



Consiglio Nazionale delle Ricerche



Campagna sperimentale per la valutazione di fattori di emissione di autobus per il trasporto pubblico urbano alimentati a CNG e rispondenti allo standard emissivo Euro VI

Web Conference ISPRA
Emissioni da trasporto stradale
16 APRILE 2021



A cura di:

Maria Vittoria Prati (mariavittoria.prati@stems.cnr.it)

Maria Antonietta Costagliola (mariaantonietta.costagliola@stems.cnr.it)

Rocco Giuzio

Laboratorio Emissioni Veicoli – STEMS

Premessa

Nel novembre 2019 è stato stipulato un contratto tra l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA) e l'associazione temporanea di scopo costituita tra l'Istituto Motori del Consiglio Nazionale delle Ricerche ed Innovhub – Stazioni Sperimentali per l'industria S.r.l., relativo al “*Servizio di misura delle concentrazioni medie di $CO_2/PM_{2.5}/NO_x$ emesse per Km percorso di automobili ed autobus in prove che simulano l'uso effettivo dei veicoli*” (CIG 8031562E9E).

Questa presentazione riassume l'attività relativa alle
PROVE CON AUTOBUS EURO VI ALIMENTATI A GAS NATURALE.



Nella presentazione successiva verrà illustrata un'altra attività svolta sempre nell'ambito dello stesso contratto.





Energy

ic Istituto di Ricerche
sulla Combustione



100 ricercatori
60 personale tecnico
ed amministrativo

Sustainable agriculture

Mobility

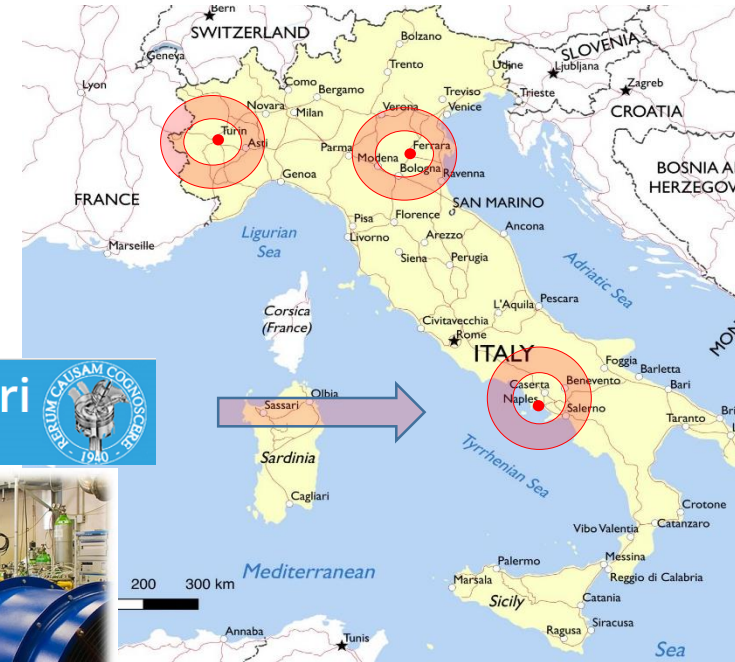
INAMOTER

Istituto per le Macchine Agricole
e Movimento Terra



Istituto Motori

Consiglio Nazionale delle Ricerche



Sede principale:
Via Guglielmo Marconi, 4
80125 Napoli (NA)
Italy

<http://www.stems.cnr.it>

**da ottobre 2020 il nuovo istituto STEMS è operativo ed afferisce al
Dipartimento di Ingegneria, ICT e Tecnologie per l'Energia e i Trasporti (DIITET) del CNR**

MISSIONE DI STEMS-CNR



L'Istituto nasce con la finalità di costituire un punto di eccellenza Nazionale in grado di interpretare al meglio le sfide a cui il Paese è chiamato a confrontarsi riguardanti il clima, l'energia e la mobilità: tematiche strettamente collegate che devono essere affrontate con un approccio olistico, anche per quanto riguarda le loro implicazioni per i cittadini e in generale per la società nel suo complesso.

In particolare, affronta tematiche di interesse prioritario a livello nazionale e internazionale, quali:

- *la de-carbonizzazione dei settori dell'energia e della mobilità,*
- *la transizione energetica verso risorse rinnovabili alternative a quelle fossili,*
- *il miglioramento dell'efficienza energetica, sia nell'ambito della mobilità sia all'interno dei vari comparti industriali, tra cui l'agricolo e l'off-road.*

Le attività di ricerca riguardano anche l'applicazione di metodologie avanzate di data analytics nella gestione ed ottimizzazione dei sistemi energetici.

Definizione dei veicoli: AUTOBUS

Sono veicoli che appartengono alla categoria M3, cioè destinati al trasporto di persone, equipaggiati con più di nove posti compreso quello del conducente, e massa massima superiore a 5 t.

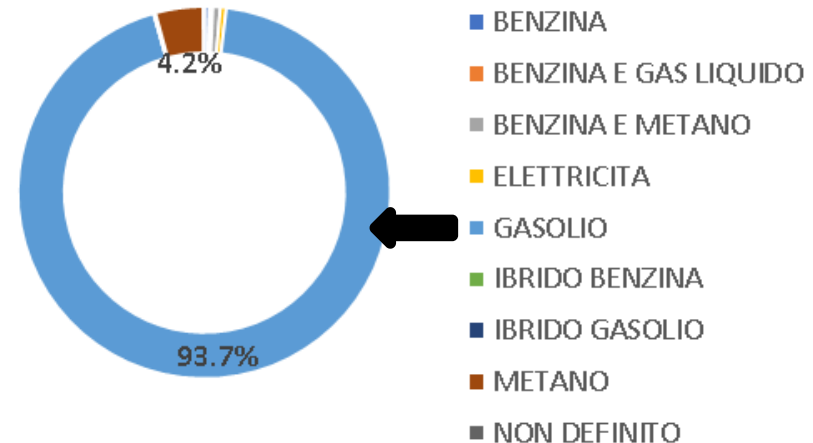


Automobile Club d'Italia
 Open Parco Veicoli

al 31/12/2020
 99.883 unità
 di cui 51.429 per uso pubblico

Degli autobus per uso pubblico il 57% circa è omologato per trasportare più di 70 persone.

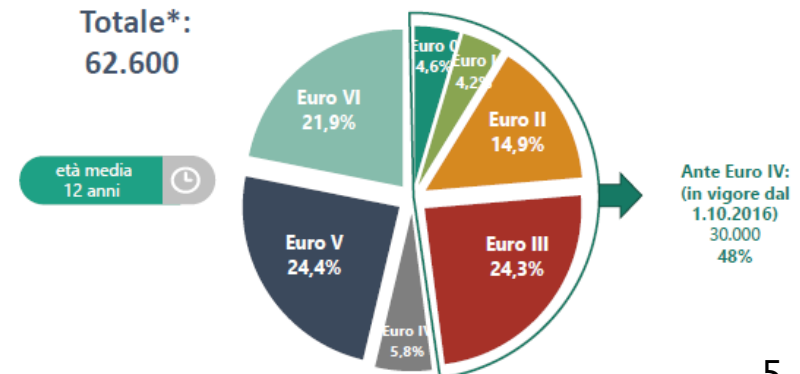
Classificazione per alimentazione



Unione Nazionale Rappresentanti Autoveicoli Esteri

al 30/06/2020

Totale*:
 62.600



* Stima UNRAE al 30/06/2020 basata sui veicoli ancora circolanti immatricolati dal 1990 - esclusi minibus (fino a 22 passeggeri)

AUTOBUS oggetto della sperimentazione

Gli autobus oggetto della sperimentazione appartengono alla categoria M3, hanno capacità superiore ai 22 passeggeri oltre al conducente, ed alla «Classe I»: veicoli costruiti con zone destinate ai passeggeri in piedi, per consentire loro spostamenti frequenti.

Quindi *AUTOBUS PER TRASPORTO PUBBLICO URBANO (TPL)*

Tre aziende hanno dato la disponibilità per questa sperimentazione su un proprio autobus alimentato a Gas Naturale Compresso (CNG) e rispondente allo standard emissivo Euro VI.

Pubblicamente ci teniamo a ringraziare i loro responsabili ed il personale che ha collaborato.

Azienda TPL	Città	Periodo della sperimentazione
AMAT	PALERMO	Novembre 2019
SETA	MODENA	Dicembre 2019
SAF	UDINE	Febbraio 2020



Palermo, Modena ed Udine rappresentano tre diverse realtà comunali italiane:

- ✓ Palermo una grande città del Sud Italia (la quinta come numero di abitanti in Italia, circa 660.000) con una elevata densità abitativa di circa 4.100 abitanti/kmq,
- ✓ Modena una media città (con poco meno di 200.000 abitanti e circa 1.000 ab/kmq),
- ✓ Udine una piccola cittadina del Nord-Est (con poco meno di 100.000 abitanti ed una densità di 1.700 ab/kmq circa).

Si ritiene quindi che i risultati di questa attività sperimentale possano dare delle informazioni rappresentative del comportamento emissivo di questa tipologia di autobus nei principali contesti urbani italiani.

AUTOBUS oggetto della sperimentazione

	IVECO URBANWAY	MENARINI BUS CITYMOOD	CITYWIDE
Azienda di trasporto	AMAT SPA (PALERMO)	SETA SPA (MODENA)	SAF SPA (UDINE)
Costruttore autobus	IVECO FRANCE	INDUSTRIA ITALIANA AUTOBUS	SCANIA
CO ₂ /CONSUMO/NOX/PM _g /kWh	-/-/0.2141/0.000	-/-/0.174/0.0044	604/301/0.1827/0.0024
Motore termico	FPT Cursor 8 CNG Euro VI 6 cilindri in linea 4 valvole per cilindro	FPT Cursor 8 CNG Euro VI 6 cilindri in linea 4 valvole per cilindro con turbina a geometria variabile (VGT)	Scania OC09 106 CNG 5 Cilindri in linea 4 valvole per cilindro con turbina a geometria variabile (VGT)
Cilindrata, cm ³	7800	7800	9291
Potenza massima, kW (cv)	213 (290) a 2000 rpm	243 (330) a 2000 rpm	235 (320) a 1900 rpm
Coppia massima, Nm	1100 da 1100 a 1850 rpm	1300 da 1200 a 1600 rpm	1350 da 1000 a 1400 rpm
Massa in ordine di marcia, kg	11770	11770	11770
Massa Totale a Terra (MTT), kg	19000	19000	19000
Cambio	Automatico	Automatico	Automatico
Lunghezza/Larghezza, m	12,023/2,50	12,100/2,55	11,985/2,55
Passo, m	6,12	5,9	
n. Posti e Tipo di carrozzeria	97/103 - M3/A3	97/103 - M3/CE	100 - M3/
Omologazione	627/2014C 24 dicembre 2018	627/2014C 25 gennaio 2019	627/2014C 06 dicembre 2018
Posizione tubo di scarico	Verso il basso	Sul tetto	In alto dietro
Serbatoio combustibile	4 bombole tipo CNG 3 o CNG 4 montate su rack longitudinale da 320 litri ciascuna (1280 litri di capacità totale)	4/5 bombole tipo CNG 4 montate su rack longitudinale da 340 litri ciascuna (1360 litri di capacità totale)	4 bombole tipo CNG 4 montate su rack longitudinale da 320 litri ciascuna (1280 litri di capacità totale)



Da richiesta ISPRA i tre autobus dovevano essere di tre produttori differenti. Gli autobus Iveco Urbanway e Menarini Citymood sono dotati dello stesso motore Cursor ma in configurazione potenziata quello dell'azienda SETA. Tutti e 3 i motori presentano combustione stechiometrica e sono dotati di catalizzatore three-way (TWC) allo scarico.

AUTOBUS: standard di omologazione Europei

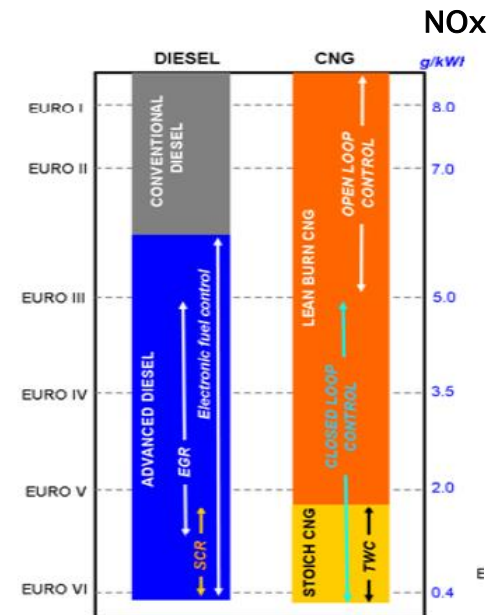
Tutti e tre gli autobus sono stati omologati secondo la direttiva 627/2014. Gli standard emissivi Euro VI per veicoli Heavy-duty sono stati introdotti con il Regolamento 595/2009 seguito da una serie di pacchetti comitologici che hanno specificato dettagli tecnici ed integrazioni. Per i veicoli ad accensione comandata (come i motori alimentati a CNG) sono previste due tipologie di prova:

- prove con il solo motore su ciclo transitorio (WHTC, World Harmonized Transient Cycle)

Stage	Date	Test	CO	NMHC	CH ₄ ^a	NOx	PM ^b	PN
			g/kWh					
Euro III	1999.10	EEV only	ETC	3.0	0.40	0.65	2.0	0.02
	2000.10			5.45	0.78	1.6	5.0	0.16 ^c
Euro IV	2005.10	WHTC	ETC	4.0	0.55	1.1	3.5	0.03
Euro V	2008.10			4.0	0.55	1.1	2.0	0.03
Euro VI	2013.01			4.0	0.16 ^d	0.5	0.46	0.01

^a for gas engines only (Euro III-V: NG only; Euro VI: NG + LPG)
^b not applicable for gas fueled engines at the Euro III-IV stages
^c PM = 0.21 g/kWh for engines < 0.75 dm³ swept volume per cylinder and a rated power speed > 3000 min⁻¹
^d THC for diesel (CI) engines
^e PN limit for PI engines applies for Euro VI-B and later [4374]

Limite sul numero di particelle(PN)



- prove emissive Off-Cycle (OCE): con motore in 15 modi stazionari «random» (NTE) e con veicolo con test su strada (anche test In-Service Conformity, ISC)

Stage	Implementation Date		OCE/ISC Requirements				
	Type approval (new types/all vehicles)	Last date of registration	PEMS power threshold	Cold start included in PEMS	OCE NTE g/kWh	PEMS CO, HC, NMHC, CH ₄ CF	PEMS PN CF
A	2013.01/2014.01	2015.08	20%	No	NOx 0.60 THC 0.22 CO 2.0 PM 0.016	1.50	-
B (CI)	2013.01/2014.01	2016.12					
B (PI)	2014.09/2015.09	2016.12					
C	2016.01/2017.01	2017.08					
D	2018.09/2019.09	2021.12	10%				
E	2020.09/2021.09	-		Yes		1.63 ^a	

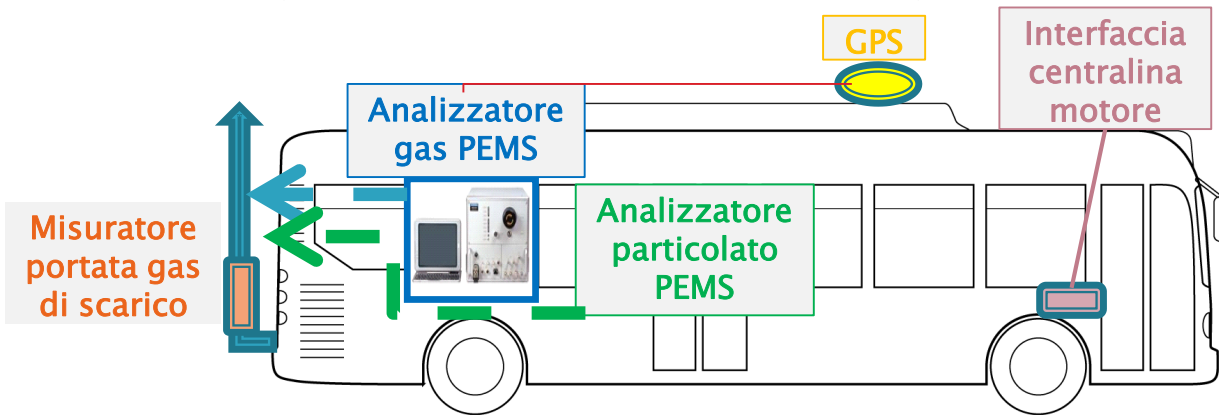


In questa attività sperimentale si sono seguite alcune delle prescrizioni contenute nei regolamenti per i test su strada (n. 582/2011 e n. 595/2009)

^a For PI engines and type 1A and 1B dual fuel engines in dual fuel mode, PN CF applies 2023.01/2024.01

AUTOBUS: allestimento per le prove

I bus sono stati strumentati con strumentazione PEMS (Portable Emission Measurement Systems) per la misura di CO₂, CO, NOX (in g/km o mg/km) e il particolato in massa (PM_{2.5} in mg/km) e quindi all'interno ed all'esterno degli autobus sono state allocate e collegate diverse strumentazioni e attrezzature:



- ❑ la misura degli inquinanti gassosi è stata eseguita tramite l'analizzatore Gas PEMS Horiba OBS 2200,
- ❑ una sonda lambda per la misura del tenore di O₂,
- ❑ misuratore della portata volumetrica dei gas esausti con un tubo di Pitot montato allo scarico del veicolo,
- ❑ analizzatore PEMS Pegasor Particle Sensor-M (PPS-M) per misurare la massa totale delle particelle aventi diametro da 10 nm fino a 2,5 µm (PM_{2.5}),
- ❑ GPS per acquisire le coordinate spaziali e l'altitudine del percorso,
- ❑ sistema di acquisizione parametri motore da presa OBD (Texa TXT),
- ❑ computer per gestione strumenti ed acquisizione dati,
- ❑ una sonda di temperatura, umidità e pressione ambiente,
- ❑ bombole per la calibrazione degli strumenti,
- ❑ batterie 12V 110Ah ed inverter per alimentare la strumentazione,
- ❑ eventuale zavorra (con sabbia o sale)

Il collegamento con lo scarico del motore e lo zavorramento degli autobus hanno rappresentato le maggiori criticità della sperimentazione.

Tutti i dati sono stati acquisiti istantaneamente alla frequenza di 1 Hz, cioè un dato al secondo, per tutte le prove eseguite e poi mediati su ogni percorso effettuato.

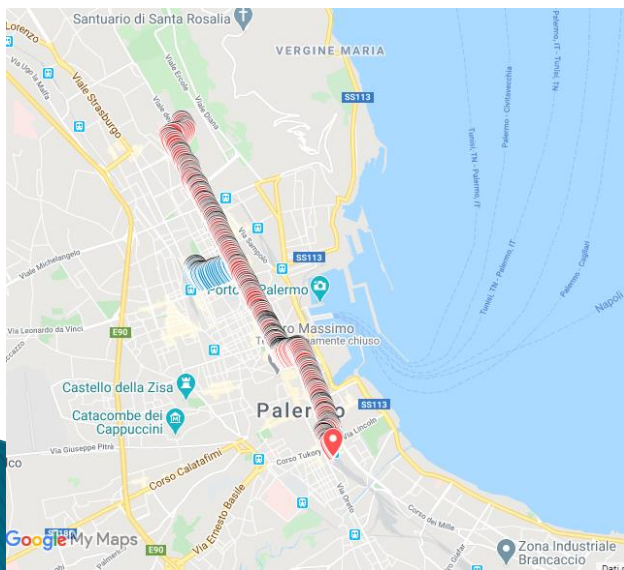
Percorsi effettuati

Con i referenti di ogni azienda di trasporto sono stati valutati i percorsi e le linee rappresentative per l'attività sperimentale, seguendo suggerimenti relativi al maggior utilizzo ed alle coperture su ampie zone delle città. E' stato chiesto ad ogni azienda, ed ottenuto, di mettere a disposizione per i giorni di attività di prove su strada sempre lo stesso autista (con uno stile di guida "medio", nè troppo aggressivo nè troppo dolce). Ogni autobus strumentato ha seguito un autobus in normale esercizio sulla linea selezionata per simulare i tempi delle fermate e di stop di autobus in reale utilizzo. Percorsi pianeggianti in tutte e 3 le città.

La fascia oraria di sperimentazione è stata dalle 08:00 alle 15:00 circa.

PALERMO

Linee rappresentative: 101 e 102



LINEA 101 ha come direttrice: STADIO - STAZIONE CENTRALE
 LINEA 102 ha come direttrice: STAZIONE NOTARBARTOLO - STAZIONE CENTRALE

MODENA

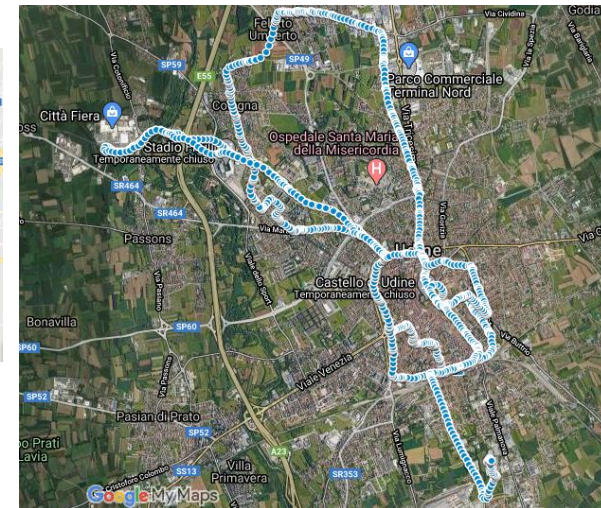
Linea rappresentativa: 9



LINEA 101 ha come direttrice: GOTTARDI - MARZAGLIA NUOVA

UDINE

Linee rappresentative: Circolari 2 e 9



CIRCOLARE 2 ha come direttrice: TAVAGNACCO
 CIRCOLARE 9 ha come direttrice: MARTIGNACCO

Caratteristiche delle prove

ZAVORRA/CARICO

Autobus/Azienda	Allestimento base	Zavorra	Totale	% Carico
IVECO/AMAT	1000 kg	-	~ 1 t	14%
MENARINI/SETA	1000 kg	1000 kg (in alcuni test) con sacchi di sale	~ 1/2 t	14/27%
SCANIA/SAF	1000 kg	2000 kg con sacchi di sabbia	~ 3 t	42%

CONDIZIONI TERMICHE DEL MOTORE

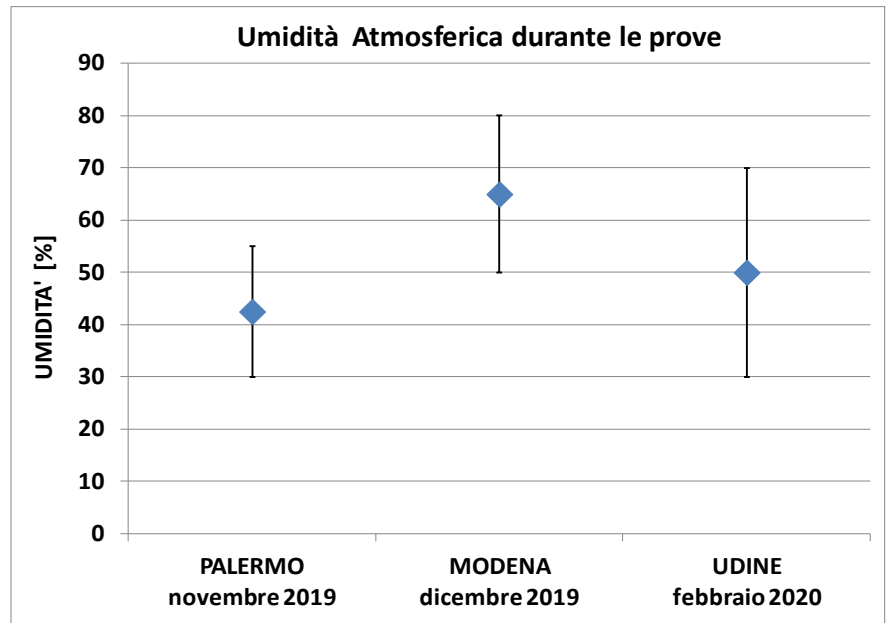
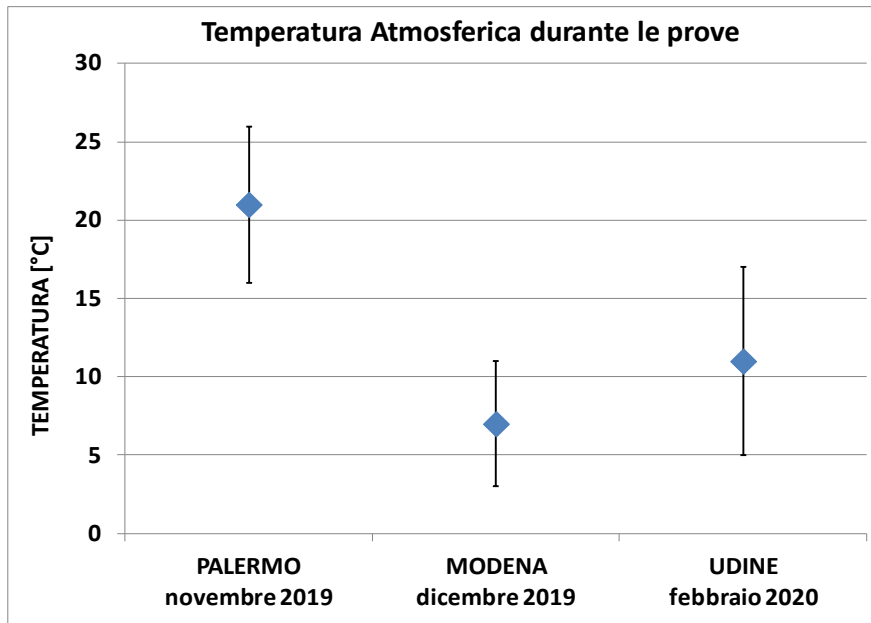
WARM: le prove sono state condotte in condizioni regimate "a caldo" del motore (temperatura olio >75°C) e del sistema di after-treatment (>300 °C)
COLD: le prove sono state condotte partendo dopo almeno 8 ore di stop del veicolo, condizioni "a freddo" del motore e del sistema di after-treatment

Autobus/Azienda	Zavorra	Carico realizzato [%]	Condizioni termiche motore	N° percorsi ripetuti	Km totali	Velocità media [km/h]	Tempo arresto [%]
IVECO/AMAT-PALERMO	NO	14	WARM	12	75	13	23
MENARINI/SETA-MODENA	NO	14	WARM	3	53	20	25
MENARINI/SETA-MODENA	SI	28	WARM	5	66	21	20
SCANIA/SAF-UDINE	SI	42	WARM	8	140	20.5	20
SCANIA/SAF-UDINE	SI	42	COLD	4	12	16.5	30

Caratteristiche delle prove

La campagna sperimentale si è svolta in circa tre mesi (da novembre 2019 a febbraio 2020) in realtà localizzate al Sud e al Nord dell'Italia.

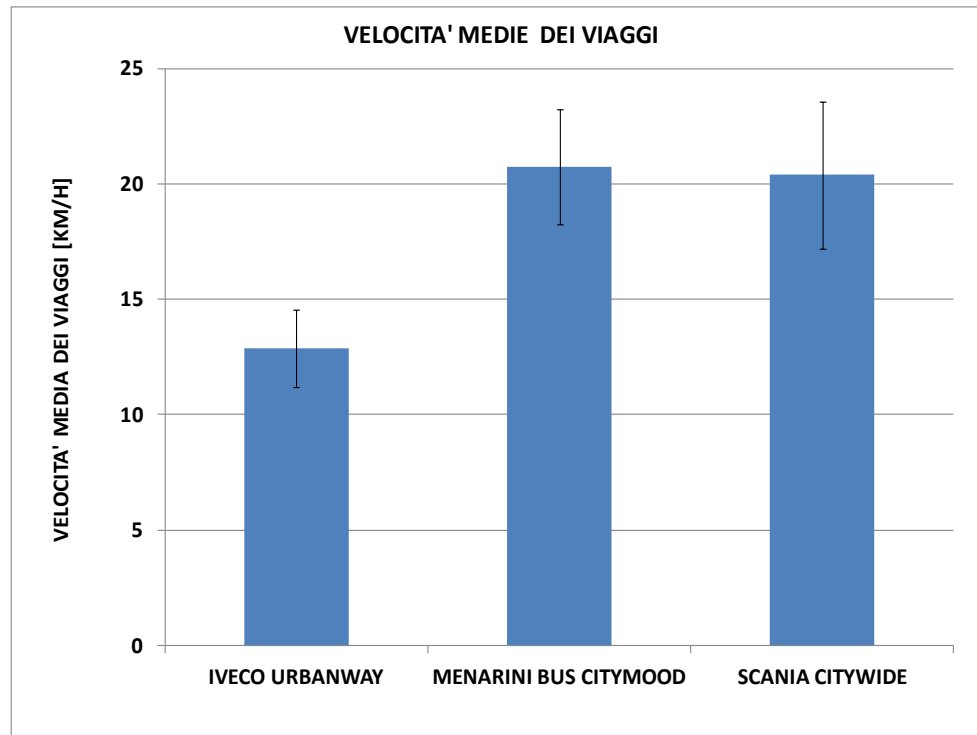
Le condizioni ambientali, in termini di temperatura e umidità atmosferiche, sono state quindi variabili.



A Palermo la temperatura media è stata di 21 °C contro i 7–10 °C di Modena ed Udine.

Durante le ore di prova si è riscontrata una variazione di temperatura di circa 10 °C (nella fascia oraria 7:30–14:30 circa) con una corrispondente variazione nell'umidità di circa il 30% (all'aumentare della temperatura vi è una diminuzione nel grado di umidità).

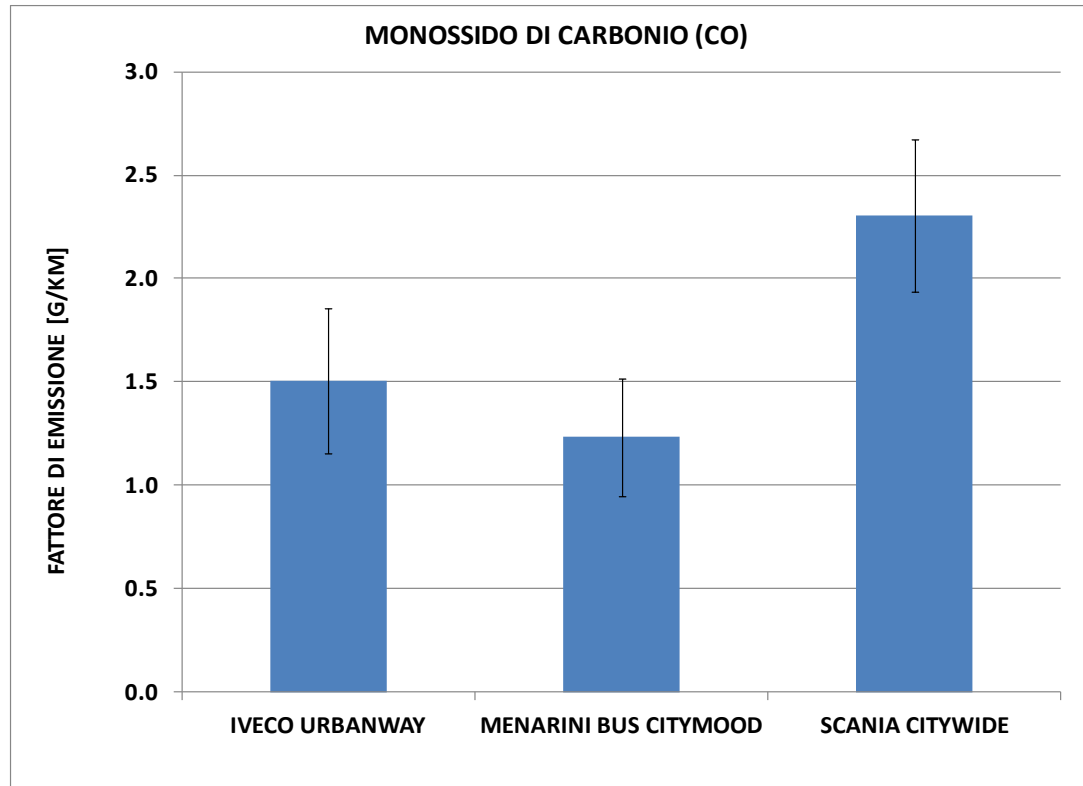
Caratteristiche delle prove



Le velocità medie si sono attestate sui 20.5 km/h (± 3.0 km/h) per i viaggi effettuati durante le sperimentazioni a Modena ed Udine e ad una velocità media piu' bassa e pari a 13 km/h (± 2.0 km/h) a Palermo.

Le condizioni di traffico riscontrate a Palermo sono risultate piu' congestionate rispetto alle altre due città.

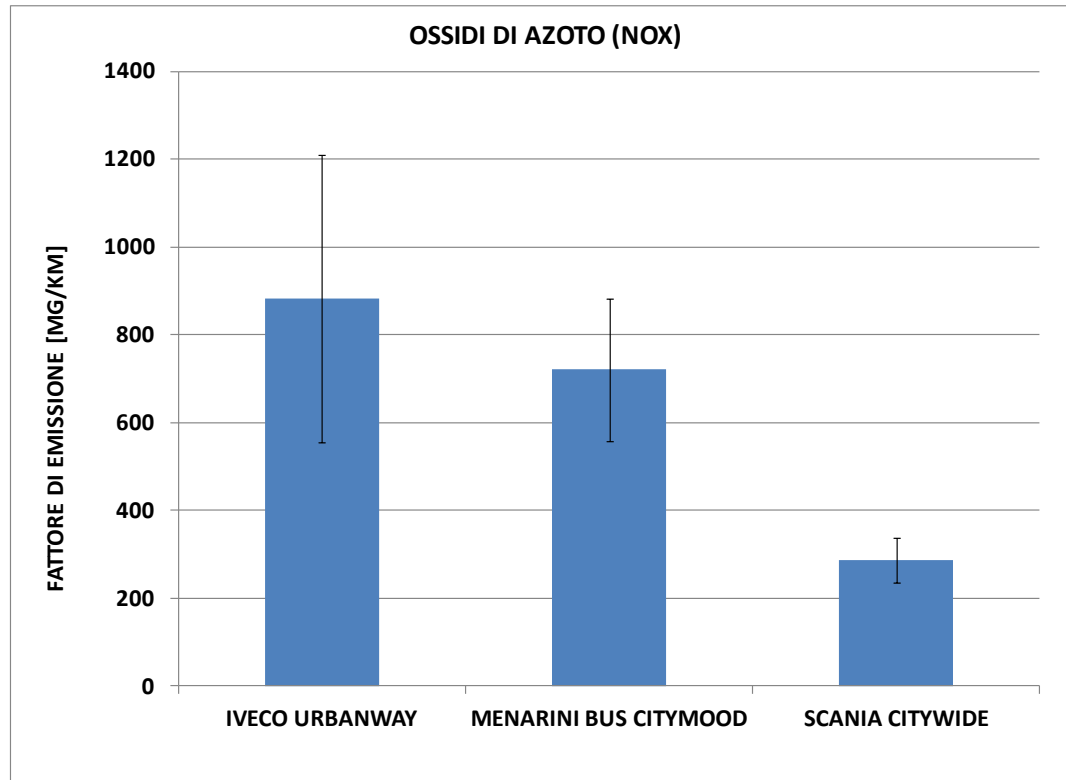
Risultati: fattori di emissione «a caldo» per CO (in g/km)



I fattori di emissione “a caldo” di CO mostrano dei valori confrontabili (intorno a 1.25–1.5 g/km) per l’Iveco ed il Menarini e dei valori più elevati emessi dallo Scania (circa 2.3 g/km).

La variabilità è intorno al 20% per tutti e tre gli autobus.

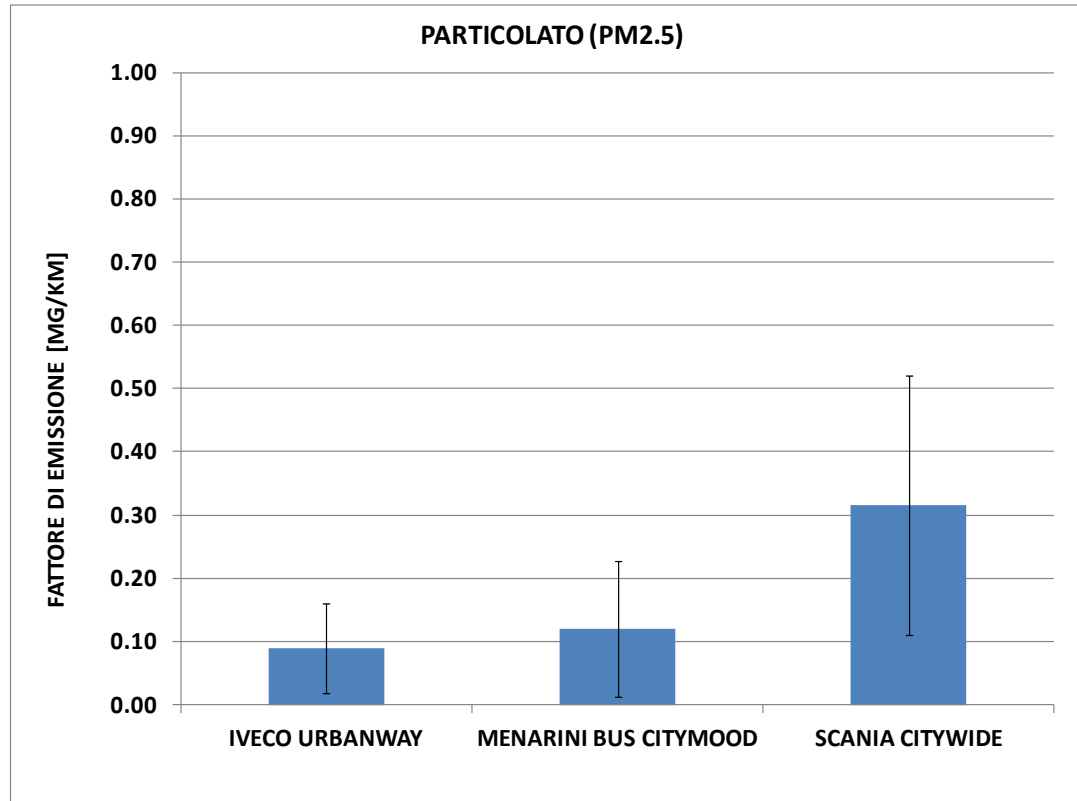
Risultati: fattori di emissione «a caldo» per NOx (in mg/km)



I fattori di emissione “a caldo” di NOx mostrano dei valori confrontabili (intorno a 0.72–0.88 g/km) per l’Iveco ed il Menarini e dei valori decisamente più bassi allo scarico dallo Scania (circa 0.3 g/km).

La variabilità è risultata intorno al 20% per il Menarini e lo Scania, di circa il 30% per l’Iveco.

Risultati: fattori di emissione «a caldo» per PM_{2.5} (in mg/km)

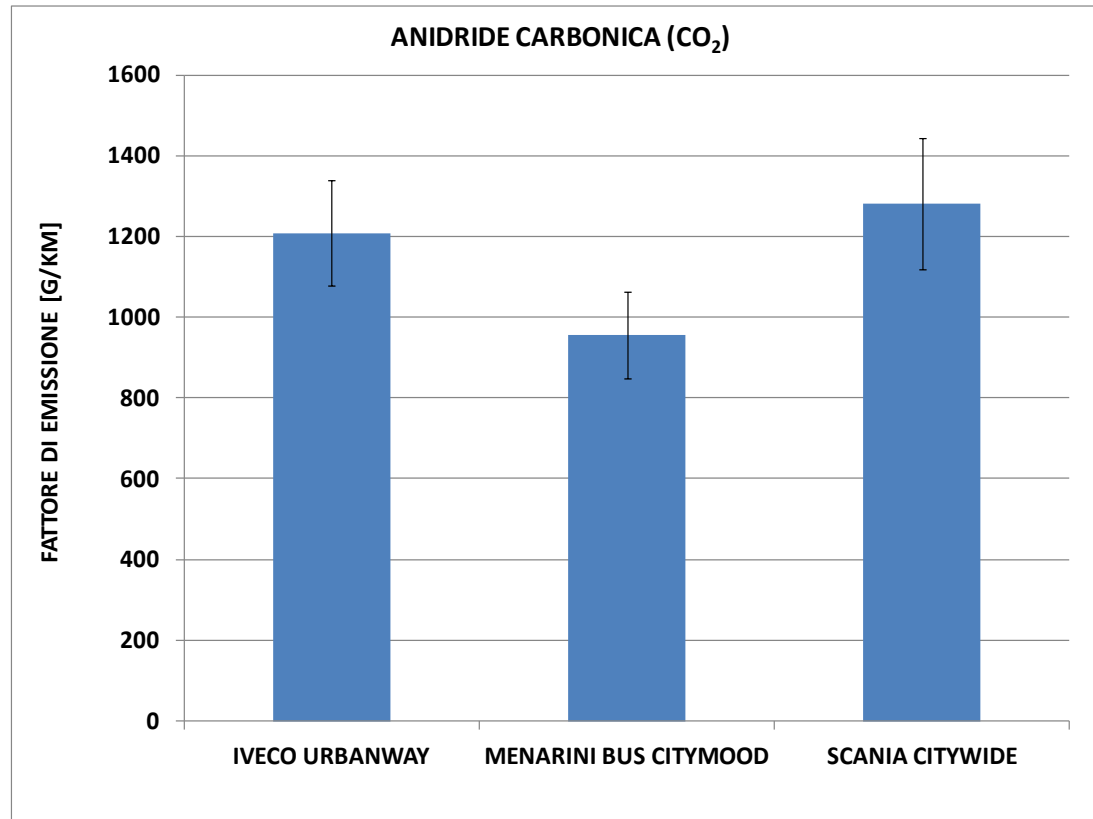


Le emissioni di PM_{2.5} “a caldo” sono risultate molto basse e sempre minori di 0.5 mg/km.

Per questo inquinante la variabilità nei valori misurati è molto elevata, principalmente a causa delle basse concentrazioni misurate.

Si evidenzia che per i due autobus con motore Cursor 8 (Iveco Urbanway e Menarini Citymood) si sono osservati fattori di emissione simili per CO, NOX e PM_{2.5}.

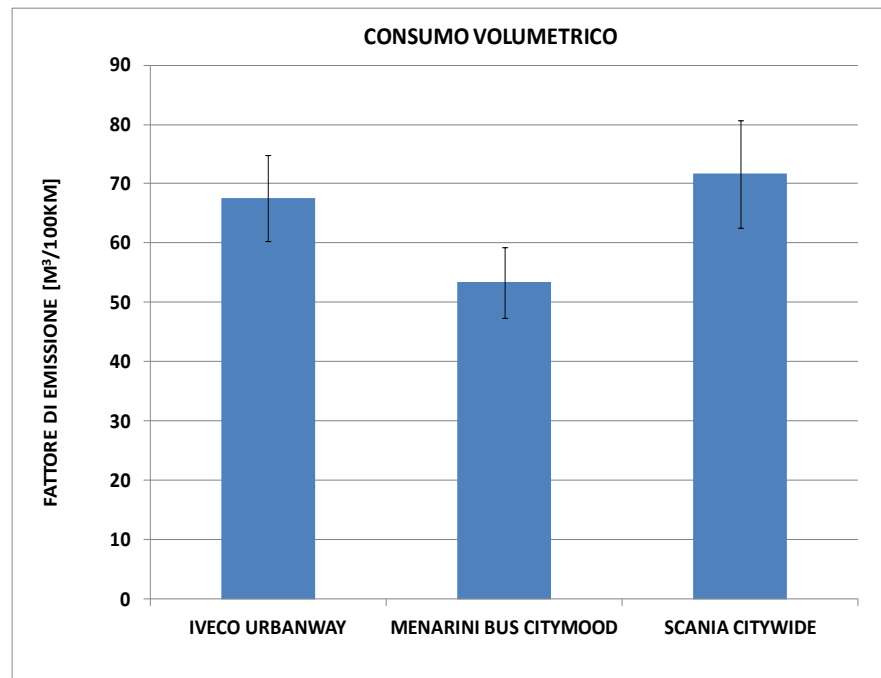
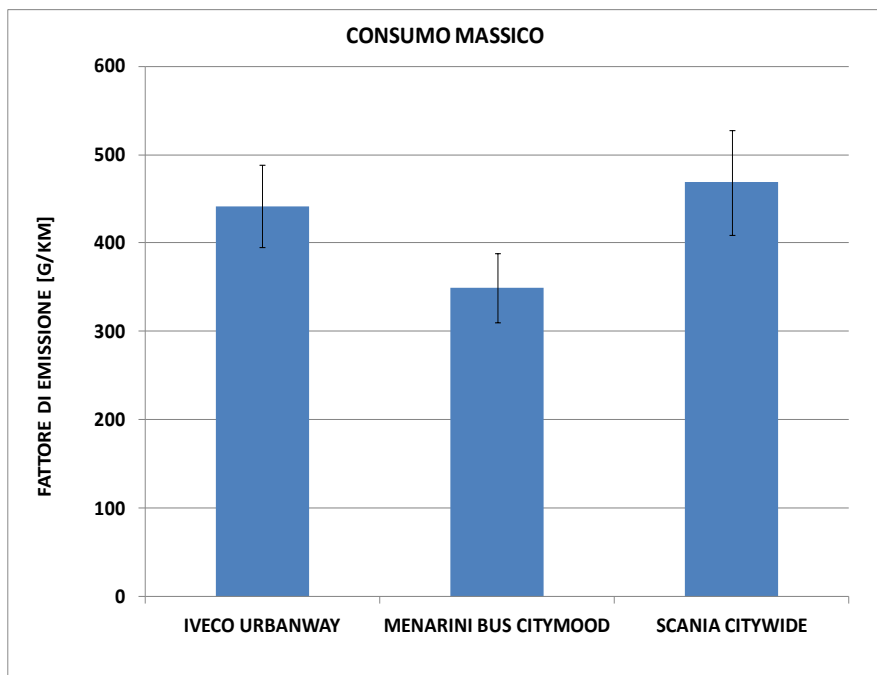
Risultati: fattori di emissione «a caldo» per CO₂ (in g/km)



Sono state misurate emissioni confrontabili di anidride carbonica (CO₂) tra l'Iveco e lo Scania (1200÷1280 g/km) mentre il Menarini presenta emissioni più basse (~960 g/km): tali differenze potrebbero essere spiegate con il maggior carico trasportato sullo Scania (circa 3 t contro le 1-2 t degli altri due veicoli) e con le velocità medie di spostamento più basse per l'Iveco (14 contro i 20 km/h).
NOTA: i valori diagrammati per il Menarini rappresentano il valore medio tra le due configurazioni di carico.

La variabilità è tra il 10-12% per tutti e tre gli autobus.

Risultati: fattori di consumo di CNG (in g/km e m³/100km)



Nella due figure sono diagrammati i consumi massici (in g/km) e volumetrici (m³/100 km) ricavati dalle emissioni inquinanti secondo le formule del bilancio del carbonio (Regolamento 49 UNECE Allegato 4B).

Si evidenzia che durante questa campagna sperimentale gli idrocarburi incombusti (HC) non sono stati misurati e quindi il loro contributo alla stima del consumo non è stato considerato

Conclusioni

- ▶ Sono stati selezionati tre autobus urbani omologati con lo standard Euro VI alimentati a CNG, commercializzati da diversi fornitori, e in dotazione alle aziende AMAT di Palermo, SETA di Modena e SAF di Udine. Le prove sono state effettuate presso le tre aziende nel periodo novembre 2019–febbraio 2020.
- ▶ I bus sono stati strumentati per la misura di CO₂, CO, NOX (in g/km o mg/km) e il particolato in massa (PM_{2.5} in mg/km).
- ▶ Ogni autobus è stato guidato da un autista, messo a disposizione dall'azienda, seguendo un autobus in normale esercizio su una linea per simulare i tempi delle fermate e di stop di autobus in reale utilizzo su linee rappresentative del trasporto urbano.
- ▶ Il collegamento con lo scarico del motore e lo zavorramento degli autobus hanno rappresentato le maggiori criticità della sperimentazione.
- ▶ I fattori di emissione medi valutati sulle tre tipologie di autobus Euro VI in condizioni di prova termicamente regimate “a caldo” e su percorsi pianeggianti sono risultati nei seguenti range:
 - ❑ CO (monossido di carbonio): 1.3–2.3 g/km;
 - ❑ NOx (ossidi di azoto): 0.3–0.9 g/km;
 - ❑ PM_{2.5} (particolato di dimensioni inferiori ai 2.5 micron) < 0.5 mg/km
 - ❑ CO₂ (anidride carbonica): 950–1250 g/km.
- ▶ Per i due autobus con motore Cursor 8 (Iveco Urbanway e Menarini Citymood) si sono osservati fattori di emissione simili per CO, NOX e PM_{2.5}.