



Consumi ed impatti degli impianti a fune urbani: comparazione modale e tendenze moderne

Consumption and impacts of cable-driven People Movers: modal comparison and modern trends

Stefano BAZZOLO^(*)

(<https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.05.2024.ART.2>)

Sommario - Nonostante l'efficacia dei sistemi di trasporto a fune sia riconosciuta per il loro basso impatto energetico e ambientale, con consumi ed emissioni generalmente inferiori rispetto ad altri mezzi di trasporto, è assente nella letteratura scientifica un'analisi approfondita delle loro prestazioni energetiche in contesti urbani. Il presente studio mira a colmare tale lacuna, esaminando attraverso simulazioni l'impatto energetico e ambientale di un impianto a fune aereo in vari scenari urbani, in funzione di fattori come la pendenza del percorso e la capacità oraria di trasporto. Viene inoltre discussa l'applicabilità della tecnologia funiviaria in ambiti urbani e metropolitani, evidenziandone i vantaggi e le sfide. L'articolo presenta anche un caso di studio su un nuovo tipo di impianto a fune ibrido, il sistema CableSmart, implementato per la prima volta in Svizzera nel dicembre 2023, che integra tecnologie funiviaria e automotrice per superare i limiti tradizionali dei sistemi a fune.

1. Introduzione

L'attuale paradigma di mobilità urbana, ancora fortemente sbilanciato verso l'auto privata come principale mezzo di trasporto, mostra chiaramente la sua insostenibilità dai punti di vista sociale, economico, energetico e – di conseguenza – ambientale. Ciononostante, l'auto privata rimane il mezzo principale con cui i passeggeri soddisfano le proprie esigenze di trasporto nelle aree urbane, per gli indubbi vantaggi che presenta, quali la personalizzazione del viaggio sia in termini di percorso sia di orari, gli elevati standard di comfort e il basso costo percepito.

È quindi necessario, per rimuovere i limiti dell'evoluzione delle città e della qualità della vita dei cittadini, definire un'offerta di trasporto in grado di mantenere i punti di forza tipici dell'auto privata, rimuovendone i punti di insostenibilità.

In questo contesto, i sistemi di trasporto a fune pos-

Summary - Although the effectiveness of aerial ropeway systems is recognized for their low energy and low environmental impact, with generally lower consumption and emissions than other means of transport, an in-depth analysis of their energy performance in urban contexts is lacking in the scientific literature. This study aims to fill this gap by examining through simulations the energy and environmental impact of an aerial ropeway in various urban scenarios, depending on factors such as the gradient of the route and the hourly transport capacity.

The applicability of ropeway technology in urban and metropolitan areas will be also discussed, highlighting its advantages and challenges. The article also presents a case study about a new type of hybrid cable car plant, the CableSmart system, first implemented in Switzerland in December 2023, which integrates ropeway and self-propelled technologies to overcome the traditional limitations of ropeway systems.

1. Introduction

The current urban mobility paradigm, still strongly skewed towards the private car as the main means of transport, clearly shows its unsustainability from social, economic, energy and - consequently - environmental points of view. Nevertheless, the private car remains the main transport system which passengers fulfil their transport needs in urban areas, due to its undoubted advantages such as the personalization of the trip in terms of both route and timetable, high standards of comfort and low perceived cost.

It is therefore necessary, in order to remove the limits to the evolution of the cities and the quality of the citizens' life, to define a transport offer capable of maintaining the typical strengths of the private car while removing its points of unsustainability.

In this context, rope-driven transport systems can play

^(*) Politecnico di Torino, dip. DIATI- Trasporti. Dimensione Ingegnerie.

^(*) Politecnico di Torino, dip. DIATI- Trasporti. Dimensione Ingegnerie.

sono giocare un ruolo importante, per via di loro caratteristiche quali il basso impatto energetico e la capacità di superare facilmente ingenti dislivelli e ostacoli naturali ed antropici con basso impatto al suolo, che rendono tale tecnologia particolarmente adatta in ambiti urbani.

Proprio con riferimento all'impatto energetico, e quindi ambientale, relativo alla tecnologia funiviaria, il presente articolo fornisce una dissertazione sui consumi specifici [kWh/(pass-km)] e sulle emissioni specifiche [gCO₂/(pass-km)] relativi alla tecnologia funiviaria, quantificandoli e definendo la relazione tra questi e differenti variabili geometriche (pendenza) e di utilizzo (capacità oraria, fattori di riempimento) della linea.

Infine, citando, parallelamente ai punti di forza di installazioni funiviarie, anche le debolezze che ne limitano l'adozione in ambiti metropolitani, quali la complessità di definire tratte non rettilinee e la difficoltà di integrazione delle stazioni nel tessuto urbano, viene richiamato e descritto il sistema di trasporto ibrido denominato CableSmart, già oggetto dell'analisi pubblicata in [1]. A differenza di quelli dei tradizionali impianti funiviari, i veicoli del sistema CableSmart ospitano a bordo batterie e super-condensatori, in grado di fornire energia per il comfort delle cabine e per il loro moto: i veicoli sono infatti automotori quando sono disammorsati dalla fune traente, quindi durante il transito in stazione e durante la copertura di segmenti su rotaia, in cui il veicolo si muove autonomamente grazie a ruote automotrici installate nei pressi della morsa del veicolo stesso.

2. Stato dell'arte

L'elevata efficienza energetica e il basso impatto energetico ed ambientale della tecnologia funiviaria sono noti e riferiti dall'esistente letteratura.

Seppure con risultati specifici e puntuali, infatti, [2] riporta che la tecnologia funiviaria consente un risparmio, in termini di impatto energetico unitario [kWh/(pass-km)], e conseguentemente di emissioni specifiche [gCO₂/(pass-km)] di circa il 40% rispetto a treni regionali e metropolitani, di circa il 50% rispetto a navette e tram, e di quasi il 70% comparato a bus e ad automobili private. Tali risultati si dimostrano essere coerenti ed intonati con quelli evidenziati da [3].

Il relativamente basso impatto energetico della tecnologia funiviaria è dovuto al fatto che il moto viene trasferito ai veicoli tramite un corpo, la fune, dalla limitata inerzia. Inoltre, la presenza di unico motore localizzato in una delle stazioni consente l'adozione di propulsori più grandi, e quindi mediamente più efficienti, rispetto a quelli associati ad una motorizzazione distribuita. Infine, in caso di linee inclinate, la tecnologia funiviaria permette di recuperare l'energia potenziale ceduta da veicoli e passeggeri nel ramo di discesa, che viene reimpressa nel sistema e utilizzata per aumentare quota ed energia potenziale di veicoli e passeggeri nel ramo di salita.

an important role, due to their characteristics such as the low energy impact and the ability to easily overcome large height differences and natural and anthropic obstacles with low ground impact, which make this technology particularly suitable in urban areas.

Precisely with reference to the energy, and thus environmental, impact of ropeway technology, this article provides a dissertation about the specific consumption [kWh/(pass-km)] and specific emissions [gCO₂/(pass-km)] related to ropeway technology, quantifying them and defining the relationship between them and different geometric (slope) and utilization (hourly capacity, filling factors) variables of the line.

Finally, mentioning, alongside the strengths of cableway installations, also the weaknesses that are limiting their adoption in metropolitan areas, such as the complexity of defining non-rectilinear routes and the difficulty of integrating the stations into the urban fabric, the hybrid transport system known as CableSmart, already the subject of the analysis published in [1], is described. Unlike those of traditional cableway plants, the vehicles of the CableSmart system house on-board batteries and super-capacitors, able of supplying energy for the comfort of the cabins and for their motion: in fact, the vehicles are self-propelled when they are not gripped to the hauling rope, id est during transit through the station and during the covering of rail segments, in which the vehicle moves autonomously thanks to self-propelled wheels installed near the grip of the vehicle itself.

2. State of the art

The high energy efficiency and low energy and environmental impact of ropeway technology are known and reported in existing literature. Although with specific and circumscribed results, in fact, [2] reports that ropeway technology allows savings, in terms of unit energy impact [kWh/(pass-km)], and consequently specific emissions [gCO₂/(pass-km)] of around 40% compared to stopping and urban trains, around 50% compared to shuttles and trams, and almost 70% compared to buses and private cars. These results prove to be consistent and in tune with those highlighted by [3].

The relatively low energy impact of ropeway technology is due to the fact that motion is transferred to the vehicles through an object, the rope, with limited inertia. Furthermore, the presence of a single engine localized in one of the stations allows the adoption of larger, and therefore on average more efficient, propulsion units than those associated with distributed motorization. Finally, in the case of inclined lines, cableway technology allows the potential energy given up by vehicles and passengers in the descent branch to be recovered, feeding it back into the system and using it to increase the altitude and potential energy of vehicles and passengers in the ascent branch.

On the other hand, the greatest source of energy loss associated with ropeway technology is the friction between the

Dall'altra parte, la maggior fonte di perdita energetica associata alla tecnologia funiviaria è l'attrito tra la fune metallica e i rulli, che sono ricoperti da una banda di materiale gommoso. Unitariamente, tali attriti sono di entità modesta: la normativa italiana, all'articolo 15.2.2.3 del Decreto Dirigenziale del Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti DD 18 giugno 2021 impone, in fase di progettazione, di considerare per il calcolo degli attriti con rulli con rivestimenti esterni in gomma il coefficiente teorico pari al 3,0%. La coerenza di tale valore con i risultati effettivi di sistemi funiviari funzionanti sono stati analizzati da [4], in cui gli autori hanno dimostrato, sia mediante simulazioni teoriche sia tramite misurazioni delle performance energetiche relative a telecabine in esercizio, che il prima citato valore del 3,0% del carico verticale appare essere sovrastimato, e propongono un valore tra l'1,0% e l'1,5% per riuscire a fotografare il comportamento reale. In ogni caso, seppure il valore unitario di attrito tra la fune e il singolo rullo appaia relativamente esiguo, poiché in una installazione funiviaria possono essere presenti alcune centinaia di rulli, il contributo complessivo è tutt'altro che trascurabile: a titolo di esempio, si cita che in una tradizionale seggiovia il consumo energetico associato ai rulli può essere nell'ordine dell' 85%.

In contesti urbani, la tecnologia funiviaria appare ancora applicata in maniera modesta, in quanto sono ancora rare le installazioni funiviarie urbane e metropolitane, per lo più relegate in contesti specifici e particolari. Al fine di superare i limiti che impediscono a questa tecnologia una capillare applicazione anche in contesti urbani, sono stati negli ultimi anni progettati e sviluppati sistemi di trasporto ibridi, in grado di fare sinergia tra i punti di forza tipici della tecnologia funiviaria e quelli tipici di sistemi su ruota. È il caso di CableSmart, descritto in dettaglio in [1] e oggetto di ulteriori studi riportati nel presente articolo.

In generale, l'utilizzo di impianti a derivazione funiviaria in ambito urbano è stato dettagliatamente esplorato in [5], che contiene una dissertazione di impianti funiviari dal punto di vista trasportistico, strutturale, ed energetico; e in [6].

3. Attuale paradigma della mobilità urbana

Nel 2023, la popolazione globale ha superato gli 8 miliardi di persone [7]. La quota parte di persone che vivono in aree urbane è, a livello mondiale, più del 60%: la popolazione urbana ha infatti superato quella rurale nei primi anni di questo secolo e continua a crescere esponenzialmente.

Nel 2016, erano censite a livello mondiale 1.063 città che ospitavano più di 4 miliardi di persone; è previsto che nel 2030 le aree urbane con più di 500.000 abitanti saranno 1.393 (+31%), ed ospiteranno più di 5 miliardi di persone (+25%) [8], come viene esplicitato dalla seguente Tab. 1 e Fig. 1.

Dal punto di vista trasportistico, le città sono anco-

hauling rope and the rollers, which are covered by a band of rubbery material. Unitedly, such friction is modest: the Italian regulations, in Article 15.2.3 of the Ministry of Infrastructure and Transport's Executive Decree DD 18 June 2021, require that, during the design phase, a theoretical coefficient of 3.0% should be considered when calculating friction with rollers with rubber outer coverings. The consistency of this value with the actual results of functioning ropeway systems has been analyzed by [4], in which the authors demonstrated, by both means of theoretical simulations and means of measurements of the energy performance of ropeways in operation, that the previously mentioned value of 3.0% of the vertical load appears to be overestimated, and they proposed a value between 1.0% and 1.5% in order to be able to capture the real behavior. In any case, even if the unit value of friction between the rope and the individual roller appears relatively small, since in a ropeway installation there may be several hundred rollers, the overall contribution is far from negligible: by way of example, it is mentioned that in a traditional chairlift the energy consumption associated with the rollers may be in the order of 85%.

In urban contexts, ropeway technology still appears to be applied modestly, as metropolitan ropeway installations are still rare and mostly relegated to specific and particular contexts. In order to overcome the limitations that prevent this technology from being widely applied also in urban contexts, hybrid transport systems -capable of combining the strengths typical of ropeway technology with those classic of wheeled systems- have been designed and developed in recent years. This is the case with CableSmart, described in detail in [1] and the subject of further studies in this article.

In general, the use of ropeway-derived systems in urban areas has been explored in detail in [5], which contains a dissertation on ropeway systems from a transport, structural, and energy perspective; and in [6].

3. Current urban mobility paradigm

In 2023, the global population exceeded 8 billion people [7]. The share of people living in urban areas is, globally, more than 60%: the urban population surpassed the rural population in the first years of this century and continues to grow exponentially.

In 2016, there were 1,063 cities worldwide, home to more than 4 billion people; by 2030, urban areas with more than 500,000 inhabitants are expected to number 1,393 (+31%), and to be home to more than 5 billion people (+25%) [8], as shown in the following Tab. 1 and Fig. 1.

From a transport point of view, cities are still dominated by private car use. In fact, even at European level, more than half of the transport demand in urban areas is met by the private car [9].

The graph reported in the Fig. 1 shows the share of transport needs within the municipality and within the metropolitan area that is met by private car use in several European cities.

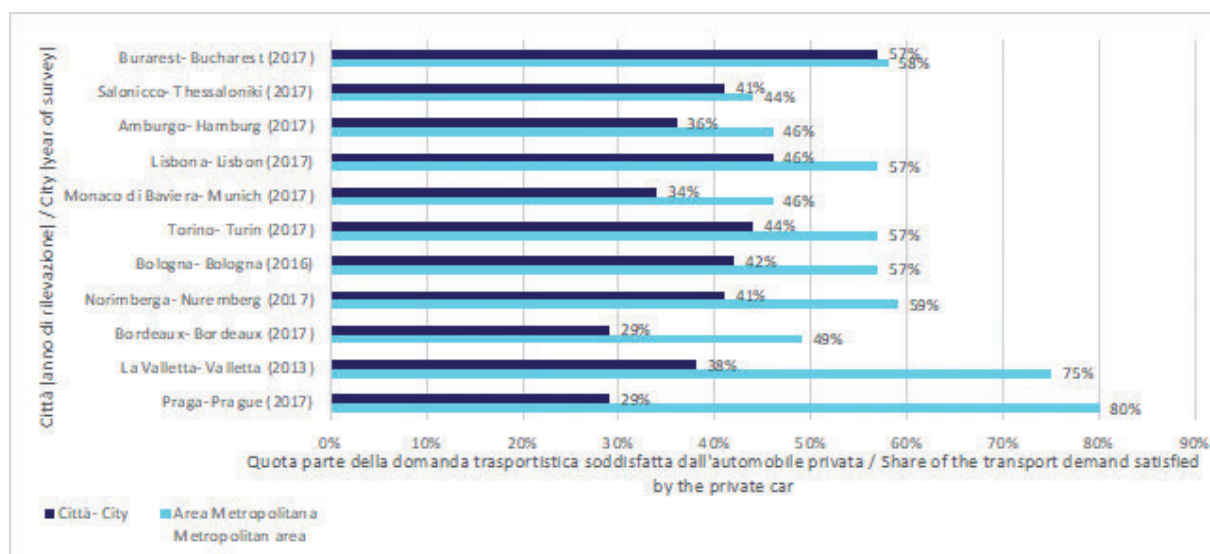


Figura 1 - Quota di domanda di trasporto che viene soddisfatta dall'automobile privata in alcune città europee, considerando il centro città e l'area metropolitana, elaborazione sulla base di [9].

Figure 1 - Share of transport demand that is satisfied by the private car in some European cities, considering city center and metropolitan area, elaboration based on [9].

Tabella 1 – Table 1

Numero, popolazione e quota di popolazione che vive nelle città nel 2016 e nel 2030 (proiezione), elaborazione sulla base di [8]

Number, population and share of population living in cities in 2016 and 2030 (projection), elaboration based on [8]

| | 2016 | | | 2030 | | |
|--|-----------------------------------|---|--|-----------------------------------|---|--|
| | Insedimenti Settlements [#] | Popolazione Population [milioni] [millions] | Quota parte della popolazione mondiale Share of the world population [%] | Insedimenti Settlements [#] | Popolazione Population [milioni] [millions] | Quota parte della popolazione mondiale Share of the world population [%] |
| Area urbane/Urban areas | - | 4.034 | 54,5% | - | 5.058 | 60,1% |
| > 10 milioni / > 10 millions | 31 | 500 | 6,8% | 41 | 730 | 8,7% |
| da 5 a 10 milioni / 5 to 10 millions | 45 | 308 | 4,2% | 63 | 434 | 5,2% |
| da 1 a 5 milioni / 1 to 5 millions | 436 | 861 | 11,6% | 558 | 1.128 | 13,4% |
| da 500.000 a 1 milione / 500k to 1 million | 551 | 380 | 5,1% | 731 | 509 | 6,0% |
| < 500.000 / < 500.000 | - | 1.965 | 26,8% | - | 2.257 | 26,8% |
| Area rurali/Rural areas | - | 3.371 | 45,5% | - | 3.367 | 40,0% |

ra dominate dall'utilizzo dell'automobile privata. Infatti, anche a livello europeo, più della metà della domanda di trasporto in ambito urbano è soddisfatta dall'auto privata [9].

This paradigm, still strongly rewarding the widespread use of the private car, no longer appears sustainable from several points of view, and it is increasingly showing the criticalities it causes.

Il grafico riportato nella Fig. 1 mostra la quota parte delle esigenze trasportistiche all'interno della municipalità e all'interno dell'area metropolitana che viene soddisfatta tramite l'utilizzo dell'automobile privata in diverse città europee.

Tale paradigma, ancora fortemente premiante dell'utilizzo capillare dell'automobile privata, non appare più sostenibile da diversi punti di vista, e sta sempre di più mostrando con evidenza le criticità di cui è causa.

i) Traffico e congestione

A livello europeo, traffico e congestioni stradali in ambito urbano sono responsabili della perdita di circa 4.500 minuti per autista per anno, corrispondenti a più di 9 giorni di lavoro. In termini monetari, ciò corrisponde ad un detrimento annuale di circa 20 miliardi di euro [10].

ii) Emissioni di inquinanti

Il motore a combustione interna, a causa di inefficienze nelle reazioni chimiche di combustione, produce e rilascia in atmosfera sostanze inquinanti, come ossidi di azoto NO_x e particolato.

Nonostante gli effetti dell'inquinamento, in termini di salute dei cittadini e specificatamente di decessi causati dall'esposizione a polveri sottili $\text{PM}_{2.5}$, abbiano visto una drastica riduzione in anni recenti (-45% negli ultimi 15 anni), nei Paesi europei nel 2020 sono decedute prematuramente almeno 238.000 persone a causa dell'inquinamento da $\text{PM}_{2.5}$ al di sopra delle linee guida redatte dall'Organizzazione Mondiale della Sanità - World Health Organization (WHO) di $5\mu\text{g}/\text{m}^3$, e 49.000 persone sono morte prematuramente a causa dell'esposizione al biossido di azoto NO_2 [11]. Inoltre, l'inquinamento atmosferico ha un importante impatto anche in termini di diminuzione della qualità di vita dei cittadini: viene stimato che circa 175.000 europei vivano con disabilità croniche a causa di malattie polmonari ostruttive causate dall'esposizione a $\text{PM}_{2.5}$.

iii) Emissioni di anidride carbonica CO_2

A livello mondiale, l'attività antropica è stata causa dell'emissione nell'atmosfera terrestre di più di 35 Gt di CO_2 all'anno, e questo valore è in drammatica crescita negli ultimi anni: è stata infatti immessa più anidride carbonica CO_2 in atmosfera negli ultimi 30 anni che nell'intera storia umana precedente [12].

L'impatto ambientale, in termini di emissioni di CO_2 , del settore automobilistico è tutt'altro che trascurabile: le automobili private sono infatti responsabili di circa il 37,5% delle emissioni adducibili al settore trasporti, le quali corrispondono ad una quota parte di circa 20,8% del totale di emissioni di anidride carbonica da fonte antropica [13]. A livello di dettaglio, una tipica automobile emette circa 4,6 tonnellate di CO_2 all'anno [14].

Nonostante il potenziale di riscaldamento globale (Global Warming Potential, GWP) del metano sia circa 25 volte quello dell'anidride carbonica, l'effetto di quest'ultimo gas

i) Traffic and congestion

On a European level, traffic and congestion in urban areas are responsible for the loss of around 4,500 minutes per driver per year, corresponding to more than nine working days. In monetary terms, this corresponds to an annual loss of around 20 billion euros [10].

ii) Emissions of pollutants

The internal combustion engine, due to inefficiencies in chemical combustion reactions, produces and releases pollutants into the atmosphere, such as nitrogen oxides NO_x and particulate matter.

Although the effects of pollution, in terms of the health of citizens and specifically of deaths caused by exposure to fine particulate matter $\text{PM}_{2.5}$, have seen a drastic reduction in recent years (-45% in the last 15 years), in 2020 in Europe at least 238,000 people prematurely died due to levels of $\text{PM}_{2.5}$ pollution above the World Health Organization (WHO) guidelines of $5\mu\text{g}/\text{m}^3$, and 49,000 people prematurely died due to exposure to nitrogen dioxide NO_2 [11]. In addition, air pollution also has an important impact in terms of decreasing citizens' quality of life: it is estimated that approximately 175,000 Europeans live with chronic disabilities due to obstructive lung disease caused by exposure to $\text{PM}_{2.5}$.

iii) Carbon dioxide (CO_2) emissions

Globally, anthropogenic activity has been responsible for the emission of more than 35 Gt of CO_2 into the earth's atmosphere per year, and this figure has been rising dramatically in recent years: more carbon dioxide CO_2 has been emitted into the atmosphere in the last 30 years than in the whole of previous human history. [12].

The environmental impact, in terms of CO_2 emissions, of the automotive sector is far from negligible: private cars are responsible for about 37.5 per cent of the emissions attributable to the transport sector, which corresponds to about 20.8 per cent of the total anthropogenic carbon dioxide emissions [13]. In detail, a typical car emits about 4.6 tons of CO_2 per year [14].

Although the Global Warming Potential (GWP) of methane is about 25 times higher than the carbon dioxide one, the effect of the CO_2 greenhouse gas in increasing the earth's temperature is far from negligible; in fact, carbon dioxide accounts for the majority of greenhouse gases released into the atmosphere (about 80% in Europe, as described in [15]). For these reasons, the current transport paradigm, which is strongly skewed towards the use of private cars, is not compatible with the numerous international commitments that have been signed by almost the entire world community and which have highlighted the need to contain the increase in the earth's surface temperature compared to the pre-industrial era below 2°C .

iv) Road Safety

In 2022, 165,889 road accidents occurred in Italy, injuring 223,475 and killing 3,159 people [16], corresponding to almost 9 fatalities per day.

serra nell'aumento della temperatura terrestre è tutt'altro che trascurabile; infatti, l'anidride carbonica rappresenta la maggior parte dei gas serra rilasciati nell'atmosfera (circa l'80% in Europa, come descritto in [15]). Per tali considerazioni, l'attuale paradigma trasportistico fortemente sbilanciato verso l'utilizzo dell'auto privata non è compatibile con i numerosi impegni internazionali che sono stati firmati dalla quasi interezza della comunità mondiale e che hanno evidenziato l'esigenza di contenere l'aumento di temperatura della superficie terrestre rispetto all'era preindustriale al di sotto dei 2°C.

iv) Sicurezza stradale

Nel 2022, in Italia, si sono verificati 165.889 incidenti stradali, che hanno causato il ferimento di 223.475 e la morte di 3.159 persone [16], corrispondenti a quasi 9 persone decedute al giorno.

Nei Paesi europei, 46 persone ogni 1.000.000 abitanti muoiono ogni anno a causa di incidenti stradali (il valore italiano è leggermente più elevato e si colloca a 53 morti ogni milione di abitanti) [17]: in altre parole, ogni europeo ha, ogni anno, una probabilità dello 0,046‰ di morire a causa di un incidente stradale.

v) Limitazione all'evoluzione urbana

Il paradigma trasportistico urbano è uno dei fattori che influenzano e guidano lo sviluppo delle città.

Negli anni '30 del XIX secolo, Londra fu la prima città europea a raggiungere il milione di abitanti dopo la Roma Traiana (II secolo) e, quasi simultaneamente, fu vittima di numerose epidemie di colera, causate dalle precarie condizioni igieniche a loro volta dovute al sovraffollamento e al sistema trasportistico. Al tempo, infatti, i mezzi di trasporto più comune erano i cavalli e le carrozze trainate da cavalli, e l'offerta di trasporto urbano per oltre un milione di abitanti era causa di degrado delle condizioni igieniche per effetto delle deiezioni delle centinaia di migliaia di equini necessari.

Questo, che fu un reale collo di bottiglia allo sviluppo delle città nel XIX secolo, tanto che era opinione comune da parte degli urbanisti che il milione di abitanti fosse il naturale limite imposto alla crescita degli agglomerati urbani, si risolse quando l'avvento e la diffusione del motore a combustione interna e della motorizzazione rese possibile da parte di autobus e automobili la sostituzione dei sistemi movimentati tramite trazione animale.

Ai giorni nostri, in modo equivalente a quanto accaduto durante il XIX secolo, il mondo sta affrontando un collo di bottiglia nello sviluppo delle città e nella qualità di vita dei cittadini, causato dagli effetti del paradigma di trasporto urbano, in questo caso dominato dall'automobile privata. Infatti, non è possibile pensare ad un dirompente concetto di città senza modificare il paradigma trasportistico, ancorato a tecnologie del XIX secolo. Ad esempio, il partito comunista cinese, massimo organo della Repubblica Popolare Cinese, nel 2016 ha decretato la pianificazione di nuove città intelligenti e senza automobili private, per

In European Countries, 46 people per 1,000,000 inhabitants die each year as a result of road crashes (the Italian figure is slightly higher: 53 deaths per million inhabitants) [17]: in other words, every European has a 0.046‰ chance of dying in a road crash every year.

v) Limitation of urban evolution

The urban transport paradigm is one of the factors influencing and guiding the development of cities.

In the 1830s, London was the first European city to reach one million inhabitants after Trajan's Rome (2nd century) and, almost simultaneously, it was the victim of numerous cholera epidemics, caused by poor hygienic conditions due to the overcrowding and to the transport system. At the time, in fact, the most common means of transport were horses and horse-drawn carriages, and the provision of urban transport for over a million inhabitants was the cause of deteriorating hygienic conditions due to the droppings of the hundreds of thousands of horses required.

This, which was a real bottleneck to the development of cities in the 19th century, so much so that it was commonly believed by town planners that the million inhabitants was the natural limit imposed on the growth of urban agglomerations, was resolved when the advent and the spread of the internal combustion engine and motorization made it possible for buses and cars to replace animal-drawn systems.

Nowadays, in a manner equivalent to what happened during the 19th century, the world is facing a bottleneck in the development of cities and the quality of life of citizens, caused by the effects of the urban transport paradigm, in this case dominated by the private car. Indeed, it is not possible to think of a disruptive city concept without changing the transport paradigm, which is anchored in 19th century technologies. For instance, the Chinese Communist Party, the highest organ of the People's Republic of China, in 2016 decreed the planning of new smart cities without private cars, to manage the placement of approximately 300,000,000 people (equal to almost the entire population of the United States of America) in urban areas by 2030 [18].

vi) Land consumption

In many cities, land consumption and its unavailability are a limiting and binding factor for the construction of new roads and the expansion of existing ones. This causes inertia in the ability of transport supply, as far as roads are concerned, to follow and adapt to demand.

vii) Low utilization rate

In Italy, on average, each car owner uses their car 85 minutes a day, for 286 days a year [19]. It follows that each Italian car is used on average only 9% of the time.

Despite the just mentioned weaknesses, the private car remains the preferred choice for the majority of citizens to satisfy their mobility needs, due to some undoubted advantages that this technology presents:

- *It is based on mature, reliable and efficient technology.*
- *It has a low perceived cost of use, as the passenger does*

gestire la collocazione in aree urbane di circa 300.000.000 di persone (pari a quasi l'intera popolazione degli Stati Uniti d' America) entro il 2030 [18].

vi) Consumo di suolo

In molte città, il consumo di suolo e la sua indisponibilità sono un elemento limitante e vincolante per la costruzione di nuove strade e per l'espansione delle esistenti. Ciò è causa di inerzia nella capacità dell'offerta trasportistica, per quanto riguarda le strade, di seguire e di adattarsi alla domanda.

vii) Basso tasso di utilizzo

In Italia, in media, ogni proprietario di automobili utilizza la propria automobile 85 minuti al giorno, per 286 giorni all'anno [19]. Ne consegue che ogni automobile italiana è utilizzata in media per appena il 9% del tempo.

Nonostante i punti di debolezza appena menzionati, l'automobile privata rimane la scelta preferita da parte della maggioranza dei cittadini per soddisfare le proprie esigenze di mobilità, a causa di alcuni indubbi vantaggi che questa tecnologia presenta:

- Si basa su una tecnologia matura, affidabile ed efficiente.
- Ha un basso costo di utilizzo percepito, in quanto il passeggero non deve pagare un biglietto per il viaggio, e poiché i costi nascosti ed ancillari, come l'ammortamento del veicolo, l'assicurazione, la tassa automobilistica, ed eventuali spese di danneggiamento, sono normalmente sottostimati dai guidatori.
- Ha elevati standard in termini di comfort, grazie a sistemi ancillari come aria condizionata e sistemi di *infotainment*.
- Permette una completa customizzazione del viaggio, in termini sia di percorso sia di tempistiche.

Al fine di mantenere questi punti di forza e di eliminare allo stesso tempo i vincoli imposti dall'automobile privata, nella seconda metà dello scorso secolo sono stati sviluppati i sistemi *Public Rapid Transit* (PRT), sistemi di trasporto pubblico che ambiscono a raggiungere alti livelli di customizzazione del viaggio tramite veicoli con relativamente bassa capienza (6-10 persone) che si susseguono con una elevata frequenza (un veicolo ogni manciata di secondi).

L'adozione di questi sistemi appare però molto rara e relegata ad alcuni specifici contesti, come gli aeroporti, che hanno necessità trasportistiche molto differenti rispetto a quelle tipiche della mobilità urbana: esistono in tutto il mondo solo qualche unità di PRT, che coprono complessivamente una distanza nell'ordine dei 20 km e sono localizzati come riportato dalla mappa nella seguente Fig. 2.

La motivazione di tale scarsa adozione di sistemi PRT è duplice: da una parte essi sono sviluppati su una tecnologia datata, risalente allo scorso secolo, che non tiene in considerazione le recenti innovazioni in ambito informatico e mecatronico, e dall'altra si basano sulla normativa ferroviaria, molto restrittiva e che ha impedito ai sistemi

not have to pay a ticket for the journey, and because hidden and ancillary costs, such as vehicle depreciation, insurance, car tax, and damage charges, are normally underestimated by drivers.

- *It has high standards in terms of comfort, thanks to ancillary systems such as air conditioning and infotainment systems.*
- *It allows complete customization of the trip, in terms of both route and timing.*

In order to maintain these strengths and at the same time to remove the constraints imposed by the private car, Public Rapid Transits (PRTs) systems were developed in the second half of the last century. These are public transport systems that aim to achieve high levels of customization of travel through vehicles with relatively low capacity (6-10 persons) that follow each other with a high frequency (one vehicle every few seconds).

However, the adoption of these systems appears to be very rare and relegated to a few specific contexts, such as airports, which have very different transport needs than those typical of urban mobility: there are only a few PRT units in the whole world, covering a total distance in the order of 20 km and located as shown on the map in the following Fig. 2.

The reason for this low uptake of PRT systems is twofold: on the one hand, they are developed on an outdated technology, dating back to the last century, which does not take into account recent innovations in computing science and mechatronics; and on the other hand, they are based on railway regulations, which are very restrictive and have prevented PRT systems from being economically competitive with traditional means of transport.

Despite the negative response that these systems have received from the market, the need to define transport systems that are both 'private', in the sense that they allow a high degree of customization of the journey, and 'public' remains central.

In this context, people movers with rope traction (C-APMs), public transport systems in which motion is transmitted to the vehicles by means of a pulling rope, have been developed in recent years and are discussed in [20] with regard to the guidelines for their design. In particular, despite the fact that such C-APM systems require a fixed seat and the construction of a ropeway-type infrastructure, a high degree of customization of the journey can be achieved in terms of both route (through the construction of a dense infrastructure network) and timing (as these systems are characterized by low-capacity vehicles following each other at high frequency).

4. Current condition of the ropeway market

Already in 2016, the number of ropeway installations worldwide exceeded 29,000, and more than 60 per cent of them were located in the Alps and Western Europe (around 17,500) [21].

The world ropeway market is still heavily skewed towards the tourism-mountain sector: around 60% of new

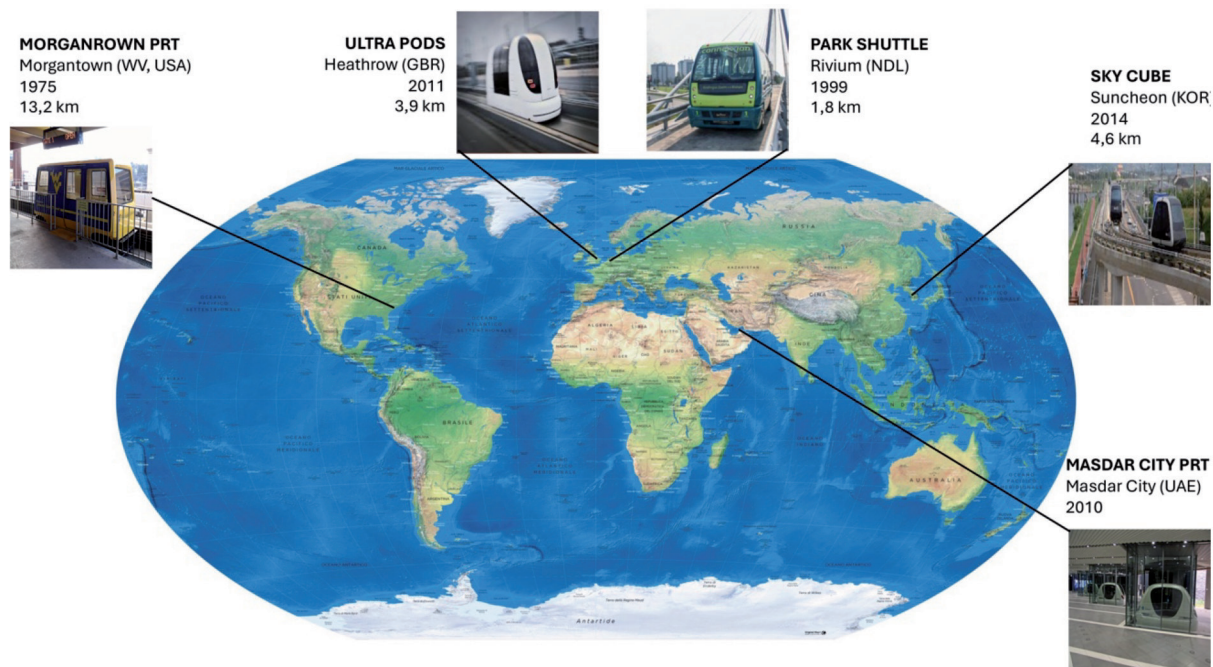


Figura 2 - Mappa delle installazioni di PRTs nel mondo.

Figure 2 - Map of PRTs installations worldwide.

PRT di essere economicamente competitivi con i tradizionali mezzi di trasporto.

Nonostante la risposta negativa che questi sistemi hanno ricevuto dal mercato, rimane centrale l'esigenza di definire sistemi di trasporto che siano allo stesso tempo "privati", nel senso che consentono un'elevata customizzazione del viaggio, e "pubblici".

In questo contesto, negli ultimi anni sono stati sviluppati i *people movers* a fune (C-APM), sistemi di trasporto pubblici in cui il moto viene trasmesso ai veicoli tramite l'ammorramento ad una fune traente, che sono trattati in [20] per quanto riguarda le linee guida per la loro progettazione. In particolare, nonostante tali sistemi C-APM necessitino di una sede fissa e della costruzione di un'infrastruttura di tipo funiviario, è possibile raggiungere un'elevata customizzazione del viaggio in termini sia di percorso (attraverso la costruzione di una fitta rete infrastrutturale) sia di tempistiche (in quanto questi sistemi sono caratterizzati da veicoli con bassa capacità che si susseguono ad alta frequenza).

4. Attuale condizione del mercato funiviario

Già nel 2016, il numero di installazioni funiviarie nel mondo superava le 29.000 unità, e ne erano localizzate nelle Alpi e nell'Europa occidentale più del 60% (circa 17.500) [21].

Il mercato funiviario mondiale è ancora fortemente sbilanciato verso il settore turistico-montano: circa il

ropeway installations serve ski resorts (in Fig. 3 visually depicts the distribution of new ropeway installations in function of their area of use) This exposes the ropeway market to several risks:

- *market saturation, particularly in the Alps, where ski resorts have already developed almost all areas where skiing is technically possible and economically viable;*
- *competition from alternative markets to mountain tourism, reducing the demand for ski experiences and, therefore, demand for ski transport and cableway facilities;*
- *global warming is profoundly undermining the viability of skiing in many mountain areas and it is reducing the duration of the ski season and the economic viability of skiing. Many studies agree that over the 30-year period 2020-2050, the global average surface temperature of the earth will increase by about 1.5°C, which will result in a consequent increase in altitude, under the same weather, climate and snow conditions, of about 230 m.*

On the other hand, around 35% of new cableway installations are in urban areas, and although most of these are located in South American and Asian megalopolises (e.g. the "Mi Teleférico" cableway network in La Paz-Bolivia and "Metrocable" in Medellin-Colombia), which have very different requirements in terms of transport and comfort from those in the West Countries, there are also examples of cableway installations in European areas. This is the case of the Greenwich cableway in London, UK, which crosses the river Thames, or the 50-years-old (opened in 1970, closed in 2004 and reopened in 2007) Montjuïc cableway in Barce-

60% delle nuove installazioni funiviarie è infatti al servizio di comprensori sciistici (in Fig. 3 viene visivamente rappresentata la distribuzione dei nuovi impianti funiviari in funzione dell'ambito di utilizzo), e ciò espone il mercato funiviario ad alcuni rischi:

- saturazione del mercato, in particolare nell'arco alpino, dove i comprensori sciistici hanno già sviluppato quasi tutte le aree dove sciare è tecnicamente possibile ed economicamente sostenibile;
- competizione di mercati alternativi a quello del turismo montano, che riducono la domanda di esperienze sciistiche e, quindi, di domanda di trasporto a fini sciistici e di installazioni funiviarie;
- riscaldamento globale, che sta profondamente minando alla fattibilità dello sci in molte aree di montagna, e sta riducendo la durata della stagione sciistica e la sostenibilità economica dello sci. Molti studi concordano che, nel periodo trentennale 2020-2050, la temperatura media globale della superficie terrestre aumenterà di circa 1,5°C, il che comporterà un conseguente aumento di altitudine, alle stesse condizioni meteorologiche, climatiche e nivologiche, di circa 230 m.

Dall'altra parte, circa il 35% delle nuove installazioni di impianti funiviari è inerente all'ambito urbano e, sebbene la gran parte di questi impianti siano localizzati in megalopoli sudamericane e asiatiche (vengono a titolo di esempio citate le reti di funivie "Mi Teleférico" di La Paz-Bolivia, e "Metrocable" di Medellin-Colombia), con delle esigenze in termini trasportistici e di comfort molto diverse rispetto a quelle occidentali, esistono esempi di installazioni funiviarie anche in ambiti europei. È il caso della telecabina di Greenwich, a Londra- UK, che attraversa il fiume Tamigi, o della ormai cinquantennale (inaugurata nel 1970, chiusa nel 2004 e riaperta nel 2007) cabinovia del Monttjuïc a Barcellona-Spagna, che unisce l'area portuale ad una collina posta nelle adiacenze della città catalana.

In generale, i punti di forza che rendono la tecnologia funiviaria particolarmente adatta in ambito urbano sono:

- Bassi costi costruttivo ed operativo.
- Possibilità di superare elevati dislivelli e ostacoli naturali e antropici con basso impatto al suolo.
- Basso impatto energetico ed ambientale.

Proprio riguardo all'impatto energetico-ambientale, dati in letteratura citano un ampio spettro di valori, in quanto questi risultano essere estremamente oscillanti in funzione di variabili di linea quali la pendenza, la capacità oraria, il tasso di utilizzo (...).

A titolo di esempio, si menziona [2], che definisce un

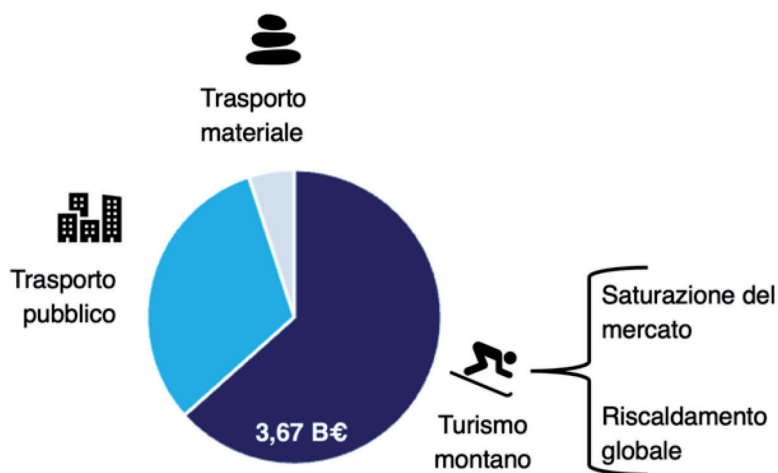


Figura 3 - Distribuzione dei campi di applicazione del mercato funiviario mondiale.

Figure 3 - Distribution of application areas in the worldwide ropeway market.

lona-Spain, which connects the port area to a hill near the Catalan city.

In general, the strengths that make ropeway technology particularly suitable in urban areas are:

- Low construction and operating costs.
- Ability to overcome high gradients and natural and man-made obstacles with low impact on the ground.
- Low energy and environmental impact.

Precisely with regard to the energy-environmental impact, data in the literature cite a wide range of values, as these are extremely variable depending by line variables such as slope, hourly capacity, utilization rate (...).

For instance, [2] defines a range, in terms of specific consumption, depending on the utilization rate: from less than 0.03 kWh/(pass-km) (with a utilization factor of 100%) to approximately 0.21 kWh/(pass-km) (with a utilization factor of 12.5%; id est there is on average one passenger per vehicle, which has a capacity of 8 passengers); and [3] reports a specific consumption value of 0.11 kWh/(pass-km).

Considering an emission factor of 225 gCO₂/kWh [22], equal to the average emission for electricity generation of Italy's largest energy producer, the environmental impact values, in terms of gCO₂/(pass-km), range from 6.75-47.25 considering data from [2], to 24.75 considering the data cited in [3].

In summary, therefore, the scientific literature to date provides some partial, incomplete and circumscribed data about the energy consumption and environmental impact of ropeway technology, which are, however, more than competitive when compared to other urban transport systems. In Tab. 3 the specific energy consumption data [kWh/(pass-km)] and specific emissions data [gCO₂/(pass-km)] related to ropeway technology and mentioned in the afore-

range, in termini di consumi specifici, in funzione del tasso di utilizzo: da meno di 0,03 kWh/(pass-km) (con fattore di utilizzo del 100%) a circa 0,21 kWh/(pass-km) (con fattore di utilizzo 12,5%; in media, cioè, vi è un passeggero a veicolo, che ha capacità di 8 passeggeri); e [3], che riferisce un valore di consumo specifico di 0,11 kWh/(pass-km).

Considerando un fattore di emissione di 225 gCO₂/kWh [22], pari alla media di emissione per la generazione di energia elettrica del maggiore produttore energetico italiano, i valori di impatto ambientale, in termini di gCO₂/(pass-km), variano da 6,75-47,25 considerando i dati di [2], a 24,75 vagliando i dati citati in [3].

In compendio, quindi, la letteratura ad oggi fornisce alcuni dati di consumo energetico ed impatto ambientale della tecnologia funiviaria parziali, incompleti e circoscritti, che però risultano essere più che competitivi se paragonati a quelli relativi ad altri sistemi di trasporto urbano. Nella Tab. 3 vengono raccolti i dati di consumo energetico specifico [kWh/(pass-km)] e di emissioni specifiche [gCO₂/(pass-km)] relativi alla tecnologia funiviaria e menzionati dalla letteratura succitata, e comparati con i valori relativi ad altri sistemi di trasporto, calcolati da [23] e collezionati nella Tab. 2.

5. Analisi dell'impatto energetico della tecnologia funiviaria

Come prima scritto, l'impatto energetico ed ambientale di installazioni funiviarie dipende marcatamente da variabili geometriche (pendenza) e di utilizzo (capacità oraria, tasso di riempimento) della linea, ma l'attuale trattazione quantitativa in letteratura di tali temi appare ancora parziale.

Viene quindi proposto in questo paragrafo una dissertazione quantitativa degli impatti ambientale ed energetici

mentioned literature are collected and compared with values for other transport systems, calculated by [23] and collected in Tab. 2.

5. Analysis of the energy impact of ropeway technology

As previously written, the energy and environmental impact of ropeway installations is highly dependent on the geometric (gradient) and utilization (hourly capacity, fill rate) variables of the line, but the current quantitative treatment of these topics in the literature still appears to be partial.

Therefore, a quantitative dissertation of the environmental and energy impacts related to ropeway technology, derived by simulation using the SIF ropeway design software, is proposed in this section [24].

The "Software per impianti a fune" (SIF) software calculates the mechanical, dynamic and geometric performance of a ropeway installation span by span, taking the height difference, length and inclination of the span, and the weight of the rope and vehicles as input variables.

These variables are used to determine the tensions of the rope at both ends of the span, as well as the deflection caused by distributed loads (function of the linear weight of the rope) and concentrated loads (function of the weight and number of vehicles and of the load distribution). For each span, starting from the downstream end, the SIF software calculates angles, stresses and deflections.

The final equation of the rope catenary is defined using the principle of superposition of effects.

Finally, depending on the gradient of the line and friction, the power of the system is defined, both in terms of average and peak values.

A typical urban ropeway line was simulated, the design

Tabella 2 – Table 2

Impatto energetico ed ambientale di diversi sistemi di trasporto, elaborazione sulla base di [23]
Energy and environmental impact of different transport systems, elaboration based on [23]

| | Pass+mi/gal | | | Btu/pass/mi | | | gCO ₂ /pass/mi | | |
|---|-------------|------------|------------|-------------|------------|------------|---------------------------|------------|------------|
| | Basso/ Low | Medio/ Avg | Alto/ High | Basso/ Low | Medio/ Avg | Alto/ High | Basso/ Low | Medio/ Avg | Alto/ High |
| Autobus/ Autobus | 230,9 | 280,1 | 318,3 | 433,5 | 492,7 | 597,7 | 32,3 | 36,7 | 44,5 |
| Automobile- media/ Car- avg | 33,6 | 38,2 | 83,2 | 1.658,5 | 3.614,6 | 4.106,9 | 123,5 | 269,1 | 305,7 |
| Automobile- 1 passeggero/ Car- 1 pass | 25,4 | 28,9 | 62,9 | 2.192,3 | 4.777,8 | 5.428,6 | 163,2 | 355,7 | 404,1 |
| Automobile- 2 passeggeri/ Car- 2 pass | 50,8 | 57,8 | 125,9 | 1.096,2 | 2.388,9 | 2.714,3 | 81,6 | 177,8 | 202,1 |
| TNC- media/ TNC- avg | 24,2 | 27,4 | 59,8 | 2.307,7 | 5.029,3 | 5.714,3 | 171,8 | 374,4 | 425,4 |
| Pulmino/ Van | 43,3 | 107,1 | 162,5 | 849,3 | 1.289,0 | 3.259,9 | 63,2 | 95,9 | 242,6 |
| Treno/ Train | 63,0 | 190,8 | 250,7 | 551,5 | 723,4 | 2.366,9 | 97,1 | 127,3 | 416,6 |
| Treno suburbano/ Suburban train | 75,8 | 89,8 | 155,9 | 885,2 | 1.536,2 | 1.820,9 | 155,8 | 141,7 | 135,6 |
| Servizio ferroviario suburbano/ Commuter rail | 50,8 | 97,0 | 204,4 | 700,7 | 1.422,3 | 2.730,1 | 113,2 | 167,2 | 271,7 |
| Valo interno/ Domestic air travel | | 56,6 | | | 2.437,9 | | | 181,5 | |
| Metrotramvia/ Light rail | 37,9 | 110,2 | 183,1 | 753,6 | 1.251,9 | 3.640,2 | 132,7 | 220,4 | 640,7 |
| Filobus/ Trolley bus | 58,1 | 90,9 | 104,3 | 1.319,6 | 1.517,4 | 2.411,7 | 232,3 | 267,1 | 424,5 |
| Bus urbano/ Transit bus | 11,2 | 33,7 | 57,5 | 2.395,7 | 4.091,8 | 11.763,4 | 177,7 | 283,2 | 860,2 |
| Traghetto/ Ferry | 3,8 | 11,9 | 24,0 | 5.810,4 | 11.616,6 | 47.269,1 | 432,6 | 863,8 | 3.519,0 |

co correlati alla tecnologia funiviaria, ricavati tramite simulazione utilizzando il software di progettazione funiviaria SIF [24].

Il software “Software Impianti a Fune” (SIF) calcola campata per campata le performance meccaniche, dinamiche e geometriche di un impianto funiviario prendendo come variabili di input il dislivello, la lunghezza e l'inclinazione della campata, e il peso della fune e dei veicoli.

Tali variabili sono utilizzate per determinare le tensioni della fune presso entrambe le estremità della campata, oltre che la deflessione causata da carichi distribuiti (funzione del peso lineare della fune) e concentrati (funzione del peso e del numero dei veicoli e della distribuzione del carico). Per ogni campata, partendo dall'estremità di valle, il software SIF calcola angoli, tensioni e deflessioni.

L'equazione finale della catenaria della fune viene definita utilizzando il principio di sovrapposizione degli effetti.

Infine, in funzione del dislivello della linea e degli attriti, viene definita la potenza dell'impianto, sia per quanto riguarda il valore medio sia per quanto concerne il valore di picco.

È stata simulata una linea funiviaria tipicamente urbana, la cui progettazione è in coerenza con tutti i punti della normativa vigente [25].

Il presente capitolo riprende quanto esposto dal succitato [5] in merito all'analisi energetica di un impianto funiviario.

A. Impatto energetico in funzione della capacità oraria

È stata dapprima considerata una linea funiviaria completamente orizzontale di lunghezza 1.500 m, e con fattore di riempimento del 100% in entrambe le direzioni di marcia; ed è stato variato il valore di capacità nominale oraria della linea, da un valore di 1.480 passeggeri all'ora per senso di marcia ad un valore di 5.000 passeggeri all'ora per senso di marcia. Le seguenti Fig. 4 e Tab. 4 riportano i valori di consumo energetico specifico in funzione della capacità oraria della linea simulata, ricavati tramite la formula

$$e = \frac{P}{2 \cdot C \cdot L \cdot \mu}$$

dove:

- $e \left[\frac{kWh}{pass \cdot km} \right]$ è il consumo specifico della linea;

Tabella 3 – Table 3

Impatto energetico specifico [$kWh/(pass \cdot km)$] ed emissioni specifiche [$gCO_2/(pass \cdot km)$] della tecnologia funiviaria, comparato con dati relativi ad altri mezzi di trasporto

Specific energy impact [$kWh/(pass \cdot km)$] and specific emissions [$gCO_2/(pass \cdot km)$] of ropeway technology, compared with data from other means of transport

| | kWh/pass/km | gCO ₂ /pass/km |
|---|-------------|---------------------------|
| Autobus/ Autobus | 0,0897 | 22,8044 |
| Automobile- media/ Car- avg | 0,6582 | 167,2114 |
| Automobile- 1 passeggero/ Car- 1 pass | 0,8701 | 221,0223 |
| Automobile- 2 passeggeri/ Car- 2 pass | 0,4350 | 110,4801 |
| TNC- media/ TNC- avg | 0,9159 | 232,6420 |
| Pulmino/ Van | 0,2347 | 59,5896 |
| Treno/ Train | 0,1317 | 79,1007 |
| Treno suburbano/ Suburban train | 0,2798 | 88,0485 |
| Servizio ferroviario suburbano/ Commuter rail | 0,2590 | 103,8935 |
| Volo interno/ Domestic air travel | 0,4440 | 112,7792 |
| Metrotranvia/ Light rail | 0,2280 | 136,9506 |
| Filobus/ Trolley bus | 0,2763 | 165,9687 |
| Bus urbano/ Transit bus | 0,7451 | 175,9728 |
| Traghetto/ Ferry | 2,1155 | 536,7418 |
| Impianto a fune/ Cable car | 0,0300 | 6,7500 |
| Impianto a fune/ Cable car | 0,2100 | 47,2500 |
| Impianto a fune/ Cable car | 0,1100 | 24,7500 |

of which is consistent with all the articles of the current regulations [25].

This chapter incorporates the above-mentioned [5] about the energy analysis of a ropeway installation.

A. Energy impact as a function of the hourly capacity

A fully horizontal cableway line with a length of 1,500 m and a filling factor of 100% in both directions was firstly considered; and the nominal hourly capacity of the line was varied from a value of 1,480 passengers per hour per direction to a value of 5,000 passengers per hour per direction. The following Fig. 4 and Tab. 4 show the values of specific energy consumption as a function of the hourly capacity of the simulated line, obtained using the formula

$$e = \frac{P}{2 \cdot C \cdot L \cdot \mu}$$

where:

- $e \left[\frac{kWh}{pass \cdot km} \right]$ is the specific consumption of the line;
- $P [kW]$ is the power output of the plant, output of the SIF software;

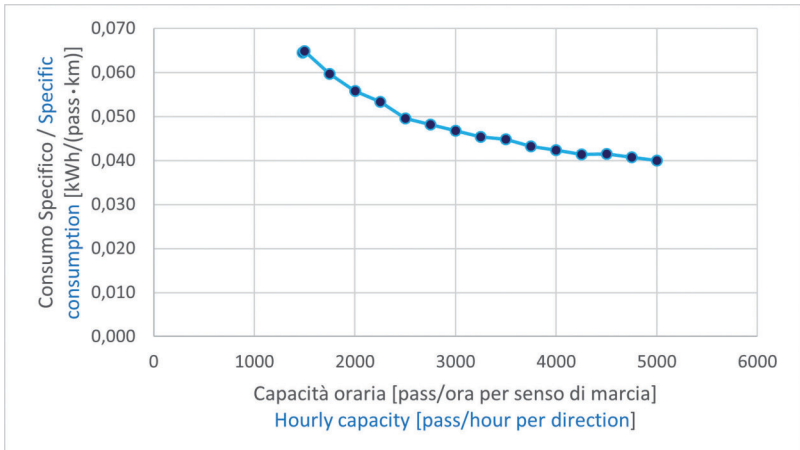


Figura 4 - Impatto energetico specifico [kWh/(pass-km)] in funzione della capacità oraria.
Figure 4 - Specific energy impact [kWh/(pass-km)] as a function of hourly capacity.

- P [kW] è la potenza a regime dell’impianto, output del software SIF;
- $C \left[\frac{\text{passenger}}{\text{ora} \cdot \text{senso di marcia}} \right]$ è la capacità oraria della linea [range 1.480 – 5.000];
- 2. Poiché la linea è ipotizzata essere completamente carica in entrambi i rami, viene moltiplicato il valore della capacità oraria $\left[\frac{\text{passenger}}{\text{ora} \cdot \text{senso di marcia}} \right]$ per il numero dei sensi di marcia;
- L è la lunghezza inclinata della linea, definita nelle simulazioni in 1.500 m e coincidente con la distanza orizzontale tra le due avanzstazioni, in quanto la linea non presenta inclinazione;
- μ è il fattore medio di riempimento, ipotizzato essere nelle simulazioni del 100%.

Tale relazione è una funzione decrescente: seppure, infatti, l’aumento di capacità oraria comporta un appesantimento dell’infrastruttura, in termini ad esempio di numero di sostegni e numero dei rulli, con un conseguente aumento degli attriti e quindi dei consumi energetici, questo aumento è di molto inferiore rispetto all’incremento di capacità oraria e -a parità di fattore di riempimento- di passeggeri.

Al fine di quantificare matematicamente la correlazione tra il consumo specifico e la capacità oraria, è stato valutato un modello di regressione lineare tra l’inverso della capacità oraria C e il consumo specifico e.

$$e = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{C}$$

Trovare I coefficienti β_0 e β_1 associati al modello di regressione lineare significa definire la retta che meglio approssima, nei termini dei minimi quadrati, la correlazione matematica tra l’inverso della capacità oraria e il consumo specifico. Tali coefficienti sono collezionati nella Tab. 5, e la rappresentazione grafica della nube di punti e della retta approssimante è fornita dalla Fig. 5.

- $C \left[\frac{\text{passenger}}{\text{ora} \cdot \text{senso di marcia}} \right]$ is the hourly capacity of the line [range 1,480 - 5,000];
- 2. Since the line is assumed to be fully loaded in both branches, the hourly capacity value $\left[\frac{\text{passenger}}{\text{ora} \cdot \text{senso di marcia}} \right]$ is multiplied by the number of running directions;
- L is the inclined length of the line, defined in the simulations as 1,500 m and coinciding with the horizontal distance between the two terminal stations, as the line has no inclination;
- μ is the average fill factor, assumed to be 100% in the simulations.

This relationship is a decreasing function: although an increase in hourly capacity leads to an increase in the complexity of the infrastructure, exempli gratia in terms of the number of supports and the number of rollers, with a consequent increase in friction and thus in energy consumption, this increase is much smaller than

Tabella 4 – Table 4

Impatto energetico specifico [kWh/(pass-km)] in funzione della capacità oraria
Specific energy impact [kWh/(pass-km)] as a function of hourly capacity

| Capacità oraria [passeggeri per ora per senso di marcia] Hourly capacity [passengers per hour per direction] | Consumo specifico [kWh/(passeggero-km)] Specific consumption [kWh/(passenger-km)] |
|---|--|
| 1.480 | 0,065 |
| 1.500 | 0,065 |
| 1.750 | 0,060 |
| 2.000 | 0,056 |
| 2.250 | 0,053 |
| 2.500 | 0,050 |
| 2.750 | 0,048 |
| 3.000 | 0,047 |
| 3.250 | 0,045 |
| 3.500 | 0,045 |
| 3.750 | 0,043 |
| 4.000 | 0,042 |
| 4.250 | 0,041 |
| 4.500 | 0,041 |
| 4.750 | 0,041 |
| 5.000 | 0,040 |

Viene enfatizzato che il valore di R^2 del modello di regressione è molto alto (99,79%), segno che la quota di variabilità della variabile dipendente “consumo specifico” che può essere spiegata dalla variabile indipendente “ $\frac{1}{\text{capacità oraria}}$ ” è vicina all’unità.

La retta di correlazione tra l’inverso della capacità oraria $\frac{1}{C}$ e il consumo specifico e è quindi:

$$e = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{C}$$

$$e = 0,0293 + 52,7518 \frac{1}{C}$$

B. Impatto energetico in funzione dell’utilizzo- linea orizzontale

Mantenendo a 1.500 m la lunghezza della linea e l’orizzontalità della linea stessa, e bloccando a 1.480 passeggeri all’ora per senso di marcia la capacità oraria nominale, è stato perturbato il modello variando il fattore di riempimento dei due rami del sistema. In questo scenario, il consumo specifico viene definito come:

$$e_{ad} = \frac{P_{a,d}}{C(a+d) \cdot L}$$

dove:

- a [%] è il fattore di riempimento di un ramo del sistema (dalla stazione tenditrice alla stazione motrice);
- d [%] è il fattore di riempimento dell’altro ramo del sistema (dalla stazione motrice alla stazione tenditrice);
- $e_{a,d} [\frac{kWh}{pass \cdot km}]$ è il consumo specifico della linea, dipendente dai fattori di riempimento dei due rami di linea;
- $P_{a,d}$ [kW] è la potenza a regime dell’impianto, output del software SIF, dipendente dai fattori di riempimento dei due rami di linea;
- $C_{a,d} [\frac{pass}{ora \cdot senso \text{ di marcia}}]$ è la capacità oraria nominale, definita nelle simulazioni in 1.480 passeggeri all’ora per senso di marcia;
- L è la lunghezza inclinata della linea, definita nelle simulazioni in 1.500 m e coincidente con la distanza orizzontale tra le due avanzstazioni, in quanto la linea non presenta inclinazione.

Tabella 5 – Table 5

Coefficienti di regressione lineare della correlazione tra l’inverso della capacità oraria e il consumo specifico
Linear regression coefficients of the correlation between the inverse of hourly capacity and specific consumption

| Coefficiente Coefficient | Valore atteso Expected value | Intervallo di confidenza al 95% 95% confidence interval |
|---------------------------------------|---------------------------------|---|
| $\beta_0 [\frac{kWh}{pass \cdot km}]$ | 0,0293 | (0,0287; 0,0298) |
| $\beta_1 [\frac{kWh}{h \cdot km}]$ | 52,7518 | (51,3813; 54,1225) |

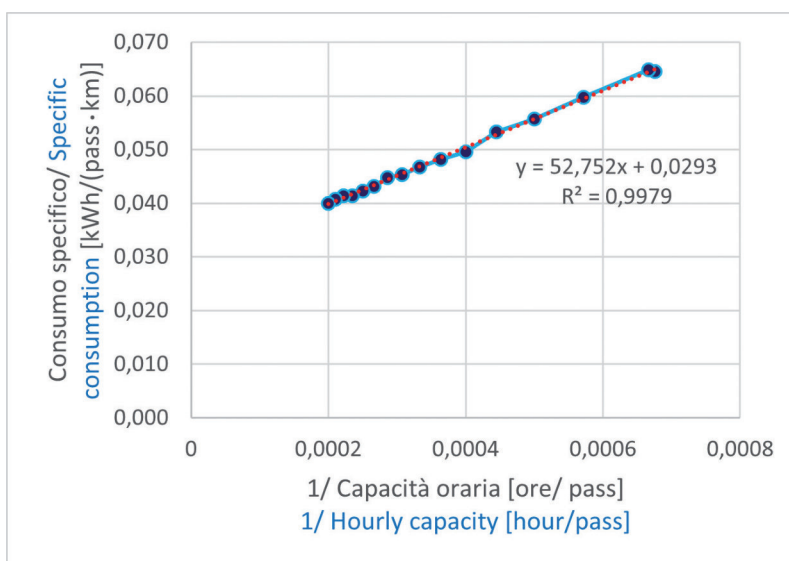


Figura 5 - Consumo specifico in funzione dell’inverso della capacità oraria.
Figure 5 - Specific consumption as a function of the inverse of hourly capacity.

the increase in hourly capacity and - assuming the same filling factor- in passengers.

In order to mathematically quantify the correlation between specific consumption and hourly capacity, a linear regression model between the inverse of hourly capacity C and specific consumption e was evaluated.

$$e = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{C}$$

To find the coefficients e associated with the linear regression model means defining the straight line that best approximates, in terms of least squares, the mathematical correlation between the inverse of hourly capacity and specific consumption. These coefficients are collected in Tab. 5, and the graphical representation of the cloud of points and the approximating line is provided by the Fig. 5.

It is emphasized that the R -square-value of the regression model is very high (99.79%), a sign that the share of variability of the dependent variable “specific consumption” that can be explained by the independent variable “ $\frac{1}{\text{capacità oraria}}$ ” is close to 1.

The correlation line between the inverse of hourly capacity $\frac{1}{C}$ and specific consumption and is thus:

$$e = \beta_0 + \beta_1 \frac{1}{C}$$

$$e = 0,0293 + 52,7518 \frac{1}{C}$$

B. Energy impact as a function of the utilization - horizontal line

Maintaining the line length at 1,500 m, the line horizontality constraint and locking the nominal hourly capacity at 1,480 passengers per hour per direction, the model was

Poiché il fattore di riempimento del ramo tra la stazione tenditrice e quella motrice è stato fatto variare dallo 0% al 100%, con un passo del 10%, così come il fattore di riempimento del ramo tra la stazione motrice e quella tenditrice, sono stati simulati 121 scenari di carico, i cui valori corrispondenti di impatto energetico unitario sono collezionati nella seguente Tab. 6 e graficamente mostrati dalla Fig. 6.

Poiché la linea funiviaria è orizzontale e simmetrica, anche la matrice di impatto energetico, riportata nella Tab. 6, e i cui dati sono graficamente rappresentati nella Fig. 6, è simmetrica. Il consumo unitario non dipende quindi dal modo in cui la linea viene caricata, ma unicamente dal valore di carico totale.

È quindi possibile modellizzare la relazione tra il consumo specifico dell'impianto funiviario e il riempimento della linea utilizzando come unica variabile indipendente la somma dei fattori di riempimento dei due rami, anziché avvalersi della coppia di variabili indipendenti "a" (fattore di riempimento del ramo tra la stazione tenditrice e quella motrice) e "d" (fattore di riempimento del ramo tra la stazione motrice e quella tenditrice).

$$e = f(a + d), \text{ non } e = f(a, d)$$

Nella seguente Tab. 7 vengono riportati i dati di capaci-

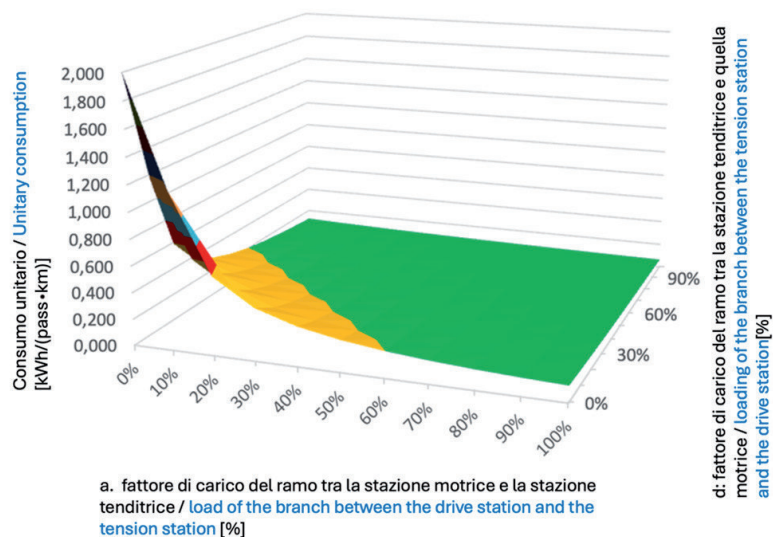


Figura 6 - Impatto energetico unitario dell'impianto urbano simulato in funzione dei fattori di riempimento dei due rami di linea.

Figure 6 - Unit energy impact of the simulated urban plant as a function of the filling factors of the two line branches.

perturbed by varying the filling factor of the two branches of the system. In this scenario, the specific consumption is defined as:

$$e_{ad} = \frac{P_{a,d}}{C(a+d) \cdot L}$$

where:

- a [%] is the filling factor of a branch of the system (from the tension station to the drive station);

Tabella 6 – Table 6

Matrice di impatto energetico unitario [kWh/(pass-km)] dell'impianto urbano simulato in funzione dei fattori di riempimento dei due rami di linea.

Unit energy impact matrix [kWh/(pass-km)] of the simulated urban installation as a function of the filling factors of the two line branches.

| d: fattore di carico del ramo tra la stazione tenditrice e quella motrice loading of the branch between the tension station and the drive station | | a: fattore di carico del ramo tra la stazione motrice e la stazione tenditrice load of the branch between the drive station and the tension station | | | | | | | | | | |
|--|------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0% | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% | 90% | 100% |
| | 0% | / | 1,176 | 0,591 | 0,396 | 0,298 | 0,240 | 0,201 | 0,173 | 0,152 | 0,136 | 0,123 |
| | 10% | 1,176 | 0,591 | 0,396 | 0,299 | 0,240 | 0,201 | 0,173 | 0,152 | 0,136 | 0,123 | 0,112 |
| | 20% | 0,591 | 0,396 | 0,299 | 0,240 | 0,201 | 0,173 | 0,152 | 0,136 | 0,123 | 0,112 | 0,104 |
| | 30% | 0,396 | 0,299 | 0,240 | 0,201 | 0,173 | 0,152 | 0,136 | 0,123 | 0,112 | 0,104 | 0,096 |
| | 40% | 0,299 | 0,240 | 0,201 | 0,173 | 0,152 | 0,136 | 0,123 | 0,112 | 0,104 | 0,096 | 0,090 |
| | 50% | 0,240 | 0,201 | 0,173 | 0,152 | 0,136 | 0,123 | 0,112 | 0,104 | 0,096 | 0,090 | 0,084 |
| | 60% | 0,201 | 0,173 | 0,152 | 0,136 | 0,123 | 0,112 | 0,104 | 0,096 | 0,090 | 0,084 | 0,079 |
| | 70% | 0,173 | 0,152 | 0,136 | 0,123 | 0,112 | 0,104 | 0,096 | 0,090 | 0,084 | 0,079 | 0,075 |
| | 80% | 0,152 | 0,136 | 0,123 | 0,112 | 0,104 | 0,096 | 0,090 | 0,084 | 0,079 | 0,075 | 0,071 |
| | 90% | 0,136 | 0,123 | 0,112 | 0,104 | 0,096 | 0,090 | 0,084 | 0,079 | 0,075 | 0,071 | 0,068 |
| | 100% | 0,123 | 0,112 | 0,104 | 0,096 | 0,090 | 0,084 | 0,079 | 0,075 | 0,071 | 0,068 | 0,065 |

tà effettiva nelle due direzioni e l'energia specifica in funzione del fattore di utilizzo complessivo a+d.

Come riportato nella seguente Fig. 7, i valori di energia specifica ricavati dalle simulazioni tramite software SIF sono inferiori rispetto a quelli teorici, che si avrebbero modellizzando la relazione attraverso un'iperbole vincolata al passaggio per il punto di coordinate $(C_{200\%}, e_{C=200\%}) = (2.960 \text{ passeggeri all'ora}; 0,065 \text{ kWh/(pass.km)})$, avente equazione:

$$e = \frac{\beta}{C} \text{ con } \beta=191$$

L'iperbole così definita è in grado di ben approssimare il consumo specifico dell'impianto, ma tende a sottostimarla (fino all'8,9%, nello scenario in cui la capacità utilizzata è il 10% della capacità nominale). Ciò accade poiché negli impianti funiviari il peso dei passeggeri non è trascurabile rispetto a quello dei veicoli, e quindi l'energia necessaria per vincere gli attriti fune-rulli, che sono funzione crescente del peso dei veicoli carichi, aumenta con la capacità oraria utilizzata dell'impianto.

C. Impatto energetico in funzione della pendenza- carico simmetrico

Negli scenari analizzati nei paragrafi precedenti è sempre stata considerata una linea funiviaria orizzontale, nella quale la quota delle due stazioni terminali è uguale. Viene invece in questo paragrafo simulata una linea funiviaria con pendenza costante, ma variabile nei vari scenari. Nel caso di dislivello non nullo della linea, diventa

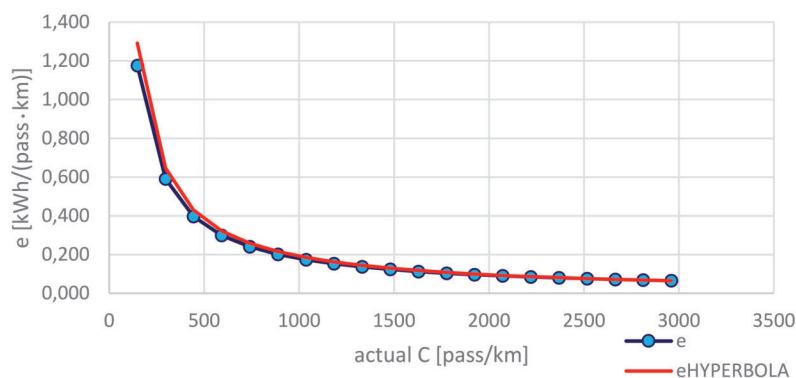


Figura 7 - Consumo specifico in funzione della capacità effettiva (utilizzata) dell'impianto.

Figure 7 - Specific consumption as a function of actual (utilized) plant capacity.

Tabella 7 – Table 7

Energia specifica e capacità effettiva relativa a vari scenari di fattori di utilizzo
Specific energy and effective capacity relative to various utilisation factor scenarios

| Fattore di utilizzo a+d [%] Utilization factor a+d [%] | Capacità effettiva C [pass/ora] Effective capacity C [pass/hour] | Energia specifica [kWh/(pass.km)] Specific energy [kWh/(pass.km)] |
|---|---|--|
| 0% | 0 | / |
| 10% | 148 | 1,176 |
| 20% | 296 | 0,591 |
| 30% | 444 | 0,396 |
| 40% | 592 | 0,299 |
| 50% | 740 | 0,240 |
| 60% | 888 | 0,201 |
| 70% | 1.036 | 0,173 |
| 80% | 1.184 | 0,152 |
| 90% | 1.332 | 0,136 |
| 100% | 1.480 | 0,123 |
| 110% | 1.628 | 0,112 |
| 120% | 1.776 | 0,104 |
| 130% | 1.924 | 0,096 |
| 140% | 2.072 | 0,090 |
| 150% | 2.220 | 0,084 |
| 160% | 2.368 | 0,079 |
| 170% | 2.516 | 0,075 |
| 180% | 2.664 | 0,071 |
| 190% | 2.812 | 0,068 |
| 200% | 2.960 | 0,065 |

- d [%] is the filling factor of the other branch of the system (from the drive station to the tension station);

- $e_{a,d} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{pass} \cdot \text{km}} \right]$ is the specific line consumption, dependent on the filling factors of the two line branches;

- $P_{a,d}$ [kW] is the power output of the plant, output of the SIF software, dependent on the filling factors of the two line branches;

- $C_{a,d} \left[\frac{\text{pass}}{\text{ora} \cdot \text{senso di marcia}} \right]$ is the nominal hourly capacity, defined in the simulations as 1,480 passengers per hour per direction of travel;

- L is the inclined length of the line, defined in the simulations as 1,500 m and coinciding with the horizontal distance between the two terminal stations, as the line has no inclination.

As the filling factor of the branch be-

rilevante la posizione del gruppo motore e del tenditore: in tutti gli scenari analizzati, la stazione motrice è prevista essere quella di monte, mentre la stazione tenditrice è prevista essere quella di valle, conformazione che ottimizza il calcolo della linea in termini di tensione della fune e potenza necessaria.

La lunghezza orizzontale della linea è mantenuta costante a 1.500 m, così come la capacità oraria della linea permane quella dello scenario base di 1.480 passeggeri all'ora per senso di marcia; inoltre, la linea simulata ha un fattore di riempimento unitario sia nel ramo ascendente sia in quello discendente. La seguente Tab. 8 riporta i dati geometrici ed energetici dell'installazione funiviaria in funzione della pendenza, mentre la successiva Fig. 8 mostra l'andamento dell'impatto energetico unitario e in funzione della pendenza s.

I coefficienti attesi della retta di regressione lineare, unitamente al loro intervallo di confidenza, sono riportati nella seguente Tab. 9. Poiché l'intervallo di confidenza al 95% del coefficiente angolare della retta di regressione lineare (-0,006; +0,005) contiene il valore nullo, è possibile affermare con una confidenza del 95% che non esiste una dipendenza significativa tra la pendenza della linea funiviaria ed il suo consumo specifico unitario. Questo risul-

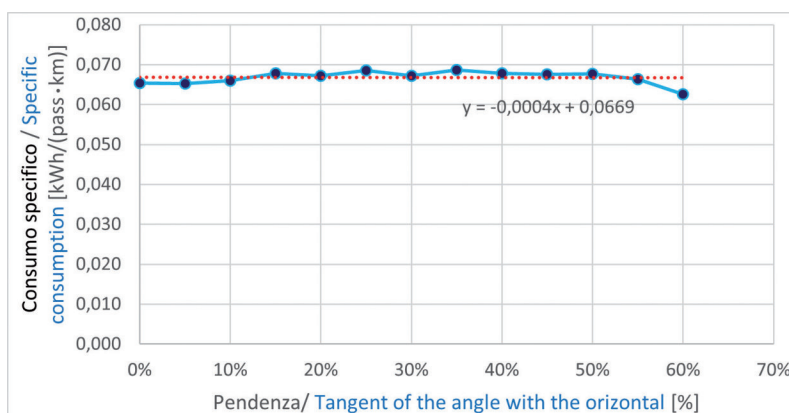


Figura 8 - Consumo specifico in funzione dell'inclinazione della linea.

Figure 8 - Specific consumption as a function of line inclination.

tween the tension and drive stations was varied from 0% to 100%, with a step of 10%, as well as the filling factor of the opposite branch, 121 load scenarios were simulated, whose corresponding values of unit energy impact are collected in the following Tab. 6 and graphically shown in Fig. 6.

Since the ropeway line is horizontal and symmetrical, the energy impact matrix, shown in Tab. 6 and whose data are graphically represented in Fig. 6, is symmetrical. The unit consumption therefore does not depend on how the line is loaded, but only on the total load value.

It is therefore possible to model the relationship between

Tabella 8 – Table 8

Variabili geometriche ed energetiche in funzione della pendenza della linea
Geometrical and energy variables as a function of line gradient

| Pendenza [%] Slope [%] | Dislivello tra le due stazioni [m] Height difference between the two stations [m] | Lunghezza inclinata [m] Inclined length [m] | Potenza a regime della linea [kW] Power at line speed [kW] | Consumo specifico [kWh/(pass·km)] Specific consumption [kWh/(pass·km)]. |
|---------------------------|---|---|---|--|
| 0% | 0 | 1.500,0 | 290 | 0,065 |
| 5% | 75 | 1.501,9 | 290 | 0,065 |
| 10% | 150 | 1.507,5 | 295 | 0,066 |
| 15% | 225 | 1.516,8 | 304 | 0,068 |
| 20% | 300 | 1.529,7 | 304 | 0,067 |
| 25% | 375 | 1.546,2 | 314 | 0,069 |
| 30% | 450 | 1.566,0 | 312 | 0,067 |
| 35% | 525 | 1.589,2 | 323 | 0,069 |
| 40% | 600 | 1.615,5 | 324 | 0,068 |
| 45% | 675 | 1.644,9 | 329 | 0,068 |
| 50% | 750 | 1.677,1 | 336 | 0,068 |
| 55% | 825 | 1.711,9 | 336 | 0,066 |
| 60% | 900 | 1.749,3 | 324 | 0,063 |

tato si spiega con il fatto che, essendo sia il ramo di salita sia quello di discesa completamente carichi, i due rami sono equilibrati in termini di peso ed energia, e questo equilibrio non dipende dalla pendenza; quindi, indipendentemente dai valori assunti dalla pendenza, l'energia richiesta all'impianto è unicamente quella necessaria per vincere gli attriti.

L'equazione che lega la pendenza media "s" della linea al suo consumo specifico "e" è quindi:

$$e = \beta_0 + \beta_1 s$$

$$e \left[\frac{\text{kWh}}{\text{pass} \cdot \text{km}} \right] = 0,0669 \frac{\text{kWh}}{\text{pass} \cdot \text{km}} - 0,004 \frac{\text{kWh}}{\text{pass} \cdot \text{km}} s [\%]$$

D. Impatto energetico in funzione della pendenza- carico generico

Il risultato di inesistenza di una relazione statisticamente rilevante tra pendenza e consumo specifico è valida non solo nel caso di completo utilizzo della linea nei due rami, ma in ogni scenario in cui il tasso di utilizzo è simmetrico; in cui, cioè, il numero di passeggeri nel ramo di discesa è uguale al numero di passeggeri nel ramo di salita, ed è dovuto al fatto che la tecnologia funiviarica è, al netto degli attriti, conservativa: l'energia gravitazionale che viene ceduta dai veicoli (e dai passeggeri) nel ramo di discesa viene reimpressa nel sistema ed utilizzata per aumentare l'energia gravitazionale, quindi la quota, dei veicoli e dei passeggeri nel ramo di salita.

Appare quindi evidente che il risultato di indipendenza statistica è valido unicamente sotto l'ipotesi di simmetria, in termini di fattori di utilizzo, della linea. Negli altri casi, qualitativamente:

- 1) Se il ramo di salita è più carico del ramo di discesa, il consumo specifico segue una funzione crescente rispetto all'inclinazione della linea.
- 2) Se il ramo di discesa ha un coefficiente di riempimento maggiore di quello di salita, il consumo specifico è decrescente rispetto all'inclinazione della linea: in questo caso maggiore è l'inclinazione della linea, quindi il dislivello, minore è l'energia necessaria per movimentare l'impianto, in quanto l'energia potenziale persa da parte di veicoli e passeggeri nel ramo di discesa viene reimpressa nel sistema e interviene in modo più ingente nel bilancio energetico. Inoltre, se l'energia

Tabella 9 – Table 9

Coefficienti della retta di regressione lineare che correla il consumo specifico alla pendenza della linea

Coefficients of the linear regression line correlating specific consumption to the slope of the line

| Coefficiente Coefficient | Valore atteso Expected value | Intervallo di confidenza Confidence interval |
|--|---------------------------------|--|
| $\beta_0 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{pass} \cdot \text{km}} \right]$ | 0,0669 | (0,065; 0,069) |
| $\beta_1 \left[\frac{\text{kWh}}{\text{pass} \cdot \text{km}} \right] \%$ | -0,004 | (-0,006; 0,005) |

the specific consumption of the cable car system and the utilization of the line by using the sum of the filling factors of the two branches as the only independent variable, instead of using the pair of independent variables 'a' (filling factor of the branch between the tension station and the drive station) and 'd' (filling factor of the branch between the drive station and the tension one).

$$e = f(a + d), \text{ not } e = f(a, d)$$

The following Tab. 7 shows the actual capacity data in the two directions and the specific energy as a function of the overall utilization factor a+d.

As shown in the following Fig. 7, the specific energy values obtained from the simulations using SIF software are lower than the theoretical values, which would be obtained by modelling the relationship through a hyperbola constrained to the passage through the point ($C_{200\%}$, $e_{C=200\%}$) = (2,960 passengers per hour; 0.065 kWh/(pass·km)), having equation

$$e = \frac{\beta}{c} \text{ with } \beta=191$$

The hyperbola thus defined is able to well approximate the specific consumption of the installation, but it tends to underestimate it (up to 8.9%, in the scenario where the capacity used is 10% of the nominal capacity). This happens because in cableway installations the weight of passengers is not negligible compared to the vehicles one, and therefore the energy required to overcome the rope-roller friction, which is an increasing function of the weight of the loaded vehicles, increases with the hourly utilized capacity of the plant.

C. Energy impact as a function of the slope - symmetrical load

In the scenarios analyzed in the previous paragraphs, a horizontal cableway line, in which the height of the two terminal stations is equal, was always been considered. In this paragraph, on the other hand, a ropeway line with a constant gradient, but varying in the different scenarios, is simulated. In the case of a non-zero gradient of the line, the position of the drive and the tensioner units becomes relevant: in all the scenarios analyzed, the drive station is foreseen to be the upstream one, while the tensioning station is foreseen to be downstream, a conformation that optimizes the calculation of the line in terms of rope tension and power required.

The horizontal length of the line is kept constant at 1,500 meters, as the hourly capacity of the line remains the same as in the base scenario of 1,480 passengers per hour in each direction; in addition, the simulated line has a unitary fill factor in both the ascent and descent branches. The following Tab. 8 shows the geometric and energy data of the cableway installation as a function of slope, while the following Fig. 8 shows the trend of the unit energy impact e as a function of slope s.

The coefficients of the linear regression line, together with their confidence interval, are shown in the following Tab. 9. Since the 95% confidence interval of the angular coefficient of the linear regression line (-0.006; +0.005) contains the null value, it is possible to state with 95% confidence that there is no significant correlation between the slope of the

potenziale gravitazionale ceduta dai veicoli nel ramo di discesa (più carichi) è, al lordo delle perdite dovute agli attriti, superiore all'energia potenziale gravitazionale che è necessario fornire ai veicoli (più scarichi) nel ramo di salita, il sistema non necessita di energia per il suo moto, e l'energia specifica assume valori negativi. Operativamente, in impianti funiviari, l'energia ottenuta dal sistema quando evolve naturalmente verso il movimento viene convertita in energia elettrica e ceduta alla rete elettrica.

Mantenendo i vincoli di linea relativamente alla portata oraria di 1.480 passeggeri all'ora per senso di marcia e di lunghezza orizzontale della linea di 1.500 m, sono stati valutati quantitativamente tre scenari limite, corrispondenti a: (i) rami entrambi carichi, (ii) ramo di salita carico e ramo di discesa scarico, e (iii) ramo di salita scarico e ramo di discesa carico; non sono invece stati valutati i due scenari relativi a fune nuda e ad entrambi i rami scarichi, in quanto, essendo la portata oraria in queste ultime condizioni di carico nulla, il consumo specifico non può essere definito.

La Tab. 10 e la Fig. 9 riportano i valori di consumo energetico unitario in funzione dell'angolo medio di linea nei tre scenari di carico analizzati.

- i) Quando entrambi i rami sono completamente carichi (retta blu in Fig. 9), quindi il fattore di riempimento è simmetrico nei due rami, come precedentemente menzionato, non esiste correlazione statistica tra il consumo specifico e la pendenza della linea funiviaria. Si sottolinea che, in questo scenario, in caso di linea orizzontale il consumo specifico è circa la metà rispetto a quello definito nelle condizioni (ii) e (iii), in quanto, essendo fissata la portata oraria in 1.480 passeggeri all'ora per senso di marcia, il presente scenario ha portata doppia rispetto a quelli sotto descritti.
- ii) Quando il ramo di salita è carico e quello di discesa vuoto (retta azzurra in Fig. 9), il contributo gravitazionale al moto dell'impianto dato dai veicoli, vuoti, nel ramo di discesa è minimo, ed è necessario immettere nel sistema l'energia necessaria, oltre che a coprire le perdite per attrito, anche a vincere lo squilibrio gravitazionale tra i due rami, che dipende in modo crescente dalla pendenza.
- iii) Quando il ramo di salita è completamente scarico e quello di discesa è completamente carico (retta viola in Fig. 9), i veicoli carichi nel ramo di discesa sono in grado di fornire il massimo contributo al moto dell'impianto. Quando la pendenza della linea supera il 60%, l'energia fornita dalla perdita di quota dei veicoli carichi nel ramo di discesa è in grado di vincere gli attriti e di

Tabella 10 – Table 10

Consumo specifico in funzione dell'inclinazione della linea e dello scenario di carico.
Specific consumption as a function of line inclination and load scenario.

| Ramo di salita/ Ascent branch | Carico/ Loaded | Carico/ Loaded | Vuoto/ Empty |
|---------------------------------|----------------|----------------|----------------|
| Ramo di discesa/ Descent branch | Carico/ Loaded | Vuoto/ Empty | Carico/ Loaded |
| Pendenza/ Slope= 0% | 0,065 | 0,129 | 0,117 |
| Pendenza/ Slope= 5% | 0,065 | 0,140 | 0,107 |
| Pendenza/ Slope= 10% | 0,066 | 0,151 | 0,100 |
| Pendenza/ Slope= 15% | 0,068 | 0,164 | 0,093 |
| Pendenza/ Slope= 20% | 0,067 | 0,174 | 0,081 |
| Pendenza/ Slope= 25% | 0,069 | 0,187 | 0,073 |
| Pendenza/ Slope= 30% | 0,067 | 0,195 | 0,060 |
| Pendenza/ Slope= 35% | 0,069 | 0,209 | 0,052 |
| Pendenza/ Slope= 40% | 0,068 | 0,217 | 0,042 |
| Pendenza/ Slope= 45% | 0,068 | 0,226 | 0,032 |
| Pendenza/ Slope= 50% | 0,068 | 0,234 | 0,023 |
| Pendenza/ Slope= 55% | 0,066 | 0,240 | 0,013 |
| Pendenza/ Slope= 60% | 0,063 | 0,241 | -0,001 |

ropeway line and its specific unit consumption. This result can be explained by the fact that, since both the ascent and descent branches are fully loaded, the two branches are balanced in terms of weight and energy, and this balance does not depend on the gradient; therefore, regardless of the values assumed by the gradient, the energy required from the installation is only the one required to overcome the friction.

The equation linking the average slope 's' of the line to its specific consumption 'e' is thus:

$$e = \beta_0 + \beta_1 s$$

$$e \left[\frac{kWh}{pass \cdot km} \right] = 0,0669 \frac{kWh}{pass \cdot km} - 0,004 \frac{kWh}{pass \cdot km} s [\%]$$

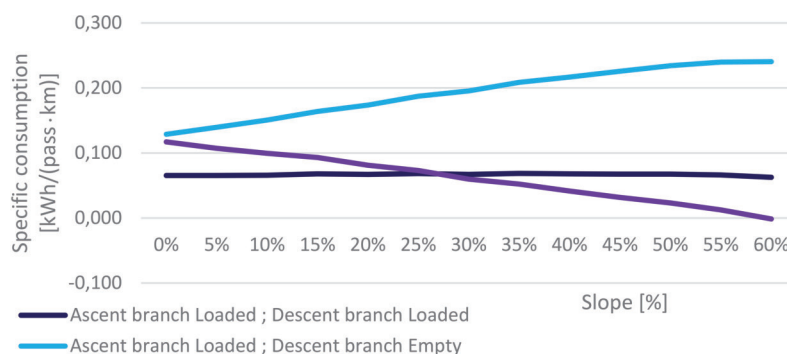


Figura 9 - Consumo specifico in funzione dell'inclinazione della linea e dello scenario di carico.

Figure 9 - Specific consumption as a function of line inclination and load scenario.

fornire l'energia necessaria per l'aumento di quota dei veicoli, scarichi, nel ramo di salita. Oltre a questo valore di pendenza, il sistema genera energia, e l'impatto energetico dell'impianto funiviario è addirittura negativo.

La seguente Tab. 11 riporta i coefficienti delle rette di regressione lineare che approssimano le relazioni tra la pendenza s e il consumo specifico e nei tre scenari di carico analizzati.

La relazione tra la pendenza s e il consumo specifico ha quindi equazione:

$$e \left[\frac{kWh}{pass \cdot km} \right] = \begin{cases} e = \beta_0 + \beta_1 s \\ 0,0669 \frac{kWh}{pass \cdot km} - 0,004 \frac{kWh}{pass \cdot km} s [\%]; \\ \text{if asc = loaded; desc = loaded} \\ 0,1236 \frac{kWh}{pass \cdot km} + 0,1236 \frac{kWh}{pass \cdot km} s [\%]; \\ \text{if asc = loaded; desc = empty} \\ 0,1297 \frac{kWh}{pass \cdot km} - 0,0097 \frac{kWh}{pass \cdot km} s [\%]; \\ \text{if asc = empty; desc = loaded} \end{cases}$$

E. Impatto energetico in funzione dell'utilizzo- linea inclinata

Viene in questo paragrafo analizzato l'impatto energetico in funzione dell'utilizzo, considerando una linea funiviaria che mantenga una capacità oraria di 1.480 passeggeri all'ora per senso di marcia e una lunghezza orizzontale di 1.500 metri, ma che (al contrario di quanto descritto nel paragrafo 5.2, in cui la linea analizzata era orizzontale) presenta un'inclinazione costante del 60%.

Con tale linea, sono stati simulati 121 scenari di carico: da 0% al 100%, con granularità del 10%, per i tassi di riempimento del ramo di salita e del ramo di discesa, e per ogni condizione è stato calcolato l'impatto energetico unitario come segue. I risultati sono collezionati nella Tab. 12 e graficamente rappresentati dalla Fig. 10.

$$e_{ad} = \frac{P_{a,d}}{C(a+d) \cdot L}$$

Tabella 11 – Table 11

Coefficienti di regressione lineare che quantificano la correlazione tra pendenza s e consumo specifico e nei tre scenari di carico analizzati
Linear regression coefficients quantifying the correlation between slope s and specific consumption e in the three load scenarios analysed

| Coefficiente Coefficient | Ramo di salita carico; ramo di discesa carico Loaded upward branch; loaded downward branch | Ramo di salita carico; ramo di discesa scarico Loading upward branch; unloading downward branch | Ramo di salita scarico; ramo di discesa carico Ascending branch unloaded; descending branch loaded |
|--|--|--|--|
| $\beta_0 \left[\frac{kWh}{pass \cdot km} \right]$ | 0,0669 | 0,1236 | 0,1292 |
| $\beta_1 \left[\frac{kWh}{pass \cdot km} \right]$ | -0,004 | 0,0099 | -0,0097 |

D. Energy impact as a function of the slope - generic load

The result of the inexistence of a statistically significant relationship between slope and specific consumption is valid not only in the case of complete utilization of the line in the two branches, but in any scenario in which the utilization rate is symmetrical; that is, in which the number of passengers in the descent branch is equal to the number of passengers in the ascent branch, and is due to the fact that the cableway technology is, net of friction, conservative: the gravitational energy that is given up by the vehicles (and passengers) on the descent branch is fed back into the system and used to increase the gravitational energy, hence the height, of the vehicles and passengers on the ascent branch.

It is therefore evident that the statistical independence result is only valid under the assumption of symmetry, in terms of utilization factors, of the line. In the other cases, qualitatively:

- 1) If the ascent branch is more heavily loaded than the descent one, the specific consumption follows an increasing function with respect to the inclination of the line.
- 2) If the descent branch has a higher filling coefficient than the ascent one, the specific consumption is decreasing with respect to the slope of the line: in this case, the greater the inclination of the line, and therefore the difference in height, the less energy is required to move the system, since the potential energy lost by vehicles and passengers in the descent branch is fed back into the system and intervenes more in the energy balance. Furthermore, if the gravitational potential energy yielded by the vehicles in the descent branch (more loaded) is, gross of losses due to friction, higher than the gravitational potential energy that must be supplied to the vehicles (more unloaded) in the ascent branch, the system does not require energy for its motion, and the specific energy takes on negative values. Operationally, in cableway systems, the energy obtained by the system as it evolves naturally towards movement is converted into electrical energy and transferred to the power grid.

Maintaining the line constraints of 1,480 passengers per hour in each direction and a horizontal line length of 1,500 m, three limit scenarios were quantitatively assessed, corresponding to (i) both-loaded branches, (ii) loaded ascent branch and unloaded descent branch, and (iii) unloaded ascent branch and loaded descent branch; on the other hand, the two scenarios relating to empty rope and both unloaded branches were not evaluated, since, as the hourly capacity under the latter load conditions is zero, the specific consumption cannot be defined.

Tab. 10 and Fig. 9 show the unit energy consumption values as a function of the average line angle in the three load scenarios analyzed.

Tabella 12 – Table 12

Consumo specifico [kWh/(pass·km)] dell'impianto simulato in funzione dei coefficienti di riempimento del ramo di salita (a) e del ramo di discesa (d)
Specific consumption [kWh/(pass·km)] of the simulated system as a function of the filling coefficients of the uphill branch (a) and downhill branch (d)

| | | a: fattore di carico del ramo di salita load of the ascent branch | | | | | | | | | | |
|---|------|--|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| | | 0% | 10% | 20% | 30% | 40% | 50% | 60% | 70% | 80% | 90% | 100% |
| d: fattore di carico del ramo di discesa loading of the descent branch | 0% | | 1,263 | 0,695 | 0,506 | 0,411 | 0,354 | 0,316 | 0,289 | 0,269 | 0,253 | 0,241 |
| | 10% | 1,020 | 0,574 | 0,425 | 0,350 | 0,306 | 0,276 | 0,255 | 0,239 | 0,226 | 0,216 | 0,208 |
| | 20% | 0,453 | 0,344 | 0,290 | 0,257 | 0,235 | 0,220 | 0,208 | 0,199 | 0,192 | 0,186 | 0,181 |
| | 30% | 0,263 | 0,229 | 0,209 | 0,195 | 0,185 | 0,178 | 0,172 | 0,168 | 0,164 | 0,161 | 0,159 |
| | 40% | 0,169 | 0,160 | 0,155 | 0,151 | 0,148 | 0,145 | 0,144 | 0,142 | 0,141 | 0,140 | 0,139 |
| | 50% | 0,112 | 0,114 | 0,116 | 0,118 | 0,119 | 0,119 | 0,120 | 0,121 | 0,121 | 0,122 | 0,122 |
| | 60% | 0,074 | 0,082 | 0,087 | 0,092 | 0,095 | 0,098 | 0,100 | 0,103 | 0,104 | 0,106 | 0,107 |
| | 70% | 0,047 | 0,057 | 0,065 | 0,071 | 0,076 | 0,080 | 0,084 | 0,087 | 0,090 | 0,092 | 0,094 |
| | 80% | 0,027 | 0,038 | 0,047 | 0,054 | 0,060 | 0,065 | 0,070 | 0,073 | 0,077 | 0,080 | 0,082 |
| | 90% | 0,011 | 0,023 | 0,032 | 0,040 | 0,047 | 0,052 | 0,057 | 0,062 | 0,066 | 0,069 | 0,072 |
| | 100% | -0,002 | 0,012 | 0,021 | 0,029 | 0,036 | 0,042 | 0,048 | 0,052 | 0,057 | 0,060 | 0,063 |

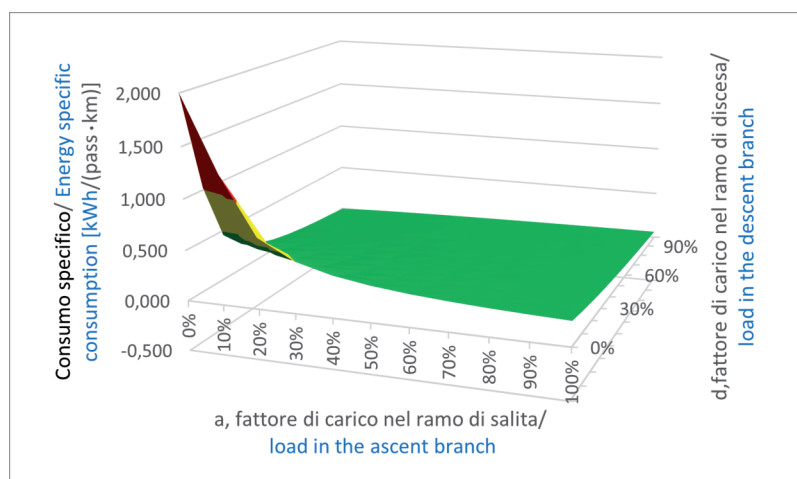


Figura 10 - Consumo specifico [kWh/(pass·km)] dell'impianto simulato in funzione dei coefficienti di riempimento del ramo di salita (a) e del ramo di discesa (d).

Figure 10 - Specific consumption [kWh/(pass·km)] of the simulated system as a function of the filling coefficients of the uphill branch (a) and downhill branch (d).

dove:

- a [%] è il fattore di riempimento del ramo ascendente di linea;
- d [%] è il fattore di riempimento del ramo discendente di linea;
- $e_{a,d} \left[\frac{kWh}{pass \cdot km} \right]$ è il consumo specifico della linea, dipendente dai fattori di riempimento dei due rami di linea;
- $P_{a,d}$ [kW] è la potenza a regime dell'impianto, output del software SIF, dipendente dai fattori di riempimento dei due rami di linea;

i) When both branches are fully loaded (blue line in Fig. 9), *id est* the filling factor is symmetrical in the two branches, as previously mentioned, there is no statistical correlation between the specific consumption and the slope of the ropeway line.

It is emphasized that, in this scenario, the specific consumption in the case of a horizontal line is approximately half that the one defined in conditions (ii) and (iii), since, as the hourly capacity is set at 1,480 passengers per hour per direction of travel, this scenario has twice the capacity of those described below.

ii) When the ascent branch is loaded and the descent branch empty (blue line in Fig. 9), the gravitational contribution to the motion of the system given by the vehicles, empty, in the descent branch is minimal, and it is necessary to inject into the system the energy required, not only to cover friction losses, but also to overcome the gravitational imbalance between the two branches, which depends increasingly on the gradient;

iii) When the ascent branch is fully unloaded and the descent branch is fully loaded (purple line in Fig. 9), the loaded vehicles in the descent branch are able to make the maximum contribution to the motion of the system. When the slope of the line exceeds 60%, the energy provided by the loss of altitude of the loaded vehicles in the

- $C_{a,d} \left[\frac{\text{pass}}{\text{ora} \cdot \text{senso di marcia}} \right]$ è la capacità oraria nominale, definita nelle simulazioni in 1.480 passeggeri all'ora per senso di marcia;
- L è la lunghezza inclinata della linea. Considerando una lunghezza orizzontale di 1.500 m e un angolo di inclinazione del 60%, la lunghezza inclinata della linea è 1.749 m.

Contrariamente a quanto dimostrato nel caso di linea orizzontale, con una linea inclinata la portata oraria complessiva dei due rami non è sufficiente a determinare univocamente il consumo energetico specifico della linea, che è invece funzione delle due variabili indipendenti a (fattore di riempimento del ramo ascendente) e d (fattore di riempimento del ramo discendente).

$$e = f(a; d), \text{ non } e = f(a + d)$$

Questo risultato è spiegato dal fatto che i carichi dei rami di salita e di discesa danno un contributo diverso nel calcolo del consumo energetico:

- il carico nel ramo di salita dà un contributo positivo in termini di consumo energetico, in quanto maggiore è il carico nel ramo di salita, maggiore è l'energia richiesta dal sistema per il suo movimento;
- il carico del ramo di discesa dà un contributo negativo in termini di consumo energetico, in quanto maggiore è il carico nel ramo discendente, maggiore è l'energia prodotta internamente dal sistema (attraverso la perdita dell'energia potenziale gravitazionale dei veicoli in discesa) e che non deve essere immessa nel sistema dall'esterno.

Nelle seguenti Tab. 13 e Fig. 11 sono riportati i valori del consumo energetico specifico relativi ad una capacità effettiva pari a 1.480 passeggeri all'ora ($a+d=100\%$), in funzione della coppia di valori a e d con cui viene raggiunta tale capacità trasportistica, quindi in funzione della distribuzione dei passeggeri tra i due rami di linea. Mentre nel caso precedentemente affrontato di linea orizzontale il valore del consumo energetico era costante in funzione della distribuzione del carico nei due rami, con una linea inclinata il consumo specifico è tanto maggiore quanto più il ramo di salita è carico.

Se invece si prende in considerazione un ciclo intero, cioè se si inserisce nel modello il vincolo che ogni passeggero che percorre la linea in senso ascendente la debba percorrere anche in senso discendente e viceversa, la dipendenza dell'energia specifica dalla distribuzione del carico sui due rami viene eliminata. La Tab. 14 e la Fig. 12 riportano i valori e l'andamento del consumo energetico unitario relativo ad un ciclo ramo in salita- ramo in discesa (o viceversa), e dimostrano che la somma del consumo specifico di energia dei due rami è la stessa per tutti gli scenari di distribuzione del carico. In particolare, nella prima colonna "scenario del ciclo" (Tab. 14), il primo vettore rappresenta la distribuzione dei carichi lungo la linea funiviaria della prima parte del ciclo, ed il secondo vettore rappresenta la distribuzione dei carichi lungo la linea della seconda parte del ciclo; all'interno di ogni vettore,

descent branch is able to overcome the friction and provide the energy required for the increase in altitude of the unloaded vehicles in the ascent branch. Beyond this slope value, the system generates energy, and the energy impact of the ropeway system is even negative.

The following Tab. 11 shows the coefficients of the linear regression lines approximating the relationships between the slope s and the specific consumption e under the three load scenarios analyzed.

The relationship between the slope s and the specific consumption thus has equation:

$$e \left[\frac{\text{kWh}}{\text{pass} \cdot \text{km}} \right] = \begin{cases} e = \beta_0 + \beta_1 s \\ 0,0669 \frac{\text{kWh}}{\text{pass} \cdot \text{km}} - 0,004 \frac{\text{kWh}}{\text{pass} \cdot \text{km}} s [\%]; \\ \text{if asc = loaded; desc = loaded} \\ 0,1236 \frac{\text{kWh}}{\text{pass} \cdot \text{km}} + 0,1236 \frac{\text{kWh}}{\text{pass} \cdot \text{km}} s [\%]; \\ \text{if asc = loaded; desc = empty} \\ 0,1297 \frac{\text{kWh}}{\text{pass} \cdot \text{km}} - 0,0097 \frac{\text{kWh}}{\text{pass} \cdot \text{km}} s [\%]; \\ \text{if asc = empty; desc = loaded} \end{cases}$$

E. Energy impact depending on the utilization - inclined line

This paragraph analyses the energy impact as a function of the utilization, considering a cable car line that maintains an hourly capacity of 1,480 passengers per hour in each direction and a horizontal length of 1,500 meters, but which (contrary to what was described in section 5.2, in which the analyzed line was horizontal) has a constant slope of 60%.

With this line, 121 load scenarios were simulated: from 0% to 100%, with a 10% granularity, for the ascent and descent branch fill rates, and the unit energy impact was calculated for each condition as follows. The results are collated in Tab. 12 and graphically represented by Fig. 10.

$$e_{ad} = \frac{P_{a,d}}{C(a+d) \cdot L}$$

where:

- a [%] is the filling factor of the ascent line branch;
- d [%] is the filling factor of the descent line branch;
- $e_{a,d} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{pass} \cdot \text{km}} \right]$ is the specific line consumption, dependent by the filling factors of the two line branches;
- $P_{a,d}$ [kW] is the power output of the plant, output of the SIF software, dependent on the filling factors of the two line branches;
- $C_{a,d} \left[\frac{\text{pass}}{\text{ora} \cdot \text{senso di marcia}} \right]$ is the nominal hourly capacity, defined in the simulations as 1,480 passengers per hour per direction of travel;
- L is the inclined length of the line. Given a horizontal length of 1,500 m and an inclination angle of 60%, the inclined length of the line is 1,749 m.

Contrary to what has been demonstrated in the case of a horizontal line, with an inclined line the total hourly flow rate of the two branches is not sufficient to unambiguously determine the specific energy consumption of the line, which is instead a function of the two independent variables a (fill-

la prima percentuale è il riempimento nel ramo di salita (a) e la seconda percentuale è il riempimento nel ramo di discesa (d).

6. Sistemi ibridi a derivazione funiviaria

Sono precedentemente stati citati i punti di forza della tecnologia funiviaria, che la rendono adatta ad installazioni in contesti urbani, quali il limitato impatto energetico ed ambientale, il ridotto impatto economico in termini di investimento ed esercizio, e facilità di superare ingenti dislivelli e ostacoli antropici e naturali con basso impatto al suolo.

Con particolare riferimento all'ultimo punto, si enfatizza che negli ultimi anni le installazioni funiviarie in ambito urbano hanno trovato applicazione in contesti peculiari e specifici: a titolo di esempio, si citano:

- la London cable car (quadrante di

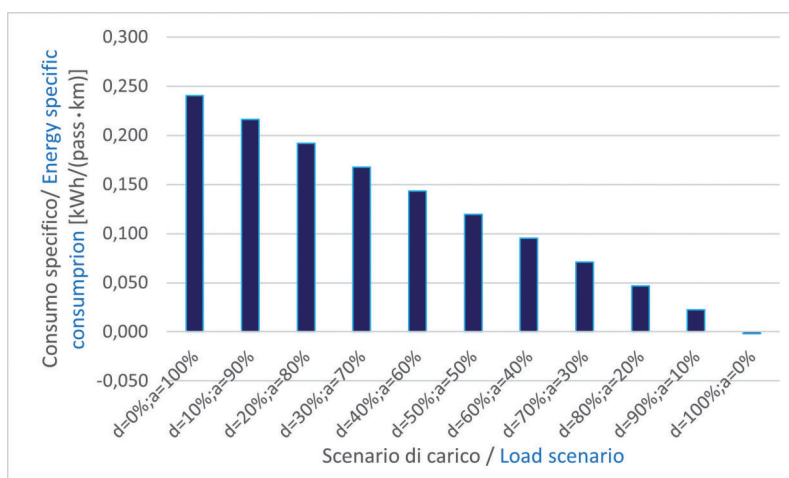


Figura 11 - Consumo specifico [kWh/(pass-km)] in funzione dello scenario di carico, con il vincolo di mantenere una capacità oraria effettiva di 1.480 passeggeri all'ora (cioè la metà della massima capacità oraria complessiva, che è di 1.480 passeggeri all'ora per senso di marcia).

Figure 11 - Specific consumption [kWh/(pass-km)] as a function of the load scenario, with the constraint of maintaining an effective hourly capacity of 1,480 passengers per hour (i.e. half of the maximum total hourly capacity, which is 1,480 passengers per hour per direction of travel).

Tabella 13 – Table 13

Consumo specifico [kWh/(pass-km)] in funzione dello scenario di carico, con il vincolo di mantenere una capacità oraria effettiva di 1.480 passeggeri all'ora (cioè la metà della massima capacità oraria complessiva, che è di 1.480 passeggeri all'ora per senso di marcia)

Specific consumption [kWh/(pass-km)] as a function of the load scenario, with the constraint of maintaining an effective hourly capacity of 1,480 passengers per hour (i.e. half of the maximum total hourly capacity, which is 1,480 passengers per hour in each direction)

| Scenario | Consumo energetico specifico [kWh/(pass-km)] Specific energy consumption [kWh/(pass-km)] |
|--------------|---|
| d=0%; a=100% | 0,241 |
| d=10%; a=90% | 0,216 |
| d=20%; a=80% | 0,192 |
| d=30%; a=70% | 0,168 |
| d=40%; a=60% | 0,144 |
| d=50%; a=50% | 0,119 |
| d=60%; a=40% | 0,095 |
| d=70%; a=30% | 0,071 |
| d=80%; a=20% | 0,047 |
| d=90%; a=10% | 0,023 |
| d=100%; a=0% | -0,002 |

ing factor of the ascent branch) and d (filling factor of the descent branch).

$$e = f(a; d), \text{ not } e = f(a + d)$$

This result is explained by the fact that ascent and descent branch loads make different contributions to the calculation of energy consumption:

- the load in the ascent branch makes a positive contribution in terms of energy consumption, as the greater the load in the ascent branch, the greater the energy required by the system for its movement;
- the load in the descent branch makes a negative contribution in terms of energy consumption, as the greater the load in the descent branch, the more energy is produced internally by the system (through the loss of the gravitational potential energy of the downward vehicles) and does not have to be fed into the system from outside.

In the following Tab. 13 e Fig. 11 the specific energy consumption values for an effective capacity of 1,480 passengers per hour ($a+d=100\%$) are shown, as a function of the pair of values a and d with which this transport capacity is reached, therefore as a function of the distribution of passengers between the two line branches. While in the previously discussed case of a horizontal line, the value of energy consumption was constant as a function of the load distribution in the two branches, with a sloped line, the specific consumption is all the greater the more the ascent branch is loaded.

On the other hand, if an entire cycle is taken into account, id est if the constraint that each passenger travelling in the ascent branch must also travel in the descent branch

Tabella 14 – Table 14

Consumo specifico riferito ad un ciclo in differenti scenari di distribuzione del carico (capacità oraria effettiva = 1.480 passeggeri all'ora per senso di marcia)

Specific consumption related to one cycle under different load distribution scenarios (effective hourly capacity = 1,480 passengers per hour per direction of travel)

| Scenario di ciclo (a_1, d_1) + (a_2, d_2) Cycle Scenario (a_1, d_1) + (a_2, d_2) | e_1 [kWh/ (pass·km)] | e_2 [kWh/ (pass·km)] | $\sum e$ [kWh/ (pass·km)] | Media aritmetica (e) [kWh/(pass·km)] Arithmetic mean (e) [kWh/(pass·km)] |
|---|------------------------------|------------------------------|---------------------------------|---|
| (0%;100%) + (100%;0%) | -0,002 | 0,241 | 0,239 | 0,120 |
| (10%;90%) + (90%;10%) | 0,023 | 0,216 | 0,239 | 0,120 |
| (20%;80%) + (80%;20%) | 0,047 | 0,192 | 0,239 | 0,120 |
| (30%;70%) + (70%;30%) | 0,071 | 0,168 | 0,239 | 0,120 |
| (40%;60%) + (60%;40%) | 0,095 | 0,144 | 0,239 | 0,120 |
| (50%;50%) + (50%;50%) | 0,119 | 0,119 | 0,239 | 0,120 |

- nordovest in Fig. 13), che unisce la penisola di Greenwich ai Royal Docks, attraversando il fiume Tamigi;
- la Teleferic de Montjuic a Barcellona (quadrante di sudest in Fig. 13), localizzata nei pressi del porto industriale della metropoli catalana, collega il parco del Montjuic al castello del Montjuic, superando un ingente dislivello;
 - le reti di impianti aerei a fune Mi Teleferico di La Paz (quadrante di nordest in Fig. 13) e Metrocable di Medellin (quadrante di sudovest in Fig. 13) attraversano sobborghi con elevatissima densità costruttiva e abitativa nei pressi delle due megalopoli sudamericane.

and vice versa is included in the model, the dependence of the specific energy by the load distribution on the two branches is eliminated. The Tab. 14 and the Fig. 12 show the values and the trend of the unit energy consumption for an ascent branch-descent branch cycle (or vice versa), and demonstrate that the sum of the specific energy consumption of the two branches is the same for all load distribution scenarios. In particular, in the first column "cycle scenario" (Tab. 14), the first vector represents the distribution of loads along the cable car line of the first part of the cycle, and the second vector represents the distribution of loads along the line in the second part of the cycle; within each vector, the first percentage is the filling of the ascent branch (a) and the second percentage is the filling of the descent branch (d).

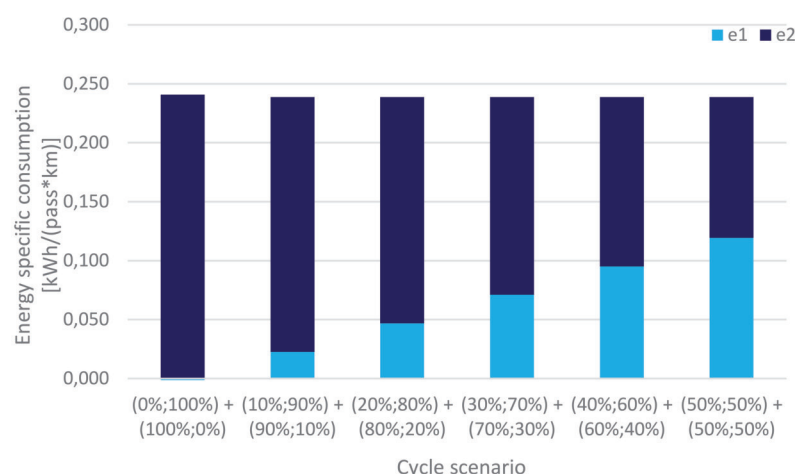


Figura 12 - Consumo specifico riferito ad un ciclo in differenti scenari di distribuzione del carico (capacità oraria effettiva = 1.480 passeggeri all'ora per senso di marcia).

Figure 12 - Specific consumption related to one cycle under different load distribution scenarios (effective hourly capacity = 1,480 passengers per hour per direction of travel).

6. Cable car-derived hybrid systems

The strengths of the cable car technology, which make it suitable for installations in urban contexts, such as its limited energy and environmental impact, its reduced economic impact in terms of investment and operation, and its ease in overcoming large gradients and man-made and natural obstacles with low impact on the ground, have been mentioned above.

With particular reference to the last point, it is emphasized that in recent years, ropeway installations in urban areas have found application in peculiar and specific contexts: by way of example, we cite the following:

- the London cable car (north-west quarter in Fig. 13), which links the Greenwich Peninsula to the Royal Docks, crossing the River Thames;



Figura 13 - Fotografie di installazioni funiviarie in ambito urbano. Dal quadrante in alto a sinistra in senso orario: London cable car (Londra, UK), Mi Teleferico (La Paz, BOL), Teleferic de Montjuic (Barcellona, SPA), Metrocable (Medellin, COL).

Figure 13 - Photographs of cableway installations in urban areas. Clockwise from top left quarter: London cable car (London, UK), Mi Teleferico (La Paz, BOL), Teleferic de Montjuic (Barcelona, SPA), Metrocable (Medellin, COL).

D'altra parte, gli impianti funiviari non hanno trovato ampia applicazione in ambito metropolitano in circostanze diverse da quelle peculiari prima menzionate, in quanto esistono dei vincoli propri della tecnologia che ne limitano la capacità di integrazione nel tessuto urbano e, in definitiva, l'impiego in tali contesti urbani. *In primis*, le linee funiviarie sono normalmente vincolate a seguire tracciati rettilinei, in quanto la fune traente, che trasmette il moto ai veicoli, può difficoltosamente definire angoli in linea; *in secundis*, nonostante l'impatto lungo la linea dell'installazione funiviaria sia minimo e limitato puntualmente ai sostegni, le stazioni hanno relativamente grandi dimensioni, e (soprattutto le stazioni motrici, che ospitano il gruppo motore) possono essere causa di inquinamento rumoroso non trascurabile.

Con l'obiettivo di conservare i punti di forza della tradizionale tecnologia funiviaria e di superarne i limiti, negli ultimi anni si stanno affacciando sul mercato sistemi con tecnologia ibrida.

È questo il caso del sistema CableSmart, sistema sviluppato dalla società di ingegneria italiana Dimensione Ingegnerie con supporto, all'occasione, del Politecnico di Torino (area Trasporti) e la cui descrizione è dettagliata in [1]. Nel sistema CableSmart, come schematizzato in Fig.

- la Teleferic de Montjuic in Barcelona (southeast quarter in Fig. 13), located close to the industrial harbor of the Catalan metropolis, connects the Montjuic park to the Montjuic castle, overcoming a considerable difference in height;
- Mi Teleferico aerial cableway networks in La Paz (north-east quarter in Fig. 13) and Metrocable in Medellin (southwest quarter in Fig. 13) run through suburbs with very high construction and housing density across the two South American megacities.

On the other hand, cable car systems have not found wide application in metropolitan areas in circumstances other than the peculiar ones mentioned above, as there are constraints inherent to the technology that limit their ability to integrate into the urban fabric and, ultimately, their use in such urban contexts. First of all, cableway lines are normally constrained to follow rectilinear paths, as the hauling rope, which transmits motion to the vehicles, can hardly define angles; secondly, although the impact along the line of the cableway installation is minimal and limited to the supports, the stations are relatively large, and (especially the drive stations, which hosts the motor unit) can be the cause of non-negligible noise pollution.

With the aim of preserving the strengths of the traditional ropeway technology and overcoming its limitations, hybrid technology systems have been appearing on the market in recent years.

14, il moto può essere trasmesso al veicolo, di derivazione funiviaria, in due modalità alternative: (i) tramite l'ammorsamento ad una fune traente, in modo del tutto simile ad una tradizionale telecabina; oppure (ii) tramite quattro ruote automotrici installate nelle adiacenze della morsa, in modo non dissimile ad una monorotaia sospesa.

In questo modo, tale sistema è in grado di conciliare i punti di forza della tradizionale tecnologia funiviaria, in termini di facilità di superamento di ingenti dislivelli e ostacoli naturali e antropici con basso impatto al suolo, ai vantaggi tipici di sistemi a rotaia, come la facile integrazione nel tessuto urbano e la possibilità di definire percorsi sinuosi e curve con ridotto raggio di curvatura.

In aggiunta alla sinergia tra punti di forza prima descritta, il sistema CableSmart presenta altri benefici che lo rendono particolarmente adatto all'esercizio in ambiti urbani:

- per alimentare le moto-ruote che garantiscono il moto del veicolo lungo le tratte su rotaia, è accolto a bordo veicolo un pacco batterie. Ciò consente l'elettificazione dei veicoli, che ospitano al loro interno sistemi di comfort termico quali climatizzazione, riscaldamento e condizionamento, sistemi di infotainment e telecamere di sicurezza;
- pei tradizionali impianti funiviari ad ammortamento automatico, nelle stazioni, quando il veicolo non è ammortato alla fune traente e scollega le sue caratteristiche cinematiche da quelle della fune (che si muove costantemente alla velocità della linea, tipicamente 5-6m/s), avanza grazie al contatto con un treno di pneumatici montati nella stazione e collegati tra loro tramite cinghie, che ricevono il movimento dalla fune e lo trasmettono per contatto al veicolo. Tale meccanismo, oltre ad essere energeticamente non ottimale, non permette la completa fermata del veicolo in stazione, caratteristica fondamentale per la completa e comoda fruizione di un sistema di trasporto urbano da parte di tutte le fasce di popolazione. Nel sistema CableSmart, invece, durante il transito in stazione, il moto viene trasferito ai veicoli attraverso le motoruote installate sul veicolo stesso. In questo modo, i veicoli sono in grado di fermarsi completamente in stazione per consentire l'imbarco e lo sbarco dei passeggeri con una modalità ed una interfaccia simili a quelle di un ascensore verticale, consentendo così la comoda e completa fruizione del servizio di trasporto anche a persone con mobilità ridotta, o con valigie, passeggerini...;
- l'eliminazione della complessa catena cinematica prima menzionata, necessaria nella tecnologia funivia-

This is the case of the CableSmart system, a system developed by the Italian engineering company Dimensione Ingegnerie with support, on this occasion, from the Politecnico di Torino (DIATI- transportation department) and whose description is detailed in [1]. In the CableSmart system, as schematized in Fig. 14, motion can be transmitted to the vehicle, derived from a cableway, in two alternative ways: (i) by means of a hauling rope, similarly to a traditional cable car; or (ii) through four self-propelled wheels installed adjacent to the grip, like a suspended monorail.

In this way, this system is able to reconcile the strengths of traditional ropeway technology, in terms of the ease of overcoming large differences in high and natural and anthropic obstacles with a low impact on the ground, with the typical advantages of rail systems, such as easy integration into the urban fabric and the possibility of defining sinuous routes and curves with a small radius of curvature.

In addition to the synergy of strengths described above, the CableSmart system has other benefits that make it particularly suitable for operation in urban environments:

- *in order to power the motorized wheels that ensure the vehicle's motion along the rail segments, a battery pack is installed in the vehicle. This enables the electrification of the vehicles, which accommodate thermal comfort systems such as air conditioning, heating and air conditioning, infotainment systems and security cameras;*
- *in traditional detachable grip cableways, in the stations, when the vehicle is not attached to the hauling rope and disconnects its kinematic characteristics from those of the rope (which moves constantly at the speed of the line, typically 5-6m/s), it moves forward thanks to contact with a set of tires mounted in the station and connected to each other by belts, which receive the movement from the rope and transmit it by contact to the vehicle. This mechanism, in addition to being sub-optimal in terms of energy, does*



Figura 14 - Bozzetto di un'installazione di sistema CableSmart: la linea è disegnata in rosso nella sua parte funiviaria, e in blu nel suo segmento su rotaia.

Figure 14 - Sketch of a CableSmart system installation: the line is red in its cableway segment, and in blue in its rail segment.

ria tradizionale per conferire il moto ai veicoli durante il transito nelle stazioni, consente alla tecnologia CableSmart di diminuire ulteriormente l'impatto energetico ed ambientale dell'installazione.

A tal proposito, viene menzionato nuovamente il già citato [1], che presenta una analisi dettagliata sull'impatto energetico ed ambientale del sistema CableSmart, con particolare enfasi alle sue tratte su rotaia e in cui viene dimostrato che le emissioni specifiche del sistema, in termini di $\text{gCO}_2/(\text{pass}\cdot\text{km})$, nella tratta su rotaia sono circa il 45% in meno rispetto a quelle dei suoi segmenti su fune. Inoltre, viene in [1] proposta una dissertazione rispetto alla sinergia tra un impianto CableSmart e un impianto fotovoltaico con sistema di accumulo energetico tramite batterie, in cui viene riportato che è possibile diminuire l'impatto sulla rete elettrica dell'impianto CableSmart fino al -70% in ambienti particolarmente favorevoli in termini di produzione fotovoltaica e di sincronismo tra produzione e carico come Dubai City.

- Il sistema CableSmart consente la definizione di una vera e propria rete di trasporto: linee su fune e linee su rotaia possono infatti costituire gli archi che uniscono diverse stazioni (nodi) e possono venire attraversate da veicoli che si muovono tra i segmenti senza soluzione di continuità. Inoltre, la relativamente bassa capienza unitaria dei veicoli (6-10 persone) ben si adatta alla customizzazione del viaggio: in fase di imbarco, l'utente può prenotare la fermata attraverso un'interfaccia simile a quella di un ascensore verticale.

Sulla base del sistema CableSmart descritto in questo articolo, oltre che in [1][2][4][5], è stato inaugurato in Svizzera (a Flims- Cantone Grigioni) nel dicembre 2023 il primo sistema di trasporto ibrido a derivazione funiviaria.

7. Analisi dei risultati

La dettagliata analisi del carico energetico relativo ad installazioni funiviarie in diverse condizioni di capacità oraria, di carico e di pendenza ha evidenziato che:

- la funzione tra il consumo specifico "e" e la capacità oraria della linea "C" segue una relazione inversa, dovuta al fatto che, nonostante un aumento della capacità oraria è causa di un appesantimento della linea, in termini di numero di sostegni e numero dei rulli e, quindi, in termini di entità delle forze di attrito e conseguentemente dell'impatto energetico assoluto del sistema, questo incremento è minore rispetto all'aumento di capacità nominale (ed effettiva, in quanto questo risultato è stato ottenuto a parità di fattore di utilizzo della linea, ipotizzato al 100%);
- nel caso di linea orizzontale, la funzione che, a parità di capacità oraria nominale, lega il consumo specifico "e" alla capacità oraria "C" effettiva della linea, è una relazione inversa costantemente minore rispetto all'iperbole vincolata al passaggio per il punto $(C_{C(\text{eff})}=C_{C(\text{nom})})$ relativo all'utilizzo unitario della linea.

not allow the vehicle to come to a complete stop at the station, a fundamental characteristic for the complete and comfortable use of an urban transport system by all segments of the population. In the CableSmart system, on the other hand, during the transit through the station, motion is transferred to the vehicles through the wheels installed on the vehicle itself. In this way, the vehicles are able to stop completely in the station to allow passengers to embark and disembark in a manner and interface similar to that of a vertical lift, thus allowing the comfortable and complete use of the transport service even for people with reduced mobility, or with suitcases, pushchairs, etc;

- *the elimination of the complex kinematic chain mentioned above, which is necessary in traditional ropeway technology to give motion to the vehicles during transit through the stations, allows CableSmart technology to further reduce the energy and environmental impact of the installation.*

In this regard, the already mentioned [1], which presents a detailed analysis of the energy and environmental impact of the CableSmart system, with particular emphasis on its rail segments, shown that the system's specific emissions, in terms of $\text{gCO}_2/(\text{pass}\cdot\text{km})$, in the rail segment are approximately 45% lower than those of its cable car segments. Furthermore, in [1] a dissertation is proposed regarding the synergy between a CableSmart system and a photovoltaic plant with energy storage through batteries, in which it is reported that it is possible to decrease the impact on the electric grid of the CableSmart system by up to -70% in particularly favorable environments in terms of photovoltaic production and synchronism between production and energy load such as Dubai City.

- *The CableSmart system allows the definition of a real transport network: cable car segment rail segment can form the arcs joining different stations (nodes) and can be crossed by vehicles moving seamlessly among the segments. Furthermore, the relatively low unit capacity of the vehicles (6-10 persons) is well suited to customization of the journey: when boarding, the user can book the stop via an interface similar to that of a vertical lift.*

Based on the CableSmart system described in this article, as well as in [1][2][4][5], the first ropeway-derived hybrid transport system was opened in December 2023 in Switzerland (in Flims, Canton Graubünden).

7. Analysis of results

The detailed energy load analysis of cableway installations under different conditions of hourly capacity, load and gradient shown that:

- *the function between the specific consumption "e" and the hourly capacity of line "C" follows an inverse relationship.*

An increase in hourly capacity causes an increase in the line complexity, in terms of number of supports and number of rollers and also in terms of magnitude of the friction forces and of the absolute energy impact of the system. Despite this, the increase of the absolute energy impact of the system is lower than the grow of the nominal capacity (and effective

Tale risultato è dovuto al fatto che il rapporto tra la massa dei passeggeri e quella dei veicoli è nel caso di impianti funiviari relativamente alto, e quindi il contributo, in termini di aumento di forza premente e conseguentemente di attrito, di un aumento dei passeggeri trasportati non è trascurabile.

Inoltre, nel caso di linea orizzontale, il consumo specifico "e" è funzione unicamente del fattore di utilizzo della linea, con insensibilità del modello al modo in cui la linea viene riempita (quindi ai fattori di riempimento dei due rami di linea);

- se la linea è caricata in modo simmetrico, quindi se il fattore di riempimento del ramo ascendente è uguale al fattore di riempimento del ramo discendente, è stata dimostrata la non significatività della relazione tra pendenza e consumo energetico: in tal caso, quindi, l'impatto energetico è indipendente dalla pendenza della linea. Questo esito è legittimato dal fatto che, al lordo degli attriti, un impianto funiviario è un sistema conservativo, in cui l'energia potenziale persa dai veicoli e dai passeggeri nel ramo discendente viene utilizzata per bilanciare energeticamente la linea e per fornire energia potenziale a veicoli e passeggeri nel ramo ascendente, aumentandone la quota.

In modo non dipendente dalla pendenza, quindi, l'energia da immettere nel sistema al fine del funzionamento di una linea funiviaria in cui il numero di passeggeri è uguale nei due rami, è sempre pari a quella necessaria per vincere gli attriti;

- eliminando il vincolo di simmetria nei fattori di riempimento dei due rami, (i) se il ramo ascendente è più carico di quello discendente, esiste una correlazione crescente tra pendenza e consumo energetico; (ii) se invece il ramo discendente è più carico di quello ascendente, maggiore è la pendenza, minore è il consumo energetico. In questo ultimo scenario, per alti valori di pendenza e di sbilanciamento del carico, è possibile definire un consumo energetico negativo: in tal caso, il differenziale di energia potenziale tra il ramo discendente e quello ascendente è maggiore dell'energia che viene complessivamente dissipata in attriti;
- al contrario di quanto descritto per lo scenario orizzontale, quindi, nel caso di linea inclinata, il fattore di riempimento totale della linea, che ingloba entrambi i sensi di marcia, non è sufficiente per definire in modo univoco il consumo energetico dell'installazione funiviaria, ma è necessario esplicitare anche la suddivisione dei passeggeri tra i due rami di linea. Nella condizione generale, quindi, il carico energetico associato all'impianto funiviario è funzione dei due fattori di riempimento, tra loro indipendenti, del ramo di salita "a" e di quello di discesa "d".

Menzionando i pregi e le criticità della tecnologia funiviaria, con particolare enfasi alla potenziale adozione di tali sistemi in contesti urbani, l'articolo ha inoltre ribadito

capacity, as this result was obtained with the same line utilization factor, assumed to be 100%);

- in the case of a horizontal line, the function that, given the same nominal hourly capacity, links the specific consumption "e" to the effective hourly capacity "C" of the line, is an inverse relation constantly smaller than the hyperbolic bound to the point $(C_{C(eff)=C(nom)}; e(C_{C(eff)=C(nom)}))$ relating to the maximum utilization of the line. This result is due to the fact that the ratio of the mass of passengers to the mass of vehicles is relatively high in the case of ropeways, and therefore the contribution, in terms of an increase in the pressing force and consequently in friction, of an increase in carried passengers is not negligible.

Furthermore, in the case of a horizontal line, the specific consumption 'e' is a function solely of the line utilization factor, with the model being insensitive to the way the line is filled (id est the filling factors of the two line branches);

- if the line is symmetrically loaded, id est if the filling factor of the ascending branch is equal to the filling factor of the descent branch, the relationship between slope and energy consumption has been shown to be statistically non-significant: in this case, the energy impact is independent of the slope of the line. This outcome is legitimized by the fact that, gross of friction, a ropeway plant is a conservative system, in which the potential energy lost by vehicles and passengers in the descent branch is used to energetically balance the line and to provide potential energy to vehicles and passengers in the ascent branch, increasing their altitude.

Therefore, in a way that is not dependent on the gradient, the energy that should be fed into the system in order to operate a cableway line in which the number of passengers is the same in both branches is always equal to that required to overcome frictions;

- by eliminating the symmetry constraint in the filling factors of the two branches, (i) if the ascent branch is more loaded than the descent branch, there is an increasing correlation between slope and energy consumption; (ii) on the other hand, if the descent branch is more loaded than the ascent one, the greater the slope, the lower the energy consumption. In this last scenario, for high values of slope and load imbalance, it is possible to define a negative energy consumption: in this case, the potential energy differential between the descent and the ascent branch is greater than the energy that is dissipated in friction overall;
- contrary to what has been described for the horizontal scenario, in the case of a sloped line, the total filling factor of the line, which encompasses both directions of travel, is not sufficient to unambiguously define the energy consumption of the cableway installation, but it is also necessary to make explicit the split of passengers between the two line branches. In the general condition, therefore, the energy load associated with the ropeway installation is a function of the two independent filling factors of the ascent branch "a" and the descent branch "d".

Mentioning the advantages and the criticalities of the ropeway technology, with particular emphasis on the poten-

quanto affermato in [1] in merito a sistemi ibridi a derivazione funiviaria (CableSmart).

Tali sistemi ibridi consentono di superare i punti di debolezza della funivia tradizionale, che non hanno ancora consentito a questa tecnologia di entrare in maniera capillare nel mercato della mobilità urbana. Un sistema monocavo tradizionale, infatti, appare intrinsecamente limitato da alcuni vincoli tecnologici quali l'estrema difficoltà di definire tratti curvi, la relativa complessità delle stazioni e la non elettrificazione dei veicoli, che non consente l'installazione di sistemi di videosorveglianza e sistemi di comfort a bordo cabina. Questi fattori allontanano i tradizionali sistemi funiviari dalle esigenze della domanda e dai contesti urbani, e costituiscono una spiegazione della motivazione per cui i tradizionali sistemi funiviari, nonostante gli indubbi punti di forza in termini di superamento di dislivelli, e di ostacoli antropici e naturali con basso impatto al suolo e basso impatto ambientale ed energetico, non sono ancora adottati frequentemente in contesti urbani.

D'altro canto, il sistema ibrido è in grado di mantenere i punti di forza della tecnologia tradizionale funiviaria e di superarne i limiti. In questo sistema, infatti, il moto può essere trasferito ai veicoli (derivati da quelli funiviari) in due modi:

- attraverso una fune, in modo simile ad una tradizionale funivia. In questi tratti, il veicolo è ammorsato alla fune traente e lo spostamento avviene grazie alla fune. I sistemi ausiliari ed il comfort termico all'interno del veicolo sono comunque garantiti dalle batterie montate a bordo del veicolo stesso.
- Attraverso ruote motorizzate montate nella parte superiore del veicolo, alimentate da batterie installate a bordo. In questi segmenti, il sistema funziona in modo simile a una monorotaia sopraelevata.

Nel tratto in fune, il sistema ibrido mantiene vantaggi e svantaggi di una telecabina tradizionale, mentre nei tratti su rotaia eredita le caratteristiche di un sistema su ruota, ed è quindi in grado di definire percorsi curvilinei e di adattarsi efficacemente ai tessuti urbani.

8. Conclusioni

Gli impatti energetico ed ambientale associati ad impianti funiviari, già descritti in [1][2][4], sono stati in questo articolo più approfonditamente esaminati.

In particolare, le analisi descritte in questo articolo hanno dettagliatamente indagato il consumo energetico specifico [kWh/(pass-km)] e le emissioni specifiche [gCO₂/(pass-km)] correlati ad una telecabina in vari scenari.

Il presente articolo ha proposto un'analisi quantitativa dell'impatto energetico della tecnologia funiviaria, evidenziando come variabili geometriche e di utilizzo influenzino i consumi energetici. Utilizzando il software SIF, si sono simulate le performance di una linea funiviaria urbana che sia coerente la normativa vigente.

tial adoption of such systems in urban contexts, the article also reiterated what was stated in [1] about cable car derived hybrid systems (CableSmart).

Such hybrid systems make it possible to overcome the weaknesses of the traditional cableway, which have not yet allowed this technology to enter into the urban mobility market in a widespread manner. A traditional cable car system, in fact, is intrinsically limited by certain technological constraints such as the extreme difficulty of defining curved stretches, the relative complexity of the stations and the non-electrification of the vehicles, which does not allow the installation of video surveillance and comfort systems on board the cabin. These factors are distancing traditional cableway systems from the needs of the demand and from urban contexts, and constitute an explanation of why traditional cableway systems, despite their undoubted strengths in terms of overcoming gradients and anthropic and natural obstacles with low ground, environmental and energy impact, are still not frequently adopted in urban contexts.

On the other hand, the hybrid system is able to maintain the strengths of traditional ropeway technology while overcoming its limitations. Indeed, in this system, motion can be transferred to vehicles (derived from ropeway vehicles) in two ways:

- *through a rope, similar to a traditional cable car. In these sections, the vehicle is attached to the hauling rope and movement takes place via the cable. The auxiliary systems and thermal comfort inside the vehicle are however ensured by the batteries mounted on board the vehicle.*
- *Through motorized wheels mounted at the top of the vehicle, powered by batteries installed on board. In these segments, the system operates similar to an elevated monorail.*

In the cable car section, the hybrid system retains the advantages and disadvantages of a traditional gondola, while in the rail sections it inherits the characteristics of a wheeled system, and is therefore able to define curved routes and adapt effectively to urban areas and fabric.

8. Conclusions

The energy and environmental impacts associated with ropeway installations, already described in [1][2][4], have been more thoroughly examined in this article.

In particular, the analyses described in this article investigated in detail the specific energy consumption [kWh/(pass-km)] and specific emissions [gCO₂/(pass-km)] related to a cable car plant under various scenarios.

This paper proposed a quantitative analysis of the energy impact of ropeway technology, highlighting how geometric and usage variables influence energy consumption. Using SIF software, the performance of an urban ropeway line was simulated to be consistent with the current Italian regulations.

Si è dapprima simulata una linea orizzontale di lunghezza pari a 1.500 m con riempimento unitario, variandone la capacità nominale da 1.480 a 5.000 passeggeri all'ora per senso di marcia; osservandone una diminuzione del consumo energetico specifico da 0,065 a 0,040 kWh/(pass·km) al crescere della capacità. Un modello di regressione lineare ha permesso di stabilire una relazione inversa statisticamente rilevante tra capacità oraria e consumo specifico energetico, quantificata dalla retta che lega il consumo specifico e all'inverso della capacità nominale $\frac{1}{C}$.

$$e = 0,0293 + 52,7518 \frac{1}{C}$$

Fissando la capacità nominale a 1.480 passeggeri all'ora per senso di marcia, e variando il fattore di riempimento dei due rami del sistema, è emerso come il consumo energetico specifico dipenda in modo inverso dalla somma dei fattori di riempimento, e non -in modo indipendente- dai due fattori di riempimento dei due rami.

Quando la linea è simmetricamente carica, l'analisi ha dimostrato che la pendenza non influisce significativamente sul consumo energetico, in quanto l'intervallo di confidenza del coefficiente angolare della retta di regressione include il valore nullo.

Al contrario, scenari con carichi asimmetrici rivelano che una maggiore inclinazione riduce il consumo energetico se il ramo di discesa è più carico di quello di salita, poiché l'energia potenziale gravitazionale persa dai veicoli, carichi, nel ramo discendente viene reimmessa nel sistema e riutilizzata per ridurre il consumo energetico complessivo. In questo caso, la relazione decrescente tra la pendenza s e il consumo energetico unitario e è modellizzata dalla retta di equazione:

$$e = 0,1297 \frac{\text{kWh}}{\text{pass} \cdot \text{km}} - 0,0097 \frac{\frac{\text{kWh}}{\text{pass} \cdot \text{km}}}{\%} s$$

Viceversa, nel caso in cui il ramo ascendente è più carico di quello discendente, viene dimostrata una statisticamente rilevante relazione lineare crescente tra la pendenza s e l'impatto energetico e , in accordo con l'equazione:

$$e = 0,1236 \frac{\text{kWh}}{\text{pass} \cdot \text{km}} + 0,1236 \frac{\frac{\text{kWh}}{\text{pass} \cdot \text{km}}}{\%} s$$

Infine, l'articolo comprende una descrizione di CableSmart, una tecnologia ibrida a derivazione funiviaria che mira a superare i punti di debolezza della tradizionale tecnologia funiviaria (che non le hanno ancora permesso di avere ampio utilizzo in ambito urbano), mantenendone i punti di forza.

9. Ringraziamenti

Il presente articolo deriva dalla relazione presentata al seminario "Impianti a fune urbani. Progettazione, energia consumata ed impatto, ritorno di esperienze", organizzato dall'Associazione Italiana per l'Ingegneria del Traffico e dei Trasporti (AIIT) con il supporto dell'Ordine degli Ingegneri

Firstly, a horizontal line with a length of 1,500 meters with unitary filling was simulated, varying its nominal capacity from 1,480 to 5,000 passengers per hour per direction; observing a decrease in specific energy consumption from 0.065 to 0.040 kWh/(pass·km). A linear regression model established a statistically significant inverse relationship between hourly capacity and specific energy consumption, quantified by the straight line linking specific consumption and the inverse of nominal capacity $\frac{1}{C}$.

$$e = 0,0293 + 52,7518 \frac{1}{C}$$

By setting the nominal capacity at 1,480 passengers per hour per direction of travel and varying the filling factor of the two branches of the system, it was apparent that the specific energy consumption depends inversely on the sum of the filling factors, and not -independently- on the two filling factors of the two branches.

When the line is symmetrically loaded, the analysis showed that the slope does not significantly affect the energy consumption, as the confidence interval of the angular coefficient of the regression line includes the null value.

Quite the opposite, the analysis of scenarios with asymmetrical loads reveal that a greater slope reduces energy consumption if the descent branch is more heavily loaded than the ascent branch, since the gravitational potential energy lost by the loaded vehicles in the descent branch is fed back into the system and reused to reduce overall energy consumption. In this case, the decreasing relationship between the slope s and the unit energy consumption e is modelled by the line described by the equation:

$$e = 0,1297 \frac{\text{kWh}}{\text{pass} \cdot \text{km}} - 0,0097 \frac{\frac{\text{kWh}}{\text{pass} \cdot \text{km}}}{\%} s$$

Conversely, in the case where the ascent branch is more heavily loaded than the descent one, a statistically significant increasing linear relationship is demonstrated between the slope s and the energy impact e , in accordance with the equation:

$$e = 0,1236 \frac{\text{kWh}}{\text{pass} \cdot \text{km}} + 0,1236 \frac{\frac{\text{kWh}}{\text{pass} \cdot \text{km}}}{\%} s$$

Finally, the article includes a description of CableSmart, a cableway-derived hybrid technology that aims to overcome the weaknesses of traditional cable car technology (which have not yet allowed it to be widely used in urban areas) while maintaining its strengths.

9. Acknowledgements

This article derives from the report presented at the seminar "Impianti a fune urbani. Progettazione, energia consumata ed impatto, ritorno di esperienze / Urban ropeways. Design, consumed energy and impact, return of experiences", organized by the Italian Association for Traffic and Transport Engineering (Associazione Italiana per l'Ingegneria del Traffico e dei Trasporti, AIIT) with the support of the Order of Engineers of the Province of Turin and under the

ri della Provincia di Torino e sotto l'egida del Collegio degli Ingegneri Ferroviari Italiani (CIFI) in data 10.11.2023 presso l'Unione Industriali di Torino.

aegis of the College of Italian Railway Engineers (Collegio degli Ingegneri Ferroviari Italiani CIFI) on 11.10.2023 at the Industrial Union of Turin.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] BAZZOLO S., BLENGINI S., DALLA CHIARA B. (2019), "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"; Ingegneria Ferroviaria; dicembre.
- [2] AFFATATO M., BLENGINI S., DALLA CHIARA B. (2015), "Automated People Movers with rope traction: engineering and modelling an innovative hybrid solution to optimise energy use / Automated People Mover con trazione a fune: progettazione e modellizzazione di una soluzione ibrida innovativa finalizzata al risparmio energetico"; Ingegneria Ferroviaria; dicembre.
- [3] FICKERT L., ZHANG Z., QIAN C., LUO Y. (2018), "Discussion on the energy efficiency and electrotechnical questions of urban cable car system"; Proceedings of the 3rd International Conference on Electrical and Information Technologies for Rail Transportation (EITRT) 2017; marzo.
- [4] NAVONE M., DALLA CHIARA B., BLENGINI S., VAIR E. (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; settembre.
- [5] BAZZOLO S., DALLA CHIARA B. (supervisor), BLENGINI S. (supervisor) (2023), PhD thesis "Cable driven innovative systems for urban transport: engineering, design, and energy consumption"; Politecnico di Torino- DIATI; giugno.
- [6] PETRUCELLI U., FABRIZIO D. (2023), "Regulatory, technological and operational innovations in cableway transport / Innovazioni normative, tecnologiche ed operative nei trasporti a fune "; Ingegneria Ferroviaria; marzo.
- [7] United Nations Population Fund (2023), "State of world population 2023- 8 billion lives, infinite possibilities: the case for rights and choices", Aprile.
- [8] DALLA CHIARA B. (2020), Appunti del corso di dottorato "Suitable transport systems"; Diati-Politecnico di Torino.
- [9] European Court of Auditors (2020), "Special report 06/2020- Sustainable urban mobility in the EU: no substantial improvement is possible without member states' commitment".
- [10] Inrix (2018), "INRIX Roadway Analytics".
- [11] European Environment Agency (2022), Article "Premature deaths due to air pollution continue to fall in the EU. more efforts needed to deliver a toxic-free environment".
- [12] European Commission; "EU Transport in figures – Statistical Pocketbook"; 2019
- [13] C2ES- Center for climate and energy solutions (2023), article "global emissions"; website "https://www.c2es.org/content/international-emissions/"; consulted in November.
- [14] EPA- United States Environmental Protection Agency (2023), article "Greenhouse gas emissions from a typical passenger vehicle".
- [15] Parlamento Europeo (2023), articolo "Emissioni di gas serra nell'UE per Paese e settore: infografica"; 15.03.2018, ultimo aggiornamento: 28.03.2023.
- [16] ISTAT- Istituto Nazionale di Statistica (2023), comunicato stampa "Incidenti stradali in Italia, anno 2022".
- [17] European Commission (2023), article "Road safety in the EU: fatalities below pre-pandemic levels but progress remains too slow".
- [18] National Geographic (2019), "Cities- ideas for a brighter future"; National Geographic- special issue 04.2019; April.
- [19] Unipol Sai Assicurazioni (2019), comunicato "osservatorio Unipol Sai sulle abitudini di guida degli italiani nel 2018 in seguito all'analisi dei dati delle scatole nere installate nelle automobili".
- [20] UNI; UNI /TR 11735:2018 "Linee guida per la progettazione dei sistemi di trasporto persone ad automazione integrale con trazione a fune".
- [21] Parlamento Europeo (2016), Briefing EU legislation in progress "Cableways installations- Proposal for a new regulation".
- [22] Enel (2022), "Bilancio sostenibilità 2022- Le performance di Enel nella lotta al cambiamento climatico"; 2022
- [23] ABA (American bus association) foundation (2019), "Updated comparison of energy use & CO₂ emissions from different transportation modes".
- [24] VITALI V. (2022), "C.D.P. Software per verifica linea monofuni (tipologie: morsa fissa, automatica, puls. e telemix), realize 0110"; giugno.
- [25] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti (2021), "Decreto Dirigenziale 172/2021", 18.06.2021.