

Bocconi

SCENARI E PROSPETTIVE DELL'ELETTRIFICAZIONE DEL TRASPORTO PUBBLICO SU STRADA

Stima delle esternalità ambientali delle diverse
motorizzazioni dei bus analizzati nel modello di calcolo del
TCRO

Nota integrativa

12 Ottobre 2022



**Università
Bocconi**

GREEN
Centro di ricerca sulla geografia,
le risorse naturali, l'energia,
l'ambiente e le reti

Con la collaborazione scientifica di



Il presente Position Paper è stato elaborato da un'equipe di ricerca congiunta del GREEN - Università Bocconi e di Enel Foundation coordinata da Oliviero Baccelli e Carlo Papa con i ricercatori Claudio Brenna, Gabriele Grea, Antonio Sileo e Mirko Armiento. Ha contribuito allo studio anche Ignazio Cordella (Enel X).

Contatti:

oliviero.baccelli@unibocconi.it



**Università
Bocconi**

GREEN
Centro di ricerca sulla geografia,
le risorse naturali, l'energia,
l'ambiente e le reti

Sommario

1 Stima delle esternalità ambientali delle diverse motorizzazioni dei bus analizzati nel modello di calcolo del TCRO.....	4
1.1 Introduzione e obiettivi dell'approfondimento	4
1.2 La valutazione economica delle emissioni acustiche	5
1.3 I fattori emissivi dei principali inquinanti del trasporto terrestre in Italia.....	6
1.3 Le valorizzazioni economiche dei fattori emissivi dei principali inquinanti per i bus da 12 metri.....	10
Bibliografia	12



**Università
Bocconi**

GREEN
Centro di ricerca sulla geografia,
le risorse naturali, l'energia,
l'ambiente e le reti

1 Stima delle esternalità ambientali delle diverse motorizzazioni dei bus analizzati nel modello di calcolo del TCRO

1.1 Introduzione e obiettivi dell'approfondimento

L'elettrificazione delle flotte di bus urbani è la risposta più accreditata alle sempre più pressanti esigenze di riduzione del rumore e delle emissioni di inquinanti atmosferici da traffico che spesso portano le città a raggiungere livelli di inquinamento largamente e sistematicamente superiori ai valori limite e alle soglie di tolleranza fissate dalle norme. Gli inquinanti urbani presenti nell'atmosfera, quali polveri sottili PM10, polveri sottilissime PM2,5 e ossidi di azoto (NOx), sono imputabili all'autotrazione con un'incidenza percentuale sui livelli complessivi di inquinamento ambientale che varia tra il 20% a oltre il 50% a seconda del tipo di inquinante e dell'area in considerazione.

È noto che l'inquinamento atmosferico rappresenta da molti anni un problema di salute pubblica; le evidenze scientifiche sottolineano infatti l'esistenza di eccessi di rischio sulla mortalità e sulla morbosità della popolazione generale e di individui suscettibili esposti ai livelli di concentrazione degli inquinanti normalmente rilevati nelle aree urbane del nostro paese.

L'obiettivo di questa fase è di permettere di avere una stima del valore economico delle principali esternalità generate dai bus con diverse motorizzazioni, in modo da integrare con un'analisi di sensitività il modello di calcolo del TCO e del TCRO nei diversi contesti Paese analizzati (Brasile, Cile, Colombia, Italia, Messico, Perù, Regno Unito, Spagna e Stati Uniti).

Le esternalità qui considerate saranno le emissioni acustiche, i gas climalteranti ed inquinanti (CO₂ - anidride carbonica, NOx - ossidi di azoto, PM – particolati ed NHMC - idrocarburi non metanici) con un approccio definito come Tank to Wheel (TTW), che riguarda le emissioni dirette derivanti dalla fase d'uso, cioè dal combustibile consumato direttamente dal veicolo, dal serbatoio alla ruota. Tenendo conto delle specifiche caratteristiche dei bus con batterie elettriche, inclusi i bus ad idrogeno dotati di fuel cells, in questo caso si considererà l'approccio PTT (Production To Tank), che comprende la produzione e la distribuzione del vettore energetico.

Non saranno presi in considerazione in modo specifico i costi esterni in fase di produzione o di smaltimento del bus.

La valutazione ambientale tiene conto della situazione attuale (dati al 2021) e di scenari evolutivi al 2025 e 2030 delle caratteristiche delle diverse motorizzazioni dei bus urbani di 12 metri ed è basata sulla stima dei consumi energetici e delle emissioni complessive su base annua, e rapportata poi alla media dei km percorsi, per i principali inquinanti emessi dal bus impiegato per il trasporto pubblico locale.

In assenza di specifici dati Paese, saranno utilizzati valori parametrici ed analogici specificamente circostanziati, in particolare per le stime al 2025 e al 2030 relative al mix energetico di riferimento, considerando che i parametri di mix energetico per ciascun paese saranno calcolati con due scenari nei tre periodi analizzati 2021 (a cui viene associato il valore di mix energetico del 2019 sia per disponibilità del dato sia per le anomalie del 2020 e del 2021), 2025 e 2030: il primo relativo al mix energetico e il secondo con l'ipotesi di utilizzo di solo fonti rinnovabili prevalenti nel paese di riferimento. Per l'idrogeno sarà considerato esclusivamente il caso di generazione da fonti rinnovabili prevalenti nel Paese di riferimento. I parametri utilizzati saranno relativi alle aree metropolitane principali del paese, utilizzando fra gli altri, parametri monetari medi per quel tipo di contesto per gli inquinanti locali. Il dato sarà calcolato in modo dettagliato per i bus da 12 metri, mentre per i bus da 8 e 18 metri saranno utilizzati valori parametrici.



Tabella 1: Tipologia di impatti considerati per la valutazione economica delle esternalità ambientali

Impatti sulla salute	Altre tipologie di impatti
Aumento della mortalità <ul style="list-style-type: none"> Anni di vita persi (Years of Life Lost): $YLL=N \times L$, dove N= n. di morti, L= aspettativa di vita standard 	Contributo ai cambiamenti climatici
Aumento della mortalità <ul style="list-style-type: none"> Disability Adjusted Years of Life Lost: $DALY=YLL$ (Years of Life Lost) + YLD (Years Lost due to Disability) = $I \times DW \times L$, dove I= incidenza, DW=indice di disabilità, L=durata media della malattia) 	Danni agli ecosistemi e perdite agricole (riduzione della crescita di colture, foreste e piante, acidificazione di suolo, laghi e fiumi, eutrofizzazione)
Aumento della morbidità: <ul style="list-style-type: none"> Ricoveri Giorni lavorativi persi 	Danni a edifici e monumenti
	Riduzione del valore immobiliare

Fonte: Elaborazioni GREEN su info Handbook on the external costs of transport del 2019 e EEA Cost of air pollution from European industrial facilities 2008-2017 del 2021

In fase di introduzione è utile rimarcare come il Rapporto Mal'Aria di Legambiente relativo al 2021 evidenzi come per i valori raccolti dalle oltre 240 centraline nei 102 capoluoghi di provincia italiani, siano fuori dalle norme indicate dall'Organizzazione Mondiale per la Sanità (OMS) e dalle politiche europee con elevata frequenza. Infatti per i valori di PM10 e di NO2 solo 5 capoluoghi su 102 nel 2021 rientrano nei parametri fissati dall'OMS. Per i parametri di PM2.5 nessuna fra le principali città italiane rientra nei parametri. Questi dati sottolineano l'importanza della riduzione degli inquinanti a livello delle principali realtà italiane.

1.2 La valutazione economica delle emissioni acustiche

Per quanto riguarda le emissioni acustiche, la tabella successiva riporta i valori di costo delle emissioni acustiche indicati dall'Handbook on the external costs of transport del 2019 della Commissione Europea relativi agli autobus. Si nota che, anche in questo caso, gli impatti in ambito metropolitano sono decisamente più importanti rispetto a quelli rilevati in altri contesti. In considerazione della tipologia di bus utilizzati come parametro di riferimento si è scelto di evidenziare solo i dati relativi agli ambiti metropolitani o urbani, escludendo i contesti rurali dall'analisi. Inoltre, i valori sono maggiori in caso di traffico scorrevole, in quanto, a maggiori velocità corrispondono maggiori emissioni acustiche. Questo è particolarmente vero per il rumore generato dal motore dei bus a combustione interna (ICE), mentre la rumorosità del motore del bus elettrico, è diversa a seconda del range di velocità raggiunto dal mezzo. Tuttavia, alle emissioni acustiche dei motori va aggiunto il rumore prodotto dal rotolamento delle ruote, il quale può ritenersi come simile tra le diverse alternative tecnologiche, dato che dipendono dallo pneumatico montato.

Tabella 2: Valore monetario del rumore per diversi contesti di bus diesel 12M

Bus		Data in EUR-cent/vkm	
		Metropolitan	Urban
Day	Dense	7,1	0,4
	Thin	17,3	1,1
Night	Dense	13,0	0,7
	Thin	31,6	2,0

Fonte: Handbook on the external costs of transport del 2019

Sulla base del rapporto ENEA "Valutazione dei benefici ambientali della mobilità elettrica nell'area di Roma" del 2016, emerge chiaramente come la rumorosità di un autobus diesel sia la più alta tra le varie alternative tecnologiche considerate avvicinandosi alle indicazioni della normativa attuale che limita il rumore dei veicoli



**Università
Bocconi**

GREEN
Centro di ricerca sulla geografia,
le risorse naturali, l'energia,
l'ambiente e le reti

più potenti a 80 dB. L'autobus a metano risulta essere più silenzioso dell'omologo diesel, riuscendo ad abbattere il rumore di 3-5 dB rispetto a quest'ultimo, ciò corrisponde ad un abbattimento pari alla metà del rumore percepito. Per quanto riguarda il bus elettrico, ENEA ritiene plausibile attribuire a questo un abbattimento pari al 25% del rumore percepito¹, prodotto da un bus diesel.

Si assume, quindi, che il valore specifico di costo da attribuire al rumore, in ciascuna situazione sopra descritta, per ciascuna tipologia di veicolo, si rapporti a quello dei veicoli diesel considerati nell'Handbook del 2019 nei seguenti termini: 50% per i veicoli a metano, 25% per i veicoli elettrici.

Ai fini della stima del costo medio per la collettività derivante dalle emissioni acustiche per il caso Italia, si è proceduto ad una stima dell'attribuzione delle percorrenze nei vari momenti della giornata, sulla base degli orari del servizio programmato del TPL su gomma nei principali contesti italiani, attribuendo per il 50% i valori relativi al contesto metropolitano e per il 50% a contesti urbani. La fascia diurna compete dalle ore 6:00 alle ore 22:00 mentre la fascia notturna va dalle ore 22:01 alle ore 5:59. Durante la fascia diurna le ore con traffico intenso sono quelle comprese tra le ore 7:00 e le ore 19:00. La stima prevede che nelle aree metropolitane i bus si muovano in un contesto di traffico intenso nel 70% dei casi, durante le ore di traffico scorrevole si muove il 20% durante le ore diurne e il rimanente 10% durante le ore notturne in assenza di traffico. Nei contesti urbani queste percentuali sono modificate rispettivamente nel 65%, 30% e 5%.

La tabella successiva schematizza le risultanze delle stime descritte, dove emerge che il costo per la collettività del rumore di un bus diesel espresso nell'unità di misura veicolo*km percorso è in media pari a 0,0618 Euro, mentre per un bus elettrico è pari a 0,01545 Euro.

Tabella 3: Valore monetario del rumore per diversi contesti di bus 12M caso Italia

Tipologia di Bus	Fattore di rumorosità rispetto al bus diesel	Valore di sintesi utilizzato nelle successive analisi di TCO e TCRO EUR-cent/vkm
Full Electric	25%	1,545
Diesel	100%	6,18
CNG e LNG	50%	3,09
Idrogeno	25%	1,545

Fonte: Elaborazioni GREEN su dati Handbook on the external costs of transport del 2019, Enea 2016

1.3 I fattori emissivi dei principali inquinanti del trasporto terrestre in Italia

Attualmente, esiste una ampia varietà di metodologie che possono essere utilizzate per la stima dei costi esterni, nessuna delle quali è riconosciuta universalmente valida ed alcune sono in contraddizione con altre. Tuttavia, si rende comunque necessario poter quantificare il danno generato dalle esternalità, pertanto, si ritiene opportuno estrapolare una valutazione riferita a fattori standard, seppur opinabile e con tutti i limiti del caso che richiederebbero analisi ad hoc rispetto ad esempio a stili di guida dell'autista, condizioni del manto stradale, temperature medie, velocità commerciali, tempi di sosta alle fermate, livello di umidità, fattori di carico.

Esiste un'ampia letteratura a riguardo, da ultimo le linee Guida della Commissione Europea e dell'Agenzia Europea dell'Ambiente sui costi esterni dei trasporti del 2019, che fornisce dei dati elaborati sulla base di ricerche ritenute aggiornate e attendibili e che vengono pertanto applicati in questa ricerca.

I valori monetari dei fattori inquinanti sono differenziati fra i diversi Paesi. Inoltre, per il PM, il valore del danno è diverso in funzione dell'ambito in cui si verifica l'emissione, distinguendo quest'ultimo tra urbano, suburbano

¹ Questo valore è confermato anche nella presentazione da parte di Volvo buses il 02-02-2016 da parte di Turcany, J. (2016), Electric buses and noise, confermando le indicazioni dell'art.8 del Regolamento Europeo 540 del 2014 che prevede l'obbligo di utilizzo di un Acoustic Vehicle Alerting System (AVAS) a bordo dei bus elettrici per eventualmente sopperire al problema della silenziosità nelle fasi di avvicinamento alle fermate.



e rurale (quest'ultimo qui non dettagliato perché non pertinente). Ciò, diventa particolarmente vero per la frazione più sottile del PM (< 2,5 µm), ovvero quella più dannosa per la salute degli esseri viventi, che si concentra nel luogo di emissione senza diffondersi troppo nell'atmosfera mentre gli altri inquinanti possiedono maggiore capacità di dispersione per cui il contesto di emissione risulta meno dirimente ai fini della determinazione del danno potenzialmente prodotto. Oltre all'emissioni di anidride carbonica (CO₂) sono stati considerati i principali inquinanti da traffico veicolare, quali il Particolato o PM, i composti organici volatili non metallici o NMVOC e gli ossidi di azoto (NO_x) e infine gli ossidi di zolfo (SO₂) presenti nella fase up-down stream ma irrilevanti nella fase d'uso dei bus, che sono oggetto di specifici regolamenti e linee di indirizzo comunitarie a partire dal Programma "Aria pulita per l'Europa" (CAFE): verso una strategia tematica per la qualità dell'aria². Questi dati sono utilizzati ampiamente nelle analisi costi-benefici delle scelte di politiche pubbliche, in particolare nel settore dei trasporti.

Tabella 4: Tipologia di inquinanti locali presi in considerazione nello studio

Tipologia di inquinante	TIPOLOGIA DI EFFETTI ESTERNI CONSIDERATI
PM2.5	Le particelle di polvere, dell'ordine di micron o addirittura di nanometri, hanno effetti deleteri sulla salute umana, sono causa di morte prematura e riducono la qualità della vita aggravando patologie respiratorie come l'asma. I particolati derivano sia dalla combustione sia dall'usura delle componenti e dall'abrasione del manto stradale. La formazione secondaria di particelle può avvenire a notevole distanza dalla fonte di emissione originaria, esse rappresentano un notevole problema transfrontaliero legato ai fenomeni dell'acidificazione, dell'eutrofizzazione e dell'ozono troposferico. Le valutazioni economiche sono basate su effetti cronici (mortalità sugli adulti sopra i 30 anni e sui bambini entro l'anno, oltre alle bronchiti su tutta la fascia di popolazione) ed effetti acuti (problematiche respiratorie, cardiovascolari, restrizioni alle attività lavorative, forme asmatiche e perdita di giorni di lavoro). L'azione dannosa di molti inquinanti è aumentata dalla presenza di particolato.
PM10	I particolati PM10 provocano la stessa tipologia di externalità negative dei PM2.5, ma essendo particelle più grandi generalmente raggiungono il suolo in tempi piuttosto brevi e causano fenomeni di inquinamento su scala molto ristretta, con effetti più limitati nel tempo e nello spazio.
NOx	Gli ossidi di azoto derivano dal processo di combustione e sono la causa di effetti cronici sulla mortalità per gli adulti oltre i 30 anni e causa di bronchiti nei bambini ed effetti acuti legati a problematiche respiratorie
SO2	Dalla combustione di ogni materiale contenente zolfo si sviluppano l'anidride solforosa e l'anidride solforica, reazioni favorite dall'umidità dell'aria, dalla radiazione solare e dalla presenza di polveri sospese che fungono da sostanze catalizzatrici. Di notte gli ossidi di zolfo vengono assorbiti dalle goccioline di acqua presenti nell'atmosfera dando origine ad un aerosol di sali di solfato d'ammonio e calcio e quindi alla foschia mattutina. A causa dell'elevata solubilità in acqua l'SO ₂ viene assorbito facilmente dalle mucose del naso e del tratto superiore dell'apparato respiratorio; quindi solo le piccolissime quantità raggiungono la parte più profonda del polmone, ma questo passaggio è favorito dai particolati. Gli ossidi di zolfo svolgono un'azione indiretta nei confronti della fascia di ozono stratosferico in quanto fungono da substrato per i clorofluorocarburi, principali responsabili del "buco" dell'ozono. Molto importante è il loro effetto sull'acidificazione delle precipitazioni, che porta a gravi danni ai bacini idrici ed alla vegetazione
NMVOC	I composti organici volatili non metallici sono principalmente idrocarburi, cioè composti organici a base di carbonio ed idrogeno di natura alifatica (catena lineare o ramificata tra i quali il capostipite è il metano) o aromatica (catene cicliche tra i quali il capostipite è il benzene). I composti organici volatili rivestono un ruolo fondamentale nella formazione degli inquinanti in quanto sono connessi alla formazione di inquinanti secondari. Gli idrocarburi interferiscono sui processi respiratori ed irritano gli occhi, mentre alcuni tra gli idrocarburi policiclici aromatici sono cancerogeni. Il solo idrocarburo che eserciti un effetto dannoso sulle piante è l'etilene: esso rallenta la loro crescita interferendo con gli ormoni che ne regolano il metabolismo.

Fonte: Elaborazioni GREEN su dati Handbook on the external costs of transport del 2019

² Comunicazione della Commissione Europea, COM(2001) 245 definitivo del 04.05.2001, che aggiorna la precedente Direttiva 96/62/CE del Consiglio in materia di valutazione e di gestione della qualità dell'aria ambiente.



Secondo queste recenti stime europee sintetizzate nell'Handbook on the external cost of transport della DG Regio della Commissione Europea pubblicato nel 2019, il valore specifico del danno prodotto dall'emissione in atmosfera di una tonnellata di inquinante generato dal trasporto terrestre, è riconducibile, per l'Italia, ai valori riportati nella seguente Tabella 5. Per comparazione, nell'ultima colonna della tabella sono indicati anche i range dei valori indicati nello studio più recente dell'European Environment Agency "Cost of air pollution from European Industrial Facilities 2008-2017", che offre le metodologie più attuali per le valutazioni economiche degli inquinanti, considerando due approcci, il value of a life year (VOLY, che tipicamente nel range costituisce la valutazione inferiore³) e il value of a statistical life (VSL⁴), prendendo in considerazione gli effetti differenziati per ciascuno dei 41 Paesi europei analizzati e includendo gli impatti sulla salute, sulle coltivazioni e le foreste, sugli ecosistemi e sui danni materiali, in valuta Euro con base 2019.

Tabella 5: Valore monetario degli inquinanti del trasporto terrestre per diversi contesti di mobilità, caso specifico Italia

Tipologia di inquinante	AMBITO	Valore di sintesi indicato nell'Handbook della Commissione Europea in EURO per tonnellata	Range di valori di sintesi proposti dall'EEA in EURO per tonnellata
CO2	Tutti	100	
PM2.5	Urbano	409.000	165.372 – 592.650
PM2.5	Suburbano	132.000	165.372 – 592.650
PM10	Medio	19.000	107.384 - 384.838
NOx	Urbano	25.400	29.007 - 108.206
SO2	Tutti	12.700	26.967 - 93.755
NMVOC	Tutti	1.100	4.803 – 15.641

Fonte: Elaborazioni GREEN su dati Handbook on the external costs of transport del 2019 e EEA, Cost of air pollution from European Industrial Facilities 2008-2017 del 2021

La tabella successiva sintetizza i valori successivamente utilizzati per il caso Italia, derivanti da una scelta di utilizzare il valore indicato nell'Handbook per i valori della CO2 e del PM 2.5⁵ e i valori intermedi fra i parametri VOLY e VSL indicati dall'EEA, in quanto ritenuti più aggiornati e dettagliati

Tabella 6: Valore monetario degli inquinanti del trasporto terrestre per diversi contesti di mobilità, caso specifico Italia

Tipologia di inquinante	Valore di sintesi utilizzato nelle successive analisi di TCO e TCRO EURO per tonnellata
CO2	100
PM2.5	409.000
PM10	246.111
NOx	68.606,5
SO2	60.361
NMVOC	10.222

³ E' una valorizzazione monetaria basata su quanto un individuo è disposto a pagare (WTP) per vivere un anno in più in salute.

⁴ E' una valorizzazione monetaria basata su quanto gli individui attribuiscono ad un cambiamento marginale nella loro probabilità di morte.

⁵ I particolati derivano sia dalla combustione sia dall'usura delle componenti e dall'abrasione del manto stradale, pertanto risulta appropriato utilizzare un dato specificamente calcolato per il settore dei trasporti e in contesti urbani per tener in considerazione il numero di soggetti impattati direttamente dagli effetti nocivi, mentre gli altri inquinanti possiedono maggiore capacità di dispersione per cui il contesto di emissione risulta meno dirimente ai fini della determinazione del danno potenzialmente prodotto



Fonte: Elaborazioni GREEN su dati Handbook on the external costs of transport del 2019 e EEA, Cost of air pollution from European Industrial Facilities 2008-2017 del 2021

I livelli di emissione dei bus a livello italiano sono stati dettagliati nel dicembre del 2018 nel documento Piano Strategico Nazionale per la Mobilità Sostenibile del Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibile e per i bus a metano (CNG Euro VI) sono stati aggiornati da uno specifico studio basato su dati primari raccolti a Palermo, Modena e Udine nel corso del 2020 e 2021⁶. Questi dati differiscono da quelli indicati nel report EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019 aggiornato nell'Ottobre del 2021⁷ relativi alla media europea.

Tabella 7: Emissioni per tipologia di motorizzazione gr*km per veicolo, ambito urbano

Tipologia di inquinante	Diesel EuroVI	Metano EuroVI	Euro VI Ibrido	Elettrico
NMVO	0,037	1.3-2.3	0,0333*	0
NOx	0,437	0.3-0.9	0,104	0
PM10	0,079	< 0.5 mg/km	0,001	0,001
CO2	921	950-1250	829*	0

Fonte: Elaborazioni GREEN su dati PNSMS del MIMS (2018) e studio CNR (2021) * stima GREEN

Per il calcolo delle emissioni globali sono state quindi considerate le seguenti 2 fasi:

1. PTT (Production To Tank), che si riferisce alle emissioni inquinanti indirette immesse nell'atmosfera derivanti dalla produzione e distribuzione del vettore energetico, nel caso di mezzi alimentati a batteria⁸;
2. TTW (Tank to Wheel), che riguarda le emissioni dirette derivanti dalla fase d'uso, cioè dal combustibile consumato direttamente dal veicolo, dal serbatoio alla ruota.

I fattori di emissione forniti nel presente studio sono tratti dal rapporto ISPRA del 2021 "Indicatori di efficienza e decarbonizzazione del sistema energetico nazionale e del sistema elettrico" e consentono di effettuare una stima delle emissioni di CO2 nella fase di produzione e distribuzione di energia elettrica in Italia⁹. I dati ISPRA evidenziano una rapida e continua riduzione dei fattori di emissione di CO2 dei consumi elettrici, che ha portato ad un -31% fra il 2010 e il 2019. In termini pratici, utilizzando i fattori di emissione per i consumi elettrici stimati per il 2019, il risparmio di un kWh a livello di utenza media consente di evitare l'emissione in atmosfera di un quantitativo di CO2 pari a 268,6 g CO2. I fattori di emissione della CO2 e degli inquinanti

⁶ Lo studio è frutto di un contratto di ricerca scientifica 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 CO2 /PM2.5/NOx emesse per Km percorso di automobili ed autobus in prove che simulano l'uso effettivo dei veicoli" (CIG 8031562E9E). Il dato non considera le emissioni fuggitive, che potenzialmente potrebbero annullare o peggiorare i profili di footprint climatico, sulla base delle indicazioni del documento del MIMS "Decarbonizzare i trasporti" dell'Aprile 2022

⁷ La Guidebook viene predisposta per supportare le "Guidelines for Reporting Emissions and Projections Data" nell'ambito della United Nations Economic Commission for Europe (UNECE) Convention on Long-range Transboundary Air Pollution (LRTAP Convention) ed utilizza valori medi a livello europeo. Per i bus Euro VI diesel, ad esempio vengono indicati valori pari a 0,220 gr*km di NMVO, 0,597 gr*km di NOx, 0,0023 di PM2.5, cioè valori più elevati rispetto al caso Italia in quanto le temperature medie del contesto dove avvengono le combustioni in Europa sono più basse rispetto alla media italiana, con maggiore inefficienza dei motori ICE.

⁸ Come evidenziato nel Documento di lavoro della Commissione Europea del 18 Ottobre 2021 "Criteri UE per gli appalti pubblici verdi nel settore del trasporto su strada", è da sottolineare che gli inquinanti atmosferici rilasciati a monte dalle centrali elettriche sono generalmente emessi ad altitudini notevoli e spesso in zone scarsamente popolate. Queste emissioni si mescolano a grandi volumi d'aria e la loro incidenza sui problemi di qualità dell'aria nelle aree urbane è relativamente esigua. Al contrario le emissioni generate dal traffico avvengono a basse altitudini, nello strato di aria ambiente, e rappresentano la fonte principale di inquinamento delle aree urbane. Non producendo emissioni dallo scarico, i veicoli elettrici sono in grado di migliorare la qualità dell'aria delle città. In più le emissioni di gas serra e l'inquinamento atmosferico dovuti alla produzione elettrica diminuiranno ulteriormente nei prossimi decenni grazie al processo di decarbonizzazione del mix energetico dell'UE

⁹ Lo studio ISPRA evidenzia come le emissioni di gas serra diversi dalla CO2 incidono in maniera marginale nel settore elettrico (meno dell'1% delle emissioni di gas serra totali) pertanto qui non verranno considerati, mentre i fattori di emissione dei principali inquinanti atmosferici mostrano una costante diminuzione. In particolare si registrano significative riduzioni rispetto al 2005 dei fattori di emissione di ossidi di azoto (-42,8%), ossidi di zolfo (-90,8%) e PM10 (-84,3%).



locali per i consumi elettrici, espressi in grammi*kWh e in grammi*km di bus da 12 metri in ambito urbano, sono sintetizzati nella tabella successiva.

Tabella 8: Fattori di emissione per i consumi elettrici (grammi per kWh e grammi per km per bus elettrici)

Tipologia di inquinante	Fattore di emissione (grammi per kWh) al 2019	Fattore di emissione (grammi per km) al 2021 stima basata su consumi pari a 1,15 kWh*km
NMVOC	0,09065	0,1042475
NOx	0,21071	0,2423165
PM10	0,0266	0,03059
SO2	0,04808	0,055292
CO2	268,6	308,89

Fonte: Elaborazioni GREEN su dati ISPRA del 2021 e ipotesi di consumi come da analisi Viriciti

Tabella 9: Emissioni (esprese in grammi *km), caso specifico per bus da 12 metri in Italia (stima al 2021)

Tipologia di inquinante	Full electric (mix energetico nazionale)	Full electric (100% rinnovabili)	Diesel EuroVI	CNG e LNG (fossile)	LNG (biometano)	Idrogeno
CO2	308,89	0	921	1100	0	0
PM2.5		0				0
PM10	0,03059	0	0,079	0,0005	0,0005	0
NOx	0,2423165	0	0,437	0,6	0,6	0
SO2	0,055282	0				0
NMVOC	0,1042475	0	0,037	1,8	1,8	0

Fonte: Elaborazioni GREEN su dati Handbook on the external costs of transport del 2019 e EEA, Cost of air pollution from European Industrial Facilities 2008-2017 del 2021, PNSMS del MIMS (2018) e studio CNR (2021)

1.3 Le valorizzazioni economiche dei fattori emissivi dei principali inquinanti per i bus da 12 metri in Italia

La tabella successiva evidenzia i valori monetari delle esternalità ambientali generate dai bus 12 metri con diverse motorizzazioni in Italia, espressi in Euro*km e relativi alle fasi PTT e TTW.

Tabella 10: Valori monetari (espressi in Euro*km), caso specifico Italia per bus da 12 metri (dati al 2021)

Tipologia di inquinante	Full electric (mix energ nazionale)	Full electric (100% rinnovabili)	Diesel EuroVI	CNG e LNG (fossile)	LNG (biometano)	Idrogeno
CO2	0,030889	0	0,0921	0,11	0	0
PM2.5	0	0	0	0	0	0
PM10	0,00752854	0	0,019442769	0,000123056	0,000123056	0
NOx	0,01662449	0	0,029981041	0,0411639	0,0411639	0
SO2	0,00333688	0	0	0	0	0
NMVOC	0,00106562	0	0,000378214	0,0183996	0,0183996	0
Rumore	0,01545	0,01545	0,0618	0,0309	0,0309	0,01545
Totale (Euro*km)	0,07489452	0,01545	0,203702024	0,200586556	0,090586556	0,01545

Fonte: Stime GREEN su dati Handbook on the external costs of transport del 2019 e EEA, Cost of air pollution from European Industrial Facilities 2008-2017 del 2021, PNSMS del MIMS (2018) e studio CNR (2021)



Le elaborazioni relative al costo delle esternalità su base annua, rapportate ai 55.000 km indicati come numero standard a livello italiano, sono indicate nella tabella seguente. La scelta di utilizzare un autobus elettrico alimentato con sole fonti rinnovabili (caso, ad esempio, di ATM a Milano o di GTT a Torino) permette di ridurre il costo monetario delle esternalità ambientali all'8% rispetto ad un Diesel Euro VI (37% nel caso di ricarica con mix energetico nazionale). Questo risultato è dovuto principalmente alla riduzione di 50,655 tonnellate di CO2 che implicano una riduzione di 5.065 Euro, pari al 49% della differenza dei costi monetari delle esternalità complessive fra i bus con motorizzazione elettrica comparato al diesel.

Tabella 11: Valori monetari (espressi in Euro*anno), caso specifico Italia per bus da 12 metri (dati al 2021)

Valore annuo	Full electric (mix energetico nazionale)	Full electric (100% rinnovabili)	Diesel EuroVI	CNG e LNG (fossile)
Valore monetario annuo delle esternalità ambientali (Euro, 2021)	4.119	850	11.204	11.032
Valore indice, con bus Diesel EuroVI= 100	37	8	100	98

Fonte: Stime GREEN su dati Handbook on the external costs of transport del 2019 e EEA, Cost of air pollution from European Industrial Facilities 2008-2017 del 2021, PNSMS del MIMS (2018) e studio CNR (2021)

Questo risultato è in linea con le risultanze emerse nel rapporto “Decarbonizzare i trasporti. Evidenze scientifiche e proposte di policy” del Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili pubblicato nell’aprile del 2022 in cui si sottolinea come le soluzioni basate sull’elettrificazione diretta sono chiaramente più competitive dal punto di vista dell’efficienza energetica e delle capacità di decarbonizzazione, se l’elettricità è ottenuta a partire da fonti rinnovabili. Inoltre, nel rapporto ministeriale emerge come l’entità di questi vantaggi dipende dalla possibilità di produrre elettricità a zero emissioni di gas serra e a basso costo, nonché dall’ottimizzazione e dalla qualità (durabilità) di sistemi di stoccaggio energetico a bordo (batterie), che sono la componente più costosa di questo tipo di tecnologie.



Bibliografia

Basel Committee on Banking Supervision (2021): Principles for the effective management and supervision of climate-related financial risks, November

Carbon footprint (2022) "Country specific electricity grid greenhouse gas emission factors", updated March 2022

European Monitoring and Evaluation Programme (EMEP) and European Environmental Agency (EEA) (2021), "Air pollutant emission inventory guidebook 2019", update at October 2021.

Group of 20 (2021): 2021 Synthesis Report of the Sustainable Finance Working Group, October

ISPRA, (2021) "Indicatori di efficienza e decarbonizzazione del sistema energetico nazionale e del sistema elettrico", Rapporto 343.

ISPRA, (2020) "Fattori di emissione di gas serra nel settore elettrico in Italia e nei principali Paesi europei", Roma

Istituto Motori del Consiglio Nazionale delle Ricerche ed Innovhub – Stazioni Sperimentali per l'industria S.r.l. (2021), "Servizio di misura delle concentrazioni medie di CO₂ /PM_{2.5}/NO_x emesse per Km percorso di automobili ed autobus in prove che simulano l'uso effettivo dei veicoli".

Mao, F.; Li, Z.; Zhang, K. (2021), "A Comparison of Carbon Dioxide Emissions between Battery Electric Buses and Conventional Diesel Buses", Sustainability 2021, 13, 5170. [https:// doi.org/10.3390/su13095170](https://doi.org/10.3390/su13095170)

Ministero delle Infrastrutture e della Mobilità Sostenibili (Aprile, 2022) "Decarbonizzare i trasporti. Evidenze scientifiche e proposte di policy", Roma

Pedersen, L, S Fitzgibbons and L Pomorski (2021): "Responsible investing: the ESG efficient frontier", Journal of Financial Economics, vol 142, no 2, November, pp 572– 97.

Red Eelctrica de Espana (2021) "CO₂ emissions of electricity generation in Spain", Madrid

Scatigna M., Xia D., Zabai A., Zulaica, O, (2021) "Achievements and challenges in ESG markets" BIS Quarterly Review, December, pp 83–97

Sven Borén (2020), "Electric buses' sustainability effects, noise, energy use and costs", International Journal of Sustainable Transportation, 14:12, 956-971, DOI: 10.1080/15568318.2019.1666324

Valenti G., Lelli M.,. Liberto C., Orchi S., Messina G., Ortenzi F., Carapellucci F.(2016)" Valutazione e valorizzazione dei benefici ambientali della mobilità elettrica nell'area di Roma", ENEA.

World Bank. The Global Health Cost of PM_{2.5} Air Pollution: A Case for Action Beyond 2021. International Development in Focus. Washington, DC: World Bank. doi:10.1596/978-1-4648-1816-5.



GREEN
Centro di ricerca sulla Geografia,
le risorse naturali, l'energia,
l'ambiente e le reti
via Röntgen 1
20136 Milano - Italia
Tel 02 5836.5414-36/6620 Fax 02 5836.6612

www.green.unibocconi.eu

© Università Commerciale Luigi Bocconi – Febbraio 2022



**Università
Bocconi**

GREEN
Centro di ricerca sulla geografia,
le risorse naturali, l'energia,
l'ambiente e le reti