

Coordinato da

Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti

Organizzato da

ASSOCIAZIONE ITALIANA
per l'INGEGNERIA
del TRAFFICO
e dei TRASPORTI



CIFI Collegio
Ingegneri
Ferroviari
Italiani

**Area Tematica – TRAM E TRENI NELLE AREE METROPOLITANE****Analisi comparativa dei tram esistenti**

Andrea Bracciali, Gianluca Megna
Università degli studi di Firenze, Via di S. Marta 3, 50139, Firenze
Tel. 3482856982; e-mail: gianluca.megna@unifi.it

1. INTRODUZIONE

Nel mercato dei tram si sta delineando la tendenza verso una maggiore standardizzazione dei prodotti, con l'ambizione di creare piattaforme in grado di soddisfare le amministrazioni cittadine su tutti gli aspetti relativi al veicolo tranviario.

Se questa tendenza da una parte può facilitare la stesura di capitolati, le procedure di acquisto e di fornitura, dall'altra deve fare i conti con le peculiarità delle linee tranviarie, sia preesistenti che di nuova costruzione, le quali possono essere caratterizzate da importanti limitazioni tecniche, dovendosi adattare ai vincoli urbanistici delle città e della circolazione automobilistica. A differenza delle linee ferroviarie, le linee tranviarie sono quindi difficilmente generalizzabili, ed è infatti impossibile estendere il concetto di interoperabilità ai tram, i quali, anche se appartenenti alla stessa piattaforma possono essere molto diversi fra loro.

Tale concetto, applicabile allo stesso modo ai veicoli metropolitani, risulta quindi in controtendenza con lo sviluppo tecnico dei veicoli tranviari, sospinto anche dalla sempre maggiore applicazione delle norme EN come strumento di riferimento per la progettazione e la stesura di capitolati. Vale la pena ricordare che le suddette norme sono nate come supporto alle *Specifiche Tecniche di Interoperabilità* (STI), per i veicoli ferroviari ad alta velocità. Anche se nel corso degli anni sono state emesse versioni per veicoli merci o veicoli passeggeri convenzionali, le norme EN rimangono in molti aspetti lontani dalle necessità di mezzi di trasporto leggeri ad alta capacità.

Ad oggi il tram riesce ancora a distinguersi tecnicamente dagli altri veicoli, in quanto deve assecondare alcuni requisiti non riscontrabili sui veicoli ferroviari convenzionali, lasciando spazio a soluzioni innovative e non convenzionali. Nonostante le norme EN rappresentino lo stato dell'arte per i principali sottosistemi ferroviari, è necessario mettere in evidenza i limiti di applicabilità ed i requisiti aggiuntivi che il veicolo tram necessita. Ad esempio, la UNI 11174, introdotta nel 2005 per riunire in un'unica norma i requisiti fondamentali del veicolo tram, è stata revisionata nel 2014 [1], introducendo molti collegamenti alle norme EN (UNI EN ISO 3381, UNI EN 13272, UNI EN ISO 3095, UNI EN 15663, UNI EN 13452-1:2003, UNI CEI EN 45545, UNI EN 12663-1, UNI EN 15227, UNI EN 13103, UNI EN 13104, UNI EN 14752:2006), con lo scopo di allineare le linee guida italiane ai prodotti internazionali, ma senza escludere la possibilità di applicazione per altre soluzioni tecniche ove necessarie.

Nel presente articolo si è cercato di analizzare le tipologie di veicolo tranviario esistenti, analizzando il mercato dei produttori con informazioni desunte da fonti pubblicamente disponibili. L'analisi è stata effettuata da un punto di vista puramente tecnico e funzionale, senza considerare i costi d'acquisto considerando il fatto che la vita media di un veicolo tranviario è di solito superiore ai 30 anni. È stato quindi possibile constatare un cospicuo numero di costruttori con una discreta variabilità di soluzioni tecniche. I parametri di confronto sono stati scelti tra quelli peculiari dei veicoli tranviari dove possibile e coniati di nuovi dove necessario per facilitare la comprensione dei risultati.

2. METODOLOGIA DI COMPARAZIONE

2.1 Definizione dell'architettura

L'architettura dei veicoli tranviari è mutata nel corso degli anni soprattutto per garantire maggiore capacità di trasporto e facilità di accesso ai veicoli. In particolare, la sempre più diffusa necessità di "pavimento basso" ha portato a rivedere non solo le banchine ma le intere modalità di incarrozzamento dei viaggiatori. Altrettanto, gli sviluppi nell'elettronica di comando e la necessità di disporre di un efficace sistema di climatizzazione hanno portato a "spostare" le apparecchiature dal sotto-cassa all'imperiale.

La classica architettura italiana rappresentata in Figura 1, definita dalla UNI 3192:1952 insieme alla UNI 8944:1986, che per prima introduceva il concetto del piano ribassato, e alla UNI 9251:1988 è stata definitivamente sorpassata solo con l'avvento della UNI 11174 nel 2005, la quale definiva solamente i requisiti funzionali del veicolo tranviario.

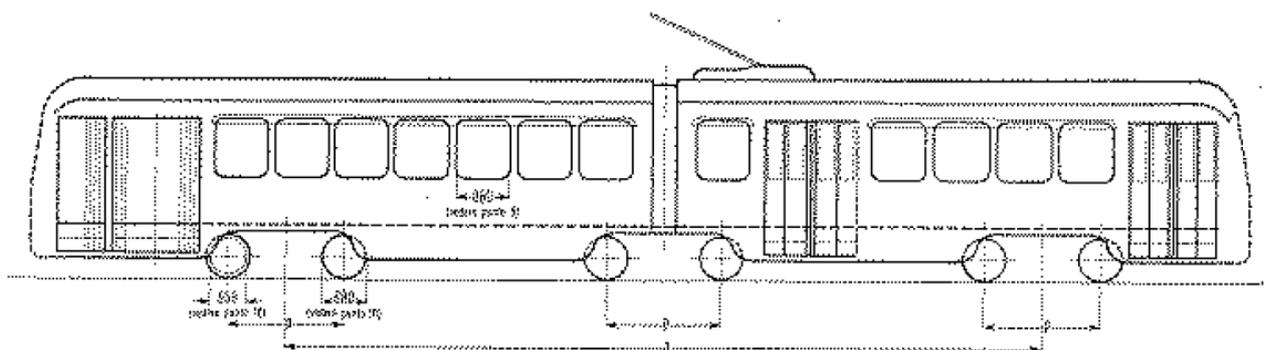


Figura 1. Architettura standard di un veicolo tranviario definita dalla UNI3192

Architetture del genere erano chiaramente derivate da veicoli ferroviari convenzionali, con l'introduzione dell'articolazione centrale fra due casse adiacenti in modo da ridurre l'interperno fra i carrelli senza diminuire eccessivamente la lunghezza delle carrozze.

Ad oggi invece sono riscontrabili architetture concettualmente molto diverse da quella originaria, rendendo difficile ad esempio l'identificazione del rodiggio secondo le usuali convenzioni usate per i treni. Ad esempio, è sempre più facile trovare veicoli con carrozzini a carrello singolo e articolazioni fra casse sospese o addirittura carrozze completamente sospese.

La presente analisi è stata effettuata partendo quindi da una ricognizione delle architetture presenti. Per cercare di uniformare la classificazione in tal senso, è stata proposta una nuova simbologia di identificazione della composizione di veicoli tranviari. Tale schematizzazione è sintetizzata in Tabella 1.

Tabella 1. Sintesi dei simboli utilizzati nel nuovo codice proposto per veicoli tranviari

Cassa su carrello non pivotante (“carrozzino”) – simbolo di una lettera			
Simbolo	Descrizione	Equivalenza UIC	Note
M	Cassa su carrello <i>motore</i>	B o B ₀	Nessuna distinzione riguardo a numero e disposizione dei motori
T	Cassa su carrello <i>portante</i>	2	
Cassa su due supporti – simbolo di due lettere			
Simbolo	Descrizione	Equivalenza UIC	Note
m	Cassa con estremità su carrello <i>motore</i> pivotante	B' o B ₀ '	Nessuna distinzione riguardo a numero e disposizione dei motori
t	Cassa con estremità su carrello <i>portante</i> pivotante	2'	
J	Cassa con estremità su carrello <i>motore</i> Jakobs	B (?)	Dato che il carrello Jakobs sostiene due carrozze adiacenti, il simbolo è riportato per entrambe
j	Cassa con estremità su carrello <i>portante</i> Jakobs	2 (?)	
^	Cassa con estremità su articolazione di cassa adiacente	N/A	-

Se già per un carrello Jakobs risulta improprio l'utilizzo del codice UIC, applicandolo ad un veicolo tranviario moderno, ad esempio quello riportato in Figura 2, è praticamente impossibile distinguere l'architettura senza osservare il relativo figurino. Il nuovo codice si propone quindi di identificare l'architettura attraverso la configurazione delle casse e non dei carrelli.

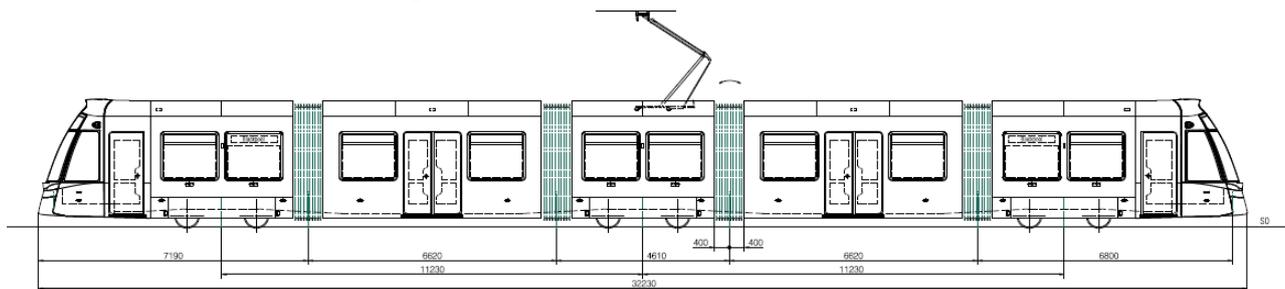


Figura 2. Tram di Blackpool (Bombardier Transportation) con tre carrozzini e due casse sospese.

Per l'esempio sopra riportato ne risulta quindi un codice **M ^ ^ T ^ ^ M**, di comprensione più immediata rispetto ad una classificazione standard del tipo **B 2 B**. Per meglio comprendere la potenzialità offerta dalla nuova denominazione basti pensare ad un rodiggio **B 2 2 B** (con apice se i carrelli hanno la ralla per ruotare liberamente rispetto alla cassa), che per un veicolo ferroviario può indicare solo due casse su quattro carrelli, o tre casse su quattro carrelli nel caso che i due carrelli portanti siano Jakobs. Per un tram invece le combinazioni possono essere molte di più, come ad esempio riportato in Figura 3, senza contare la possibilità di avere comunque soluzioni con carrelli Jakobs (vedi Skoda *Forcity ALFA* in Figura 12).



Figura 3. Possibili configurazioni di tram Skoda con quattro carrelli. Il colore verde indica i carrelli pivotanti, mentre il rosso indica quelli non pivotanti.

La possibilità di indicare la configurazione tramite i punti di appoggio delle casse rende così più semplice e diretta la comprensione del veicolo, che negli esempi di Figura 3 sarebbero rispettivamente

$$\begin{array}{cccc}
 & mt & tm & \\
 & m^{\wedge} & tt & m^{\wedge} \\
 m^{\wedge} & T & \wedge\wedge & T & m^{\wedge} \\
 M & \wedge\wedge & T & \wedge\wedge & T & \wedge\wedge & M
 \end{array}$$

e $mJ \quad JJ \quad Jm$ per il *Forcity ALFA* che ha tutti carrelli motori.

2.2 Definizione dei parametri di confronto

La *percentuale di piano ribassato* è sicuramente uno dei parametri principali per la scelta di un tram moderno. Oggigiorno la maggior parte dei veicoli è costruito con la filosofia “100% Low Floor”, anche se esistono ancora produttori che forniscono soluzioni con piano ribassato dal 40% all’ 80%. Infatti, il piano ribassato esteso su tutta la lunghezza del veicolo garantisce la possibilità di spostarsi al suo interno senza ostacoli, ma non è direttamente collegato alla capacità totale di trasporto passeggeri. Tale capacità si può facilmente riassumere in tre parametri: *numero di posti a sedere per metro*, *numero di posti in piedi per metro*, e il rapporto fra questi, denominato anche *comfort ratio* espresso in percentuale. Inoltre, i carrelli pivotanti oltre ad avere una migliore iscrizione in curva riducendo le forze laterali all’ingresso delle curve che in campo tranviario sono caratterizzate dall’assenza dei raccordi per diminuire la lunghezza della curva stessa, oggigiorno sono costruiti in modo tale da garantire anch’essi il piano ribassato totale o quasi. In quest’ultimo caso, la differenza di altezza fra il pavimento nella zona d’incarozzamento e quello nella zona sopra i carrelli (fino a 40 mm) è spesso colmabile per mezzo di piccole rampe.

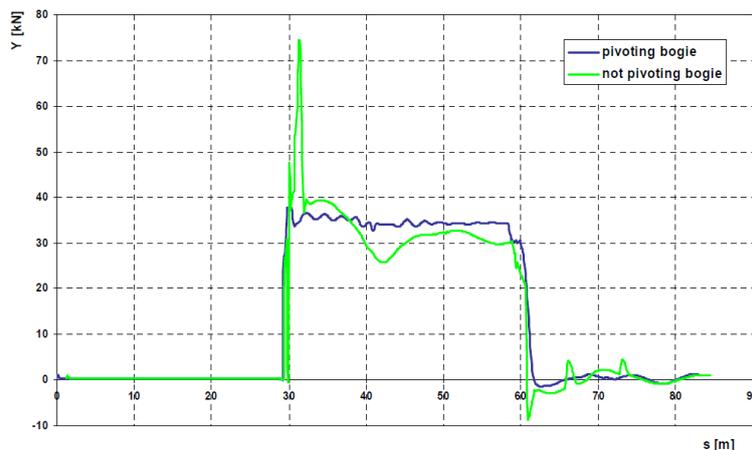


Figura 4. Forza laterale durante l’iscrizione in curva di raggio 20 m senza transizione, per un veicolo con carrelli pivotanti e uno con carrelli non-pivotanti [2].

Affinché la presenza del piano ribassato per tutta la lunghezza del veicolo sia utile per favorire l’incarozzamento dei passeggeri sono necessarie porte anche in prossimità delle cabine di guida, solitamente a una anta. Questo permette di aumentare il numero di porte, ma al contempo aumenta l’aggetto delle carrozze di estremità [3]. È stato quindi valutato il *numero di porte ad una o due ante* e rapportato alla lunghezza totale del veicolo, calcolando la *distanza media fra le porte*.

Da un punto di vista prettamente più tecnico è importante analizzare il veicolo in base al numero di elementi di cui è composto, come *numero di carrelli* e *numero di moduli*, valutando anche in questo caso la *lunghezza media dei moduli*. Insieme al numero massimo di passeggeri si definisce quindi il *carico per asse*, e la massa totale che è stata utilizzata per valutare la *potenza per unità di massa*. La massa a pieno carico è stata calcolata considerando una capacità di 4 pax/m² in aggiunta ai posti a sedere. Come capacità prestazionali risultano di particolare interesse anche l’*accelerazione massima* e la *pendenza superabile* dal veicolo, anche se questi dati solitamente non vengono forniti nei datasheet dei produttori. Allo stesso modo il raggio minimo di curvatura è un parametro non chiaramente esplicitato, mentre la *velocità massima* è un parametro di scarso interesse in quanto tutti i veicoli si attestano nell’intervallo 70÷80 km/h.

3. ANALISI DEI RISULTATI

L'analisi si è estesa a prodotti non solamente europei, senza la pretesa di coprire il 100% dei produttori. Ad ogni modo sono state individuate 32 aziende attive nella produzione mondiale di tram e tra queste sono stati scelti per l'analisi 31 veicoli.

Da un'ulteriore analisi delle notizie riportate da *Metro Report International* nel corso del biennio 2017-2018, è stata stimata la percentuale di occupazione del mercato, in cui Alstom sembra far da guida, probabilmente anche grazie alla notevole richiesta di veicoli *catenary-free* (circa il 30% delle notizie analizzate).

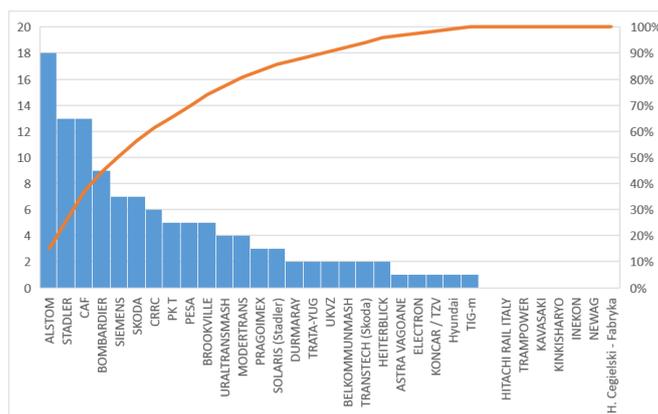


Figura 5. Analisi di mercato in base alle notizie presenti su *Metro Report International* nel biennio 2017-2018

La sintesi dei veicoli presi in considerazione è riportata nella in Figura 6, dove sono indicati anche i parametri principali, come percentuale di piano ribassato, lunghezza e disposizione delle casse.

Come prima indicazione è possibile notare che circa il 77% dei veicoli ha una lunghezza inferiore ai 35 m, di cui il 42% nell'intervallo 30-34 m. La maggiore tendenza verso veicoli 100% a piano ribassato è chiara, ma è possibile notare come questa caratteristica non sia confinata solo a veicoli con carrozzini sostenuti da carrelli non pivotanti e casse intermedie completamente sospese.

Dall'analisi risulta che questa disposizione è caratterizzata da una lunghezza media dei moduli abbastanza bassa, e come mostrato Figura 7 (sinistra), maggiore è il numero di moduli sospesi minore è la loro lunghezza media. D'altro canto, con moduli corti intervallati da carrozzini, diminuisce il numero di ante per modulo e quindi tende ad aumentare la distanza media fra le porte, come mostrato in Figura 7 (destra). L'ottimo si raggiunge paradossalmente con i tram a singolo modulo, come il Pragoimex *EVO1*, 100% a piano ribassato, con una lunghezza di 15 m e un totale di 4 porte di cui 3 a doppia anta, il quale presenta una distanza media fra le porte di 3.8 m. Valori intorno ai 4.5 m sono invece raggiungibili per veicoli come il *Nevelo* di Newag, il *Vityaz M* di PKT (PK Transportnye Sistemy), i quali hanno tre porte sulle carrozze di estremità (di tipo m^{\wedge}). Un caso particolare è rappresentato dall'*Avenio* di Siemens, che è costituito da carrozzini più lunghi del consueto (9.3 m) con due porte a doppia anta ciascuno e sostenuti da un carrello centrale. La distanza fra le porte risulta quindi 4.5 m, ma data la maggiore lunghezza dei moduli, i carrelli non pivotanti devono garantire un certo grado di rotazione per mezzo dell'elasticità delle sospensioni secondarie in gomma (fino a 4.5°). Con lo stesso concetto dell'*Avenio* sono costruiti i tram *Tramino* della Solaris (Jena, Olsztyn e Braunschweig), l'*Imperio* della ASTRA e il *TMK2200* della Konkar.

Per i veicoli con moduli sospesi si raggiunge una bassa distanza media fra le porte se i moduli sospesi sono tutti costruiti in modo tale da poter alloggiare due porte a doppia anta e i moduli d'estremità hanno almeno una porta a singola anta, come ad esempio il Pesa *Jazz 128NG*, l'Inekon *Trio* e l'Electron T5B64, che raggiungono valori pari a 5 m.

Manufacturer	Product	Reference city	Order Year	Track gauge	% Low floor	Length [m]	Modules arrangements								
CAF	URBOS 3	Budapest	2016	1435	100	56	M	^^	T	^^	M	^^	T	^^	M
Alstom	Citadis 405	Nice	2017	1435	100	44	M	^^	T	^^	M	^^	M		
Stadler	Tango	Geneve	2010	1000	75	44	m^	T	^J	J^	T	^m			
Bombardier	Flexity 2	Zurich	2017	1000	100	43	M	^^	T	^^	M	^^	M		
Bombardier	Flexity	Berlin	2006	1435	100	40	M	^^	T	^^	M	^^	M		
Solaris	Tramino	Lipsia	2015	1458	65	38	mm	^j	j^	mm					
Siemens	Avenio	Munich	2013	1435	100	37	M	T	M	M					
Durmaray	Panorama	Olsztyn	2018	1435	100	33	M	^^	T	^^	M				
Bombardier	Flexity 2	Blackpool	2009	1435	100	32	M	^^	T	^^	M				
Newag	Nevelo	Krakov	2016	1435	100	32	m^	tt	^m						
Hitachi	Sirio	Florence	2009	1435	100	32	M	^^	T	^^	M				
Astra	Imperio	Oradea	2018	1435	100	32	M	T	M						
Konkar/TZV	TMK2200	Liepāja	2018	1000	100	32	M	^^	M	^^	M				
Moderntans	Moderus gamma	Poznan	2017	1435	100	32	m^	mm	^m						
Hyundai	-	Izmir	2014	1435	100	32	M	^^	M	^^	M				
Siemens	Avenio M	Ulm	2015	1000	100	31	M	^^	T	^^	M				
Skoda	Forcity Classic	Chemitz	2016	1435	100	31	M	^^	M	^^	M				
Skoda	Forcity Alfa	Prague	2009	1435	100	31	mJ	JJ	Jm						
PESA	Jazz 128NG	Gdansk	2014	1435	100	30	M	^^	T	^^	M				
Electron	T5B64	Kiev	2017	1524	100	30	M	^^	T	^^	M				
PKT	Vityaz-M	Moskov	2016	1524	100	28	m^	M	^m						
Transtech	Artic	Helsinki	2012	1000	100	28	m^	mm	^m						
Tatra-Yug	K-1M6	Kiev	2018	1524	70	27	m^	T	^m						
UKVZ	71 - 633	Samara	2016	1524	100	26	m^	T	^m						
BKM	AKSM843	Kazan	2013	1524	80	25	m^	T	^m						
Heiterblick	Leoliner	Lipsia	2004	1458	70	23	m^	tm							
UTM	71 - 409	Novgorod		1524	100	22	M	^^	M						
Inekon	Trio	Seattle	2011	1435	50	20	M	^^	M						
Brookville	Liberty	Oklahoma City	2016	1435	70	20	M	^^	M						
UTM	71 - 407	Kolomna	2017	1524	40	16	mm								
Pragoimex	EVO1	Most	2016	1435	100	15	mm								

Figura 6. Sintesi dei veicoli analizzati (in ordine decrescente di lunghezza)

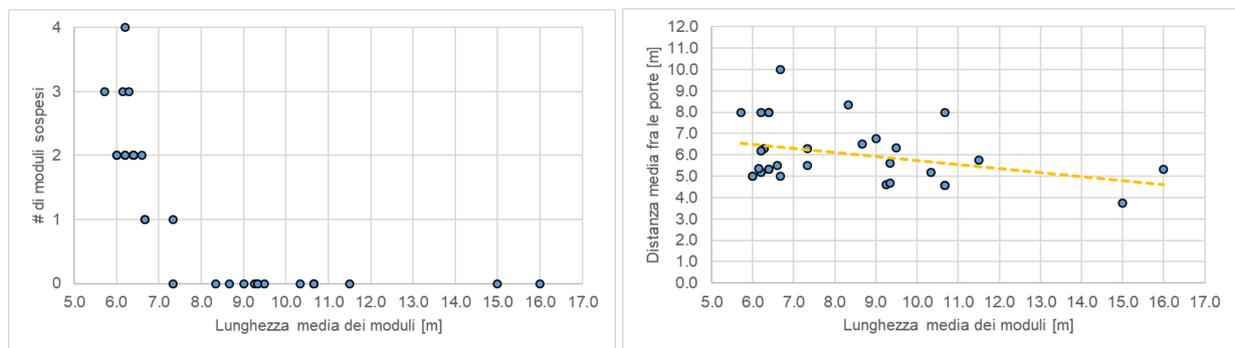


Figura 7. Numero di moduli completamente sospesi (sinistra) e distanza media fra le porte (destra) in funzione della lunghezza media dei moduli



Figura 8. In senso antiorario: tram a unità singola EVO1, tram a tre moduli Nevelo, tram a tre moduli con carrozino centrale Vityaz-M, tram Avenio a due moduli

Anche se permangono le perplessità per la capacità sterzante di carrelli non pivotanti con sospensioni secondarie in gomma, sono da sottolineare importanti passi avanti nella costruzione degli stessi, come mostrato in Figura 9 in cui sono rappresentati il carrello del *Combino Supra* di Budapest e il più recente carrello dell'*Avenio* di Monaco (entrambi Siemens).



Figura 9. Carrelli non pivotanti con sospensioni secondarie in gomma, del *Combino Supra* a sinistra e dell'*Avenio* a destra (il motore longitudinale esterno non è presente)

È naturale che con veicoli a singola unità diminuisce la capacità totale di passeggeri trasportabili, ed quindi necessario aumentare la frequenza del servizio. Ad ogni modo è possibile constatare che il numero di passeggeri per unità di lunghezza si mantiene costante per tutti i veicoli considerati, attestandosi su un valore di circa 6 pax/m. Anche il comfort ratio non presenta particolare tendenze, con un valore medio intorno al 30%, cioè in media il veicolo ha una capacità di circa il 30% di posti a sedere rispetto al totale dei passeggeri trasportabili.

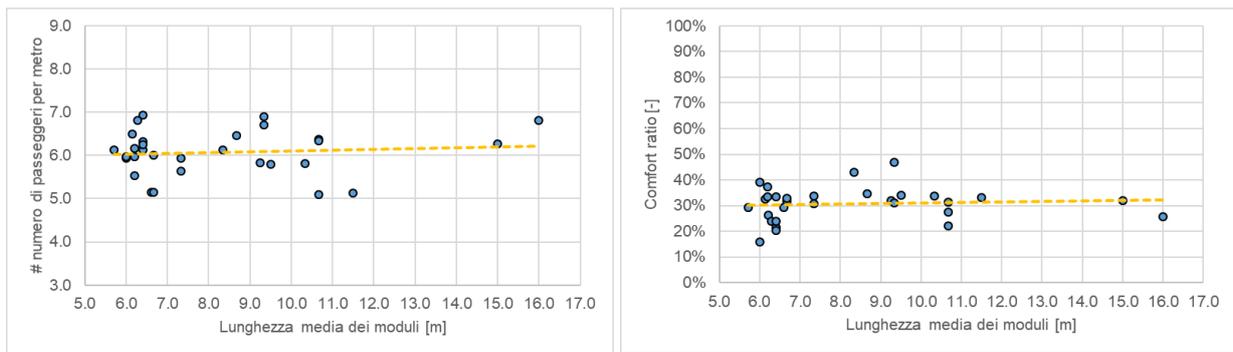


Figura 10. Numero di passeggeri a metro (sinistra) e comfort ratio (destra) in funzione della lunghezza media dei moduli

Considerando che i tram multiarticolati composti da moduli sospesi hanno il vantaggio di avere un numero minore di carrelli in relazione alla lunghezza, ne consegue che la distanza media fra i carrelli è maggiore e il carico per asse risulta più alto rispetto ai veicoli con moduli più lunghi, che ad ogni modo non supera mai le 10 t/asse. Il carico per asse minore risulta quello del *Leoliner* della Heiterblick, che grazie a 3 carrelli pivotanti che sostengono 2 casse ha un carico per asse di 6 t. Il veicolo, che ha il 70% di piano ribassato (con un solo gradino sopra i carrelli motori di estremità), è in servizio a Lipsia dal 2006, ma nuove versioni sono state prodotte come ad esempio il *Vamos70*. Soluzioni simili sono state adottate anche da Newag per il *Nevelo* (carico per asse 7.3 t) e da Skoda per i veicoli della serie *Forcity Smart* (Figura 3, veicolo 2), da cui è derivato anche l'*Artic* della Transtech per le città di Helsinki e Tampere (carico per asse 7 t). Lo stesso *Forcity Alfa* di Skoda con 4 carrelli Jakobs che sostengono 3 casse, ha un carico per asse di 6.9 t. La soluzione con tali carrelli permette anche l'installazione di sei porte a due ante con soli 5.2 m di distanza media fra le porte, a differenza dei 5.6 m per l'*Artic* (con 2 porte su 5 a singola anta) e dei 5.8 m per il *Leoliner*.

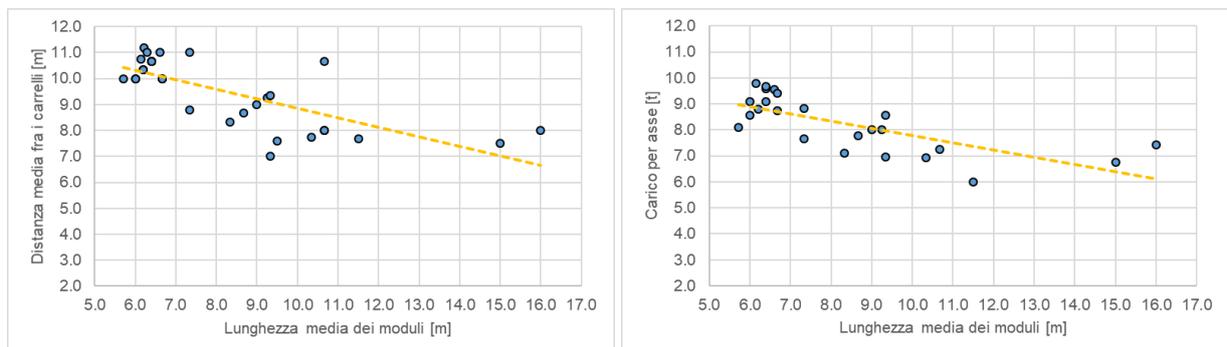


Figura 11 Distanza media fra i carrelli (sinistra) e carico per asse (destra)



Figura 12. In senso antiorario: tram a due unità Leoliner, tram a tre unità Forcity Alfa con carrelli Jakobs, tram a tre unità Artic

Indipendentemente dal numero di carrelli, anche se la dispersione dei dati non è proprio trascurabile, la potenza unitaria (per unità di massa) sembra attestarsi ad un valore medio di 8 kW/t, come mostrato in Figura 13. Da un punto di vista prestazionale è invece difficile fornire un'indicazione precisa sui valori accelerazione e pendenza massima superabile. Per quest'ultima, mediamente

vengono indicati valori nell'intervallo $6 \div 9$ %, mentre per l'accelerazione si può passare da 1.2 m/s^2 a vuoto fino a 0.5 m/s^2 a pieno carico.

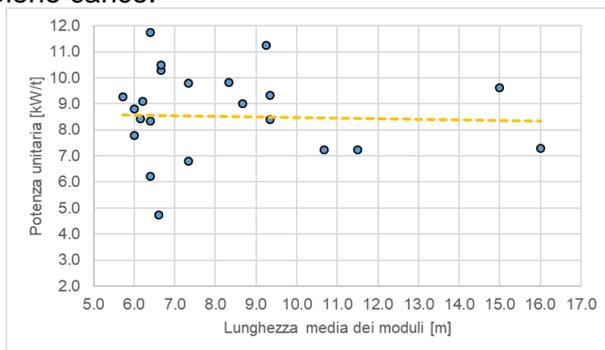


Figura 13 Potenza per unità di massa in funzione della lunghezza media dei moduli

Anche per quanto riguarda il raggio minimo di curvatura non possono essere tratte indicazioni molto precise, ma si trovano facilmente valori minimi compresi nell'intervallo $15 \div 25$ m.

4. TRAM AD ASSI STERZANTI

Nelle varie architetture analizzate nei paragrafi precedenti non si è tenuto di conto di alcuni casi particolari, i quali non avendo avuto l'aspettato successo commerciale non sono attualmente commercializzati dai produttori stessi. Fra questi possiamo trovare i tram ad assi sterzanti come il COBRA (Zurigo) e l'ULF (Vienna e Oradea), mostrati in Figura 14. Nonostante la possibilità di avere assi sterzanti singolarmente sia la soluzione più efficace per risolvere i problemi di rumore e usura su curve di raggio molto stretto, tale architettura non è mai stata estensivamente applicata, in particolare per le molte complicazioni sia di costruzione che di manutenzione. Le soluzioni adottate nei due tram precedentemente citati, sono mostrate rispettivamente in Figura 15 e Figura 16.

Mentre il COBRA già si avvicinava alle architetture moderne (il secondo e il quarto modulo sono completamente sospesi) con la differenza che i carrelli sono sostituiti da assi sterzanti (distanti 3.26 m) le cui ruote sono collegate ai motori laterali tramite alberi cardanici, l'ULF applicava la tecnologia TALGO al tram realizzando un veicolo da 35 m con 5 moduli e 6 assi "a portale" di cui quelli centrali a cavallo tra le casse, motorizzati e guidati dalle casse stesse. Gli assi di estremità sono invece portanti e guidati dai primi assi adiacenti. In questo modo si realizza un piano ultra-basso con incarrozzamento a soli 197 mm di altezza. D'altra parte, l'architettura a portale obbliga il posizionamento dei motoriduttori in posizione verticale con notevoli ingombri e non poche complicazioni manutentive. Complicazioni del genere oggi potrebbero in qualche modo essere superate tramite l'utilizzo di motori sincroni a magneti permanenti *direct drive*, ampiamente sui veicoli stradali totalmente elettrici. Un esempio di applicazione di trazione *direct drive* in campo tranviario è rappresentato dal Forcity Alfa di Skoda (Figura 17).



Figura 14. Tram COBRA a sinistra e tram ULF (Ultra Low Floor) a destra

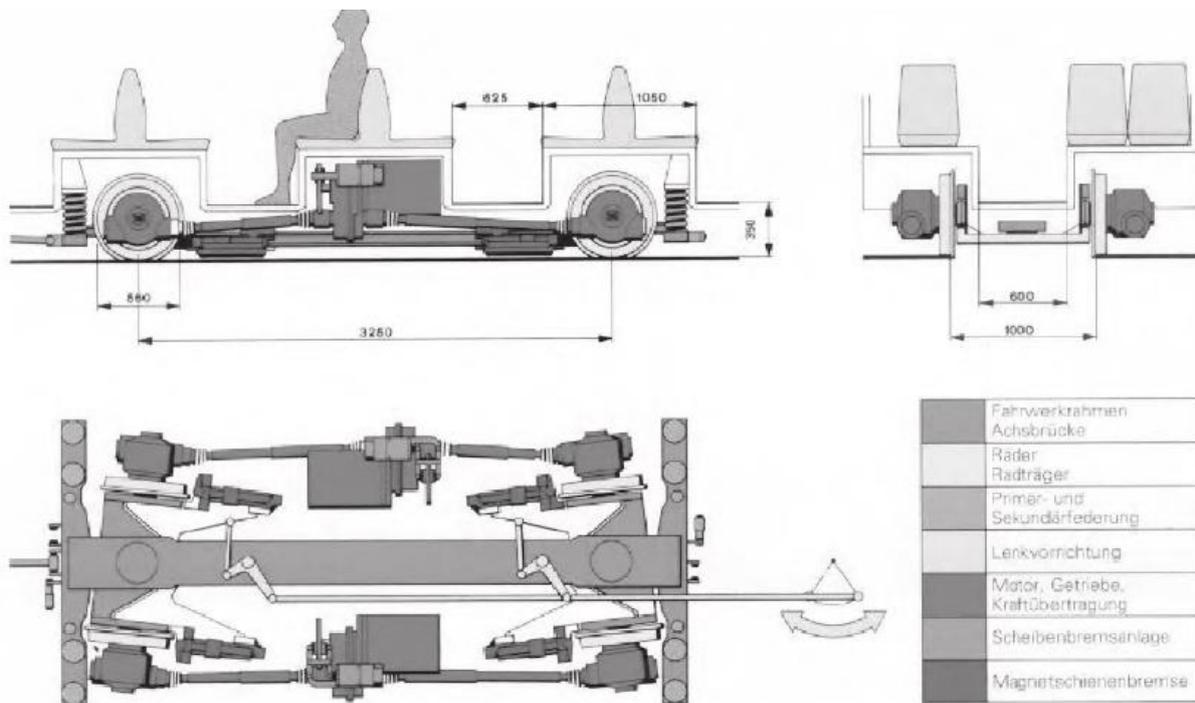


Figura 15. Sistema di assi sterzanti adottato sul tram COBRA [4]

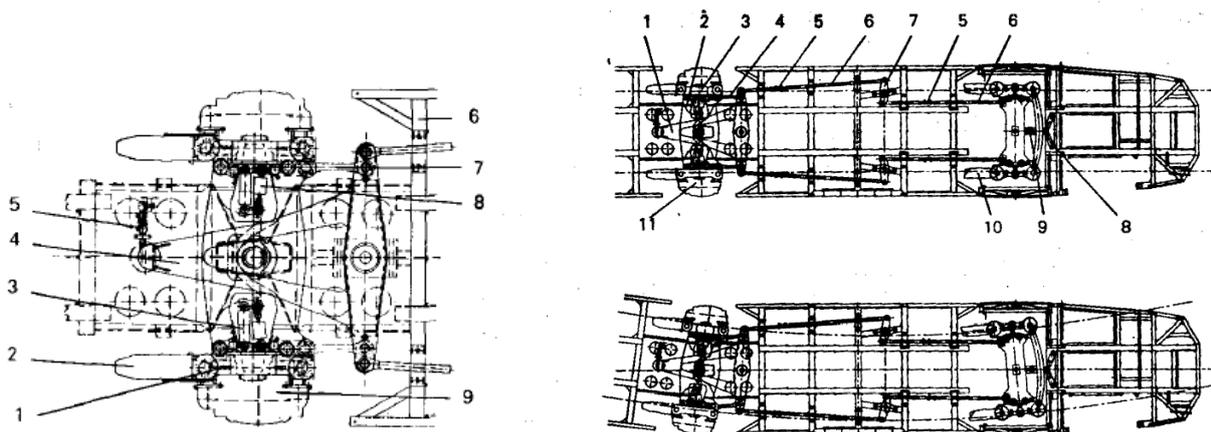


Fig. 8: Articulated portal control
 1 Wheel housing/2 Magnetic rail brake/3 Lateral damper/4 Symmetrical control/5 Guide rod/6 Floor frame structure/7 Control rod, short/8 Lateral stop (rubber-sprung)/9 Motor-gear unit

Fig. 10: Running gear controls on ULF ultra-low floor tramcar
 1 Symmetrical controls/2 Portal lateral connection plate/3 Wheel housing/4 Lateral guide, short/5 Turnbuckle sleeve/6 Guide, long/7 Deflection lever/8 Damper/9 Damper lever
 10 Magnetic rail brake/11 Motor-gear unit

Figura 16. Sistema di assi sterzanti applicato al tram ULF [5]

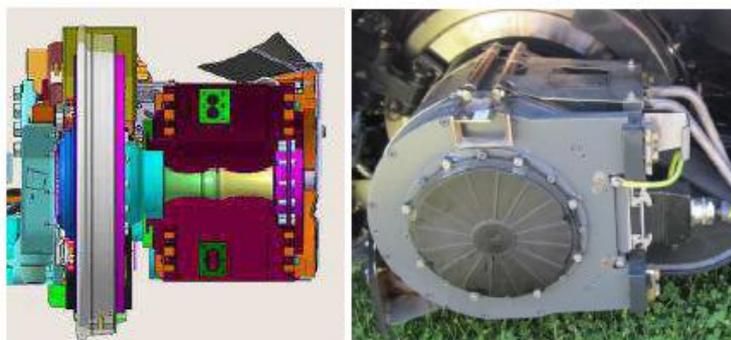


Figura 17. Motore sincro da 55 kW direttamente applicato alla ruota [6]

5. TIPOLOGIE DI TRAZIONE

Un discorso a parte merita la descrizione dei sistemi d'alimentazione, vista la sempre maggiore frequente richiesta di sistemi catenary-free. Una dettagliata ricognizione di tali sistemi è riportata in [7], in cui sono analizzate le seguenti tipologie di trazione:

- *Ground Level Power Supply (GPLS)*
- *Onboard Energy Storage System (OESS)*
- *Onboard Power Generation System (OPGS)*

Mentre nel primo gruppo si distinguono solamente il sistema *Tramwave* di Ansaldo STS e il sistema *APS* di Alstom, il secondo risulta più affollato, come mostrato nella seguente tabella. Questa tendenza risulta avvalorata dagli importanti sviluppi ottenuti nelle tecnologie di accumulo e ricarica di energia elettrica.

Produttore	Città	Sistema	Lunghezza tratta
Alstom	Nizza	SRS	11 km
CAF	Newcastle	ACR	2.6 km
Skoda	Konya	Batterie nano-Li-Ti	1.8 km
Inekon	Seattle	Batterie	4 km
Brookville	Dallas	Batterie	2.6 km
Siemens	Doha	SITRAS	11.6 km
Bombardier	Nanjing	PRIMOVE	8 km
Kinkisharyo	Charlotte (dimostratore)	e-Brid	Fino a 8 km
Kawasaki	Sapporo	GIGACELL	10 km

Nel terzo gruppo, ad eccezione di alcuni veicoli ibridi con alimentazione diesel, si stanno sviluppando alcuni tram a celle a combustibile, CRRC (Qingdao) e TIG/m (Dubai).

6. CONCLUSIONI

I risultati dell'analisi presentata nel presente articolo sottolineano come l'architettura del tram si stia avviando verso una nuova standardizzazione costituita da uno o più moduli sospesi e carrozzini adiacenti con carrelli non pivotanti. Il piano totalmente ribassato rimane sempre la scelta più gettonata. Nonostante questo, il tram rimane l'unico veicolo su ferro a presentare una certa libertà di progettazione e costruzione e seppur spesso confinata a costruttori "minori" tale variabilità porta ad avere un numero non trascurabile di alternative all'architettura sopracitata.

Per cercare di uniformare la descrizione di tali architetture una nuova denominazione basata sulla disposizione delle casse è stata proposta. L'analisi comparativa si è poi articolata su un campione di 31 veicoli di diversa natura basandosi su parametri tipici sia operazionali che prestazionali. Nonostante la valutazione finale debba essere effettuata anche sulla base dei costi di acquisto, della tipologia di infrastruttura e delle modalità di traffico urbano, ne risulta che la soluzione **M ^ ^ M** o simile non è sempre la migliore soluzione, considerando la maggiore distanza fra le porte, il maggior carico per asse e la peggiore capacità di iscrizione in curva a causa dell'assenza di carrelli pivotanti. Inoltre, il numero di passeggeri trasportabili e il numero di posti a sedere per unità di lunghezza non sembra essere influenzato né dalla presenza del piano totalmente ribassato né dalla presenza dei moduli sospesi, così come la potenza unitaria per unità di massa.

Nonostante i problemi di usura e rumore sulle curve di raggio stretto siano ancora argomenti molto sensibili in ambito urbano, nessuno dei veicoli presi in considerazione durante l'analisi prevede sistemi di sterzata attiva o passiva in curva. Infatti, gli unici casi prodotti (COBRA e ULF) non sono più commercializzati dai produttori stessi, a causa degli elevati costi di produzione e manutenzione.

Infine, si è rilevato un notevole incremento di richiesta di sistemi di trazione senza catenaria, in particolare di sistemi con accumulatori di energia a bordo grazie alla maggiore economicità rispetto a sistemi di alimentazione a terra e ai notevoli passi avanti fatti nello sviluppo di batterie e supercapacitori.

RIFERIMENTI

- [1] UNI 11174:2014: *MATERIALE ROTABILE PER TRAMVIE E TRAMVIE VELOCI - CARATTERISTICHE GENERALI E PRESTAZIONI.*
- [2] J. Capek & J. Kolar: *OPTIMAL DESIGN OF LOW-FLOOR TRAM*, From horse-drawn railway to high-speed transportation systems, Praga, Aprile 2007.
- [3] S. Viganò: *PAVIMENTO TUTTO BASSO, NE VALE SEMPRE LA PENA?*, 4° Convegno Nazionale Sistema Tram, Roma Settembre-Ottobre 2010.
- [4] Y. Wei: *SPURFÜHRUNGSREGELUNG EINES AKTIV GELENKTEN RADPAARS FÜR STRAßENBAHNEN*, KIT Scientific Publishing, 2014.
- [5] O. Krettek & P. Lehotzky: *RUNNING BEHAVIOUR OF THE SINGLE WHEEL AND ITS INFLUENCE ILLUSTRATED BY EXAMPLE OF THE ULF ULTRA LOW FLOOR TRAMCAR OF THE VIENNA TRANSPORT AUTHORITIES*, 5th Mini Conference on vehicle system dynamics, identification and anomalies, Budapest, Novembre 1996.
- [6] J. Kolar: *DESIGN OF A WHEELSET DRIVE*, Transactions on Electrical Engineering, Vol. 4 (2015), No. 1.
- [7] J. Swanson, J. Smatlak: *STATE OF THE ART IN LIGHT RAIL ALTERNATIVE POWER SUPPLIES*, APTA / TRB 2015 Light Rail Conference.