POLITECNICO DI TORINO
Repository ISTITUZIONALE

Automatic passenger counting on buses for local public transport: evaluation of the reliability of a system based on pressure sensors|Conteggio automatico dei passeggeri su

Original
Automatic passenger counting on buses for local public transport: evaluation of the reliability of a system based on pressure sensors|Conteggio automatico dei passeggeri su autobus per il trasporto pubblico locale: valutazione dell'affidabilità di un sistema basato su sensori di pressione / Cavallero, A., Caravello, A., Colombo, L., Dalla Chiara, B., Urso, P., Zanini, M.. - In: INGEGNERIA FERROVIARIA. - ISSN 0020-0956. - 78:11(2023), pp. 773-793. [10.57597/IF.11.2023.ART.1]

Availability:
This version is available at: 11583/2988261 since: 2024-05-02T14:31:21Z

Publisher:
CIFI

Published
DOI:10.57597/IF.11.2023.ART.1

Terms of use:

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

Publisher copyright

(Article begins on next page)

26 November 2026

Conteggio automatico dei passeggeri su autobus per il trasporto pubblico locale: valutazione dell'affidabilità di un sistema basato su sensori di pressione

Automatic passenger counting on buses for local public transport: evaluation of the reliability of a system based on pressure sensors

Alina CAVALLERO [*]
Alessia CARAVELLO [*]
Luca COLOMBO [**]
Bruno DALLA CHIARA [*]
Pietro URSO [***]
Marco ZANINI [***]

(https://www.medra.org/servlet/view?lang=it&doi=10.57597/IF.11.2023.ART.1)

Sommario - Il periodo della pandemia COVID-19 ha imposto il distanziamento interpersonale in vari luoghi, *in primis* sui trasporti pubblici: conoscere in automatico i passeggeri presenti a bordo sarebbe stato molto utile, ma raramente possibile. Oggi, a pandemia auspicabilmente terminata, la tendenza verso il MaaS ed un incremento dell'affidabilità oltre che una più corretta programmazione del TPL rendono il conteggio automatico sui mezzi pubblici un elemento oramai indispensabile.

Questo studio si pone come obiettivo quello di fornire ai gestori del TPL dati affidabili circa l'entità della domanda effettiva, per poter sia pianificare sia gestire con maggiore accuratezza il servizio, anche ai fini della manutenzione della flotta. Nell'ambito di una estesa sperimentazione su autobus in circolazione nella città di Torino, per poter disporre di una stima per quanto possibile esatta dell'utenza a bordo, sono stati installati innovativi sistemi di conteggio passeggeri: questi sono basati su una già nota idea, l'uso dei sensori di pressione installati nell'impianto delle sospensioni degli autobus ed un successivo algoritmo, sviluppato dagli autori.

I sensori, insieme con il sistema di acquisizione, sono in grado di fornire il valore della pressione agente sulle sospensioni del mezzo, in continuo e in tempo reale, dato già acquisibile su tutti i mezzi moderni. I dati trasmessi dai sensori vengono convertiti in una stima del numero di passeggeri presenti a bordo di un autobus mediante l'algo-

Summary *- The period of the COVID-19 pandemic imposed interpersonal distancing in various places, first of all, for public transport: knowing automatically the passengers on board would have been very useful, but rarely possible. Today, with the pandemic hopefully over, the trend towards MaaS (Mobility as a Service) and an increase in reliability of available instruments as well as more correct LPT scheduling make automatic passenger counting (APC) nowadays an indispensable element on public transport.*

The aim of this study is to provide local public transport (LPT) managers with reliable data on the actual demand, to be able to both plan and manage the service more accurately, and also for fleet maintenance purposes. As part of an extensive experiment on buses operating in the city of Turin (IT), innovative passenger counting systems were installed to obtain an estimate as accurate as possible of the number of passengers on board: these are based on an already known idea, the use of pressure sensors installed in the bus suspension system and a subsequent algorithm developed by the authors.

The sensors, together with the acquisition system, can provide the value of the pressure acting on each suspension of the vehicle, continuously and in real-time, data that can already be acquired on all modern vehicles. The data transmitted by the sensors are converted into an estimate of the number of passengers on board a vehicle using an algorithm and a linear regression model. This equipment, although

[*] Politecnico di Torino, Dipartimento DIATI-Trasporti, corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino.

[**] Politecnico di Torino, corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino.

[***] GTT, Gruppo Torinese Trasporti, Torino.

[*] *Politecnico di Torino, Dept. DIATI-Transport systems, corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Turin, IT.*

[**] *Politecnico di Torino, corso Duca degli Abruzzi 24, 10129 Turin, IT.*

[***] *GTT, Gruppo Torinese Trasporti, Turin, IT.*

ritmo e l'utilizzo di un modello di regressione lineare. Questo equipaggiamento, seppure impegnativo come concezione, può essere oggi di facile e veloce implementazione sulla base delle impostazioni sviluppate: i risultati dimostrano che esso consente di ottenere dati molto affidabili, costituendo un'alternativa economica e vantaggiosa rispetto ad altri sistemi di conteggio passeggeri già presenti in commercio.

Tale strumentazione, oltre a fornire una stima della domanda a chi programma il servizio di trasporto pubblico, risulta utile anche a chi ne fruisce poiché consente di conoscere in tempo reale lo stato di occupazione dell'autobus, che può essere reso disponibile anche alle fermate o su specifici applicativi.

1. Introduzione ed obiettivi generali

Gli ultimi decenni sono stati caratterizzati da un forte incremento della domanda di mobilità, sia in relazione alla crescita ed allo sviluppo delle infrastrutture, sia dell'offerta dei sistemi di trasporto, con grande impatto sulla quotidianità nonché sul traffico e sulla rete viaria nel suo complesso.

Negli ultimi anni soprattutto, fatta eccezione per il periodo COVID-19, si è osservato un aumento di mobilità dovuto alla sempre maggiore richiesta di spostamenti in ambiti urbani ed extra-urbani, per scopi lavorativi o privati. L'emergere e il consolidarsi di sensibilità nonché norme ambientali, associate alla spinta verso la mobilità come servizio (MaaS), stanno fomentando la necessità di aumentare l'offerta fornita dal settore dei trasporti pubblici, soprattutto quelli in ambito urbano, dove la maggior parte della popolazione risiede ed espleta i propri spostamenti quotidiani. Contestualmente a ciò, per poter garantire un miglioramento della qualità del servizio e diminuire le emissioni inquinanti, è nata l'esigenza di migliorare e potenziare il trasporto pubblico locale sulla base della domanda effettiva, non più solo stimata oppure rilevata sporadicamente con campioni basati su conteggi manuali.

Nel 2020-2023, il periodo della pandemia COVID-19 ha imposto il distanziamento interpersonale in vari luoghi, in primis i trasporti pubblici: conoscere in automatico i passeggeri a bordo sarebbe stato molto utile, raramente possibile (Fig. 1). Oggi, a pandemia auspicabilmente terminata, la rafforzata tendenza verso il MaaS ed un incremento dell'affidabilità oltre che più corretta programmazione del TPL rendono il conteggio automatico sui mezzi pubblici un elemento oramai indispensabile.

I sistemi di trasporto, per poter rendere all'utenza un servizio adeguato che punti sulla qualità, la sicurezza e il comfort, si sono dovuti adeguare a questa inarrestabile crescita tecnologica, evolvendosi via via verso nuovi orizzonti e realtà più all'avanguardia, con l'introduzione di innovativi sistemi di trasporto intelligenti (ITS) ormai da 3-4 decenni (AVM, AVL, ecc.) fino ad approdare nell'ultimo

challenging in concept, can now be implemented quickly and easily based on the settings developed: the results show that it allows very reliable data to be obtained, constituting an economical and advantageous alternative to other APC already present on the market.

This instrumentation not only provides an estimate of demand to those who plan the public transport service but it is also useful to those who use it, as it allows them to know the occupancy status of the bus in real-time, which can also be made available at bus stops or on applications.

1. Introduction and general objectives

The last few decades have been characterized by a sharp increase in demand for mobility, both in relation to the

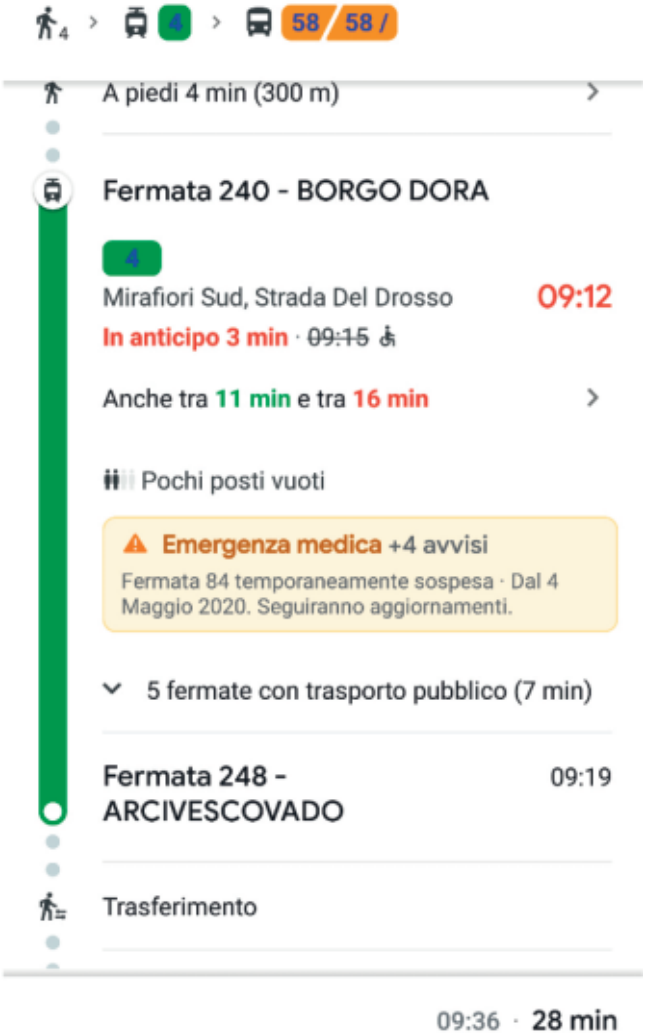


Figura 1 – Prime applicazioni sull'affollamento derivanti da sperimentazioni sul conteggio dei passeggeri in periodo COVID: "pochi posti vuoti".

Figure 1 – First applications on crowding from passenger counting experiments in COVID period: 'few empty seats' message.

decennio agli APC (*Automatic Passenger Counting*): sistemi automatici utili a valutare la densità a bordo dei mezzi.

La conoscenza del numero di passeggeri che sono di fatto presenti a bordo di un mezzo diviene così un dato fondamentale per conoscere non solo la domanda ma anche le fermate più utilizzate e gli interscambi preferiti, così da potenziare la multi-modalità, adattare la frequenza di passaggio sulle linee ove necessario, definire percorsi di linee e fermate sulla base dei flussi di passeggeri.

Tale dato può quindi essere utilizzato da chi fornisce il servizio per programmare la frequenza dei passaggi, selezionare la tipologia di mezzi più adatta (anche in termini di dimensioni), riprogrammare eventualmente le linee, sulla base della conoscenza dell'affollamento, dei saliscendi, e stimare l'usura dei mezzi legata al carico. Anche l'utenza del trasporto pubblico viene avvantaggiata dalla conoscenza dello stato di occupazione del mezzo, attraverso messaggistica, applicazioni per dispositivi portatili, pannelli posti in corrispondenza delle banchine, per consentire la possibilità di scelta del migliore percorso o mezzo di trasporto ed eventualmente usufruire di servizi di mobilità differenti.

Gli APC si basano su presupposti tecnologici più ampi e consolidati in un arco temporale di circa 30 anni, in alcune città, per i quali le norme in ambito europeo che ne regolano l'utilizzo e ne incoraggiano l'impiego ad oggi in vigore sono formalmente cominciate oltre dieci anni or sono:

A. la "Direttiva 2010/40/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 7 luglio 2010 sul quadro generale per la diffusione dei sistemi intelligenti nel settore del trasporto stradale e nelle interfacce con altri modi di trasporto" [1], rivista nel novembre 2023;
B. il Piano di Azione ITS per la diffusione di sistemi di trasporto intelligenti in Europa, del 2014 [2].

Anche in ambito italiano sono in vigore norme che promuovono la diffusione degli ITS, ad esempio l'Art. 8 del D.L. 18 ottobre 2012, n. 179 sulle "Misure per l'innovazione dei sistemi di trasporto" che integra la direttiva europea 2010/40/UE del 7 luglio 2010, citata in precedenza. Per quanto riguarda i sistemi APC, la trattazione in letteratura è riconducibile a svariati articoli che pongono l'attenzione sia sui sistemi di conteggio manuali, gravati dall'eventualità di errori grossolani legati alla fase di conteggio visivo e alla trascrizione dei dati nonché dall'onerosità di un rilievo sistematico, non a campione, sia su altre metodologie come: sistemi di videosorveglianza, telecamere ad infrarossi o radiofrequenze (queste ultime in genere più onerose). I sistemi di conteggio passeggeri con sensori di pressione denominati "indiretti", poiché si basano sulla stima del carico complessivo gravante sull'autobus, risultano infatti più affidabili e meno costosi rispetto ai sistemi APC generalmente più diffusi in commercio, che stimano il numero dei passeggeri con una misura diretta effettuata mediante sistemi ad infrarossi oppure ottici.

All'interno dell'autobus utilizzato durante la ricerca, oltre alla strumentazione relativa ai trasduttori di pressio-

growth and development of infrastructure and the supply of transport systems, with a great impact on everyday life as well as on traffic on the road network as a whole.

In recent years especially, except for the COVID-19 period, an increase in mobility has been observed due to the ever-increasing demand for travel in urban and extra-urban areas, for work or private purposes. The emergence and the consolidation of environmental awareness with related rules, coupled with the push towards mobility as a service (MaaS), are fomenting the need to increase the supply provided by the public transport sector, especially in an urban environment, where most of the population resides and makes their daily journeys. At the same time, in order to guarantee an improvement in service quality and reduce pollutant emissions, the need has arisen to improve and expand LPT on the basis of actual demand, no longer merely estimated or sporadically measured with samples based on manual counts.

In 2020-2023, the period of the COVID-19 pandemic imposed interpersonal distancing in various places, primarily public transport: knowing the passengers on board automatically would have been very useful, rarely possible (Fig. 1). Today, with the pandemic hopefully over, the strengthened trend towards MaaS and an increase in reliability of usable instruments as well as more correct scheduling of LPT make automatic counting on public transport now an indispensable element.

In order to be able to provide users with an adequate service that focuses on quality, safety and comfort, transport systems have had to adapt to this unstoppable technological growth, gradually evolving towards new horizons and more avant-garde realities, with the introduction of innovative intelligent transport systems (ITS) over the last 3-4 decades (AVM, AVL, etc.), and APC in the last decade: automatic systems usable to assess the density on board vehicles.

Knowledge of the number of passengers who are on board a vehicle thus becomes a fundamental piece of data to know not only the demand but also the most frequently used stops and preferred interchanges, thus enhancing the multimodality, adapt the frequency of passing on lines where necessity, define routes of lines and stops on the basis of passenger flows.

This data can then be used by staff providing the service to plan the frequency of passages, select the most suitable type of vehicle (also in terms of size), possibly reschedule the lines, based on knowledge of crowding, stepping in and out users, and assess the wear and tear on the vehicles, load-related. Public transport users also benefit from the knowledge of the occupancy status of the vehicles, through messaging, apps for portable devices, and variable message panels placed at the platforms, to allow for possibility of choosing the best transport route or vehicle and possibly to take advantage of different mobility services.

APCs are based on broader technological assumptions that have been consolidated over a period of about 30 years

ne, erano contemplati anche sistemi ottici e altri sistemi di conteggio passeggeri denominati ERF (*Electronic Registering Fareboxes*); questi sistemi già precedentemente installati a bordo, operano le stime in base alla validazione elettronica dei biglietti.

Volendo fare un confronto tra queste strumentazioni pre-installate e quella inserita in fase di sperimentazione, che prevedeva l'utilizzo di sensori di pressione, si è evidenziato che il dato dei sensori di pressione, benché sia riferito al totale di passeggeri a bordo tra una fermata e l'altra e non consenta di avere l'esatta stima di passeggeri saliti e scesi, fornisca comunque conteggi più affidabili.

Infatti i sistemi ottici consentono di discretizzare le quantità di passeggeri scesi e saliti ad una determinata fermata, ma spesso tali stime risultano essere imprecise e complicate da ottenere.

Come riportato dall'Ing. TRANCUCCIO [3], per poter utilizzare le immagini fornite dalle videocamere presenti a bordo di un autobus a scopo di sorveglianza, è necessaria una loro rielaborazione per ottenere una stima di conteggio passeggeri.

Questa manipolazione delle immagini risulta necessaria poiché tali sistemi ottici nascono con uno scopo diverso, quello di videosorveglianza, e non di valutazione dello stato di carico. Inoltre, per risultare efficaci occorrono un riposizionamento delle videocamere per consentire una migliore visualizzazione delle zone di accesso con un operatore oppure un software aggiuntivo per l'effettuazione dei conteggi.

Si nota quindi che i costi relativi alla messa in opera della strumentazione ed all'elaborazione delle immagini ottenute sarebbero superiori a quelli di un conteggio passeggeri basato sui sensori, con l'aggravante di una minore affidabilità delle stime.

Oltre alle telecamere di sorveglianza, a bordo del mezzo in sperimentazione era già presente un'ulteriore attrezzatura preinstallata in grado di fornire una stima di conteggio passeggeri mediante sistemi ottici posizionati sopra ciascuna delle porte dell'autobus.

Questa soluzione tecnologica è in grado di operare la stima monitorando l'area sottostante a ciascuna porta, dividendo la suddetta area in due sotto-sezioni per valutare se le condizioni di flusso siano in entrata o in uscita.

I pacchetti di dati di tale strumentazione, denominata INFO_PAX, che viaggiano sulla rete di bordo, contengono informazioni relative al numero totale di passeggeri saliti e scesi ed al numero totale di passeggeri presenti a bordo.

Durante l'analisi di tali pacchetti si sono spesso riscontrati degli errori come l'azzeramento delle stime, la sottostima dei passeggeri totali presenti a bordo e conteggi errati dei passeggeri entranti o uscenti.

Ad esempio, si è notato che in corrispondenza dei capolinea si verificasse spesso un annullamento del conteggio dei passeggeri stimati da questa strumentazione. Que-

in some cities. For which the European standards regulating their use and encouraging their application today, formally began more than a decade ago:

A. *the 'Directive 2010/40/EU of the European Parliament and of the Council of 7 July 2010 on the framework for the deployment of Intelligent Systems in the field of road transport and for interfaces with other modes of transport' [1], revised in November 2023;*

B. *the 2014 ITS Action Plan for the Deployment of Intelligent Transport Systems in Europe [2].*

In Italy, there are regulations in force that promote the spread of ITS, for example, Art. 8 of Decree Law no. 179 of 18 October 2012 on 'Measures for the innovation of transport systems', which incorporates European Directive 2010/40/EU of 7 July 2010, mentioned above. Regarding APC systems, the discussion in the literature can be traced back to various papers that focus on both manual counting systems, burdened by the possibility of gross errors linked to the visual counting phase and the transcription of data as well as the onerousness of a systematic, non-sampling survey, and on other methodologies such as: video surveillance systems, infrared cameras or radio frequencies (the latter being generally more onerous). Passenger counting systems with pressure sensors known as 'indirect', since they are based on the estimation of the overall load on the bus, are in fact more reliable and less expensive than the APC systems generally available on the market, which estimate the number of passengers with a direct measurement by means of infrared or optical systems.

Inside the bus used during the research, in addition to the pressure transducer instrumentation, there were also optical and other passenger counting systems called ERFs (Electronic Registering Fareboxes); these, which had already been installed on board, operate estimates based on the electronic validation of tickets.

A comparison between these pre-installed instruments and the one included in our trial phase, which involved the use of pressure sensors, showed that the pressure sensor data, although referring to the total number of passengers on board between stops and not allowing for an exact estimate of passengers stepping in and out, still provided more reliable counts.

Indeed, optical systems make it possible to discretise the quantities of passengers getting off and on at a given stop, but such estimates are often inaccurate and complicated to obtain.

As reported by Eng. TRANCUCCIO [3], to use the images provided by the video cameras on board a bus for surveillance purposes implies the need to reprocess them for obtaining an estimated passenger counting.

This manipulation of the images is necessary because these optical systems were created for a different purpose, that of video surveillance, and not for load status assessment. Furthermore, in order to be effective, repositioning of the cameras to allow a better view of the access zones

sta situazione appare ben diversa da quella osservata dai dati dei sensori di pressione dove anche in corrispondenza dei capolinea la stima risulta affidabile e non affetta dallo stato di carico quasi a vuoto. Ciò è dovuto al fatto che la tara media del veicolo non influenza i conteggi poiché viene considerata nel termine noto "b" della retta di interpolazione lineare, come oltre specificato.

Un altro problema che è stato riscontrato è quello relativo alla mancata accuratezza dei sistemi ottici in caso di sovraffollamento. Quando il bus presenta un carico eccessivo, le persone – stazionando sotto le telecamere – non consentono a tali strumenti di discretizzare il flusso entrante da quello uscente, portando ad avere vari errori nelle stime.

Tali dati necessitano di costi elevati, dovuti ad una rielaborazione che consenta di decodificare le informazioni presenti nei pacchetti e di calibrare l'area sottostante le porte mappata delle telecamere, rispetto ai sensori di pressione.

Da ultimo vi sono strumentazioni basate sulla validazione dei titoli di viaggio a bordo del mezzo; queste ultime non consentono di avere delle stime affidabili per svariati motivi, tra i quali il fatto che non tutti i passeggeri validino il biglietto a causa del non rispetto della regola o degli elevati livelli di sovraffollamento che non sempre permette alle persone di raggiungere le macchine validatrici.

2. Letteratura

I riferimenti bibliografici con i quali ci si è confrontati per questo studio riguardano circa un ventennio di analisi, ricerche ed alcune applicazioni.

Nel *Transit Cooperative Research Program* (TCRP) *Synthesis* 29, *Passenger Counting Technologies and Procedures* [4], viene evidenziata la necessità di implementare soluzioni alternative per poter soddisfare la crescita della domanda del sistema dei trasporti, dovuta allo sviluppo e all'ampiamento degli agglomerati urbani, minimizzando l'impatto ambientale.

Primaria la ricerca condotta da Pavlidis (1999) [5], in Minnesota basata sul rilevamento automatico dei passeggeri a bordo dei veicoli transitanti nella corsia ad alta occupazione (*High Occupancy Vehicle* HOV) che è stata un interessante spunto di riflessione. Il conteggio, eseguito in questo caso con i metodi della banda d'onda e della visione artificiale, aveva dimostrato che solo utilizzando la larghezza di banda del vicino infrarosso fosse possibile ottenere dei risultati attendibili e delle immagini nitide, a differenza del medio infrarosso che, a velocità sostenute, non riesce invece a fornire lo stesso grado di dettaglio.

Un altro studio di ragguardevole utilità venne condotto da Kimpel *et al.* (2003) [6], presso il *Tri-County Metropolitan Transportation District* di Oregon (Tri-Met). L'accuratezza e la precisione della tecnologia di conteggio automatico dei passeggeri in questo caso venivano valutate confrontando i

with an operator or additional software for counting is required.

It can therefore be seen that the costs of setting up the instrumentation and processing the resulting images would be higher than those of a sensor-based passenger count, with the aggravating factor of lower reliability of the estimates.

In addition to the surveillance cameras, there was additional pre-installed equipment on board the vehicle, under experimentation, that could provide an estimated passenger count by means of optical systems positioned above each of the bus doors.

This technological solution is able to perform the estimation by monitoring the area below each port, dividing this area into two sub-sections to assess whether the flow is incoming or outgoing.

The data packets of this instrumentation, called INFO_PAX, that are transferred on the on-board network, contain information on the total number of passengers on and off and the total number of passengers on board.

During the analysis of these packages, errors such as zeroing of estimates, underestimation of total passengers on board and incorrect counts of incoming or outgoing passengers were often found.

For example, it was noted that at the bus terminal there was often a cancellation of the passenger count estimated by this instrumentation. This situation appears quite different from that observed from the pressure sensor data, where even at the bus terminal the estimation is reliable and unaffected by the near-empty state. This is due to the fact that the average vehicle tare does not influence the counts as it is taken into account in the known term 'b' of the linear interpolation line, as later detailed.

Another problem that has been encountered is the lack of accuracy of the optical systems in case of overcrowding. When the bus is overloaded, passengers – standing under the cameras – do not allow these instruments to discretize the incoming flow from the outgoing one, leading to various errors in the estimates.

These data require higher costs, due to reprocessing in order to decode the information in the packets and to calibrate the mapped area underneath the camera doors, with respect to the pressure sensors.

Lastly, there are instruments based on the validation of tickets on board the vehicle; these do not allow for reliable estimates for various reasons, including the fact that not all passengers validate their tickets due to non-compliance with the rules or the high levels of overcrowding that do not always allow passengers to reach the validating machines.

2. Literature

The bibliographical references that inspired this study cover about two decades of analyses, research and some applications.

In the Transit Cooperative Research Program (TCRP) Synthesis 29, Passenger Counting Technologies and Proce-

dati dei conteggi APC con i dati derivanti dai conteggi dalle videocamere. Lo scopo era sviluppare piani di campionamento impiegabili sia per la segnalazione mensile dei passeggeri e sia per la segnalazione annuale del NTD (*National Transit Database*). I risultati ottenuti mostravano che i sistemi APC utilizzati presentavano margini d'errore notevolmente bassi ed avevano una buona accuratezza rispetto ad una raccolta dati manuale nonché agli output delle videocamere, tuttavia a volte – in funzione di determinate condizioni (temperatura superiore ai 40°C e tipologia di autobus) – sovrastimavano il carico dei passeggeri.

Lo studio di Pinna *et al.* (2010) [7], analizzava come stimare la domanda di mobilità sfruttando diverse tecnologie di conteggio automatico dei passeggeri utilizzando una metodologia indiretta basata sulla valutazione del carico complessivo agente sul veicolo. Di fatto tale disamina è rimasta ancora molto attuale, salvo che tale tipologia di soluzione oggi può vedere anche l'applicazione concreta.

Un ulteriore riferimento d'interesse per questo studio è la ricerca condotta da Nielsen *et al.* (2014) [8], nella città di Copenaghen: gli autori provarono a conteggiare i passeggeri a bordo di un treno locale partendo dal peso rilevato da sensori posizionati sulle sospensioni pneumatiche dello stesso. I risultati dimostrarono che un sistema di conteggio passeggeri basato sul peso fosse sensibilmente più affidabile rispetto ad altre metodologie basate sul mero conteggio di salita e discesa dei passeggeri, nonostante le masse sospese su un treno, per quanto più piccolo rispetto a quelli di lunga percorrenza, sia elevate in comparazione a quelle di passeggeri; questo divario è molto meno rilevante in un mezzo pubblico come un autobus o un tram.

Con il crescente sviluppo dei dispositivi mobili personali e la correlativa dipendenza dalle comunicazioni *wireless fidelity* (Wi-Fi) negli spazi pubblici vengono condotti studi empirici sull'utilizzo dei dati del segnale Wi-Fi per poter stimare i flussi di passeggeri. In merito a questo metodo di analisi, Mishalani R.G. (2016) [9] combinando i dati del Wi-Fi con i dati di sistemi APC presenti a bordo e, anche se tali dati non corrispondono ai flussi reali, risultano utili se aggregati con altre stime a bordo. Analogamente, in Italia, Nitti, Pinna, Pintor, Pilloni e Barabino (2020) [10] presentano iABACUS, un sistema di conteggio automatico dei passeggeri su un autobus basato sulla tecnologia Wi-Fi che ha l'obiettivo di esaminare e indagare la mobilità urbana andando a monitorare i passeggeri lungo il loro percorso. La precisione di tale sistema è risultata intorno al 100% nel caso statico e quasi del 94% nel caso dinamico; in parallelo allo studio svolto e riportato dal presente articolo sono state svolte analisi similari con sniffer WiFi: la presenza di veicoli privati adiacenti al bus, eventualmente in coda ad un semaforo, è sovente difficile da filtrare come pure doppi dispositivi o dispostivi disattivati dai passeggeri, il che porta a variazioni abbastanza elevate del numero effettivo di utenti a bordo del bus.

Un documento invece che mira a valutare l'accuratezza e la precisione di un sistema APC commerciale a infrarossi all'interno di un mercato europeo è stato redatto da

dures [4], the need to implement alternative solutions to manual counting in order to meet the growth in demand for transport systems, due to the development and expansion of urban agglomerations, while minimising environmental impact, is highlighted.

Primarily, the research conducted by Pavlidis (1999) [5] in Minnesota, based on the automatic detection of passengers in vehicles travelling in the High Occupancy Vehicle (HOV) lane, was an interesting stimulus for thought. The counting, performed in this case using the waveband and machine vision methods, had shown that only by using the near-infrared bandwidth was it possible to obtain reliable results and sharp images, unlike the mid-infrared, which cannot provide the same degree of detail at high speeds.

Another remarkably useful study was conducted by Kimpel et al. *(2003) [6], at the Tri-County Metropolitan Transportation District in Oregon (Tri-Met). The accuracy and precision of APC technology in this case was evaluated by comparing data from APC counts with data from camera counts. The aim was to develop sampling plans that could be used for both monthly passenger reporting and annual NTD (National Transit Database) reporting. The results showed that the APC systems used had remarkably low margins of error and good accuracy compared to manual data collection and camera outputs, but sometimes – depending on certain conditions (temperature above 40°C and type of bus) – overestimated passenger loads.*

The study by Pinna et al. *(2010) [7], analysed how to estimate mobility demand by exploiting various APC technologies using an indirect methodology based on the assessment of the overall load acting on the vehicle. In fact, this analysis is still very relevant today, except that this type of solution can now also see first practical applications.*

A further reference of interest for this study is the research conducted by Nielsen et al. *(2014) [8], in the city of Copenhagen: the authors tried to count the passengers on board a local train on the basis of the weight detected by sensors placed on the train's air suspension.*

The results showed that a passenger counting system based on weight was significantly more reliable than other methodologies based on the mere counting of passengers boarding and stepping out, even though the masses suspended on a train, although smaller than on long-distance trains, are high in comparison to those of passengers; this difference is much less relevant in vehicles for public transport such as a buses or trams.

With the increasing development of personal mobile devices and the correlating reliance on wireless fidelity communications (Wi-Fi) in public spaces, empirical studies are being conducted on the use of Wi-Fi signal data to estimate passenger flows. Regarding this method of analysis, Mishalani R.G: (2016) [9] combined Wi-Fi data with data from on-board APC systems, and although this data do not correspond to actual flows, it is useful when aggregated with other on-board estimates. Similarly, in Italy, Nitti, Pinna, Pintor, Pilloni and Barabino (2020) [10] present iABA-

Olivo *et al.* (2019) [11] impiegando circa 1000 dati grezzi raccolti da PTC italiano. Dai risultati emerge che il sistema ha mostrato una tendenza nel sottostimare i passeggeri saliti e non i passeggeri discesi.

Infine, il più recente studio di Gonzalez *et al.* (2022) [12] presenta un sistema *Be-In/Be-Out* (BIBO) che utilizza l'identificazione a radiofrequenza per il monitoraggio dei passeggeri a bordo dei mezzi di trasporto pubblici ottenendo matrici O/D che risultano affidabili e molto rappresentative sulla mobilità dei servizi di trasporto pubblico.

A differenza degli studi e degli articoli sopradetti, la ricerca che qui viene illustrata è tra le poche in ambito europeo che mira a valutare l'affidabilità e l'accuratezza della stima di un APC confrontando i dati manuali del carico a bordo con quelli automatici del sistema di pressione delle sospensioni.

3. Sperimentazione

Alla luce di quanto indicato, l'obiettivo di tale sperimentazione è stato dunque quello di sviluppare un'innovativa tecnologia studiando e mettendo in atto un metodo, alternativo a quelli convenzionali, di conteggio automatico dei passeggeri a bordo di veicoli su gomma adibiti al trasporto pubblico locale urbano ed extraurbano, che possa colmare quel gap esistente ad oggi tra le metodologie presenti nel settore. Tale tecnologia consente di conoscere in modo continuo ed in tempo reale il numero di passeggeri presenti all'interno di un veicolo, sfruttando una strumentazione di facile implementazione, che richiede bassi costi di acquisto e manutenzione.

L'azienda che ha collaborato passo-passo a tale studio sperimentale è GTT (Gruppo Torinese Trasporti S.p.a.), che gestisce l'intera rete del TPL, urbano ed extraurbano, della città di Torino.

La sperimentazione si è basata sull'utilizzo di trasduttori di pressione che, appositamente montati sulle sospensioni pneumatiche di un autobus di linea adibito al trasporto pubblico urbano, hanno consentito di valutare la pressione dell'aria dell'impianto delle sospensioni ECAS (*Electronically Controlled Air Suspension*) e ricavare il valore del carico a bordo del mezzo.

Il veicolo che l'azienda del Gruppo Torinese Trasporti ha messo a disposizione per portare avanti il progetto è un mezzo su gomma lungo 12 m e alimentato a gasolio (Mercedes Conecto Euro6).

Poiché lo scopo principale è stato studiare e tarare un sistema che permettesse di contare in modo accurato, con margini di errore molto bassi, il numero dei passeggeri a bordo, si è scelta una linea che raccogliesse un bacino d'utenza elevato e che passasse da poli attrattivi e punti di snodo strategici della città metropolitana di Torino, come la stazione centrale di Porta Nuova, il Campus universitario Einaudi, il tribunale di Torino e la Mole Antonelliana, che è sede di un museo molto frequentato, come riportato in Fig. 2.

CUS, an automatic passenger counting system on a bus based on Wi-Fi technology that aims to examine and investigate urban mobility by tracking passengers along their route. The accuracy of such a system resulted around 100% in the static case and almost 94% in the dynamic case; in parallel to the study carried out and reported by this paper, similar analyses were carried out with WiFi sniffers: the presence of private vehicles adjacent to the bus, possibly queuing at a traffic light, is often difficult to filter out, so as are double devices or devices deactivated by passengers, which leads to fairly high variations in the actual number of travelers on board the bus.

A paper, on the other hand, aiming to evaluate the accuracy and precision of a commercial infrared APC system within a European market was prepared by Olivo et al. *(2019) [11] using approximately 1000 raw data collected by the Italian PTC. The results demonstrate that the system showed a tendency to underestimate ascending passengers and not descending passengers.*

Finally, the most recent study by Gonzalez et al. *(2022) [12] presents a Be-In/Be-Out (BIBO) system that uses radio-frequency identification to monitor passengers on board public transport vehicles, obtaining O/D matrices that are reliable and very representative of the mobility of public transport services.*

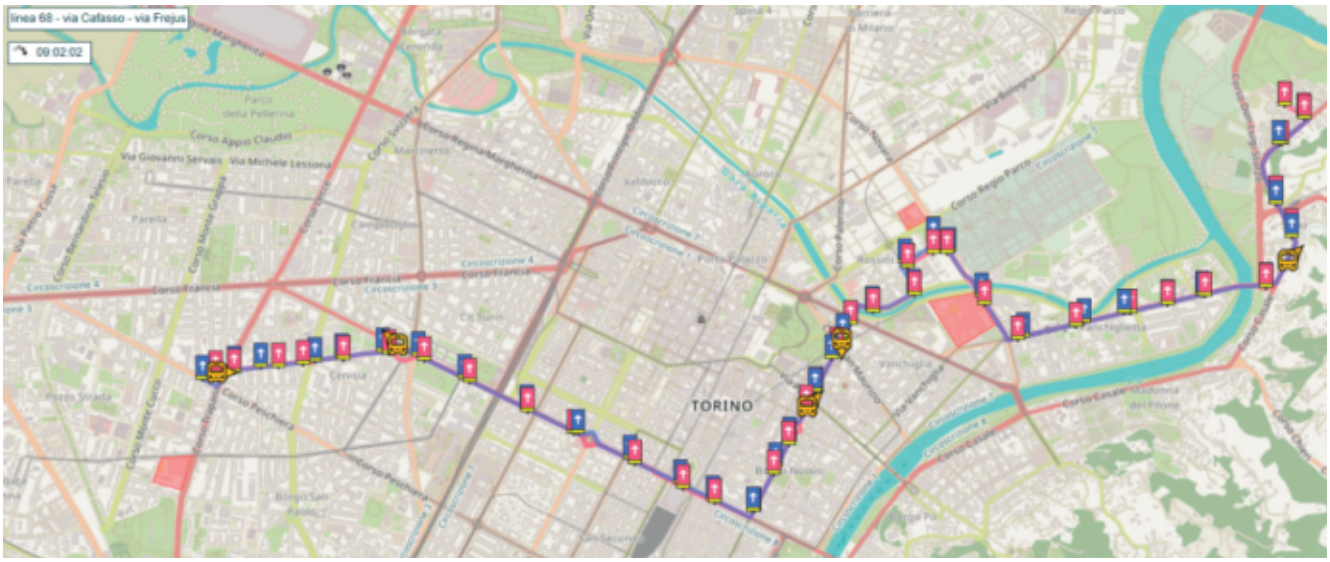
Unlike the above-mentioned studies and papers, the research presented here is among the few in Europe that aims to assess the reliability and accuracy of an APC estimate by comparing manual on-board load data with automatic suspension pressure system data.

3. Experimentation

In the light of the above, the objective of this experimentation was therefore to develop an innovative technology by studying and implementing an alternative method to the conventional ones for automatically counting passengers on board road vehicles used for local urban and suburban public transport, which could fill the gap that currently exists among the methodologies in the sector. This technology makes it possible to know continuously and in real-time the number of passengers inside a vehicle, using an easy-to-implement instrumentation that requires low investment and maintenance costs.

*The company that collaborated, step by step, in this experimental study is GTT (*Gruppo Torinese Trasporti*), which manages the entire LPT network, urban and extraurban, of the city of Turin.*

The experimentation was based on the use of pressure transducers which, specially mounted on the air suspension of an urban public transport bus, made it possible to assess the air pressure of the ECAS (Electronically Controlled Air Suspension) suspension system and to derive the value of the load on board the vehicle.



(Fonte – *Source:* Caravello A., 2022 [14], Cavallero A., 2022 [15])

Figura 2 – Percorso effettuati dalla linea di TPL scelta per la sperimentazione.
Figure 2 – Route taken by the LPT line chosen for the experiment.

Tra i diversi sensori di pressione, disponibili sul mercato, si è scelto di optare per una tipologia ad alta qualità con prestazioni adatte ad applicazioni ferroviarie, individuando dei sensori adatti a resistere ad ambienti ostili, robusti e affidabili nella restituzione dei dati di pressione e temperatura. I sensori utilizzati sono i CANopen *Miniature Pressure-Trasmitter* (CMP) 8270/8826 (*Trafag Sensors Controls*, Svizzera), trasduttori di pressione visibili in Fig. 3.

Lo studio sperimentale è stato condotto e seguito in tutti i suoi processi, dal reperimento del materiale alla programmazione a banco dell'apparecchiatura, fino all'installazione di tutti gli apparati utili al rilievo dei dati dei trasduttori a bordo del mezzo scelto, Fig. 4.

Successivamente, una volta tarate e provate tutte le componenti, si è passati alla fase di raccolta dei dati partendo dai dati manuali, base di partenza per la costruzione del modello di regressione lineare che, una volta correlati con i dati restituiti dai sensori, hanno dato il via al processo di elaborazione finale. La fase cruciale è stato il confronto dei dati che venivano restituiti dai sensori di pressione, messi in connessione con gli apparati di bordo, con i dati provenienti dai sistemi di conteggio automatico già presenti sul mezzo di trasporto su gomma. In seguito, è stato eseguito il calcolo degli errori per valutare l'affidabilità del sistema ponendoli a confronto con i dati ricavati dal conteggio eseguito manualmente a bordo del mezzo.

I risultati ottenuti hanno portato a considerare il sistema di conteggio basato sull'utilizzo di sensori di pressione affidabile ed efficiente con errori dell'ordine di grandezza di un passeggero.

Per maggiore chiarezza viene riportato in modo schematico Fig. 5 il processo adottato.

The vehicle that the GTT company provided to carry out the research is a 12m long, diesel-powered (Mercedes Conecto Euro6) bus.

Since the main aim was to study and calibrate a system that would allow the number of passengers on board to be accurately counted, with very low margins of error, a line was chosen that would collect a large catchment area and pass through attractive poles and strategic junctions in the metropolitan city of Turin, such as the Porta Nuova central rail station, the Einaudi University Campus, the Turin Law Court and the Mole Antonelliana, which is the seat of a very popular museum, as shown in Fig. 2.

Among the different pressure sensors. available on the market, it was decided to opt for a high-quality type with performance suitable for railway applications, identifying sensors that could withstand harsh environments, and were both robust and reliable in returning pressure and temperature data. The sensors used are the CANopen Miniature Pressure-Transmitter (CMP) 8270/8826 (Trafag Sensors Controls, Switzerland), pressure transducers visible in Fig. 3.

The experimental study was conducted and followed in all its processes, from the selection of the materials to the bench programming of the equipment, up to the installation of all the apparatus useful for surveying the transducer data on board the chosen vehicle, Fig. 4.

Subsequently, once all the components had been calibrated and tested, authors moved on to the data collection phase, starting with the manual data, the basis for the construction of the linear regression model, which, once correlated with the data returned by the sensors, gave way to the final processing. The crucial step was the comparison of the data returned by the pressure sensors, which were connected with the on-board equipment, with the data from the

4. Metodologia di analisi

4.1. Programmazione dei sensori di pressione a banco e installazione dei sensori e dell'attrezzatura a bordo dell'autobus

Dopo aver reperito il materiale necessario per la sperimentazione, il primo passo è stato la programmazione dei sensori così da impostare per ciascuno di essi un codice identificativo e settarli affinché trasmettessero, automaticamente, un dato di pressione a livello delle sospensioni e temperatura al secondo. I sensori così programmati sono stati montati nell'impianto di sospensioni dell'autobus.

Oltre all'utilizzo dei sensori è necessario disporre di altri strumenti quali: (i) un interruttore, che consente una rapida accensione e spegnimento dell'apparecchiatura elettronica, (ii) un convertitore dei dati CAN/LAN, per trasformare i dati provenienti dai sensori in formato CAN, in LAN, (iii) un alimentatore per alimentare la strumentazione a 5V, (iv) uno *switch*, per collegare tra loro i vari apparati e (v) un *Raspberry* Pi 4, per il salvataggio dei dati provenienti dai sensori e dall'AVM.

Dopo aver programmato i sensori ed acquistata la restante parte dell'attrezzatura, si è provveduto ad installarli nell'impianto di sospensione del bus; le apparecchiature elettroniche, invece, sono state inserite in una scatola contenuta nella parte superiore del veicolo, posta nel vano in prossimità della postazione di guida dell'autista, come evidenziato in Fig. 6.

I dati provenienti da ciascuno dei quattro sensori, veicolati tramite la rete CANbus, sono stati prima convertiti e trasmessi sulla rete LAN attraverso l'utilizzo del convertitore CAN/LAN e successivamente memorizzati nel Raspberry Pi 4. Oltre ai pacchetti di dati provenienti ogni secondo dai quattro sensori, nel *Raspberry* Pi sono stati contemporaneamente salvati anche i pacchetti dell'AVM (*Advanced Vehicle Monitoring*), presenti sulla rete di bordo.



(Fonte – *Source:* Caravello A., 2022 [14], Cavallero A., 2022 [15])

Figura 3 – Trasduttore di pressione con connettore M12.
Figure 3 – Pressure transducer with M12 connector.





(Fonte – *Source:* Caravello A., 2022 [14], Cavallero A., 2022 [15])

Figura 4 – Installazione del sistema di acquisizione dei dati sul conteggio passeggeri su bus di GTT (Torino).
Figure 4 – Installation of the passenger counting data acquisition system on GTT buses (Turin).

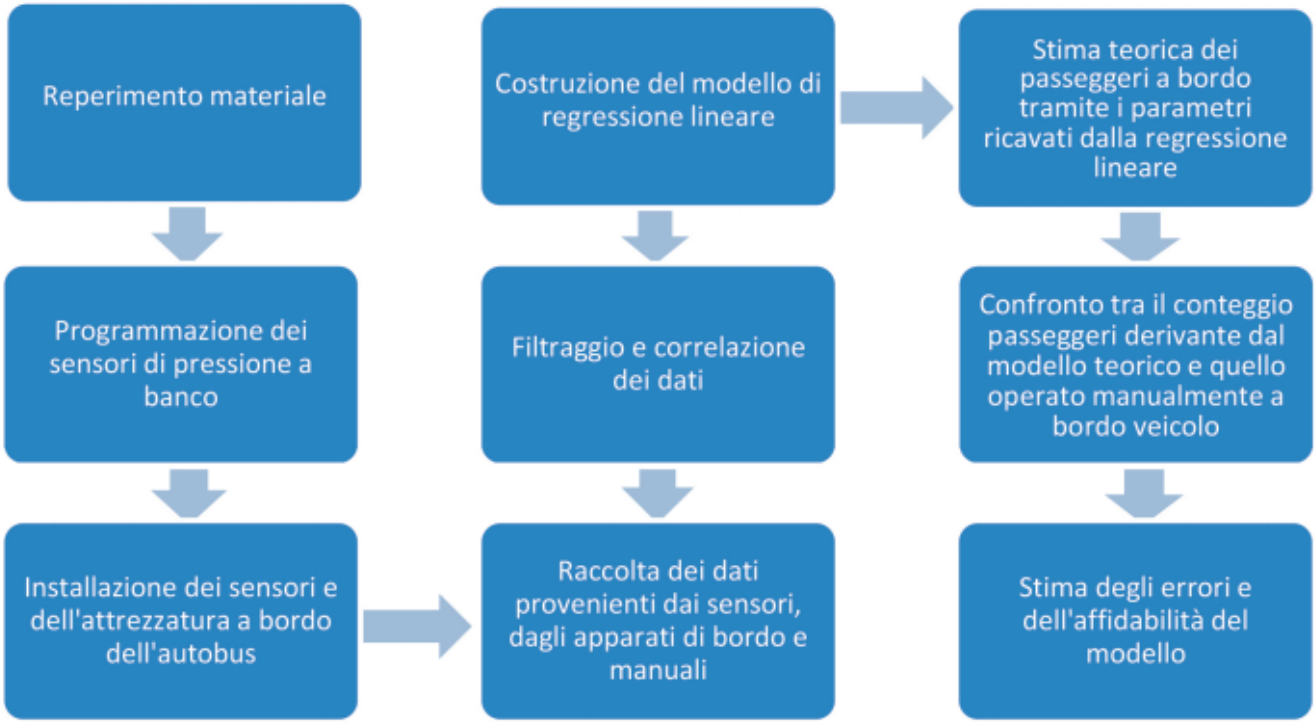


Figura 5 – Schema del processo di analisi e conteggio adottato.
Figure 5 – Diagram of the analysis and counting process adopted.



(Fonte – *Source:* Manuale d'uso e manutenzione per dispositivi Aesys [16] e Caravello A. 2022 [14], Cavallero A., 2022 [15])
From the operation and maintenance handbook for devices Aesys [16] and Caravello A. 2022 [14], Cavallero A. 2022 [15])

Figura 6 – Allocazione dei sensori (sottocassa) e dell'attrezzatura, evidenziata in rosso.
Figure 6 – Location of sensors (underbody) and equipment, highlighted in red.

Tutte le apparecchiature citate sono connesse mediante l'utilizzo di uno *switch* che collegato ad un secondo *switch* di bordo del veicolo permette di ottenere una connessione non solo fra i vari apparati della strumentazione utilizzata durante lo studio ma anche con le altre apparecchiature presenti sul bus. La connessione tra *switch* di bordo e quello montato in fase di sperimentazione consente quindi l'ottenimento dei dati provenienti dall'AVM relativi alla diagnostica, allo stato delle porte, se aperte o chiuse, alla localizzazione e alla velocità assunta dal veicolo, decodificati seguendo le indicazioni presenti nel manuale redatto da GASTALDI (2020) [13].

4.2. Costruzione del modello

La costruzione del modello include l'impostazione del medesimo, il filtraggio dei dati, l'analisi di correlazione dei dati e la conseguente stima teorica dei passeggeri a bordo tramite i parametri ricavati mediante regressione lineare.

Dopo la corretta installazione del sistema di sensori e della restante attrezzatura è stato possibile ottenere i dati di pressione, forniti in continuo, per ogni secondo di funzionamento dell'autobus.

I dati così ottenuti fanno riferimento ad un periodo di osservazione di circa un mese tra fine maggio 2022 e fine giugno 2022, in cui sono state effettuate circa una ventina di corse, da capolinea a capolinea, e raccolti circa 680 valori, riferiti al conteggio dei passeggeri totali presenti alle fermate, della linea.

Per ottenere una maggiore eterogeneità dei dati e non incorrere in errori sistematici, si è deciso di variare i giorni della settimana e le ore in cui venivano eseguiti i rilievi.

Per poter avere un unico valore di pressione, rappresentativo dello stato di carico dell'autobus è stato sviluppato uno script che, per ogni secondo di rilievi, operasse la somma tra i due dati di pressione provenienti dai sensori posizionati nelle sospensioni anteriori e il doppio dei due dati di pressione provenienti dai sensori posteriori, in considerazione del fatto che questi ultimi presentano sezioni doppie rispetto alle prime. Una volta ottenuto per ogni secondo di rilievo un valore di riferimento della pressione è stato necessario filtrare i dati in modo che venissero presi in considerazione solo i dati relativi ai tre secondi antecedenti l'apertura delle porte in fermata.

Per far ciò è stato necessario abbinare i dati dei sensori a quelli provenienti dall'AVM, che consente di ottenere i dati relativi allo stato dell'autobus, alla diagnostica, velocità e posizione e allo stato delle porte, così da considerare solo i dati di pressione riferiti agli ultimi tre secondi in cui il campo DOOR, presentava valore nullo, significativo di uno stato delle porte chiuse. Si è deciso di considerare una tripletta di dati poiché consente una valutazione più affidabile dello stato di carico, come spiegato in maggior dettaglio nel paragrafo 4.3.

automatic counting systems already present on the road vehicle. Subsequently, the calculation of errors was performed to assess the reliability of the system, by comparing them with the data from the counting performed manually on board the vehicle.

The results obtained led to the counting system based on the use of pressure sensors being considered reliable and efficient with errors in the order of magnitude of one passenger.

For more clarity, the process adopted is shown schematically in Fig. 5.

4. Methodology of analysis

4.1. Programming of bench pressure sensors, installation of sensors and equipment on board the bus

Having procured the necessary material for the testing, the first step was to programme the sensors to set an identification code for each of them and set them to automatically transmit one suspension pressure and temperature data per second. The sensors thus programmed were mounted in the suspension system of the bus.

In addition to using the sensors, other equipment is required, such as: (i) a circuit breaker, which allows the electronic equipment to be quickly switched on and off, (ii) a CAN/LAN data converter, to transform the data coming from the sensors in CAN format, into LAN, (iii) a power supply unit to power the equipment with 5V, (iv) a switch, to connect the various equipment with each other, and (v) a Raspberry Pi 4, to save the data coming from the sensors and the AVM.

After programming the sensors and purchasing the rest of the equipment, they were installed in the bus suspension system; the electronic equipment, on the other hand, was placed in a box contained in the upper part of the vehicle, located in the compartment near the driver's seat, as shown in Fig. 6.

The data from each of the four sensors, conveyed via the CANbus network, was first converted and transmitted over the LAN network using the CAN/LAN converter and then stored in the Raspberry Pi 4. In addition to the data packets coming from the four sensors every second, the AVM (Advanced Vehicle Monitoring) packets from the on-board network were also stored in the Raspberry Pi at the same time.

All the mentioned equipment is connected by means of a switch which, connected to a second switch on board the vehicle, makes it possible to obtain a connection not only between the various parts of equipment used during the analysis but also with the other equipment on the bus. The connection between the on-board switch and the one fitted during the test phase thus allows data to be obtained from the AVM relating to diagnostics, the status of the doors, whether open or closed, the location and the speed assumed by the vehicle, decoded according to the indications in the handbook drawn up by GASTALDI (2020) [13].

Ottenuti i dati relativi ai tre secondi antecedenti l'apertura delle porte, è stata fatta la media, arrivando ad avere un unico valore di P_REF rappresentativo per ogni fermata. Inserendo in un grafico i valori ottenuti, dai sensori sull'asse delle ordinate e i corrispettivi valori dei conteggi manuali su quello alle ascisse, è stato possibile tarare i parametri a e b e ricavare la retta di regressione lineare:

$$\hat{y} = a\,x + b \tag{5.1}$$

Individuata l'equazione della retta, invertendo la formula è possibile ottenere il numero teorico di passeggeri presenti a bordo del mezzo tra una fermata e l'altra. L'equazione che permette la stima dei passeggeri a bordo mezzo è la seguente:

$$Pax\ teorici = \frac{P_REF - b}{a} \tag{5.2}$$

Una volta ricavato in tal modo il numero di passeggeri teorici si è potuto confrontare tale valore con i corrispettivi dati ricavati dalla stima manuale, effettuata mediante rilevazioni sul campo. Da un primo confronto tra queste due raccolte di dati sono emerse delle differenze. Nell'ambito della suddetta ricerca sono state svolte numerose analisi con la finalità di poter minimizzare la differenza in valore assoluto tra numero di passeggeri rilevato manualmente e quello teorico.

4.3. Confronto tra il conteggio passeggeri derivante dal modello e manuale

Il confronto è stato effettuato tra il conteggio passeggeri derivante dal modello teorico e quello operato manualmente, a bordo veicolo.

Durante le analisi si è cercato di ridurre progressivamente il divario tra le suddette stime, andando a filtrare i dati e ricalibrando il modello. Dopo aver individuato le fermate in cui il numero di passeggeri teorici stimati dal modello si discostava notevolmente da quello ricavato manualmente, si è cercato di individuarne la causa. Per far ciò è stato necessario attuare un processo di reverse engineering e partendo dal valore della P_REF, ricavare i quattro valori di pressione P_1, P_2, P_3, P_4 provenienti dai quattro sensori di pressione, da cui era generato. Infatti ogni secondo durante il quale l'autobus è in funzione i trasduttori di pressione sono in grado di fornire un valore di pressione ciascuno, P_1, P_2, P_3, P_4. Analizzando i valori P_1, P_2, P_3, P_4 corrispondenti ai picchi di differenze tra i valori di conteggio passeggeri teorici e quelli manuali, si è potuto constatare che in corrispondenza dei picchi i valori iniziali di pressione presentavano valori o relativamente bassi, circa 2 bar o decisamente elevati, 8 bar. Queste stime si discostavano notevolmente dai valori osservati in condizioni di pressione normale, che oscillavano nell'intorno dei 4-5 bar. Dopo un'attenta analisi si è potuto constatare che tali variazioni rispetto ai valori di pressione assunti in

4.2. Model construction

The construction of the model includes setting up the model, filtering the data, correlation analysis of the data and the resulting theoretical estimation of the passengers on board using parameters obtained by linear regression.

After the correct installation of the sensor system and the remaining equipment, it was possible to obtain pressure data, provided continuously, for every second of bus operation.

The data thus obtained refer to an observation period of about one month between the end of May 2022 and the end of June 2022, during which indicatively twenty journeys were carried out, from terminus to terminus, and about 680 values were collected, referring to the total passenger count at the stops, of the line.

In order to achieve a greater heterogeneity of the data and to avoid systematic errors, it was decided to vary the days of the week and the hours in which the surveys were carried out.

For collecting a single pressure value, representative of the bus's load state, a script was developed which, for each second of measurement, summed up the two pressure data from the sensors positioned in the front suspension and twice the two pressure data from the rear sensors, in view of the fact that these latter have sections twice as large as the first. Once a reference pressure value had been obtained for each second of measurement, it was necessary to filter the data so that only the data from the three seconds before the doors opened at a stop were considered.

In order to do this, it was necessary to combine the sensor data with data from the AVM, which provides data on bus status, diagnostics, speed and position, and door status, so that only the pressure data referring to the last three seconds in which the DOOR field had a null value, significant of a closed door status, were considered. It was decided to consider a triplet of data as it allows a more reliable assessment of the load state, as explained in more detail in section 4.3.

Having obtained the data for the three seconds before the doors opened, the average value was taken, resulting in a single representative P_REF value for each stop. By plotting the values obtained from the sensors on the y-axis and the corresponding values from the manual counts on the x-axis, it was possible to calibrate the parameters a and b and derive the linear regression line:

$$\hat{y} = a\,x + b \tag{5.1}$$

Having identified the equation of the straight line, by inverting the formula it is possible to obtain the theoretical number of passengers on board the vehicle between one stop and the next. The equation for estimating the number of passengers on board the vehicle is as follows:

condizioni di carico normale, erano dovuti alla presenza di un impianto di sospensioni ECAS.

Il sistema di sospensioni ECAS presente sull'autobus consente infatti di compensare l'eventuale abbassamento o innalzamento del piano di calpestio dell'autobus rispetto al manto stradale, dovuto alla presenza di irregolarità nella pavimentazione o dalla ridistribuzione del peso a bordo veicolo, variando la quantità d'aria presente nell'impianto di sospensioni. Per tal motivo se il dato di pressione rilevato dai sensori venisse misurato nei secondi in cui l'impianto ECAS opera questa ritaratura, il valore di pressione osservato non risulterebbe rappresentativo dello stato di carico gravante sulle sospensioni ma alla pressione di insufflaggio dell'aria.

Dal momento che i sensori sono in grado di fornire i dati in continuo, oltre ai valori di pressione che fanno riferimento al carico che grava sulle sospensioni vi sono anche dati relativi al funzionamento dell'impianto ECAS che opera una ricalibrazione quando risulta fermo in banchina, durante i secondi prima dell'apertura delle porte.

Una volta messo in luce questo problema è sembrata necessaria una modifica dello script, che consentiva il filtraggio dei dati. Infatti, andando a considerare solo i valori di pressione di riferimento relativi ai tre secondi prima dell'apertura delle porte, la probabilità di ottenere dati di pressione non corrispondenti al carico ma alla pressione dell'aria in fase di compensazione, risulta essere elevata. Per non incorrere in questa eventualità si è deciso di non limitarsi alla considerazione degli ultimi tre valori antecedenti l'apertura delle porte ma di utilizzare tutti i valori tra il secondo in cui vengono chiuse le porte in una determinata fermata e i primi due secondi a porte aperte relativi alla fermata successiva. Una volta ampliato l'intervallo di misurazioni, abbinando tali dati per coppie di valori successivi, la P_REF del suddetto intervallo, rappresentativa dello stato di carico della fermata, è stata calcolata come media dei valori presenti nella coppia, che presentava il range (la differenza assoluta tra i due valori) più basso.

Per poter migliorare ulteriormente il modello, considerato che alcune differenze tra i valori conteggiati manualmente e quelli ottenuti mediante il modello di regressione lineare risultavano essere ancora elevati, si è deciso di non abbinare i dati per coppie di dati ma per triplette. In tal modo il calcolo della P_REF risultava essere più stabile perché qualora il sistema di sensori avesse fornito dati affetti da errori dovuti all'irregolarità del manto stradale, al funzionamento dell'impianto ECAS o a sobbalzi, la probabilità di avere tre dati consecutivi tutti alterati da queste anomalie risultava essere decisamente minore rispetto alla considerazione di solo due dati.

4.4. Stima degli errori e dell'affidabilità del modello

Come menzionato, l'utilizzo di sensori di pressione montati nell'impianto di sospensioni del mezzo consente di ottenere, tramite la stima della pressione, un valore del

$$Pax\ theoretical = \frac{P_REF - b}{a} \qquad (5.2)$$

Once the number of theoretical passengers had been obtained in this way, it was possible to compare this value with the corresponding data from the manual estimation carried out by means of field surveys. An initial comparison of these two data collections revealed differences. As part of the above-mentioned research, numerous analyses were carried out with the aim of minimising the difference in absolute value between the manually determined and theoretical number of passengers.

4.3. Comparison of model-derived and manual passenger counts

The comparison was made between the passenger count derived from the theoretical model and that operated manually, on-board the vehicle.

During the analysis, an attempt was made to progressively reduce the gap between these estimates, by filtering the data and recalibrating the model. After identifying the stops where the number of theoretical passengers estimated by the model deviated significantly from the manually derived number, an attempt was made to identify the cause. To do this, it was necessary to carry out a process of reverse engineering and, starting from the value of P_REF, derive the four pressure values P_1, P_2, P_3, P_4 from the four pressure sensors, from which it was generated. In fact, every second during which the bus is in operation, the pressure transducers are able to provide one pressure value each, P_1, P_2, P_3, P_4. Analysing the values P_1, P_2, P_3, P_4 corresponding to the peak differences between the theoretical and manual passenger count values, it was found that at the peaks, the initial pressure values were either relatively low, around 2 bar, or very high, 8 bar. These estimates deviated considerably from the values observed under normal pressure conditions, which oscillated in the region of 4-5 bar. After careful analysis, it was found that these variations from the pressure values assumed under normal load conditions were due to the presence of an ECAS suspension system.

In fact, the ECAS suspension system on the bus compensates for any lowering or raising of the bus floor in relation to the road surface, due to irregularities in the pavement or the redistribution of weight on board the vehicle, by varying the amount of air in the suspension system. For this reason, if the pressure value measured by the sensors were measured during the seconds in which the ECAS system performs this recalibration, the observed pressure value would not be representative of the load state of the suspension, but of the air blowing pressure.

Since the sensors can provide data continuously, in addition to the pressure values that refer to the load on the suspension, there is also data relating to the operation of the ECAS system, which recalibrates when it is stationary at the bus platform, during the seconds before the doors open.

numero di passeggeri a bordo veicolo. Una volta ottenuti dai sensori i valori di pressione è possibile convertirli in numero di passeggeri presenti a bordo del mezzo tra due fermate consecutive, mediante un modello di regressione lineare. In questa sezione vengono illustrati i risultati ottenuti dal modello di regressione lineare precedentemente descritto.

Considerando tutti i dati compresi tra una fermata e quella successiva e i primi due dati relativi alla fermata successiva, a porte aperte, una volta selezionata la tripletta con il range minore, la pressione di riferimento è stata ricavata come media tra i dati della tripletta selezionata. Sono stati inseriti sull'asse delle ordinate i dati di pressione così ottenuti e su quello delle ascisse i dati dei conteggi manuali. Si è potuto mediante regressione lineare ottenere l'equazione della retta e di conseguenza i parametri *a* e *b*. Tramite questi parametri è stato possibile stimare teoricamente il numero di passeggeri a bordo del mezzo e confrontarlo con i dati reali provenienti dal conteggio manuale.

Dal grafico a dispersione riportato nella Fig. 7 si può notare che la retta di regressione lineare permette di interpolare tutti i punti e che non vi siano dati che si discostino in modo evidente da essa. Le varie modifiche attuate nel corso della sperimentazione hanno portato ad avere un modello che presenta un coefficiente R^2 di 0,989, il valore prossimo all'unità, consente di avere una stima dell'elevata affidabilità del modello.

Once this problem had been highlighted, it seemed necessary to modify the script to filter the data. In fact, by only considering the reference pressure values for the three seconds before the opening of the doors, the probability of obtaining pressure data that did not correspond to the load but to the air pressure in the compensation phase was high. In order to avoid this possibility, it was decided not to limit the data to the last three values before the doors were opened, but to use all values between the second when the doors were closed at a specific stop and the first two seconds when the doors were open for the next stop. Once the range of measurements had been extended by combining these data for successive pairs of values, the P_REF of the above-mentioned range, representative of the load state of the stop, was calculated as the average of the values in the pair with the lowest range (the absolute difference between the two values).

To further improve the model, since some differences between the manually counted values and those obtained by means of the linear regression model were still high, it was decided not to match the data by pairs of data but by triples. In this way, the calculation of the P_REF was more stable, because if the sensor system provided data affected by errors due to unevenness of the road surface, the operation of the ECAS system or jumps (joltings), the probability of having three consecutive data all affected by these anomalies was significantly lower than if only two data were taken into account.

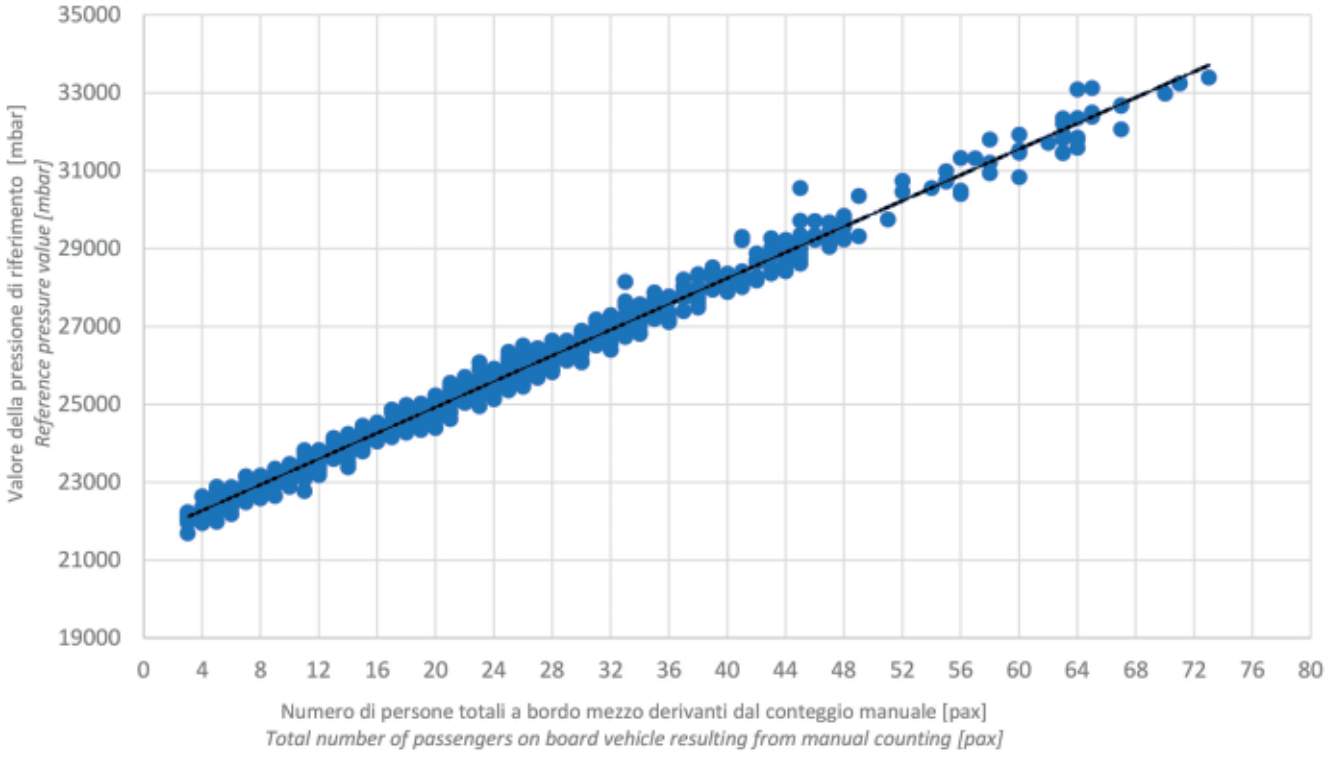


Figura 7 – Regressione lineare sui conteggi rilevati.
Figure 7 – Linear regression on measured counts.

L'equazione della retta di interpolazione lineare (5.1) assume quindi la forma:

$$\hat{y} = 165{,}7\,x + 21608 \qquad (5.3)$$

dove i parametri a = 165,7 e b = 21608 rappresentano rispettivamente l'incremento di pressione per passeggero, cioè il valore di pressione medio per persona, e la tara del veicolo, cioè il valore di pressione P_REF medio nel momento in cui l'autobus è vuoto e non vi sono persone a bordo, calcolata come media su tutte le rilevazioni effettuate.

Mediante l'inversione di questa formula, è stato possibile ricavare il valore di passeggeri teorici presenti all'interno dell'autobus tra due fermate consecutive sulla base della conoscenza della pressione di riferimento P_REF, valutata dai sensori, in corrispondenza di ciascuna fermata, attraverso la formula (5.2).

Per valutare l'affidabilità dei valori così ottenuti, è stato necessario confrontarli con quelli ricavati dai conteggi manuali.

Il grafico in Fig. 8 mostra l'andamento dei valori stimati dai conteggi manuali su tutto il periodo di osservazione, che corrisponde alle fermate, riportate in ordine cronologico, in corrispondenza delle quali si dispone di dati di osservazione, e i medesimi valori ottenuti dai sensori di pressione. Ogni punto del grafico rappresenta il va-

4.4. Estimation of errors and model reliability

As mentioned, the use of pressure sensors mounted in the suspension system of the vehicle makes it possible to obtain, through pressure estimation, a value of the number of passengers on board the vehicle. Once the pressure values have been obtained from the sensors, it is possible to convert them into the number of passengers on board the vehicle between two consecutive bus stops by means of a linear regression model. This section illustrates the results obtained from the linear regression model introduced above.

Considering all the data between one stop and the next and the first two data for the subsequent stop, with the doors open, once the triplet with the smallest range had been selected, the reference pressure was obtained as the average of the data from the selected triplet. The pressure data thus obtained were placed on the y-axis and the manual count data on the x-axis. It was possible by means of linear regression to obtain the equation of the straight line and consequently the parameters a and b. Using these parameters, it was possible to theoretically estimate the number of passengers on board the vehicle and compare it with the actual data from the manual count.

From the scatter plot shown in Fig. 7 it can be seen that the linear regression line allows all points to be interpolated, and that there is no data that clearly deviates from it. The various modifications implemented during the course of the experiment have resulted in a model with a coefficient R^2 of

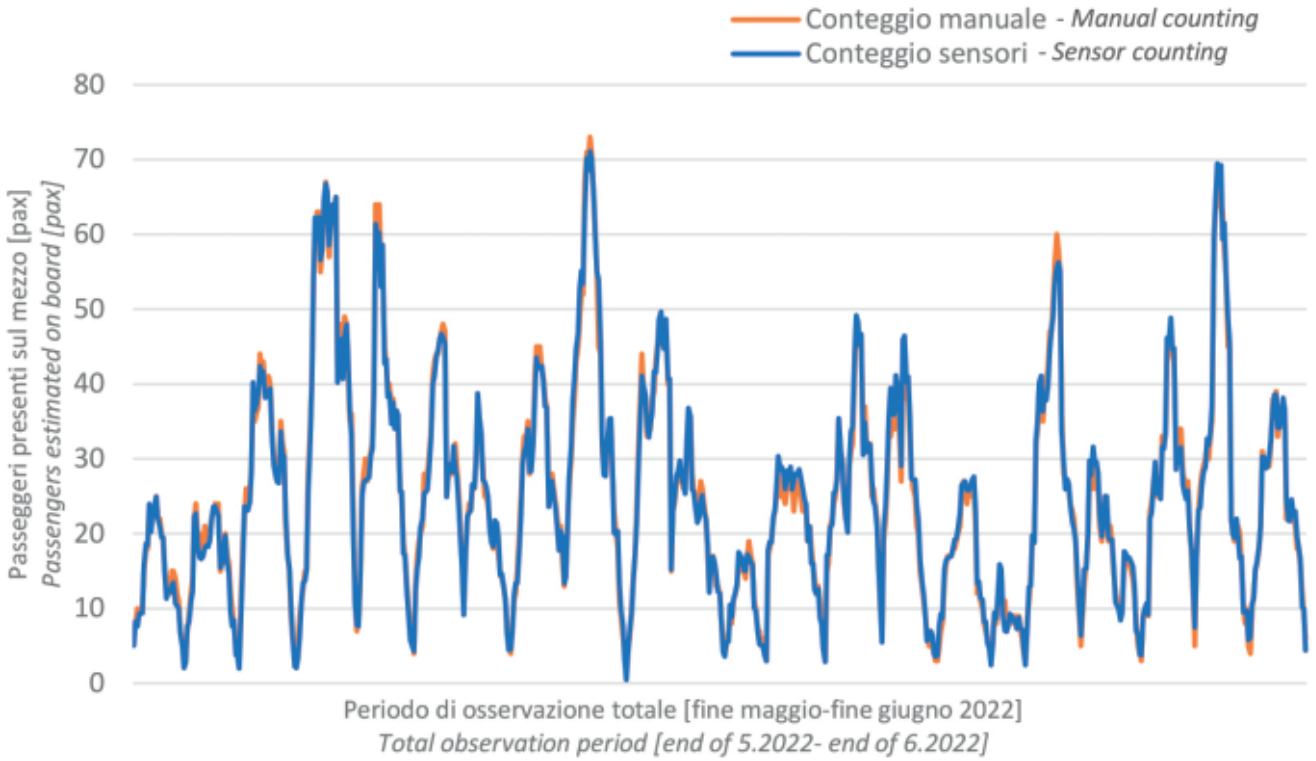


Figura 8 – Confronto tra passeggeri stimati attraverso i conteggi manuali e passeggeri stimati dai sensori di pressione.
Figure 8 – Comparison between passengers estimated by manual counts and passengers estimated by pressure sensors.

lore di conteggio di passeggeri effettuato manualmente o dai sensori, in corrispondenza di tutte le fermate, effettuate durante il periodo di osservazione di un mese tra fine maggio 2022 e fine giugno 2022.

Risulta evidente che le due distribuzioni risultino quasi del tutto sovrapposte. Ciò permette di constatare che l'equazione della retta di interpolazione lineare consente di ottenere una stima dei passeggeri a bordo affidabile se confrontata con quelli stimati dalle rilevazioni sul campo.

Una volta confrontati i dati relativi al conteggio dei passeggeri presenti a bordo del veicolo tra una fermata e l'altra ottenuti dal sistema di sensori con quelli osservati durante i rilievi, è stata fatta un'analisi degli errori per avere una stima più precisa dell'affidabilità del modello.

Una prima valutazione dell'errore ha preso in esame le differenze assolute tra numero passeggeri stimati manualmente e numero passeggeri stimati teoricamente (ottenuti a partire dai valori di pressione stimati dai trasduttori, mediante l'inversione della retta di interpolazione), per ogni fermata. Dopo aver ricavato tali differenze è stato possibile ottenere l'istogramma riportato in Fig. 9, in cui le differenze così ottenute sono state categorizzate negli intervalli di riferimento. Come si può notare dalla Tab. 1, solo lo 0,59% delle differenze tra passeggeri conteggiati manualmente e stimati ricade fuori dall'intervallo di ±5 persone e più della metà delle differenze presenta un errore massimo di ±1 passeggeri. Inoltre, nel 96,17% dei casi l'errore commesso dai sensori di pressione nella stima del-

0,989; the value close to unity allows an estimate of the model's high reliability.

The equation of the linear interpolation line (5.1) then takes the form:

$$\hat{y} = 165{,}7\,x + 21608 \qquad (5.3)$$

where the parameters a = and b= respectively represent the pressure increment per passenger, so the average pressure value per person, and the vehicle tare, so the average pressure value P_REF when the bus is empty and there are no people on board, calculated as an average over all the collected measurements.

By means of the inversion of this formula, it was possible to derive the value of theoretical passengers inside the bus between two consecutive stops on the basis of knowledge of the reference pressure P_REF, assessed by the sensors, at each stop, by means of formula (5.2).

In order to assess the reliability of the values thus obtained, it was necessary to compare them with those obtained from manual counts.

The graph in Fig. 8 shows the trend of the values estimated from the manual counts over the entire observation period, which corresponds to the stops, shown in chronological order, at which observation data is available, and the same values obtained from the pressure sensors. Each point on the graph represents the value of passenger counts carried out manually or by the sensors, at all stops, during the one-month

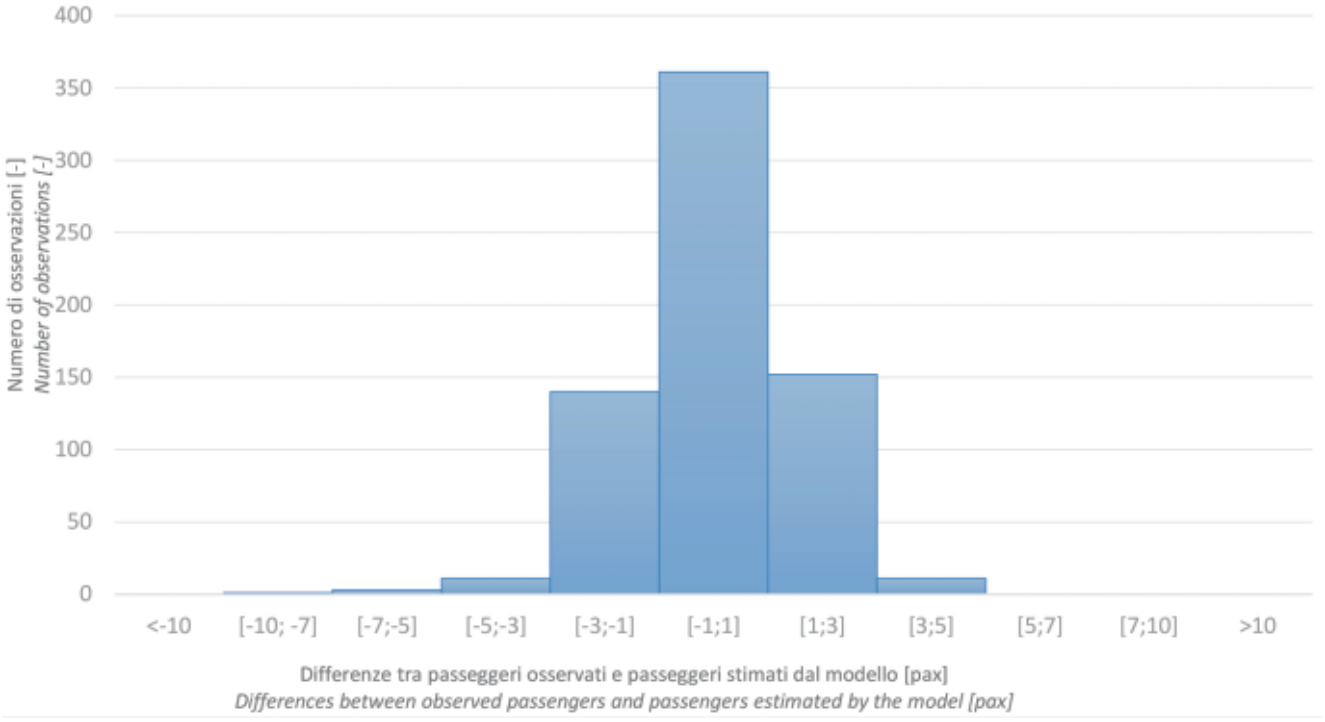


Figura 9 – Istogramma delle differenze tra conteggio manuale e teorico.
Figure 9 – Histogram of differences between manual and theoretical counting.

Tabella 1 – *Table 1*

Tabella delle differenze tra conteggio manuale e teorico
Table of differences between manual and theoretical counting

Intervalli di errore ***Error Intervals***	**Frequenza** ***Frequency***	**Percentuale [%]** ***Percentage [%]***
<-10	0	0,00
[-10;-7]	1	0,15
[-7;-5]	3	0,44
[-5;-3]	11	1,62
[-3;-1]	140	20,62
[-1; 1]	361	53,17
[1;3]	152	22,39
[3;5]	11	1,62
[5;7]	0	0,00
[7;10]	0	0,00
>10	0	0,00
Totale rilievi ***Total surveys***	679	

le persone presenti a bordo del mezzo non supera i ±3 passeggeri.

Sulla base degli errori stimati precedentemente come differenze tra passeggeri conteggiati manualmente e quelli stimati dai sensori è stata ricavata la curva di distribuzione gaussiana, riportata in Fig. 10, che non presenta delle code disperse ma assume una forma ristretta. Come evidenziato nella Tab. 2 e Tab. 3, la dispersione delle differenze, stimate precedentemente, è contenuta per il 99,3% nell'intervallo di ±3σ, mentre per il 96,3% risultano comprese nell'intervallo ±2σ.

Inoltre, il valore della deviazione standard risulta essere particolarmente ridotto e pari a 1,53. Tale dato conferma il fatto che i valori risultano concentrati vicino alla media e gli scarti limitati e che quindi le differenze tra i conteggi effettuati manualmente e quelli rilevati dai sensori sono minime.

Dopo aver calcolato l'errore assoluto come differenza tra passeggeri osservati e stimati attraverso i sensori di pressione, si è proceduto alla stima dell'errore relativo, per valutare l'affidabilità del modello.

L'errore relativo è stato calcolato sulla base delle pressioni totali, utilizzando la formula:

$$ERR_{Rel} = \frac{|P_REF_{conteggio} - P_REF_{sensori}|}{P_REF_{conteggio}} \ [\%] \quad (5.4)$$

observation period between the end of May 2022 and the end of June 2022.

It is evident that the two distributions are almost completely overlapping. This makes it possible to see that the equation of the linear interpolation line provides a reliable estimate of passengers on board when compared to those estimated from field surveys.

Once the passenger count data obtained from the sensor system between stops had been compared with those observed during the surveys, an error analysis was carried out to obtain a more precise estimate of the reliability of the model.

An initial evaluation of the error examined the absolute differences between manually estimated passenger numbers and theoretically estimated passenger numbers (obtained from the pressure values estimated by the transducers by inverting the interpolation line), for each stop. After deriving these differences, it was possible to obtain the histogram shown in Fig. 9 in which the differences thus obtained were categorized in the reference intervals. As it can be seen from Tab. 1, only 0,59% of the differences between manually counted and estimated passengers fall outside the range of ±5 persons and more than half of the differences have a maximum error of ±1 passenger. Moreover, in 96,17% of the cases, the error committed by the pressure sensors in estimating the number of people on board the vehicle does not exceed ±3 passengers.

Based on the previously estimated errors as differences between manually counted passengers and those estimated by the sensors, the Gaussian distribution curve was derived, shown in Fig. 10, which has no scattered tails but takes on a narrow shape. As shown in Tab. 2 and Tab. 3, the dispersion of the previously estimated differences is contained for 99,3% in the range ±3σ, while for 96,3% they are in the range ±2σ.

In addition, the value of the standard deviation is minimal at 1,53. This confirms the fact that the values are concentrated close to the average and the deviations limited, and that therefore the differences between the counts carried out manually and those detected by the sensors are minimal.

After calculating the absolute error as the difference between passengers observed and estimated through the pressure sensors, the relative error was estimated to assess the reliability of the model.

The relative error was calculated on the basis of the total pressures, using the formula:

$$ERR_{Rel} = \frac{|P_REF_{manuals} - P_REF_{sensors}|}{P_REF_{manuals}} \ [\%] \quad (5.4)$$

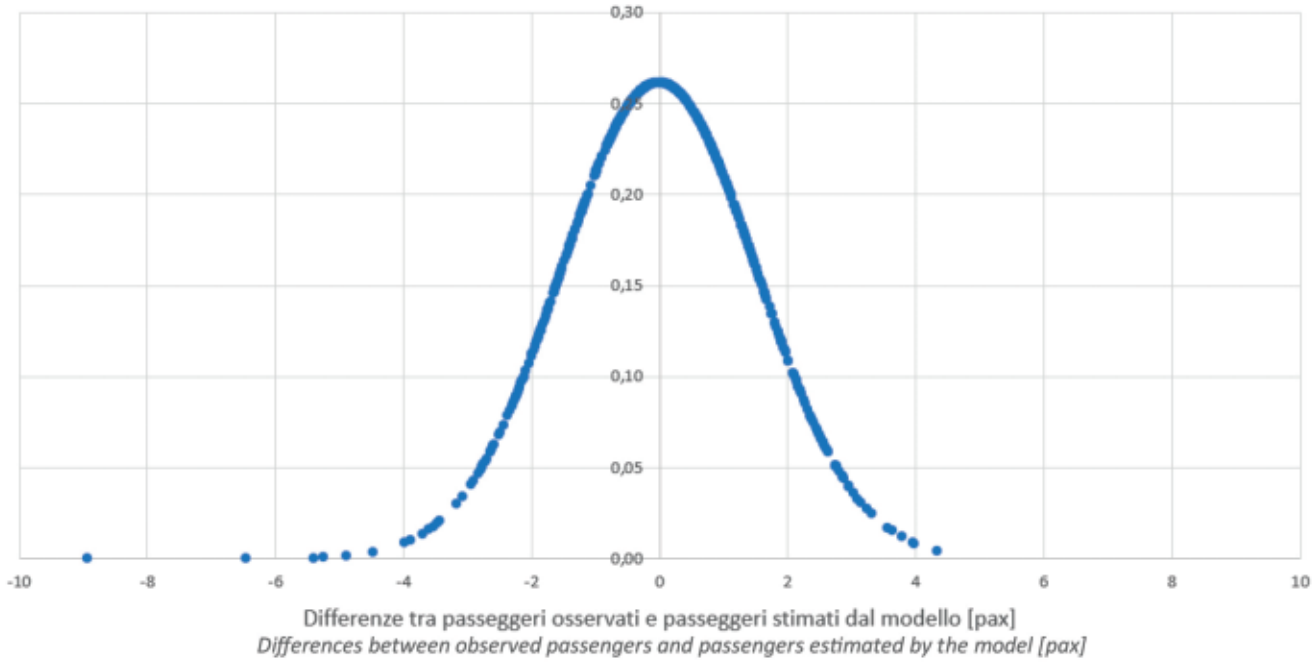


Figura 10 – Curva gaussiana delle differenze di passeggeri osservati dai conteggi manuali e quelli stimati dal modello.
Figure 10 – Gaussian curve of differences in passengers observed by manual counts and those estimated by the model.

Il valore $P_REF_{conteggio}$, che rappresenta la pressione ricavata a partire dai dati proveniente dai conteggi manuali, è stato calcolato sulla base dei parametri a e b ottenuto dalla retta di regressione lineare come:

$$P_REF_{conteggio} = a * (PAX_{conteggio}) + b \qquad (5.5)$$

dove $PAX_{conteggio}$ è il dato di persone a bordo del mezzo proveniente dai conteggi operati manualmente e i parametri a e b sono quelli ricavati dell'equazione della retta.

Il valore di pressione così ottenuto è rappresentativo del numero di passeggeri presenti sull'autobus, osservati nella realtà. Quest'ultimo è stato poi messo a confronto con il valore di pressione fornito dai trasduttori di pressione $P_REF_{sensori}$. Attraverso questa valutazione dell'errore relativo è stato possibile confrontare i valori delle pressioni riferite al carico dei passeggeri osservato nella realtà con quelli ottenuti dai sensori.

In Fig. 11 vengono mostrati gli errori relativi così stimati.

Come visibile in Tab. 4, il 71,43% delle misurazioni presenta un errore relativo inferiore all'1% e nel 99,85% il massimo errore relativo osservato non supera il 4%. Il modello di regressione lineare così stimato può com-

The value $P_REF_{manuals}$, representing the pressure obtained from the data from the manual counts, was calculated on the basis of the parameters a and b obtained from the linear regression as:

$$P_REF_{manuals} = a * (PAX_{manuals}) + b \qquad (5.5)$$

where $PAX_{manuals}$ is the number of passengers on board the vehicle from manual counts and the parameters a and b are those derived from the equation of the line.

Tabella 2 – *Table 2*

Intervalli delle differenze di passeggeri osservati dai conteggi manuali e quelli stimati dal modello
Table of passenger difference intervals observed by manual counts and those estimated by the model

Intervalli di errore ***Error Intervals***	**Frequenza** ***Frequency***	**Percentuale [%]** ***Percentage [%]***
< -3σ	5	0,74
[-3σ; -2σ]	10	1,47
[-2σ; -σ]	89	13,11
[-σ;0]	231	34,02
[0; σ]	244	35,94
[;2σ]	90	13,25
[2σ;3σ]	10	1,47
>3σ	0	0,00
Totale rilievi ***Total surveys***	679	

portare un errore relativo del conteggio passeggeri inferiore al 3% nel 99,56% delle stime.

Con l'applicazione del modello di regressione lineare risulta dunque possibile, partendo dai dati di pressione forniti dal sistema montato a bordo del mezzo, ottenere una stima quanto più precisa delle persone presenti a bordo di un autobus.

Il modello di regressione lineare così stimato permette la conoscenza del numero totale di passeggeri a bordo tra una fermata e l'altra; questo dato risulta di fondamentale importanza per avere una stima dell'entità della domanda riguardante il trasporto pubblico locale.

5. Conclusioni

Sulla base delle numerose prove effettuate, si può affermare che la metodologia di conteggio automatico dei passeggeri presentata in questo articolo fornisca in tempo reale dati affidabili sul numero di persone a bordo di un mezzo. Infatti, una volta programmati i sensori e montata l'attrezzatura sulle sospensioni del mezzo, i trasduttori sono in grado di fornire in tempo reale e in flusso continuo i dati di pressione relativi al carico gravante sulle sospensioni. Il modello di regressione lineare, che meglio interpola tutti i dati di pressione, ha permesso la valutazione dei coefficienti *a* e *b*, grazie alla conoscenza dei quali è possibile avere una stima del numero di passeggeri a bordo del mezzo, disponendo dei valori di pressione.

Dopo tutte le modifiche apportate, il modello è atto a fornire un conteggio di passeggeri a bordo veicolo, deri-

Tabella 3 – *Table 3*

Intervalli di confidenza della curva di Gauss
Gaussian curve confidence intervals

Intervalli di confidenza ***Confidence intervals***	**Percentuale [%]** ***Percentage [%]***
±σ	69,96
±2σ	96,32
±3σ	99,26

The pressure value thus obtained is representative of the number of passengers in the bus, observed in reality. The latter was then compared with the pressure value provided by the pressure transducers $P_REF_{sensors}$. *Through this evaluation of the relative error, it was possible to compare the pressure values referring to the passenger load observed in reality with those obtained from the sensors.*

Fig. 11 shows the relative errors thus estimated.

As visible in Tab. 4, 71,43 % of the measurements have a relative error of less than 1% and in 99,85% the maximum observed relative error does not exceed 4%. The linear regression model thus estimated can result in a relative error of the passenger count of less than 3% in 99,56% of the estimates.

With the application of the linear regression model, it is therefore possible, from the pressure data provided by the on-board system, to obtain a more accurate estimate of the number of people on board a bus.

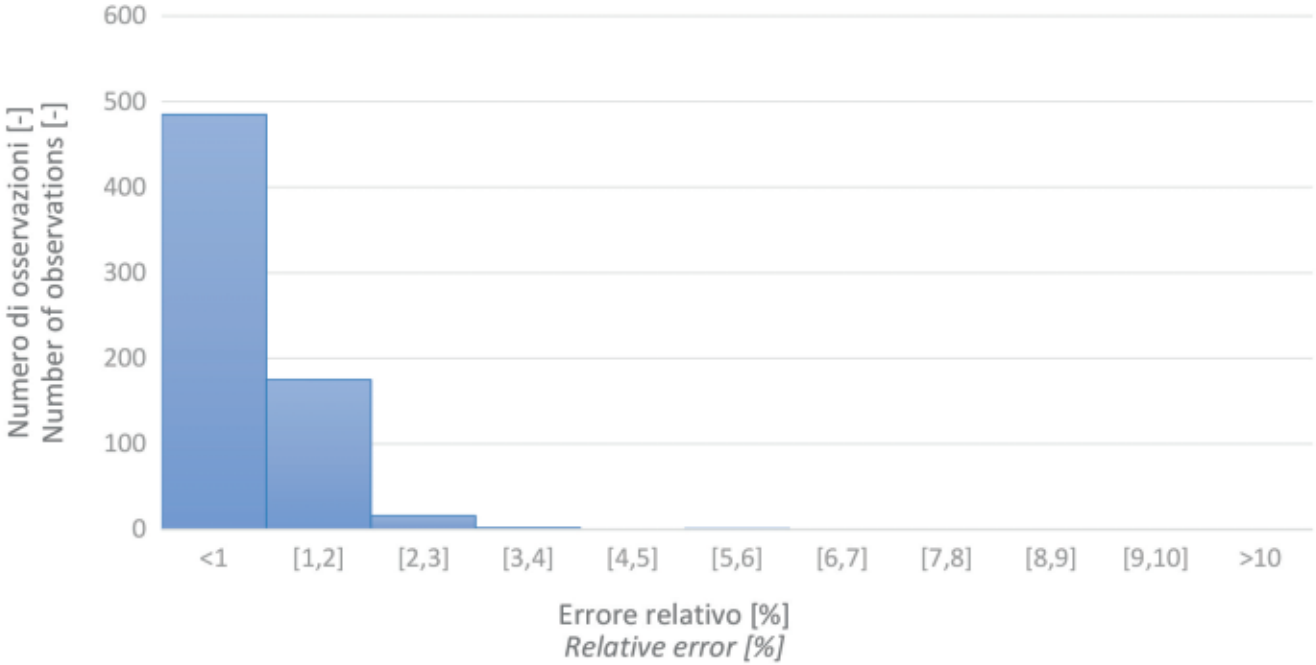


Figura 11 – Istogramma degli errori relativi.
Figure 11 – Histogram of relative errors.

Tabella 4 – *Table 4*

Tabella delle differenze tra conteggio manuale e teorico
Summary table with relative error frequency and percentage

Intervalli di errore ***Error Intervals***	**Frequenza** ***Frequency***	**Percentuale [%]** ***Percentage [%]***
<1%	485	71,43
[1%,2%]	175	25,77
[2%,3%]	16	2,36
[3%,4%]	2	0,29
[4%,5%]	0	0,00
[5%,6%]	1	0,15
[6%,7%]	0	0,00
[7%,8%]	0	0,00
[8%,9%]	0	0,00
[9%,10%]	0	0,00
Totale rilievi ***Total surveys***	679	

vante dalla stima delle pressioni da parte dei sensori, con un errore massimo di ±3 passeggeri il 96,17% delle volte. Questo è possibile anche grazie all'incremento dell'intervallo temporale da cui vengono ricavati i dati di pressione relativi ad ogni fermata; ciò ha permesso di correggere i picchi di differenze stimate tra conteggio passeggeri operato manualmente e quello effettuato attraverso i sensori, presenti nel modello originario.

La strumentazione utilizzata consente quindi di disporre di valutazioni accurate del conteggio di passeggeri a bordo di un autobus, o anche di un tram, ed è di facile implementazione e molto meno onerosa rispetto ad altre già presenti in commercio.

La conoscenza del numero di passeggeri a bordo di un mezzo di trasporto pubblico risulta di notevole importanza per i fornitori del servizio, che possono in tal modo fruire di una stima della richiesta e pianificare le attività di manutenzione e le modalità di gestione del traffico dei mezzi. Anche dal punto di vista dell'utenza la conoscenza dello stato di occupazione del veicolo può risultare utile per pianificare al meglio gli spostamenti e le relative tempistiche o effettuare anche scelte subitanee se opportunamente informata, il che è una delle aspirazioni dei sistemi MaaS. È possibile che in futuro questo tipo di informazioni riguardanti l'entità di carico di passeggeri, alto, medio o basso, vengano fornite agli utenti anche tramite app scaricabili dallo smartphone, da siti web o tramite appositi pannelli posti in corrispondenza delle banchine. In quest'ottica risulta evidente che un errore massimo di ±3 persone non andrebbe ad inficiare più di tanto le stime. Futuri sviluppi di questa sperimentazione potrebbero essere quelli di effettuare nuove analisi in diversi periodi dell'anno e non solo nei mesi estivi, come fatto nell'ambito di questa sperimentazione. Sarebbe interessante considerare ad esempio se le variazioni climatiche e di tempera-

The linear regression model estimated in this way allows knowledge of the total number of passengers on board between one stop and the next; this data is of fundamental importance to have an estimate of the extent of demand for local public transport.

5. Conclusions

On the basis of the numerous tests performed, it can be declared that the automatic passenger counting methodology presented in this paper provides reliable real-time data on the number of passengers on board a bus. In fact, once the sensors have been programmed and the equipment mounted on the suspension of the vehicle, the transducers are able to provide pressure data on the load on the suspension in real-time and in a continuous flow. The linear regression model, which best interpolates all the pressure data, allowed the evaluation of the coefficients a and b, thanks to the knowledge of which it is possible to have an estimate of the number of passengers on board the vehicle, having the pressure values available.

After all the modifications made, the model is able to provide a passenger count on board the vehicle, derived from the estimation of pressures by the sensors, with a maximum error of ±3 passengers 96,17% of the time. This is also possible thanks to the increase in the time interval from which the pressure data for each stop is obtained; this allowed the correction of the peaks of estimated differences between manually operated passenger counts and those carried out by the sensors, which were present in the original model.

The instrumentation used therefore allows for accurate passenger count assessments on board a bus, or even a tram; it results easy to be implemented and much less costly than others solutions already on the market.

Knowledge of the number of passengers on board a public transport vehicle is of considerable importance for service providers, who can thus benefit from an estimate of actual demand and plan maintenance activities as well as vehicle traffic management. Besides, from the user's point of view, knowledge of the vehicle's occupancy status can be useful in order to better plan trips and their timing or even make immediate choices if properly informed, which is one of the aspirations of MaaS (Mobility as a Service) systems. It is possible that in the future this type of information regarding the extent of passenger load – high, medium or low – will also be provided to users via apps that can be downloaded from smartphones, websites or via panels placed at the platforms. With this in mind, it is evident that a maximum error of ±3 people would not affect the estimates much. Future developments of this experiment could be to carry out new analyses at different times of the year and not only in the summer months, as

tura possano interferire o meno nella stima del conteggio passeggeri. È evidente che la considerazione di più variabili consentirebbe un affinamento sempre maggiore dell'affidabilità del modello.

I risultati di questa ricerca hanno una significativa implicazione pratica nel campo delle metodologie di conteggio automatico dei passeggeri nell'ambito dei trasporti pubblici. Tuttavia, il campo è aperto ad ulteriori scenari di ricerca che potrebbero sensibilmente ottimizzare questo settore cardine delle infrastrutture attinenti al sistema dei trasporti.

6. Ringraziamenti

Si ringrazia tutto il personale tecnico di GTT che ha supportato sia l'iniziativa di ricerca sia l'installazione e relativa sperimentazione tra il 2020 e 2023.

was done in this experiment. It would be interesting to consider, for example, whether climate and temperature variations may or may not interfere with the estimation of passenger counts. It is evident that the consideration of more variables would allow the reliability of the model to be increasingly refined.

The results of this research have significant practical implications in the field of automatic passenger counting methodologies in public transport. However, the field is open to further research scenarios that could significantly optimise this pivotal area of transport system infrastructure.

6. Acknowledgements

Authors would like to thank all the technical staff of GTT who supported both the research initiative and the installation and testing between 2020 and 2023.

BIBLIOGRAFIA - *REFERENCES*

[1] Parlamento Europeo e Consiglio dell'Unione Europea. *"Direttiva 2010/40/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio del 7 luglio 2010 sul quadro generale per la diffusione dei sistemi intelligenti nel settore del trasporto stradale e nelle interfacce con altri modi di trasporto"*. Bruxelles: Gazzetta Ufficiale dell'Unione europea; 2010.

[2] Commissione delle Comunità Europee. *"Piano di Azione ITS per la diffusione di sistemi di trasporto intelligenti in Europa"*. Bruxelles: COM 886 definitivo; 2008.

[3] Trancuccio R. (2018), *"ITS nel trasporto pubblico locale: proposta di un sistema innovativo di conteggio passeggeri"* [tesi di laurea magistrale]. Torino: Politecnico di Torino, 2018.

[4] Boyle D.K. (1998), *"Synthesis of Transit Practice 29, Passenger Counting Technologies and Procedures"*, Transit Cooperative Research Program. Washington D.C: National Academy Press; 1998.

[5] Pavlidis I., Fritz B., Symosek P., Papanikolopoulos N.P., Morellas V., Sfarzo R. (1999), *"Automatic Passenger Counting in the HOV Lane"*. Minnesota: Minnesota Department of Transportation; 1999.

[6] Kimpel T.J., Strathman J.G., Griffin D., Callas S., Gerhart R.L. (2003), *"Automatic Passenger Counter Evaluation: Implications for National Transit Database Reporting"*. Paper presented at Transportation Research Board Annual Meeting, Transportation Research Record, 2003.

[7] Pinna I., Dalla Chiara B., Deflorio F.P., *"Rilievo automatico dei passeggeri e del carico dei veicoli"*. *"Automatic passenger counting and vehicle load monitoring"*. Ingegneria Ferroviaria 2/2010; pp. 101-138.

[8] Nielsen B.F., Frolich L., Nielsen O.A., Filges D., *"Estimating passenger numbers in trains using existing weighing capabilities"*. Transportmetrica A: Transport Science 2014; 10 (6): 502-517.

[9] Mishalani R.G., McCord M.R., Reinhold T. (2016), *"Use of Mobile Device Wireless Signals to Determine Transit Route-Level Passenger Origin-Destination Flows: Methodology and Empirical Evaluation"*. Transportation Research Record 2016; 2544 (1):123-130.

[10] Nitti M., Pinna F., Pintor L., Pilloni V., Barabino B. (2020), *"iABACUS: A Wi-Fi-Based Automatic Bus Passenger Counting System"*. Energies. 2020 Mar 19;13(6):1446.

[11] Olivo A., Maternini G., Barabino B. (2019), *"Empirical Study on the Accuracy and Precision of Automatic Passenger Counting in European Bus Services"*. TOTJ. 2019 Dec 31;13(1):250-60.

[12] Gonzalez A.B.R., Diaz J.J.V., Wilby M.R. (2022), *"Detailed Origin-Destination Matrices of Bus Passengers Using Radio Frequency Identification"*. IEEE Intell Transport Syst Mag. 2022 Jan;14(1):141-52.

[13] Gastaldi D. (2020), *"Linee guida rete veicolare di bordo e protocollo scambio dati per le flotte di trasporto pubblico della Regione Piemonte, fornito dall'azienda 5T (Tecnologie Telematiche Trasporti Traffico Torino)"*, Versione 4.510 del 05/2020.

[14] Caravello A. (2022), *"Sperimentazione ed affidabilità di un sistema automatico per il conteggio passeggeri su autobus per trasporto pubblico"* [tesi di laurea magistrale]. Torino: Politecnico di Torino, 2022.

[15] Cavallero A. (2022), *"Conteggio automatico dei passeggeri su autobus per il trasporto pubblico locale: affidabilità e variabili condizionanti l'accuratezza di misura"* [tesi di laurea magistrale]. Torino: Politecnico di Torino, 2022.

[16] Aesys, Manuale d'uso e manutenzione dispositivi Aesys. Torino: Aesys S.p.A.