



Scelta multi-criteri fra sistemi di trasporto urbani a guida vincolata: un approccio alla mobilità sostenibile

Multi-criteria selection of urban guided transport systems: a sustainable mobility approach

Konstantina ANASTASIADOU ^(*)
 Nikolaos DEMIRIDIS ^(*)
 Christos PYRGIDIS ^(*)
 Stefano RICCI ^(**)

Sommario - Oggi più che mai i decisori sono alla ricerca di soluzioni volte a dissuadere l'uso dell'auto privata e a promuovere il trasporto pubblico; non sorprende che i sistemi di trasporto urbano a guida vincolata emergano come la soluzione ideale. Il quadro proposto in questo articolo è utile a selezionare il sistema di trasporto urbano a guida vincolata più adatto per determinate aree. Si basa su una rassegna esaustiva della letteratura. Il nostro approccio prende in considerazione principi di mobilità sostenibile in modo olistico, in base a criteri economici, sociali, ambientali, operativi e tecnici, con lo scopo di valutare comparativamente i sistemi di tram, metropolitana, monorotaia e *Bus Rapid Transit* (BRT). Basato su un sistema di classificazione dei criteri di ponderazione e di valutazione delle alternative, applicabile a ciascun criterio, e valutato da un gruppo di esperti, il quadro proposto prende effettivamente in considerazione le complessità dell'area di studio in questione, senza introdurre elementi di soggettività e indeterminazione dei risultati nel processo di valutazione.

1. Introduzione

Negli ultimi decenni, la pianificazione dei trasporti nel quadro della mobilità sostenibile è stata all'avanguardia a livello scientifico e istituzionale. I problemi di mobilità sono aumentati fino a diventare sempre più intensi nelle aree urbane a causa della sovrappopolazione; ne consegue una domanda sempre crescente di soluzioni di mobilità che affrontino efficacemente la congestione, il rumore, l'inquinamento atmosferico, le emissioni di gas a effetto serra, il consumo di energia e l'intrusione visiva, per citarne solo alcuni.

“La sfida di far fronte in modo efficace alla crescente domanda di mobilità, al minor costo economico, sociale e ambientale possibile per oggi e per il futuro, racchiude l'o-

Summary - Today, more than ever, decision-makers are at the lookout for solutions aimed at dissuading private car use and promoting public transportation; unsurprisingly, urban guided transport systems emerge as the ideal solution. The framework proposed in this paper allows for selecting the most suitable urban guided transport system for given areas. It is based on exhaustive literature review. Our approach adopts sustainable mobility principles at its core assessing holistically what is relevant for economic, social, environmental, operational and technical criteria for comparatively appraising tram, metro, monorail and *Bus Rapid Transit* (BRT) systems. Underpinned by a ranking system for criteria weighing and alternatives evaluation, as applicable to each criterion, and scored by a panel of experts, the proposed framework effectively considers the intricacies of the study area into question, eliminating results subjectivity and vagueness in the assessment process.

1. Introduction

Over the last decades, transport planning within the framework of sustainable mobility, has been at the forefront of both scientific and institutional focus. Mobility problems have risen to become even more intense in urban areas owed to overpopulation; hence resulting in an ever-increasing demand for mobility solutions that effectively tackle congestion, noise, air pollution, greenhouse gas emissions, energy consumption and visual intrusion, to name only a few.

“The challenge of effectively coping with the growing mobility demand, at the least possible economic, social, and environmental cost for today and the future, comprises the main goal of sustainable transport policy over the last three decades” [1][2].

^(*) Università Aristotele di Salonicco.

^(**) Sapienza University of Rome.

^(*) Aristotle University of Thessaloniki.

^(**) Sapienza University of Rome.

biiettivo principale della politica dei trasporti sostenibile negli ultimi tre decenni” [1][2].

Scoraggiare l'uso dell'automobile privata e promuovere il trasporto pubblico costituiscono principi fondamentali delle politiche di mobilità sostenibile; non sorprende che i sistemi di trasporto urbano di massa guidati siano le soluzioni più importanti per affrontare le sfide della mobilità urbana che le società moderne devono attualmente affrontare.

Per “sistemi di trasporto urbano di massa a guida vincolata”, si intendono i sistemi di trasporto terrestre più consolidati lungo un corridoio dedicato a infrastruttura fissa, vale a dire: tram, metropolitana (pesante e leggera), monorotaia e *Bus Rapid Transit* (BRT). In generale, i primi tre rientrano nell'ambito dei “sistemi ferroviari” e i BRT nei più convenzionali sistemi stradali [3]. La crescita della popolazione e l'urbanizzazione hanno stimolato negli ultimi anni un continuo e rapido aumento del numero di sistemi di trasporto urbano di massa a guida vincolata commissionati a livello mondiale [4]. Più di recente, gli *Automated People Mover* (APM), anche nella versione a fune, hanno iniziato a coprire segmenti di domanda non trascurabili in varie aree urbane. Tuttavia, essi non sono incluse in questa analisi comparativa a causa della mancanza di diffuse applicazioni per la raccolta di dati consolidati. I tram sembrano essere più popolari in Europa; le metropolitane, in particolare le monorotaie, si incontrano più spesso in Asia, i BRT in Sud America. Negli ultimi dieci anni sono stati costruiti 83 sistemi di tram, 53 sistemi di metropolitane e 6 sistemi di monorotaia, mentre il numero di sistemi BRT nello stesso periodo è triplicato [4][5].

La scelta del sistema di trasporto a guida vincolata più appropriato per una data area è un'impresa complessa:

- l'integrazione delle infrastrutture all'interno dell'ambiente urbano pone intrinsecamente importanti sfide di progettazione, costruzione e funzionamento per i soggetti interessati al progetto;
- i sistemi di mobilità sono caratterizzati da sfide tecniche e operative molto diverse tra loro; con costi e tempi per la costruzione in gran parte variabili tra loro;
- i parametri di selezione che influiscono sul sistema di trasporto più appropriato per progetto sono numerosi e la quantificazione di alcuni di essi è tutt'altro che semplice.

Nonostante la moltitudine di contesti esistenti, che contribuiscono positivamente alla disponibilità di strumenti per i decisori delle pubbliche istituzioni, la maggior parte è spesso lontana dall'essere completa e/o sufficientemente dettagliata per consentire di affrontare efficacemente la sfida appena menzionata. Ciò è ulteriormente aggravato dalla dimensione del campo di applicazione in cui tali strumenti potrebbero aggiungere un valore reale.

Gli studi di fattibilità, strumento di sostegno fondamentale, ampiamente adottato nel quadro dei progetti di trasporto e in particolare dei sistemi di trasporto urbano, richiedono la cosiddetta “verifica delle finalità tecnica e operativa” durante la loro fase iniziale [3]. Tuttavia i parametri

Discouragement of private car use and promotion of public transport constitute fundamental principles behind sustainable mobility policies; rather unsurprisingly, urban guided mass transport systems are the most prominent solutions to tackle urban mobility challenges modern societies currently face.

By ‘urban guided mass transport systems’, we mean the most consolidated terrestrial means of transport along a dedicated corridor, i.e., a fixed permanent way, namely: the tramway, metro (heavy and light), monorail and Bus Rapid Transit (BRT). Generally, the first three fall under ‘railway systems’ with BRT falling under, more conventional, ‘road systems’ [3]. Population growth and urbanisation has spurred in recent years a continuous and rapid increase in the number of urban guided mass transport systems commissioned worldwide [4]. More recently Automated People Movers (APMs) and cable-drive automated people movers started to cover not negligible demand segments in various urban areas. Nevertheless, they are not included in this comparative analysis due to lack of extensive applications for consolidated data collection. Trams appear to be most popular in Europe; metros, and particularly monorails, are most often encountered in Asia; whilst BRTs in South America. Over the last ten years, 83 tram systems, 53 metro systems and 6 monorail systems have been implemented, while the number of BRT systems has tripled within the same period [4][5].

Selecting the most appropriate guided transport system for any given area is a complex endeavour:

- *infrastructure integration within the urban environment inherently poses significant design, construction, and operational challenges to project stakeholders;*
- *mobility systems are characterized by their very own, largely different technical and operational challenges; with cost and time for construction also largely varying between them;*
- *selection parameters affecting the most appropriate transport system per project case are numerous with quantification of certain amongst them being far from straightforward.*

Despite a multitude of existing frameworks, positively contributing to the decision-making arsenal of institutional authorities, most are often far from being comprehensive and/or sufficiently detailed to enable the challenge just mentioned to be effectively addressed. This is further exacerbated by the sheer size of the application field where such toolboxes could be adding real value.

Feasibility studies, a fundamental support tool, broadly adopted within the framework of transport projects and urban transport systems in particular, require what is widely known as “technical and operational purposefulness verification” during their initial stage [3]; yet parameters and approach, in our experience, largely vary from one administration and/or project to the next. Similarly, Multi-Criteria

e l'approccio, secondo la nostra esperienza, variano ampiamente da un'amministrazione e/o da un progetto all'altro. Allo stesso modo, l'Analisi Multi-Criterio (MCA) come metodo autonomo, indipendentemente dal livello di approssimazione nelle quantità e nei criteri utilizzati per la valutazione qualitativa delle alternative, è spesso intrinsecamente ostacolata dalla sfida di quantificare accuratamente le dimensioni del problema che sono complesse o addirittura impossibili da tradurre in termini quantitativi e, ancor più, monetari (esempi evidenti in questo settore sono ad esempio intrusione visiva, comfort di viaggio, ecc.).

Di conseguenza, i decisori pubblici e privati, spesso incaricati di selezionare il sistema di trasporto più appropriato per una data area, vengono sempre messi in difficoltà. È pertanto necessaria una metodologia di sostegno decisionale che consenta di valutare globalmente le possibili alternative del sistema di trasporto per una data area, tenendo conto di tutti i parametri cruciali dell'analisi. Ciò è ancora più vero se si considera che la sostenibilità della mobilità e dei sistemi urbani è divenuta un imperativo sociale e che i principi della mobilità sostenibile sostenuti nel quadro delle MCA, che consente una valutazione comparativa di tram, metro, monorotaia e BRT, è carente per ogni area. La ricerca documentata in questo articolo mira a colmare questa lacuna.

2. Scopo e campo di applicazione

Nell'ambito degli attuali lavori di ricerca, è stata messa a punto e proposta una metodologia a sostegno delle decisioni che consenta la scelta ottimale di un sistema di trasporto urbano a guida vincolata. Il quadro di valutazione si basa su criteri che abbracciano sei grandi principi prestazionali (economici, sociali, ambientali, tecnici, operativi e strategici) intrinsecamente legati alla nostra definizione di mobilità urbana sostenibile. La metodologia si basa sulle MCA, integrando efficacemente gli aspetti degli studi di fattibilità tradizionali, di cui sopra [3], nonché l'Analisi Costi-Benefici (CBA) convenzionale. Il metodo proposto, basato su un sistema di classificazione dei criteri di ponderazione e sulla valutazione delle alternative effettuata da un gruppo di esperti, considera efficacemente le complessità dell'area di studio in questione, eliminando la soggettività dei risultati e l'indeterminatezza del processo. Essa contribuisce ad ottenere livelli più elevati di trasparenza, all'attenuazione potenziale dei conflitti e alla smussatura del processo di selezione di un sistema di trasporto urbano di massa a guida vincolata.

Il quadro proposto può essere applicato a qualsiasi area di studio in cui ha senso l'attuazione dei sistemi di trasporto citati (tram, metropolitana, monorotaia e BRT) in linea con le informazioni presentate in questo articolo. L'insieme dei criteri utilizzati e raccomandati per l'applicazione in questa ricerca può essere adattato per soddisfare le esigenze specifiche dei progetti e le esigenze particolari dei decisori, dei responsabili politici e dei pianificatori dei trasporti e degli urbanisti, ampliando così il suo campo di applicazione.

Analysis (MCA) as a stand-alone method, despite what is a higher level of granularity often seen in both the quantum and form of criteria used to allow for the qualitative evaluation of alternatives, is often inherently hampered by the challenge of accurately quantifying problem dimensions that are either too difficult or even impossible to translate into quantitative, and even further, monetary terms (stark examples in this area being for instance visual intrusion, travel comfort, etc.).

As a result, public and private decision-makers, often tasked with selecting the most appropriate transport system for any given area are always being put on the spot. A decision-aiding methodology allowing for holistically evaluating potential transport system alternatives for any given area whilst considering all crucial parameters in the analysis is therefore required. This is even more the case nowadays considering sustainability of mobility and urban schemes has become a social imperative and, a lack of sound in our knowledge, sustainable mobility principles backed MCA framework allowing for comparatively assessing tram, metro, monorail and BRT systems for any given area. The research documented in this paper aims at filling this gap.

2. Scope and field of application

In the present research work, a decision-aiding methodology allowing for the optimum selection of an urban guided transport system is devised and proposed. The assessment framework employs criteria spanning across six large performance tenets (economic, social, environmental, technical, operational, and strategic planning) inherently linked to our definition of sustainable urban mobility. The methodology bases on MCA, effectively integrating aspects of traditional feasibility studies, as enumerated above [3], as well as conventional Cost-Benefit Analysis (CBA). Underpinned by a ranking system for criteria weighting and alternatives evaluation scored by a panel of experts, the proposed method effectively considers the intricacies of the study area into question, eliminating results subjectivity and vagueness in the process. It contributes to higher levels of transparency and the potential easing of conflicts and smoothening of the overall process during selection of an urban guided mass transport system.

The proposed framework can be applied to any study area where implementation of the transport systems quoted (tram, metro, monorail and BRT) makes sense in line with the information presented in this paper. The pool of criteria used and recommended for application in this research may be adapted to serve specific project requirements and the particular needs of decision-makers, policy-makers and transport and urban planners hence expanding its field of application.

3. Sistemi di trasporto urbano di massa guidati e mobilità sostenibile

3.1. Sistemi di trasporto a guida vincolata - Attributi chiave e categorizzazione

Le caratteristiche di base dei sistemi di trasporto urbano a guida vincolata di massa studiate nel presente articolo sono riassunte nella Tab. 1.

Dato che il lavoro di questo articolo copre solo percorsi del sistema di trasporto di massa guidato "da punto a punto" non superiori a 40 km (solo andata), non sono state prese in considerazione alternative ai sistemi di cui sopra, come il tram-treno e le ferrovie suburbane.

3.2. Il tram moderno - Caratteristiche tecniche e operative di base

Il tram moderno è un veicolo elettrico a ruote d'acciaio, che corre quasi esclusivamente allo stesso livello di strade urbane o suburbane. Esso condivide la stessa infrastruttura con il resto del traffico stradale, viaggia su un'infrastruttura fissa o su una corsia riservata (protetta), situata su un unico lato, su due lati opposti o al centro di una strada. I tram utilizzano tipicamente due binari specializzati (doppio binario), costruiti con rotaie scanalate incorporate nella pavimentazione o con rotaie convenzionali a fondo piatto [3].

I sistemi tranviari sono generalmente il mezzo di trasporto prescelto [3]:

- quando la domanda di trasporto è relativamente bassa (10.000 - 15.000 passeggeri/ora/direzione);
- quando si cerca di rigenerare/aggiornare un'area e, in generale, quando si desidera mantenere l'uso del territorio esistente;
- per le città che devono far fronte a maggiori sfide in materia di inquinamento atmosferico;
- quando vi è una forte domanda di trasporto (> 10.000 passeggeri/ora/direzione) e il sottosuolo o la mancanza di finanziamenti possono ostacolare l'attuazione di una soluzione sotterranea.

I tram sono l'unico mezzo di trasporto pubblico urbano che può sostituire efficacemente l'uso dell'auto privata all'interno di un dato corridoio, in competizione con le automobili nelle aree servite, soddisfacendo e talvolta aumentando la domanda. Ciò si ottiene principalmente integrando il corridoio tramviario lungo le strade esistenti, riducendo in modo sostanziale la capacità stradale e lo spazio di parcheggio per le auto di proprietà privata.

Nella nostra esperienza, l'implementazione di un sistema tranviario può essere politicamente il modo più semplice per rivendicare una corsia dedicata al trasporto pubblico in un dato spazio urbano. Inoltre, essa facilita l'applicazione della pedonalizzazione nelle città dotate di sistemi tranviari, che, secondo la nostra esperienza, possono spesso subire l'opposizione pubblica e rappresentare sfide politiche per i decisori istituzionali.

3. Urban guided mass transport systems and sustainable mobility

3.1. Guided transport systems - Key attributes and categorisation

The basic characteristics of urban guided mass transport systems studied in the present paper are summarized in Tab. 1.

Given that the work in this paper only covers 'point-to-point' guided mass transport system routes not exceeding 40km (one way), alternatives to the above systems such as the tram-train and suburban railways have not been considered nor are being examined.

3.2. The modern tramway - Basic technical and operational characteristics

The modern tramway is a steel wheel electric train, running almost exclusively at grade along urban or suburban roads. It shares the same infrastructure as the rest of the road traffic, travels on a specially built right-of-way or a segregated (protected) lane, located at a single side, two opposite sides or in the middle of a road. Tramways typically use two, one-way traffic lines (double track), which are constructed either with grooved rails embedded in the pavement or with conventional flat bottom rails [3].

Tramway systems are generally the selected means of transport [3]:

- *when there is relatively low demand for travel ($\leq 10,000$ - 15,000 passengers/h/direction);*
- *when it is sought to regenerate/upgrade an area and, generally, where it is desired to maintain the existing land use;*
- *for cities facing increased air pollution challenges;*
- *when there is a high demand for travel (> 10,000 passengers/h/direction) and the subsoil or lack of funding may impede implementation of an underground solution.*

Trams are the only urban public transport mode that may effectively replace private car use within a given right-of-way, ostracising cars from areas trams serve, whilst still satisfying and even increasing demand. This is mainly achieved by integrating the tramway corridor along existing roads, thereby substantially reducing both street capacity and parking space for privately owned cars.

In our experience, implementing a tramway system may be politically the easiest way to 'claim' a dedicated lane for public transport in a given urban space. In addition, it makes it easier to enforce decisions in relation to pedestrian exclusive use in cities featuring tramway systems, which, in our experience, can often suffer public opposition and political challenges for institutional stakeholders.

Tabella 1 – Table 1

Principali caratteristiche tecniche e operative dei sistemi di trasporto urbano di massa guidati [3][5][6][7][8][9][10][11]
Main technical and operational characteristics of urban guided mass transport systems [3][5][6][7][8][9][10][11]

Caratteristiche tecniche e operative <i>Technical and operational characteristics</i>	Metro <i>Metro</i>	Tram (uso urbano) <i>Tramway (urban use)</i>	Monorotaia (uso urbano) <i>Monorail (urban use)</i>	BRT
Lunghezza del percorso (km) <i>Route length (km)</i>	10 - 40	5 - 20	5 - 50	3 - 30
Distanza tra fermate successive (m) <i>Distance between successive stops (m)</i>	500 - 1.000	400 - 600	800 - 1.500	350 - 600
Velocità commerciale (km/h) <i>Commercial speed (km/h)</i>	30 - 40	15 - 25	15 - 40	18 - 20
Pendenza longitudinale massima (%) <i>Maximum longitudinal gradient (%)</i>	5	8	20	8
Distanziamento temporale <i>Headway</i>	< 15 min (2-8 min. Min Distanziamento temporale: 60 s) < 15 min (2-8 min. Min headway: 60 s)	< 20 min (5-15 min. Min Distanziamento temporale: 90 s) < 20 min (5-15 min. Min headway: 90 s)	< 20 min (3-15 min. Min Distanziamento temporale: 60 s) < 20 min (3-15 min. Min headway: 60 s)	< 30 min (3-15 min. Min Distanziamento temporale: 20 s) < 30 min (3-15 min. Min headway: 20 s)
Portata massima (passeggeri/ora/direzione) <i>Maximum flow (passengers/hour/direction)</i>	45.000	15.000	Sistemi piccoli: 2.000 Sistemi compatti: 4.800 Grandi impianti: 12.500 (20.000 in alcuni casi) <i>Small systems: 2,000 Compact systems: 4,800 Large systems: 12,500 (20,000 in some cases)</i>	15.000
Integrazione rispetto alla superficie territoriale <i>Integration relative to ground surface</i>	Integrazione sotterranea per la maggior parte del percorso <i>Underground integration for the biggest part of the route</i>	Integrazione sul campo per la maggior parte del percorso <i>On the ground integration for the biggest part of the route</i>	Integrazione principalmente sopraelevata <i>Mainly over ground integration</i>	Integrazione a raso <i>On the ground integration</i>
Velocità massima di marcia (km/h) <i>Maximum running speed (km/h)</i>	90 - 100 (120)	80 - 90	60 - 100	70 - 80
Raggio minimo di allineamento orizzontale (m) <i>Minimum horizontal alignment radius (m)</i>	150	25	45	90
Presa di terra (m) <i>Land take (m)</i>	<i>Underground</i>	6 - 7	2 - 3	7 - 8
Tempo di costruzione (anni) (lunghezza di 10 km) <i>Construction time (years) (length of 10 km)</i>	5 - 10	2	2	1 - 2
Costi di attuazione (milioni di EUR/km di binario) dati 2014 (infrastruttura e materiale rotabile, doppio binario) <i>Implementation cost (MEUR/track km) 2014 data (Infrastructure and rolling stock, double track)</i>	70 - 140	15 - 35	30 - 90	3 - 20

3.3. La metropolitana - Caratteristiche tecniche e operative di base

Le metropolitane sono sistemi di trasporto guidati che funzionano prevalentemente a trazione elettrica e impiegano ruote tradizionali in acciaio e, occasionalmente, pneumatici in gomma. Le metropolitane sono in gran parte sotterranee e sono sempre separate dal traffico stradale e pedonale [3].

In base alla loro capacità di trasporto, le metropolitane possono essere distinte in pesanti o leggere.

Le metropolitane possono generalmente essere utilizzate come mezzi di trasporto in città con una popolazione superiore a un milione di abitanti e in cui [3]:

- c'è una forte domanda di trasporto (> 10.000 passeggeri/ora/direzione);
- vi è un evidente problema di qualità dell'aria;
- altri sistemi di trasporto pubblico disponibili (ad esempio gli autobus) operano oltre la capacità e, nonostante eventuali miglioramenti (ad esempio campi di percorso o utilizzo di veicoli con capacità superiore), non riescono ancora a soddisfare la domanda attuale con un buon livello di servizio;
- ci sono spazi disponibili nella periferia della città per fornire terminali per il sistema stesso (ad esempio per la manutenzione, il rimessaggio, ecc.) e, idealmente, la creazione di aree di parcheggio e strutture intermodali che promuovono l'uso del trasporto pubblico.

Dal punto di vista ingegneristico, i sistemi metropolitani sono progetti molto complessi e impegnativi che incrementano la complessità già insita in altri sistemi di trasporto guidati, come i tram.

3.4. La monorotaia - Caratteristiche tecniche e operative di base

La monorotaia è un sistema di trasporto passeggeri leggero su rotaia elettrificato. Tipicamente, è formato da un piccolo numero di veicoli (2-6 e raramente fino a 8) e, nella maggior parte dei casi, opera su ruote di gomma, su un'infrastruttura fissa. La guida è assicurata da una trave, che sopporta i carichi, guida e sostiene i veicoli. Nella maggior parte dei casi, l'infrastruttura è sopraelevata, ma le monorotaie possono anche funzionare a livello stradale, sotto il livello stradale o nei tunnel sotterranei per parte dei loro percorsi.

In generale, le monorotaie sono appropriate nelle seguenti circostanze [3]:

- se richieste per fornire un servizio di trasporto ad alta capacità in aree ristrette, ad esempio all'interno di parchi di divertimento, zoo e così via, dove molti di questi sistemi sono stati originariamente situati;
- per il trasporto di passeggeri su piccole distanze e in zone che presentano attrazioni turistiche;
- per collegare aree urbane separate da una barriera na-

3.3. The metro - Basic technical and operational characteristics

Metros are guided transport systems operating mainly by means of traditional steel wheeled and occasionally by rubber-tyre, with electric traction. Metros run largely underground and are always grade-separated from the rest of the urban road and pedestrian traffic [3].

Based on their transport capacity, metros may be distinguished into heavy or light.

Metros may generally fit as transport modes in cities with populations over one million inhabitants and where [3]:

- *there is a high demand for travel (> 10,000 passengers/hour/direction);*
- *there is a clear issue of air quality in a given city or region;*
- *other available public transport systems (e.g., buses) operate in overcapacity and despite any improvements (e.g. re-routing or use of higher capacity vehicles), they still fail to meet the current demand in offering a good level of service;*
- *there are spaces available in the city's periphery for providing terminals for the system itself (e.g., for maintenance, shunting etc.) and ideally the creation of parking areas and intermodal facilities that promote public transport use.*

From an engineering perspective, metro systems are very complex and challenging projects exacerbating complexity already inherent in other guided transport systems e.g., tramways.

3.4. The monorail - Basic technical and operational characteristics

The monorail is an electrified light rail passenger transport system. Typically, it is formed of a small number of vehicles (2-6 and rarely up to 8) and, in most cases, it operates on rubber-tyre wheels, on a permanent way (guideway). The guideway is essentially a beam, which takes over the traffic loads and guides and supports vehicles. In most cases, the guideway is elevated, but monorails may also run at grade, below grade or in subway tunnels for sections of their routes.

Generally, monorails are appropriate in the following circumstances [3]:

- *when required to provide high-capacity transport service in recreational areas e.g., within amusement parks, zoos and so on where numerous of these systems have been originally located;*
- *for carrying passengers over small distances and in areas that feature tourist attractions;*
- *for linking urban areas separated by a natural barrier*

turale che ostacola fisicamente il collegamento diretto da punto a punto (ad esempio un corso d'acqua);

- in aree sensibili dal punto di vista ambientale, dove vi è una forte domanda di trasporto e dove non è possibile integrare una rete ferroviaria di superficie o sotterranea.

Negli ultimi anni, l'uso di monorotaie come trasporto pubblico urbano ad alta capacità è in aumento: si trovano in aeroporti, centri commerciali molto frequentati e così via, soprattutto al di fuori del continente europeo. La capacità di trasporto del sistema monorotaia dipende dalle dimensioni e dalla frequenza. È possibile raggiungere una capacità massima di 20.000-25.000 passeggeri/ora/direzione (sulla linea 15 della monorotaia di San Paolo, in Brasile, viene utilizzato un treno di 8 veicoli con una capacità ferroviaria di 1.000 passeggeri, raggiungendo una capacità di sistema molto elevata) [3].

3.5. Il BRT - Caratteristiche tecniche e operative di base

Secondo la *Federal Transit Administration* degli Stati Uniti, il "Bus Rapid Transit (BRT) è un sistema di trasporto basato su autobus di alta qualità che offre un servizio rapido ed efficiente che può includere corsie dedicate, autobus, priorità semaforica, acquisizione del titolo di viaggio a terra, marciapiedi sopraelevati e stazioni di alta qualità [12]". BRT, noto anche come metropolitana di superficie, servizio di autobus di alta qualità, autobus-metropolitana, ecc., combina l'affidabilità e la velocità di un sistema ferroviario urbano tradizionale con la flessibilità operativa, oltre al costo inferiore, di un sistema di autobus convenzionale [13][14]. I BRT possono essere di fascia alta (*full-BRT*) e *BRT-light*, in cui la prima categoria è caratterizzata da livelli di servizio più elevati [13]. Il presente lavoro si riferisce al primo tipo, denominato d'ora in avanti semplicemente BRT.

Il BRT utilizza una versione leggermente modificata dell'infrastruttura stradale esistente come infrastruttura fissa dedicata; gli autobus appositamente progettati forniscono il materiale rotabile necessario [5].

I BRT possono essere scelti se [5]:

- la domanda di trasporto è relativamente bassa o media (3.000-8.000 passeggeri/ora/direzione);
- la domanda di trasporto è relativamente elevata (> 10.000 passeggeri/ora/direzione), ma la topografia o l'espansione urbana non consentono una linea di tram o monorotaia;
- la rete stradale esistente consente l'integrazione dell'infrastruttura necessaria;
- ci sono problemi di finanziamento per altri tipi più costosi di sistemi di trasporto a guida vincolata, come metropolitana, tram o monorotaia;
- ci sono spazi disponibili nella periferia della città per fornire terminali per il sistema stesso (ad esempio per la manutenzione, il rimessaggio, ecc.) e idealmente la creazione di aree di parcheggio e strutture intermodali che promuovono l'uso del trasporto pubblico.

physically hindering direct point-to-point connection (e.g. a water strip);

- *in environmentally sensitive areas where there is a significant demand for transport and where not feasible to integrate a surface or an underground railway system.*

In recent years, use of monorails as high-capacity urban public transport has been increasing; deserving airports, high-footfall shopping malls and so on, especially outside the European continent. The transport volume capacity of the monorail system depends on the size and the headway. Maximum volume capacities of 20,000-25,000 p/h/d can be achieved (in line 15 of Sao Paulo monorail, in Brazil, a train of 8 vehicles with a train capacity of 1,000 passengers is utilized, achieving a very high system capacity) [3].

3.5. The BRT - Basic technical and operational characteristics

According to the US Federal Transit Administration, "Bus Rapid Transit (BRT) is a high-quality bus-based transit system that delivers fast and efficient service that may include dedicated lanes, busways, traffic signal priority, off-board fare collection, elevated platforms, and enhanced stations [12]". BRT, also referred to as 'surface metro', 'high-quality bus service', 'bus-metro' etc., allegedly combines the reliability and speed of a traditional urban rail system with the operating flexibility, along with the lower cost, of a conventional bus system [13][14]. BRTs can be 'high-end (full) BRT' and BRT-light, with the first category characterized by higher levels of service [13]. The present work refers to the former, referred to as simply BRT in what follows.

BRT uses a lightly modified version of the existing road infrastructure as a dedicated permanent way; specially designed buses provide for the necessary rolling stock [5].

BRTs may be preferable where [5]:

- *travel demand is relatively low or medium (3,000-8,000 passengers/hour/direction);*
- *travel demand is relatively high (> 10,000 passengers/hour/direction), but topography or urban sprawl do not allow for a tramway or a monorail;*
- *the existing road network allows for integration of the required permanent way;*
- *there are known funding challenges with other, far more expensive types of guided transport systems, such as metro, tram or monorail;*
- *there are spaces available in the city's periphery for providing terminals for the system itself (e.g., for maintenance, shunting etc.) and ideally the creation of parking areas and intermodal facilities that promote public transport use.*

3.6. Valutazione comparativa dei sistemi di tram, metropolitana, monorotaia e BRT

I sistemi di trasporto urbano a guida vincolata enumerati nel presente lavoro sono stati valutati o confrontati in passato, applicando diversi metodi, nel quadro di diversi casi di studio, in particolare:

- come sistemi individuali: tutti e quattro i sistemi sono stati confrontati in termini di caratteristiche tecniche e operative, nonché in termini di caratteristiche economiche in relazione ai costi di costruzione, esercizio e manutenzione [15][16][17];
- nel quadro di un vero e proprio studio di fattibilità [18][19];
- nell'ambito dell'applicazione del metodo MCA, sempre più diffuso nella letteratura recente in relazione a progetti di trasporto [20][21][22].

4. Approccio metodologico

4.1. Principi generali

Il presente articolo introduce un quadro metodologico per la valutazione preliminare e la classificazione dei diversi sistemi di trasporto urbano di massa a guida vincolata da integrare in una data area urbana. I sistemi di trasporto valutati sono il tram, la metropolitana, la monorotaia e il BRT. La loro integrazione è comparativamente considerata in termini di criteri economici, sociali, ambientali, di progettazione e costruzione, operativi e strategici.

Per applicare il quadro proposto, dovranno essere soddisfatti in primo luogo i seguenti requisiti:

- definizione del l'area di studio: dovranno essere noti, tra l'altro, i punti di origine (A) e di destinazione (B), nonché l'area più ampia che il mezzo di trasporto oggetto di valutazione intende coprire: a tale riguardo, anche la lunghezza del percorso (A-B) diventerà nota;
- la domanda minima di passeggeri (passeggeri/ora/direzione) lungo l'itinerario considerato.

Per effettuare la valutazione comparativa dei sistemi di trasporto in questione, la metodologia utilizzata e proposta in questo articolo suggerisce che sia disponibile un gruppo di esperti indipendenti nei settori dei trasporti, della pianificazione urbana e territoriale, nonché nei sistemi di trasporto urbano a guida vincolata. Le dimensioni della commissione possono variare e possono essere prese in considerazione osservazioni generali applicabili a metodi simili, ad esempio Delphi [23]; la maggior parte delle esperienze in letteratura indica che da 5 a 11 esperti devono coprire i settori effettivamente interessati, anche se non sono rare commissioni più numerose. Gli esperti in materia esaminano i rispettivi ambiti e le evidenziano le difficoltà relative ai mezzi di trasporto esaminati nell'area di studio, valutandoli sulla base dei criteri decisionali, selezionati per lo studio specifico, e del loro rispettivo peso. Come per qualsiasi progetto, si raccomanda vivamente che gli esperti portino si basino sulla loro esperienza indi-

3.6 Comparative evaluation of tram, metro, monorail, and BRT systems

The urban guided transport systems enumerated in the present work have been evaluated or compared in the past, across various and different dimensions within the framework of several case studies. In particular:

- *as individual systems: all four systems were compared in terms of technical and operational attributes, as well as in terms of economic characteristics as it relates to construction, operation and maintenance cost [15][16][17];*
- *within the framework of a real feasibility case study [18][19];*
- *within the framework of the application of the MCA method, which gains more and more ground in recent literature in relation to transport projects [20][21][22].*

4. Methodological approach

4.1. General principles

The present paper introduces a methodological framework for the preliminary evaluation and ranking of different urban guided mass transport systems to be integrated in a given urban area. The evaluated transport systems are the tram, the metro, the monorail and the BRT. Their integration is comparatively considered in terms of economic, social, environmental, design and construction, operational and strategic planning criteria.

To apply the proposed framework, the following requirements will need to be met first:

- *definition of the study area: among others, origin (A) and destination (B) points, as well as the wider area the transport means under evaluation is intended to span, will need to be known: in this respect, the route length (A-B) also becomes known;*
- *the minimum passenger demand (passengers/hour/direction) along the subject route.*

For carrying out the comparative evaluation of the transport systems in question, the methodology employed and proposed in this paper suggests that a group of independent experts in the fields of transport, urban and spatial planning, as well as in urban guided transport systems is also made available. The size of the panel may vary and general considerations applicable in similar methods e.g. Delphi [23] may be considered; the majority of the experiences in the literature indicate 5 to 11 experts to cover effectively concerned knowledge areas, though larger panels are also not uncommon. Subject matter experts participate in considering the relative merits and challenges around the transport means examined within the area of study and evaluating and appraising those, based on the decision-making criteria and relevant weights critically selected for the specific study. As with any project, it is strongly recommended that

viduale e, ove possibile, su una profonda conoscenza dell'area di studio.

Il quadro di valutazione proposto è applicabile durante la fase iniziale di selezione del sistema di trasporto, senza considerare il percorso definitivo di ciascun sistema di trasporto esaminato. In quanto tale, il processo di valutazione può essere integrato nella fase degli studi strategici o in seguito. In ogni caso, l'applicazione del quadro proposto non dipende da uno studio di fattibilità e, a nostro avviso, è concepito per precederlo. In questo senso, l'esito della valutazione dovrebbe influenzare lo studio di fattibilità; tuttavia, non lo sostituisce, ma funge piuttosto da strumento di supporto che lo integra, in quanto potrebbe:

- portare ad abbandonare uno specifico sistema di trasporto urbano a guida vincolata dall'elenco delle alternative per l'area oggetto di studio; in tal modo, riducendo tempo, sforzo e costo necessari per realizzare lo studio di fattibilità;
- migliorare notevolmente il processo decisionale finale in relazione all'attuazione di un progetto di trasporto, se combinato con i risultati di uno studio di fattibilità completo;
- contribuire a giustificare la necessità di attuare e finanziare un determinato progetto di trasporto alla più ampia gamma di soggetti interessati al progetto, compresi i cittadini e le autorità che possono opporsi all'attuazione.

4.2 Fasi e processi

Indipendentemente dall'area di studio e dagli esperti che partecipano al processo di valutazione, le tre componenti principali che rappresentano il quadro di valutazione elaborato nel presente articolo sono le seguenti.

1) Un elenco di 41 sotto-criteri (Tab. 2); il nostro studio dimostra che essi sono considerati fondamentali per la selezione dei sistemi di trasporto urbano a guida vincolata, sulla base di una rassegna bibliografica esaustiva [3][20][22][24][25][26][27][28][29][30][31][32][33][34][35][36][37][38][39][40][41][42][43][44][45][46][47][48][49][50][51][52][53]. Abbiamo scelto di raggruppare questi 41 sotto-criteri in sei grandi aree (ambientale, sociale, economica, di progettazione e costruzione, di pianificazione strategica e strategica), come mostrato nella Tab. 2. Queste sei dimensioni, che abbiamo definito "globali", rappresentano, tra l'altro, i pilastri chiave della mobilità sostenibile. I sotto-criteri di cui alla Tab. 2 possono essere "vincolanti" e "non vincolanti", a seconda della complessità di ciascun caso di studio. Il termine "vincolante" si riferisce ai criteri imposti dalle esigenze della specifica area urbana oggetto di studio o dall'autorità aggiudicatrice. Non tutti i sistemi di trasporto urbano a guida vincolata in corso di valutazione possono soddisfare questi sotto-criteri. Di conseguenza, qualsiasi sistema sarebbe in tal caso escluso dal pool di alternative e quindi dalla valutazione. Come esempio indicativo, si può applicare l'esempio di un'autorità aggiudicatrice che non è disposta a adottare la soluzione di un sistema sopraelevato (ad esempio per motivi relativi all'impatto vi-

subject matter experts further bring along their individual subject matter expertise and, wherever possible, a deep understanding of the study area.

The proposed evaluation framework is applicable during the initial phase of transport system selection, without deeming the detailed knowledge of the route for each transport system examined. As such, the appraisal process may either be integrated in the strategic studies stage or otherwise follow right after them. In any case, application of the proposed framework is not dependent on a feasibility study and, in our view, it is designed and recommended to precede it. Naturally, the outcome of the evaluation is expected to influence the feasibility study in this respect; yet it does not replace it, but rather serves as a supporting tool that informs it as it may:

- *lead to dropping off a specific urban guided transport system from the list of alternative 'candidate' systems for the area under study; thus, reducing the time, effort and cost required for carrying out the feasibility study;*
- *greatly enhance final decision-making in relation to implementation of a transport project, when seamlessly combined with the results of a comprehensive feasibility study that follows;*
- *positively contribute to justifying the need for implementing and funding a given transport project to the wider range of project stakeholders, including in particular citizen groups and authorities that may oppose implementation.*

4.2 Steps and process

Independently of the study area and the experts participating in the evaluation process, the following three core components represent the assessment framework devised in this paper.

1) A list of 41 sub-criteria (Tab. 2); our study demonstrates these are considered fundamental for the selection of urban guided transport systems, based on exhaustive literature review [3][20][22][24][25][26][27][28][29][30][31][32][33][34][35][36][37][38][39][40][41][42][43][44][45][46][47][48][49][50][51][52][53]. We have opted to bundle these 41 sub-criteria into six main buckets (environmental, social, economic, design and construction, operational and strategic planning) as shown in Tab. 2. These six, 'overarching', as we would call them, dimensions used in the assessment represent, among other, key pillars of sustainable mobility. The sub-criteria shown in Tab. 2 may be 'binding' and 'non-binding', depending on the intricacies of each case study. The term 'binding' refers to those criteria that are imposed either by the needs of the specific urban area under study or by the contracting authority. Not all the urban guided transport systems under evaluation may meet these 'binding' sub-criteria. As a result, any system in such a case would be excluded from the pool of alternatives, and thus, from the evaluation. As an indicative example, the example

Tabella 2 – Table 2

Elenco proposto dei criteri generali (in grassetto) e dei sotto-criteri per la valutazione e la classificazione dei sistemi di trasporto urbano a guida vincolata: il peso dei criteri (%) può essere attribuito ai criteri generali mentre i sotto-criteri possono essere valutati su base numerica (scala 1-5)

Proposed list of overarching criteria (in bold) and sub-criteria for the evaluation and ranking of urban guided transport systems: criteria weights (%) may be assigned to the overarching criteria with sub-criteria being scored on a numerical scale (1-5)

Criteri di base e sotto-criteri <i>Basic criteria and sub-criteria</i>
A. Ambientali - Environmental
1. Intrusione visiva - <i>Visual intrusion</i>
2. Inquinamento dell'aria - <i>Air pollution</i>
3. Inquinamento acustico - <i>Noise pollution</i>
4. Alterazione della struttura urbana - <i>Urban structure disruption</i>
5. Vibrazioni - <i>Vibrations</i>
6. Consumo energetico - <i>Energy consumption</i>
B. Operativi - Operational
7. Capacità massima del sistema di trasporto - <i>Maximum transport system capacity</i>
8. Flessibilità nel servire la domanda di passeggeri - <i>Flexibility in servicing passenger demand</i>
9. Velocità commerciale - <i>Commercial speed (run time)</i>
10. Tempi di accessibilità iniziale e finale - <i>First and last mile time</i>
11. Comfort dei passeggeri - <i>Passenger comfort</i>
12. Impatto sugli altri mezzi di trasporto durante la fase operativa <i>Impact on other transport modes during the operation phase</i>
13. Complementarità con i mezzi di trasporto esistenti - <i>Complementarity with existing transport modes</i>
14. Accessibilità - <i>Accessibility</i>
15. Affidabilità, disponibilità e manutenibilità - <i>Reliability, availability and maintainability</i>
16. Regolarità - <i>Regularity</i>
C. Progetto e costruzione - Design and construction
17. Lunghezza del percorso - <i>Route length</i>
18. Andamento planimetrico del binario (raggio minimo di curvatura) <i>Track horizontal alignment (minimum curve radius)</i>
19. Andamento altimetrico (pendenza massima) - <i>Vertical alignment (maximum gradient)</i>
20. Flessibilità di integrazione dell'infrastruttura fissa nel tracciato <i>Integration flexibility of the permanent way in the horizontal and vertical alignment</i>
21. Flessibilità di integrazione planimetrica e altimetrica dell'infrastruttura fissa e dei veicoli <i>Integration of the permanent way and the rolling stock regarding the passage height and the right of way</i>
22. Disponibilità e operatività degli impianti di deposito <i>Availability and operability of depot facilities</i>
23. Flessibilità nell'integrazione geometrica e costruzione di fermate/stazioni <i>Flexibility in geometric integration and construction of stops/ stations</i>
24. Complessità delle opere di ingegneria civile <i>Complexity and difficulty level of civil engineering works</i>
25. Problemi costruttivi relativi agli scavi archeologici (a varie profondità di scavo) <i>Construction problems related to archaeological discoveries (in various excavation depths)</i>
26. Disponibilità delle infrastrutture e della tecnologia del materiale rotabile <i>Availability of infrastructure and rolling stock technology</i>
27. Flessibilità nell'espansione delle linee e della rete - <i>Flexibility in line/ network expansion</i>

(segue... - follows...)

(segue tab. 2 - follows tab. 2)

D. Economici - <i>Economic</i>
28. Costi di realizzazione (infrastrutture e materiale rotabile) - <i>Implementation cost (infrastructure and rolling stock)</i>
29. Spese di esproprio - <i>Expropriation cost</i>
30. Costi operativi - <i>Operating cost</i>
31. Difficoltà e costi di manutenzione - <i>Maintenance difficulty and cost</i>
E. Sociali - <i>Social</i>
32. Protezione - <i>Security</i>
33. Sicurezza - <i>Safety</i>
34. Accettazione da parte del pubblico - <i>Public acceptance</i>
35. Impatto sui residenti, sull'uso del territorio, sull'economia, ecc. durante la fase di costruzione <i>Impact on residents, land use, economy etc. during the construction phase</i>
36. Impatto sui residenti, sull'uso del territorio, sull'economia, ecc. durante la fase operativa <i>Impact on residents, land use, economy etc. during the operation phase</i>
37. Tempi di realizzazione - <i>Implementation time</i>
F. Pianificazione strategica - <i>Strategic planning</i>
38. Sviluppo territoriale e urbano dell'area oggetto dello studio <i>Spatial and urban development of the area under study</i>
39. Integrazione in termini di superficie (sotterranea, sopraelevata, a raso) <i>Integration in terms of ground surface (underground, elevated, at ground level)</i>
40. Disincentivazione all'uso dell'auto privata nella zona <i>High priority to the discouragement of private car use in the area</i>
41. Rivitalizzazione e riprogettazione dell'area di studio - <i>Revitalizing/ redesigning the area under study</i>

sivo). In tal caso, la conseguenza sarebbe il rifiuto dell'alternativa di un sistema monorotaia e la sua esclusione da un'ulteriore valutazione. Inoltre, finanziamenti molto limitati possono portare all'esclusione di un sistema metropolitano rispetto ad altre alternative più economiche. Di fatto, un sotto-criterio vincolante per un'area può non essere vincolante per un'altra e viceversa. L'elenco proposto può, quindi, essere adattato in funzione delle esigenze specifiche della zona. Per esempio, gli esperti e/o l'autorità aggiudicatrice possono non ritenere più pertinenti taluni sotto-criteri. In altre parole, la Tab. 2 funge da pool di risorse da cui si possono ricavare sotto-criteri di valutazione per l'area studiata per qualsiasi area di studio, quando si seleziona un sistema di trasporto urbano di massa a guida vincolata tra quelli elencati in questo studio.

2) Un *modus operandi* dettagliato in cui i pesi e i punteggi sono attribuiti a criteri e sotto-criteri dal gruppo di esperti o, in alternativa, dall'autorità aggiudicatrice. Per i primi, ciò può essere realizzato mediante l'assegnazione diretta del peso (percentuale) o mediante l'esecuzione di confronti di coppia secondo AHP [54]. Per quanto riguarda i sotto-criteri, essi possono essere valutati su una scala 1-5 in termini di importanza (1 = leggermente importante, 5 = assolutamente importante).

3) Un riepilogo comparativo che utilizza un formato di tabella standardizzato (Tab. 3) relativo a ciascun mezzo di trasporto alternativo classificato. Un valore da 1 (prestazioni peggiori) a 5 (prestazioni migliori) è attribuito ad ogni sistema di trasporto a guida vincolata urbano in fase

of a contracting authority being unwilling to adopt the solution of an elevated system (e.g. for reasons relating to visual impact) may appear. In such a case, the rejection of the alternative of a monorail system and its exclusion from further evaluation would be the consequence. Moreover, greatly restricted funding may lead respectively to the exclusion of e.g. a metro system compared to other cheaper alternatives. Effectively, a sub-criterion, which is binding for an area may be non-binding for another and vice versa. The proposed list can hence be adapted depending on the area's specific needs. For instance, the experts and/or the contracting authority may no longer deem certain sub-criteria as relevant. In other words, Tab. 2 serves as a resource pool from which one can derive evaluation sub-criteria for the area under study for any given study area, when selecting an urban guided mass transport system among the ones enumerated in this study.

2) A detailed *modus operandi* in which weights and scores are attributed to the overarching criteria and sub-criteria by the group of experts or alternatively the contracting authority where so relevant e.g. the overarching criteria. For the former, this can be realised through direct weight assignment (percentage %) or through the execution of pairwise comparisons according to AHP [54]. As regards the sub-criteria, they can be scored on a 1-5 scale in terms of importance (1 = slightly important, 5 = absolutely important).

3) A comparative summary using a standardised, table format (Tab. 3) as relates to each alternative scored means

Tabella 3 – Table 3

Valutazione dei sistemi di trasporto urbano a guida vincolata per sotto-criterio
Evaluation of urban guided transport systems in terms of each sub-criterion

	Sotto-criteri Sub-criteria	Valori critici - gamma - caratterizzazione qualitativa per ciascun sistema di trasporto <i>Critical values or range or qualitative characterization for each transport system</i>				Valore raccomandato attribuito a ciascun sistema di trasporto in relazione a ciascun sotto-criterio su scala 1-5 (1 = prestazioni peggiori, 5 = prestazioni migliori) <i>Recommended value attributed to each transport system with regard to each sub-criterion on a 1-5 scale (1 = worst performance, 5= best performance)</i>			
		Tram Tram	Metro Metro	Monorotaia Monorail	BRT	Tram	Metro	Monorotaia Monorail	BRT
1	Intrusione visiva <i>Visual intrusion</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Molto basso <i>Very low</i>	Molto alto <i>Very High</i>	Moderato <i>Moderate</i>	3	5	1	3
2	Inquinamento dell'aria <i>Air pollution</i>	Basso <i>Low</i>	Molto basso <i>Very low</i>	Basso <i>Low</i>	Molto alto <i>Very High</i>	4	5	4	1
3	Inquinamento acustico <i>Noise pollution</i>	Alto <i>High</i>	Basso <i>Low</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Basso <i>Low</i>	2	4	3	4
4	Alterazione della struttura urbana <i>Urban structure disruption</i>	In superfice <i>At ground</i>	Sottosuolo <i>Underground</i>	Soprelevato <i>Elevated</i>	In superfice <i>At ground</i>	1	5	3	2
5	Vibrazioni <i>Vibrations</i>	Alto <i>High</i>	Alto <i>High</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Basso <i>Low</i>	2	2	3	4
6	Consumo energetico <i>Energy consumption</i>	0.008 kWh/pkm	0.03 kWh/pkm	0.07 kWh/pkm	0.19 kWh/pkm	5	4	3	1
7	Capacità massima del sistema di trasporto <i>Maximum system transport capacity (passengers/hour/direction)</i>	15,000	45,000	12,500 (20000)	15,000	2	5	2	2
8	Flessibilità nel servire la domanda di passeggeri <i>Flexibility in servicing passenger demand</i>	Basso <i>Low</i>	Alto <i>High</i>	Molto basso <i>Very low</i>	Molto basso <i>Very low</i>	2	4	1	1
9	Velocità commerciale <i>Commercial speed V(km/h) (run time)</i>	15-25 km/h	30-40 km/h	15-40km/h	18-20km/h	2	5	3	1
10	Tempi di accessibilità iniziale e finale <i>First/last mile time t (min)</i>	0 min	4 min	3 min	0 min	5	1	2	5
11	Comfort dei passeggeri <i>Passenger comfort</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Basso <i>Low</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Molto basso <i>Very low</i>	3	2	3	1
12	Impatto sugli altri mezzi di trasporto durante la fase operativa <i>Impact on other transport modes during the operation phase</i>	Molto alto <i>Very High</i>	Molto basso <i>Very low</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Molto alto <i>Very High</i>	1	5	3	1
13	Complementarità con i mezzi di trasporto esistenti <i>Complementarity with existing transport systems</i>	Alto <i>High</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Basso <i>Low</i>	Alto <i>High</i>	4	3	2	4
14	Accessibilità <i>Accessibility</i>	Alto <i>High</i>	Basso <i>Low</i>	Basso <i>Low</i>	Molto alto <i>Very High</i>	4	2	2	5
15	Affidabilità, disponibilità e manutenibilità <i>Reliability, Availability and Maintainability</i>	Basso <i>Low</i>	Alto <i>High</i>	Alto <i>High</i>	Molto basso <i>Very low</i>	2	4	4	1
16	Regolarità <i>Regularity</i>	Alto <i>High</i>	Molto alto <i>Very High</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Basso <i>Low</i>	4	5	3	2
17	Lunghezza del percorso <i>Route length (km)</i>	5-20	10-40	5-50 (uso urbano) <i>(urban use)</i>	3-30	3	2	4	3
18	Andamento planimetrico del binario (raggio minimo di curvatura) <i>Track horizontal alignment (minimum curve radius R_c) (m)</i>	25	150	45	90	5	2	3	4
19	Andamento altimetrico (pendenza massima) <i>Vertical alignment (maximum gradient) (%)</i>	8	5	20	8	3	2	5	3
20	Flessibilità di integrazione dell'infrastruttura fissa nel tracciato <i>Integration flexibility of the permanent way in the horizontal and vertical alignment</i>	Molto basso <i>Very low</i>	Alto <i>High</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Alto <i>High</i>	1	4	3	4

(segue... - follows...)

(segue tab. 3 - follows tab. 3)

21	Flessibilità di integrazione planimetrica e altimetrica dell'infrastruttura fissa e dei veicoli <i>Integration of the permanent way and the rolling stock regarding the passage height and the right of way</i>	Basso <i>Low</i>	Molto alto <i>Very High</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Basso <i>Low</i>	2	5	3	2
22	Disponibilità e operatività degli impianti di deposito <i>Availability and operability of depot facilities</i>	Molto basso <i>Very low</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Alto <i>High</i>	1	3	3	4
23	Flessibilità nell'integrazione geometrica e costruzione di fermate/stazioni <i>Flexibility in geometric integration and construction of stops / stations</i>	Basso <i>Low</i>	Molto basso <i>Very low</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Molto alto <i>Very High</i>	2	1	3	5
24	Complessità delle opere di ingegneria civile <i>Complexity and difficulty level of civil engineering works</i>	Basso <i>Low</i>	Molto alto <i>Very High</i>	Alto <i>High</i>	Molto basso <i>Very low</i>	4	1	2	5
25	Problemi costruttivi relativi agli scavi archeologici (a varie profondità di scavo) <i>Construction problems related to archaeological discoveries (in various excavation depths)</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Molto alto <i>Very High</i>	Molto basso <i>Very low</i>	Molto basso <i>Very low</i>	3	1	5	5
26	Disponibilità delle infrastrutture e della tecnologia del materiale rotabile <i>Availability of infrastructure and rolling stock technology</i>	Molto alto <i>Very High</i>	Molto alto <i>Very High</i>	Basso <i>Low</i>	Alto <i>High</i>	5	5	2	4
27	Flessibilità nell'espansione delle linee e della rete <i>Flexibility in line/ network expansion</i>	Basso <i>Low</i>	Alto <i>High</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Basso <i>Low</i>	2	4	3	2
28	Costi di realizzazione (infrastrutture e materiale rotabile) <i>Implementation cost (infrastructure and rolling stock) (MEur/km)</i>	15-35	70-140	30-90	3-20	3	1	2	
29	Spese di esproprio <i>Expropriation cost</i>	Basso <i>Low</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Basso <i>Low</i>	Molto basso <i>Very low</i>	4	3	4	5
30	Costi operativi <i>Operating cost</i>	Molto alto <i>Very High</i>	Molto alto <i>Very High</i>	Alto <i>High</i>	Moderato <i>Moderate</i>	5	5	4	3
31	Difficoltà e costi di manutenzione <i>Maintenance difficulty and cost</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Alto <i>High</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Basso <i>Low</i>	3	2	3	4
32	Protezione <i>Security</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Molto basso <i>Very low</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Moderato <i>Moderate</i>	3	1	3	3
33	Sicurezza <i>Safety</i>	Alto <i>High</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Molto basso <i>Very low</i>	Alto <i>High</i>	4	3	1	4
34	Accettazione da parte del pubblico <i>Public acceptance</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Molto alto <i>Very High</i>	Basso <i>Low</i>	Moderato <i>Moderate</i>	3	5	2	3
35	Impatto sui residenti, sull'uso del territorio, sull'economia, ecc. durante la fase di costruzione <i>Impact on residents, other network users, land use, economy etc. during the construction phase</i>	Molto alto <i>Very High</i>	Alto <i>High</i>	Alto <i>High</i>	Basso <i>Low</i>	1	2	2	4
36	Impatto sui residenti, sull'uso del territorio, sull'economia, ecc. durante la fase operativa <i>Impact on residents, land use, economy etc. during the operation phase</i>	Molto alto <i>Very High</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Alto <i>High</i>	1	3	3	4
37	Tempi di realizzazione <i>Implementation time (years) (length of 10 km)</i>	2	5-10	2	1-2	4	1	4	5
38	Sviluppo territoriale e urbano dell'area oggetto dello studio <i>Spatial and urban development of the area under study</i>	Alto <i>High</i>	Molto alto <i>Very High</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Molto basso <i>Very low</i>	4	5	3	1
39	Integrazione in termini di superficie (sotterranea, sopraelevata, a raso) <i>Integration in terms of ground surface (underground, over ground, on the ground)</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Alto <i>High</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Moderato <i>Moderate</i>	3	4	3	3
40	Disincentivazione all'uso dell'auto privata nella zona <i>High priority to the discouragement of private car use in the area</i>	Molto alto <i>Very High</i>	Alto <i>High</i>	Moderato <i>Moderate</i>	Basso <i>Low</i>	5	4	3	2
41	Rivitalizzazione e riprogettazione dell'area di studio <i>Revitalizing/ redesigning the area under study</i>	Molto alto <i>Very High</i>	Alto <i>High</i>	Basso <i>Low</i>	Molto basso <i>Very low</i>	5	4	2	1

di valutazione. Il sistema di punteggio proposto si basa sulla revisione della letteratura e prende in considerazione le informazioni di base nelle sezioni precedenti del presente articolo. Vale la pena notare che nella stesura della Tab. 3, il tram come sistema è dotato di catenaria (sistema di tram moderno convenzionale) e che BRT utilizza diesel come carburante, ciò che nella nostra esperienza rappresenta in media il caso tipico. Come accennato in precedenza, i valori attribuiti a ciascun sistema possono essere adattati caso per caso, come ritenuto opportuno, ma le informazioni di cui alla Tab. 3 forniscono un buon orientamento generale riguardante il caso tipico del sistema di trasporto di massa trovato in letteratura [3].

Utilizzando gli strumenti di cui sopra, il processo di attuazione del quadro proposto è il seguente:

- definizione dell'area oggetto di studio (punti di origine e di destinazione, descrizione più ampia dell'area e lunghezza di connessione) e domanda minima di trasporto passeggeri;
- selezione degli esperti che partecipano al processo di selezione;
- selezione da parte degli esperti e/o dell'autorità aggiudicatrice dell'elenco dei sotto-criteri adattato all'area oggetto di studio, utilizzando come strumento i criteri di base e l'elenco dei sotto-criteri di cui alla Tab. 2; durante tale processo e di concerto con il consenso dei decisori istituzionali sono definiti anche i sotto-criteri vincolanti;
- assegnazione di peso ai criteri generali e punteggio ai sotto-criteri assegnati dagli esperti;
- moltiplicazione di ogni valore selezionato da ciascun esperto per ciascun sotto-criterio, come descritto nella fase precedente, con il peso pertinente applicabile al sotto-criterio attribuito direttamente da ciascun esperto: il valore medio aritmetico di questi prodotti per ciascun sotto-criterio costituisce il peso complessivo di ciascun sotto-criterio;
- classificazione delle alternative secondo il miglior punteggio: il valore assegnato a ciascuna alternativa in termini di sotto-criterio moltiplicato per il peso del sotto-criterio calcolato nella fase precedente, rappresenta la prestazione complessiva di ciascuna alternativa, derivata come somma dei prodotti per tutti i sotto-criteri.

5. Esempi numerici

Segue un esempio che si riferisce a un caso di studio fittizio, finalizzato a una migliore comprensione della metodologia proposta. In questo esempio, invece di coinvolgere esperti nel processo, gli autori attribuiscono pesi immaginari ai criteri e punteggi immaginari ai sotto-criteri.

I pesi dei criteri e il punteggio dei sotto-criteri per l'area oggetto di studio sono riportati nella Tab. 4; abbiamo considerato cinque criteri vincolanti per il caso specifico e, inoltre i criteri vincolanti non escludono nessuna delle alternative oggetto di valutazione.

Seguendo le fasi metodologiche descritte nella sezione precedente, ciascun sotto-criterio va moltiplicato per il

of transport. A value from 1 (worst performance) to 5 (best performance) is attributed to each urban guided transport system under evaluation. The proposed scoring system bases on literature review and considers the background information in the previous sections of this paper. It is worth noting that in drafting Tab. 3, tram as a system is fitted with catenary (conventional modern tram system) and that BRT uses diesel as fuel, what in our experience represents the usual, average case. As mentioned previously, the values attributed to each system may be adapted per case as it is seen fit, yet the information in Tab. 3 provides for a good, general guidance covering the usual mass transport system case found in literature [3].

Using the above toolbox, the process for implementing the proposed framework is as follows:

- *definition of the area under study (origin and destination points, wider area description and connection length) and minimum passenger transport demand;*
- *selection of the experts participating in the process;*
- *selection by the experts and/or the contracting authority of the sub-criteria list adapted to the area under study, using as pool the basic criteria/sub-criteria list in Tab. 2; during this process and in concert with the institutional decision-makers and wider stakeholders' community, the binding sub-criteria are also defined;*
- *weighting of the overarching criteria and scoring of the sub-criteria as assigned by the experts;*
- *multiplying each value selected by each expert for each sub-criterion, as described in the previous step, by the relevant weight applicable to the sub-criterion (directly attributed by each expert, as described in the previous step). The arithmetic mean value of these products for each sub-criterion constituting the overall weight for each sub-criterion;*
- *classification of alternatives: the value assigned to each alternative in terms of each sub-criterion multiplied by the sub-criterion weight calculated in the previous step represent the overall performance of each alternative derived as the sum of the products for all sub-criteria: alternatives ranked with the best one featuring the maximum score.*

5. Numerical example

An example referring to a fictitious case study, aiming at better understanding the proposed methodology, follows. In this example, instead of engaging experts into the process, the authors attribute imaginary weights to the criteria and imaginary scores to the sub-criteria.

The criteria weights and the sub-criteria scoring for the area under study are in Tab. 4; we considered five binding criteria for the specific case study and that the binding criteria do not exclude any of the alternatives under evaluation.

Tabella 4 – Table 4

Attribuzione del peso (%) e punteggio dei sotto-criteri (1-5) per la valutazione e la classificazione dei sistemi di trasporto a guida vincolata urbano in un'area specifica (Esempio immaginario)

Criteria weights (%) and sub-criteria scoring (1-5) for the evaluation and ranking of urban guided transport systems in a specific area-Imaginary example

Criteri di base e sotto-criteri per un'area urbana oggetto di studio <i>Basic criteria and sub-criteria for an urban area under study</i>	Peso dei criteri di base (%) e sotto-criteri corrispondenti al punteggio (1 = leggermente importante, 5 = assolutamente importante) <i>Basic criteria weight corresponding scoring (1 = slightly important, 5 = absolutely important)</i>	Valore attribuito a ciascun sistema di trasporto in relazione a ciascun sotto-criterio (1 = prestazioni peggiori, 5 = prestazioni migliori) o SI/NO in caso di sotto-criteri vincolanti <i>Value attributed to each transport system with regard to each sub-criterion (1 = worst performance, 5 = best performance) or YES/NO in case of binding sub-criteria</i>				(peso del criterio) x (punteggio del sotto-criterio) <i>(Criterion weight) x (sub-criterion scoring) (5)</i>	(6) = (5) x (1)	(7) = (5) x (2)	(8) = (5) x (3)	(9) = (5) x (4)
		Tram (1)	Metro (2)	Monorotaia (3) <i>Monorail (3)</i>	BRT (4)					
Ambientali <i>Environmental</i>	15									
1. Intrusione visiva <i>Visual intrusion</i>	4	3	5	1	3	0.6	1.8	3	0.6	1.8
2. Inquinamento dell'aria <i>Air pollution</i>	3	4	5	4	1	0.45	1.8	2.25	1.8	0.45
3. Inquinamento acustico <i>Noise pollution</i>	3	2	4	3	4	0.45	0.9	1.8	1.35	1.8
4. Alterazione della struttura urbana <i>Urban structure disruption</i>	3	1	5	3	2	0.45	0.45	2.25	1.35	0.9
5. Vibrazioni <i>Vibrations</i>	2	2	2	3	4	0.3	0.6	0.6	0.9	1.2
6. Consumo energetico <i>Energy consumption</i>	3	5	4	3	1	0.45	2.25	1.8	1.35	0.45
Operativi <i>Operational</i>	15									
7. Capacità massima del sistema di trasporto <i>Maximum transport system capacity</i>	Sotto-criterio vincolante <i>Binding sub-criterion</i>	SI YES	SI YES	SI YES	SI YES					
8. Flessibilità nel servire la domanda di passeggeri <i>Flexibility in servicing passenger demand</i>	2	2	4	1	1	0.3	0.6	1.2	0.3	0.3
9. Velocità commerciale <i>Commercial speed (run time)</i>	4	2	5	3	1	0.6	1.2	3	1.8	0.6

(segue... - follows...)

(segue tab. 4 - follows tab. 4)

10. Tempi di accessibilità iniziale e finale <i>First and last mile time</i>	3	5	1	2	5	0.45	2.25	0.45	0.9	2.25
11. Comfort dei passeggeri <i>Passenger comfort</i>	3	3	2	3	1	0.45	1.35	0.9	1.35	0.45
12. Impatto sugli altri mezzi di trasporto durante la fase operativa <i>Impact on other transport modes during the operation phase</i>	5	1	5	3	1	0.75	0.75	3.75	2.25	0.75
13. Complementarità con i mezzi di trasporto esistenti <i>Complementarity with existing transport modes</i>	3	4	3	2	4	0.45	1.8	1.35	0.9	1.8
14. Accessibilità <i>Accessibility</i>	4	4	2	2	5	0.6	2.4	1.2	1.2	3
15. Affidabilità, disponibilità e manutenibilità <i>Reliability, availability and maintainability</i>	4	2	4	4	1	0.6	1.2	2.4	2.4	0.6
16. Regolarità <i>Regularity</i>	3	4	5	3	2	0.45	1.8	2.25	1.35	0.9
Progetto e costruzione <i>Design and construction</i>	20									
17. Lunghezza del percorso <i>Route length</i>	Sotto-criterio vincolante <i>Binding sub-criterion</i>	SI YES	SI YES	SI YES	SI YES					
18. Andamento planimetrico del binario (raggio minimo di curvatura) <i>Track horizontal alignment (minimum curve radius)</i>	Sotto-criterio vincolante <i>Binding sub-criterion</i>	SI YES	SI YES	SI YES	SI YES					
19. Andamento altimetrico (pendenza massima) <i>Vertical alignment (maximum gradient)</i>	Sotto-criterio vincolante <i>Binding sub-criterion</i>	SI YES	SI YES	SI YES	SI YES					
20. Flessibilità di integrazione dell'infrastruttura fissa nel tracciato <i>Integration flexibility of the permanent way in the horizontal and vertical alignment</i>	4	1	4	3	4	0.8	0.8	3.2	2.4	3.2
21. Flessibilità di integrazione planimetrica e altimetrica dell'infrastruttura fissa e dei veicoli <i>Integration of the permanent way and the rolling stock regarding the passage height and the right of way</i>	5	2	5	3	2	1	2	5	3	2

(segue... - follows...)

(segue tab. 4 - follows tab. 4)

22. Disponibilità e operatività degli impianti di deposito <i>Availability and operability of depot facilities</i>	5	1	3	3	4	1	1	3	3	4
23. Flessibilità nell'integrazione geometrica e costruzione di fermate/stazioni <i>Flexibility in geometric integration and construction of stops/ stations</i>	5	2	1	3	5	1	2	1	3	5
24. Complessità delle opere di ingegneria civile <i>Complexity and difficulty level of civil engineering works</i>	3	4	1	2	5	0.6	2.4	0.6	1.2	3
25. Problemi costruttivi relativi agli scavi archeologici (a varie profondità di scavo) <i>Construction problems related to archaeological discoveries (in various excavation depths)</i>	5	3	1	5	5	1	3	1	5	5
26. Disponibilità delle infrastrutture e della tecnologia del materiale rotabile <i>Availability of infrastructure and rolling stock technology</i>	3	5	5	2	4	0.6	3	3	1.2	2.4
27. Flessibilità nell'espansione delle linee e della rete <i>Flexibility in line/ network expansion</i>	4	2	4	3	2	0.8	1.6	3.2	2.4	1.6
Economici <i>Economic</i>	20									
28. Costi di realizzazione (infrastrutture e materiale rotabile) <i>Implementation cost (infrastructure and rolling stock)</i>	5	3	1	2	5	1	3	1	2	5
29. Spese di esproprio <i>Expropriation cost</i>	3	4	3	4	5	0.6	2.4	1.8	2.4	3
30. Costi operativi <i>Operating cost</i>	3	5	5	4	3	0.6	3	3	2.4	1.8
31. Difficoltà e costi di manutenzione <i>Maintenance difficulty and cost</i>	3	3	2	3	4	0.6	1.8	1.2	1.8	2.4
Sociali <i>Social</i>	10									
32. Protezione <i>Security</i>	2	3	1	3	3	0.2	0.6	0.2	0.6	0.6

(segue... - follows...)

(segue tab. 4 - follows tab. 4)

33. Sicurezza Safety	3	4	4	3	1	4	0.3	1.2	0.9	0.3	1.2
33. Accettazione da parte del pubblico Public acceptance	4	3	5	5	2	3	0.4	1.2	2	0.8	1.2
35. Impatto sui residenti, sull'uso del territorio, sull'economia, ecc. durante la fase di costruzione Impact on residents, land use, economy etc. during the construction phase	4	1	2	2	2	4	0.4	0.4	0.8	0.8	1.6
36. Impatto sui residenti, sull'uso del territorio, sull'economia, ecc. durante la fase operativa Impact on residents, land use, economy etc. during the operation phase	4	1	3	3	3	4	0.4	0.4	1.2	1.2	1.6
37. Tempi di realizzazione Implementation time	2	4	1	1	4	5	0.2	0.8	0.2	0.8	1
Pianificazione strategica Strategic planning	20										
38. Sviluppo territoriale e urbano dell'area oggetto dello studio Spatial and urban development of the area under study	Sotto-criterio vincolante Binding sub-criterion	SI YES	SI YES	SI YES	SI YES	SI YES					
39. Integrazione in termini di superficie (sotterranea, sopraelevata, a raso) Integration in terms of ground surface (underground, elevated, at ground level)	Sotto-criterio vincolante Binding sub-criterion	SI YES	SI YES	SI YES	SI YES	SI YES					
40. Disincentivazione all'uso dell'auto privata nella zona High priority to the discouragement of private car use in the area	4	5	4	4	3	2	0.8	4	3.2	2.4	1.6
41. Rivitalizzazione e riprogettazione dell'area di studio Revitalizing/ redesigning the area under study	4	5	4	4	2	1	0.8	4	3.2	1.6	0.8
Prestazioni totali (somma degli elementi di ciascuna delle colonne 6, 7, 8, 9) Total performance (the sum of the elements of each one of the columns 6, 7, 8, 9)							59.75	66.90	58.10	65.25	

peso della categoria a cui appartiene il sotto-criterio. In questo modo, la colonna derivata (5) è per esempio: $0,6 = 0,15 \times 4$, $0,45 = 0,15 \times 3$ ecc.

Il valore assegnato a ciascuna alternativa in termini di ciascun sotto-criterio viene moltiplicato per il sotto-criterio ponderale calcolato nella colonna (5). Per esempio, per quanto riguarda il sotto-criterio "intrusione visiva", il rendimento è questo: $1,8 = 0,6 \times 3$ (tram), $3 = 0,6 \times 5$ (metro), $0,6 = 0,6 \times 1$ (monorotaia), $1,8 = 0,6 \times 3$ (BRT) ecc.

Le prestazioni complessive di ciascuna alternativa sono infine derivate dalla somma dei prodotti per tutti i sotto-criteri. In questo esempio, come mostrato nella Tab. 4, le prestazioni complessive per il tram sono pari a 59,75, e rispettivamente 66,90 per la metropolitana, 58,10 per la monorotaia e 65,25 per la BRT.

Infine, le alternative vengono classificate in base al loro punteggio, con il migliore più in alto. Di conseguenza, per l'area oggetto di studio, si ottiene la seguente classifica: 1. Metro, 2. BRT, 3. Tram, 4. Monorotaia. Metro e BRT appaiono molto vicini nella prima posizione; in questa occasione, un'analisi costi-benefici (CBA) per queste alternative può aggiungere valore al processo complessivo, contribuendo a evidenziare la soluzione migliore.

Per evidenziare l'impatto che ogni criterio di base può avere sulla classifica finale delle alternative prese in considerazione, in uno scenario aggiuntivo è stato assunto che il peso di ogni criterio di base sia 1 (100%), mentre i pesi comparativi con altri criteri di base siano uguali a 0, supponendo che tutti gli altri valori rimangano come indicato in precedenza (Tab. 5).

Da quanto sopra, è interessante notare quanto segue:

- la metropolitana è il mezzo di trasporto più rispettoso dell'ambiente e operativo sulla base dei sotto-criteri considerati;
- il tram può essere il mezzo di trasporto più appropriato quando mira a trasformare in modo significativo le aree urbane mantenendo e superando i livelli di servizio;
- i BRT sono i mezzi di trasporto più convenienti e socialmente accettati nel pool di sistemi di trasporto in esame: potrebbero essere l'opzione preferita in aree e regioni in cui questi aspetti svolgono un ruolo chiave nel processo decisionale istituzionale;
- la monorotaia rappresenta una soluzione intermedia tra le soluzioni esaminate, inserendosi positivamente in termini di progettazione e costruzione grazie alla sua relativa facilità e velocità di realizzazione.

6. Discussione e conclusioni

Il contributo di questo lavoro alla letteratura di ricerca esistente è duplice. In primo luogo, fornisce un elenco esaustivo di criteri per la valutazione e la selezione ottimale dei sistemi di trasporto urbano di massa a guida vincolata. L'elenco può servire come serbatoio di risorse e può essere adattato all'area di studio e al progetto in fase di valutazione, tenendo conto delle sue complessità e delle

Following the methodological steps described in the previous section, each sub-criterion value multiplies by the weight of the category to which the sub-criterion belongs. This way, derived column (5) is for instance: $0.6 = 0.15 \times 4$, $0.45 = 0.15 \times 3$ etc.

The value assigned to each alternative in terms of each sub-criterion multiplies by the sub-criterion weight as calculated in column (5). For example, concerning the sub-criterion "visual intrusion", this yield: $1.8 = 0.6 \times 3$ (tram), $3 = 0.6 \times 5$ (metro), $0.6 = 0.6 \times 1$ (monorail), $1.8 = 0.6 \times 3$ (BRT) etc.

The overall performance of each alternative finally derived as the sum of the products for all sub-criteria. In this example, as shown in Tab. 4, the overall performance for the tram equals 59.75, and respectively 66.90 for the metro, 58.10 for the monorail and 65.25 for the BRT.

Finally, the alternatives ranking based on their scoring, with the best one featuring the highest. As a result, for the area under study, this yields the following ranking: 1. Metro, 2. BRT, 3. Tram, 4. Monorail. Metro and BRT appear very close together in the first position; in this occasion, a Cost Benefit Analysis (CBA) for these alternatives may add value to the overall process helping to highlight the best solution. To uncover and showcase the impact each basic criterion may have on the final ranking of alternatives being considered, in an additional scenario has been assumed that the weight of each basic criterion is 1 (100%), while the comparative weights with other basic criteria is equal to 0, assuming that all other values remain as previous (Tab. 5) refers.

From the above, it is interesting to note the following:

- *metro is the most environmentally and operational friendly means of transport based on the sub-criteria considered;*
- *tram may be the most appropriate means of transport when aiming at significantly transform urban areas while maintaining and upending service levels;*
- *BRTs are the most cost-effective, socially accepted means of transport among the pool of transportation systems being examined: they could be the preferred option in areas and regions where these aspects play a key role in institutional decision-making;*
- *the monorail represents a great middle ground between the solutions examined, scoring particularly favourably in terms of design and construction as a result of its relative ease and speed of implementation.*

6. Discussion and conclusions

The contribution of this research work to existing research literature is twofold. First of all, it provides for an exhaustive list of criteria for the evaluation and optimum selection of urban guided mass transport systems. This list may serve as a resource 'pool' that can be tailored to the study area and project being evaluated, taking into account both its intricacies and specific needs. Forty-one

Tabella 5 – Table 5

Assegnazione del peso ai criteri di base (%) e punteggio ai sotto-criteri (1-5) per la valutazione e la classificazione dei sistemi di trasporto a guida vincolata urbano in una data area (Caso di studio numerico)
Basic criteria weights (%) and sub-criteria scoring (1-5) for the evaluation and ranking of urban guided transport systems in a given area – Numerical case study area-Imaginary example

Basic criteria <i>Basic criteria</i>	Peso <i>Weights</i>						
Ambientali <i>Environmental</i>	0.15	1	0	0	0	0	0
Operativi <i>Operational</i>	0.15	0	1	0	0	0	0
Progetto e costruzione <i>Design and construction</i>	0.20	0	0	1	0	0	0
Economici <i>Economic</i>	0.20	0	0	0	1	0	0
Sociali <i>Social</i>	0.10	0	0	0	0	1	0
Pianificazione strategica <i>Strategic planning</i>	0.20	0	0	0	0	0	1
Sistemi <i>Systems</i>	Punteggio e classifica <i>Scoring and rating</i>						
Tram	59.75 (3)	52 (4)	89 (2)	79 (4)	51 (2)	46 (3)	40 (1)
Metro	66.90 (1)	78 (1)	110 (1)	100 (3)	35 (4)	53 (2)	32 (2)
Monorotaia <i>Monorail</i>	58.10 (4)	49 (3)	83 (3)	106 (2)	43 (3)	45 (4)	20 (3)
BRT	66.25 (2)	44 (2)	71 (4)	131 (1)	61 (1)	72 (1)	12 (4)

esigenze specifiche. Per valutare comparativamente i sistemi di trasporto in questione sono stati utilizzati 41 sotto-criteri, vincolanti e non vincolanti, derivanti da un esame esaustivo della letteratura; essi sono stati raggruppati in 6 grandi insiemi di criteri generali: ambientali, operativi, tecnici, economici, sociali e strategici. Inoltre, è stato proposto uno strumento di valutazione standardizzato in formato tabellare (Tab. 3), che consente di attribuire un punteggio a ciascuna alternativa per ogni sotto-criterio, come strumento decisionale e di presentazione.

La metodologia proposta può essere combinata con l'analisi costi-benefici, utilizzando i risultati della CBA come modulo integrativo o considerando la CBA nel processo di valutazione globale, ad esempio attraverso una CBA che coinvolga solo le prime due alternative di ranking emergenti dalla metodologia proposta.

L'applicabilità della metodologia proposta potrebbe essere verificata mediante studi di casi reali ex-post che comprendano sistemi di successo e sistemi meno riusciti.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano l'Ing. M. BARBAGLI per il suo contributo nella selezione dei valori raccomandati attribuiti a ciascun sistema di trasporto esaminato nella Tab. 3.

sub-criteria, both binding and non-binding derived from exhaustive literature review have been used for comparatively appraising the transport systems in question; they have been bundled in six major, overarching sets of criteria, namely environmental, operational, technical, economic, social and strategic planning. Moreover, a standardised evaluation tool in a tabular format (Tab. 3) allowing for the scoring of each alternative against each sub-criterion has been proposed to serve as a decision-making and presentation tool.

The proposed methodology may be combined with Cost Benefit Analysis (CBA), either by using the results of CBA as a bolt-on module or by weaving CBA in the overall evaluation process, e.g. through a CBA involving only the first two ranking alternatives out of our proposed framework.

The applicability of the proposed methodology could be verified through real case studies ex-post that include both successful and less successful historical system implementations.

Acknowledgements

The authors would like to thank Eng. M. BARBAGLI for his contribution to the extraction of the recommended values attributed to each examined transport system in Tab. 3.

BIBLIOGRAFIA - REFERENCES

- [1] ANASTASIADOU K., GAVANAS N., PYRGIDIS C., PITSIABA LATINOPOULOU M. (2021), "Identifying and Prioritizing Sustainable Urban Mobility Barriers through a Modified Delphi-AHP Approach. Sustainability", 13, 10386 (doi: 10.3390/su131810386).
- [2] Organisation of Economic Cooperation and Development (1996), "Towards Sustainable Transportation. The Vancouver Conference" - Vancouver, Canada.
- [3] PYRGIDIS C. (2021), "Railway Transportation Systems Design, construction and operation" - CRC Press, 2nd edition (ISBN-13: 978-0367494230).
- [4] PYRGIDIS C., TSIPI D., DOLIANITIS A., BARBAGLI M. (2021), "An overview of the metros, trams and monorails in revenue service and under construction worldwide at the end of 2019" - Ingegneria Ferroviaria, 2, Febbraio 2021, p. 101-122.
- [5] ANASTASIOU E.K., NIKOLOS A. (2019), "Technical and operational applicability verification for a BRT system", Diploma Thesis, Civil Engineering Department, Aristotle University of Thessaloniki, Thessaloniki, Greece.
- [6] TRUBIA S., SEVERINO A., CURTO S., ARENA F., PAU G. (2020), "On BRT Spread around the World: Analysis of Some Particular Cities". Infrastructures, 5, 88 (doi: 10.3390/infrastructures5100088).
- [7] Washington Metropolitan Area Transit Authority (2020), "Framework for Transit Equity: Metrobus Service Guidelines" - Executive Committee.
- [8] YANG X., LIU L. (2020), "A Multi-Objective Bus Rapid Transit Energy Saving Dispatching Optimization Considering Multiple Types of Vehicles", in IEEE Access, vol. 8, p. 79459-79471 (doi: 10.1109/ACCESS.2020.2989334).
- [9] Far east mobility website (2020), <https://www.fareast.mobi/en/brrt/stages> (accessed 1-4-2021).
- [10] Volvo (2021), <https://www.volvobuses.com/en-en/our-offering/bus-rapid-transit.html>.
- [11] DIAZ R.B., HINEBAUGH D. (2009), "Characteristics of Bus Rapid Transit for Decision-Making" - Federal Transit Administration report, <https://nrti.org/wp-content/uploads/2017/05/Low-Res-CBRT-2009-Update.pdf>.
- [12] Federal Transit Administration (2021), "Bus Rapid Transit" - <https://www.transit.dot.gov/research-innovation/bus-rapid-transit>.
- [13] CERVERO R. (2013), "Bus Rapid Transit (BRT): An Efficient and Competitive Mode of Public Transport" - Berkley Institute of urban and regional development, University of California.
- [14] DENG T., NELSON, J. (2011), "Recent developments in bus rapid transit: a review of the literature". Transport Reviews, 31, 1, p. 69-96.
- [15] HODGSON P., POTTER S., WARREN J., GILLINGWATER D. (2013), "Can bus really be the new tram?" - Research in Transportation Economics 39, p. 158-166, (doi: 10.1016/j.retrec.2012.06.009).
- [16] MULLEY C., HENSHER D.A., COSGROVE D. (2017), "Is rail cleaner and greener than bus?" Transportation Research Part D 51, p. 14-28 (doi: 10.1016/j.trd.2016.12.004).
- [17] LEVINE J., SINGER M., MERLIN L., GRENGS J. (2018), "Apples to apples: Comparing BRT and light rail while avoiding the "BRT-Lite" trap" - Transport Policy 69, p. 20-34 (doi: 10.1016/j.tranpol.2018.05.015).
- [18] PAPAIOANNOU P., DELOUKAS A., POLITIS I., VOUGIOUKAS M. (2012), "Comparative analysis of alternative fixed track technologies for Thessaloniki air-link connection" - 2nd International Conference on Road and Rail Infrastructure, Dubrovnik, Croatia.
- [19] Institute for Transportation and Development Policy (2005), "Pre-Feasibility Study for Bus Rapid Transit Hyderabad", Andhra Pradesh.
- [20] SIRIKIJPANICHKUL A., WINYOOPADIT S., JENPANITSU A. (2017), "A multi-actor multi-criteria transit system selection model: A case study of Bangkok feeder system" - Transportation Research Procedia, 25, p. 3736-3755 (doi: 10.1016/j.trpro.2017.05.228).
- [21] SCHLICKMANN M.P., MARTÍNEZ L.M., DE SOUSA J.P. (2017), "A tool for supporting the design of BRT and LRT services". Transportation Research Procedia 27, p. 1171-1178 (doi: 10.1016/j.trpro.2017.12.101).
- [22] LOPEZ LAMBAS M.E., GIUFFRIDA N., IGNACCOLO M., INTURRI G. (2017), "Comparison between Bus Rapid Transit and Light-Rail Transit Systems: A multi-criteria decision analysis approach". Urban Transport XXIII, p. 143-154 (doi: 10.2495/UT170131).
- [23] OGBEIFUN E. et al. (2016), "The Delphi technique: a credible research methodology - Proceedings of the 2016 International Conference on Industrial Engineering and Operations Management", Kuala Lumpur, Malaysia.
- [24] GUERRIERI M. (2019), "Catenary-Free Tramway Systems: Functional and Cost-Benefit Analysis for a Metropolitan Area" - Urban Rail Transit, 5(4):p. 289-309 (doi: 10.1007/s40864-019-00118-y).
- [25] BRONIEWICZ E., OGRODNIK K. (2020), "Multi-criteria analysis of transport infrastructure projects" - Transportation Research Part D, 83, 102351 (doi: 10.1016/j.trd.2020.102351).
- [26] VERMOTE L., MACHARIS C., HOLLEVOET J., PUTMAN K. (2014), "Participatory evaluation of regional light rail scenarios: A Flemish case on sustainable mobility and land-use" - Environmental Science & Policy, 37, p. 101-120 (doi: 10.1016/j.envsci.2013.08.013).
- [27] ZHANG X., ZHANG Q., SUN T., ZOU Y., CHEN H. (2018), "Evaluation of urban public transport priority performance based on the improved TOPSIS method: A case study of Wuhan" - Sustainable Cities and Society 43, p. 357-365 (doi: 10.1016/j.scs.2018.08.013).

- [28] MORILLAS J.M.B., GOZALO G.R., GONZÁLEZ D.M., MORAGA P.A., VÍLCHEZ GÓMEZ R. (2018), "Noise Pollution and Urban Planning" - *Current Pollution Report* 4, p. 208-219 (doi: 10.1007/s40726-018-0095-7).
- [29] LOIS D., MONZÓN A., HERNÁNDEZ S. (2018), "Analysis of satisfaction factors at urban transport interchanges: Measuring travellers' attitudes to information, security and waiting" - *Transport Policy*, 67, p. 49-56 (doi : 10.1016/j.tranpol.2017.04.004).
- [30] WIGGER P. (2012), "MODSafe-Modular Urban Transport Safety and Security Analysis" - *Procedia-Social and Behavioral Sciences*, 48, p. 2616-2625 (doi: 10.1016/j.sbspro.2012.06.1232).
- [31] NORDEFJÆRN T., RUNDMO T. (2018), "Transport risk evaluations associated with past exposure to adverse security events in public transport" - *Transportation Research Part F: Traffic Psychology and Behaviour*, 53, p. 14-23 (doi: 10.1016/j.trf.2017.12.014).
- [32] LAI X., SCHONFELD P. (2016), "Concurrent Optimization of Rail Transit Alignments and Station Locations" - *Urban Rail Transit*, 2(1):p. 1-15 (doi: 10.1007/s40864-016-0033-1).
- [33] MARLETTO G., MAMELI F. (2012), "A participative procedure to select indicators of policies for sustainable urban mobility". *Outcomes of a national test - European Transport Research Review*, 4, p. 79-89.
- [34] CUPPI F., VIGNALI V., LANTIERI C., RAPAGNÀ L., DIMOLA N., GALASSO T. (2021), "High density European Rail Traffic Management System (HD-ERTMS) for urban railway nodes: The case study of Rome" - *Journal of Rail Transport Planning & Management* 17, 100232 (doi: 10.1016/j.jrtpm.2020.100232).
- [35] MAMELI F., MARLETTO G. (2014), "Can National Survey Data be Used to Select a Core Set of Sustainability Indicators for Monitoring Urban Mobility Policies?" - *International Journal of Sustainable Transportation*, 8:5, p. 336-359, (doi: 10.1080/15568318.2012.700000).
- [36] AL HABAHBEH O.M., AL SOUS H., AL-OMARI M. (2018), "Optimum transportation system for the city of Amman" - *Mechatronics Engineering Department, The University of Jordan Technical Report*.
- [37] EHSANI M., WANG, F.Y., BROSCHE G.L. (2013), "Transportation Technologies for Sustainability", (doi: 10.1007/978-1-4614-5844-9).
- [38] SUMANA H.K., BOLIA N.B. (2019), "Improvement in direct bus services through route planning" - *Transport Policy* 81, p. 263-274 (doi: 10.1016/j.tranpol.2019.07.001).
- [39] YATSKIV I., PTICINA I., SAVRASOV S. (2012), "Urban Public Transport System's Reliability Estimation Using Microscopic Simulation" - *Transport and Telecommunication*, 13, 3, p. 219-228 (doi: 10.2478/v10244-012-0018-4).
- [40] FIREW T. (2016), "Analysis of Service Reliability of Public Transportation in the Helsinki Capital Region: The Case of Bus Line 550" - *Master Thesis, School of Engineering, Aalto University*.
- [41] LAMBERTUCCI F. (2016), "Archaeo-mobility. Integrating archaeological heritage with everyday life" - *Procedia Engineering* 165, p. 104-113 (doi: 10.1016/j.proeng.2016.11.741).
- [42] MILLER P., WIRASINGHE S.C., KATTAN L., DE BARROS A. (2014), "Monorails for sustainable transportation". A review - CSCE 2014 General Conference.
- [43] L'HOSTIS A., SOULAS C., VULTURESCU B. (2017), "A Multi-criteria approach for choosing a new public transport system linked to urban development: a method developed in the Bahn" - *Ville project for a tram-train scenario in the Saint-Étienne region". Recherche Transports Sécurité, IFSTTAR*, 01-02, p. 17-25 (doi: 10.4074/S0761898016002028. hal-01670587).
- [44] DELIVOPOULOS G., KRITIKOS P., POLITIS I. (2009), "Problems caused to city operation due to metro construction" - *Proposals, Technical Chamber of Greece, Section of Central Macedonia*.
- [45] HAMURCU M., ALAGAS H.M., EREN T. (2017), "Selection of rail system projects with Analytic Hierarchy Process and goal programming" - *Sigma Journal of Engineering & Natural Science*, 8 (4), p. 291-302.
- [46] LOPEZ LAMBAS M.E., VALDÉS C. (2013), "BHLS, Bus, Tram: thesis, antithesis, synthesis", *Ingegneria Ferroviaria*, 68, 6, p. 569-585.
- [47] CYRIL A., MULANGI R.H., GEORGE V. (2019), "Performance Optimization of Public Transport Using Integrated AHP-GP Methodology" - *Urban Rail Transit* 5, p. 133-144 (doi: 10.1007/s40864-019-0103-2).
- [48] HAMURCU M., EREN T. (2019), "An Application of Multicriteria Decision-making for the Evaluation of Alternative Monorail Routes" - *Mathematics*, 7, 16 (doi: 10.3390/math7010016).
- [49] LI M., YAN F., NIU R., XIANG N. (2021), "Identification of causal scenarios and application of leading indicators in the interconnection mode of urban rail transit based on STPA" - *Journal of Rail Transport Planning & Management*, 17, 100238 (doi: 10.1016/j.jrtpm.2021.100238).
- [50] LIBERATORE M. (1994), "Sistemi di trasporto di massa e tecnologie innovative" - Masson, Milano (ISBN 88-214-0676-8).
- [51] VUCHIC V.R. (2005), "Urban Transit: Operations, Planning and Economics" - John Wiley & Sons (ISBN: 978-0-471-63265-8).
- [52] ZHU E., LI T. (2021), "Energy consumption analysis of straddle monorail transit in the operational phase based on grey relational method" - *Beijing Jiaotong University*.
- [53] Public Transport Users Association, Victoria, Australia (2021), "Myth: Public transport doesn't really save energy", <https://www.ptua.org.au/myths/energy/>.
- [54] SAATY T.L. (1980), "The Analytic Hierarchy Process" - McGraw-Hill, New York.