviene in quanto:

- la tratta su fune presenta indubbi vantaggi energetici in caso di forte pendenza, dovuti al bilanciamento di energia potenziale e cinetica tra le cabine in salita e quelle in discesa: quindi, aumentando il dislivello – soprattutto in città nelle quali non vi è un flusso unidirezionale valle-monte – la trazione su fune diventa energeticamente meno dispendiosa, mentre la trazione tramite moto-ruote vede aggiungersi nella sua richiesta energetica l'energia necessaria per superare la livelletta. Il vantaggio appena descritto non è invece applicabile in tratte piane, come quelle considerate nel presente articolo;
- essendo il veicolo il medesimo nelle tratte di fune e di moto-ruota su rotaia, si va a perdere il vantaggio di avere, nelle tratte con trazione mediante fune, un veicolo normalmente più leggero grazie alla mancanza dei sistemi di propulsione interna e trasmissione;
- i carichi energetici su moto-ruota sono particolarmente bassi (nell'ordine di 0,05 kWh/pass·km nel tratto su fune e 0,0269 kWh/pass·km in quello su rotaia, entrambi con un fattore di riempimento del 62,5%) rispetto a quelli di un altro sistema basato su trazione con ruote in quanto il veicolo del CableSmart è relativamente leggero rispetto altri sistemi di trasporto pubblico su gomma ed ancora più su rotaia.

rail section, and those reported in [1] – where the authors dealt with cable-driven energy analysis – was carried out with the same cable system, vehicles and other boundary conditions, it may be concluded that the traction by means of a cable is sub-optimal in zero gradient sections and less efficient from the energy point of view than that on the rail; this is primarily due to the following aspects.

- *The cable-driven section presents energy advantages when there is a steep slope, as a result of the balancing between the potential and kinetic energy for the cabins climbing and those descending: therefore, when the difference in level is increased – above all in a city where there is not an upstream-downstream unidirectional flow – the traction on cables becomes less energetically costly, while the traction on monorails also requires the energy necessary to overcome the steep gradient to be added to the normal energy request. However, the just explained advantage is not applicable in zero gradient situations, such as those considered in this paper;*
- *As the vehicle in the cable-driven and in the rail sections (with four motorised wheels) remains the same, the advantage of having a lighter vehicle – as a result of the lack of internal propulsion systems and of any power transmission – which is usually associated with the former (by rope), becomes irrelevant;*
- *The energy loads for monorail systems are particularly low (of the order of 0,05 kWh/pass·km) on the cable-driven stretch and 0,0269 kWh/pass·km on the track stretch, both with a filling factor of 62.5%) compared to those of any another transport system based on wheel traction, as the CableSmart vehicle is relatively light compared to the other public transport systems operating on tyres and even more so on rails.*

This result can in part been confirmed considering the history and evolution of some urban transport systems [11] [12] [13] [14]: it is in fact possible to mention various installations, conceived as systems in which movement was

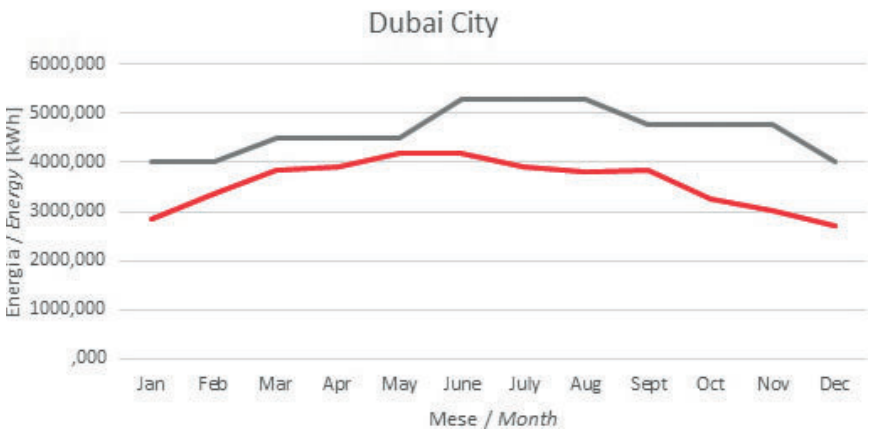


Fig. 12 - Curve di carico e di produzione energetica nella città di Dubai City.
Fig. 12 - Load (grey) and energy production (red) curves for Dubai City.

Tale risultato trova parziale conferma nella storia e nell'evoluzione di alcuni sistemi di trasporto urbano [11] [12] [13] [14]: si possono infatti contare vari impianti, nati come sistema in cui il moto veniva fornito da una fune, per i quali si è poi optato per un sistema motorizzato. Si pensi, a titolo di esempio, alla tratta Torino Sassi-Superga, inaugurata nel 1884 come funicolare, poi rinnovata nel 1935 come cremagliera senza fune con trazione elettrica.

L'analisi del carico energetico ha altresì dimostrato che una parte variabile tra il 30% e il 50% del carico energetico è appannaggio dei sistemi di comfort della cabina. Questi sistemi, in particolare riscaldamento e condizionamento, hanno un fabbisogno energetico dipendente dalla città e dalla stagione. La richiesta energetica del sistema CableSmart appare particolarmente adatta alla sinergia con un sistema da produzione energetica da fonte fotovoltaica laddove il carico utilizzato per il condizionamento è molto alto (nell'articolo è stata dettagliatamente analizzata la città di Dubai City), e in cui il massimo temporale del carico, sia mensile sia infra-giornaliero, è sincronizzato con quello della produzione.

L'analisi di simulazione energetica e il modello analitico adottato hanno dimostrato come sia possibile, tramite l'installazione di un impianto fotovoltaico che sfrutti unicamente le superfici dell'infrastruttura, dei veicoli e delle stazioni del sistema di trasporto a fune analizzato (CableSmart), ridurre l'impatto energetico e l'energia prelevata dalla rete elettrica fino a più del 50% in una città come Torino e fino a più del 70% in città con condizioni metereologiche particolarmente favorevoli in termini di produzione fotovoltaica come Dubai City. Ciò porta il sistema, che già a livello di carico appare più efficiente del 30%-70% rispetto ai sistemi tradizionali di mobilità urbana, come ricordato in letteratura dal già citato articolo [1], ad essere energeticamente meno impattante sulla rete elettrica, con un conseguente ulteriore risparmio in termini di emissioni di sostanze inquinanti e di CO_2.

supplied by a steel wire rope, for which a system on motorised wheels was later chosen. One such case is that of the Turin-Sassi-Superga installation, which was inaugurated in 1884 as a cable railway (funicular) and which was then renewed in 1935 as a rack railway (rack-and-pinion) without a hauling rope.

The analysis of the energy load has also pointed out that a variable part of the charge, between 30% and 50%, is a prerogative of the cabin comfort systems. These systems, heating and air-conditioning in particular, have energy requirements that depend on the city and season. The energy requirement of the CableSmart system appears to be particularly suitable for synergetic use with a solar energy production system, where the energy utilised for air-conditioning is much higher (Dubai City has been analysed in detail in this paper), and where the temporal maximum of the load, whether monthly or interim-daily, is synchronised with that of the production.

The energy simulation analysis and the adopted analytical model have shown how it is possible, through the installation of a solar panel system that only takes advantage of the surfaces of the infrastructure, of the vehicles and of the analysed cable transport system stations (CableSmart), to reduce the energy impact and the energy withdrawn from the electricity grid by more than 50% in a city like Turin, and by more than 70% in a city with weather conditions that are particularly favourable, in solar panel production terms, such as Dubai City. This leads the system, which already seems 30%-70% more efficient than traditional urban mobility systems at a load level, as pointed out in the already mentioned paper [1], to have less of an energy impact on the electricity grid, with a consequent further saving in terms of emissions of polluting substances and CO_2.

BIBLIOGRAFIA - *REFERENCES*

[1] Affatato M., Blengini S., Dalla Chiara B., Vair E., (Nov. 2015*), "Automated People Mover 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", Ingegneria Ferroviaria, vol. LXX, N. 11, pp. 901-923.

[2] Crotti A., Alberto D., Dalla Chiara B., Vallana M., (2006), "Impianti a fune. Elementi costruttivi, progettazione ed esercizio", Ed. Mario Gros.

[3] Hofmann G., (2015*), "Ropeway technology"*, Doppelmayr/Garaventa Gruppe.

[4] Johnson K. L., (1985), *"Contact mechanics",* Cambridge University Press.

[5] Navone M., Dalla Chiara B., Blengini S., Vair E., (Settembre 2017), *"Cable driven Automated People Movers for urban applications: modelling the roller for investigating energy consumption* / Impianti automatici con trazione a fune per trasporti urbani: modellazione dei rulli per la verifica del consumo energetico", Ingegneria Ferroviaria, vol. LXX, ISSN: 0020-0956. Numero 9, pp 631-663.

[6] UNI EN 12930: 2007 "Requisiti di sicurezza per gli impianti a fune progettati per il trasporto di persone - Calcolo"; in Italia, D.D. n. 337 – 16.11.2012, "Disposizioni e prescrizioni tecniche per le infrastrutture degli impianti a fune adibiti al trasporto di persone".

[7] UNI, (2007), *"Safety requirements for cableway installation designed to carry person"*, UNI EN 12929-1, UNI EN 12930, UNI EN 13223.

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

[9] Dalla Chiara B., Fassio C., Masanotti A., Zanotti G., (Maggio 2005), "Una metodologia per la progettazione di sistemi automatici per il trasporto persone (APM) di derivazione funiviaria", Ingegneria Ferroviaria, Vol. LX, n. 5, pp. 389-405.

[10] Dalla Chiara B., Pelissero F., (Aprile 2007) "Ferrovie a cremagliera o a dentiera", Ingegneria Ferroviaria, Vol. LXII, n. 4, pp. 325-334.

[11] Dalla Chiara B., Degioanni P, Fumarola F.P., (Gennaio 2008) "Riepilogo di sistemi di trasporto innovativi", Ingegneria Ferroviaria, Vol. LXIII, n. 1, p. 49.

[12] Dalla Chiara B., *(July-August 2010)*, "Considerazioni sulla domanda ed impiego di energia nei sistemi di trasporto / *Considerations on the demand and use of energy in the transport systems*", Ingegneria Ferroviaria, vol. LXV, ISSN: 0020-0956. Numero 7-8, pagg. 673-685, July-August 2010.

[13] Gerboni R., Grosso D., Carpignano A., Dalla Chiara B. (2017), *"Linking energy and transport models to support policy making"*, Energy Policy, Volume 111, December 2017, Pages 336–345

[14] UNI, (2018), "Linee guida per la progettazione dei sistemi di trasporto persone ad automazione integrale (APM) con trazione a fune".