



Analisi della transizione verso autobus a zero emissioni – VCO

Bolzano, 29/09/23

G.Rotondo, M.G.Prina, A.Zubaryeva, A.Grotto,
A.Estrada, W.Sparber
Eurac Research



Obiettivo

MOBSTER è un progetto cofinanziato dall'Unione Europea, dal Fondo Europeo di Sviluppo Regionale, dal Governo Italiano e dalla Confederazione Svizzera e dai Cantoni, nell'ambito del Programma di Cooperazione Interreg V-A Italia-Svizzera.

Scopo del lavoro:

- **Valutare** attraverso un modello il **numero minimo di autobus** per convertire l'intera flotta da mezzi a diesel a veicoli a **zero emissioni** (elettrici ed a idrogeno)
- **Valutazione dell'infrastruttura di ricarica** necessaria ed il **posizionamento spaziale**

Il **caso studio** considerato è quello del territorio della **provincia di Verbania Cusio Ossola**, considerando le **tratte urbane ed extraurbane gestite dalla compagnia VCO trasporti**, considerando altitudine e distanza di ogni linea.

Indice

- 1) Elaborazione della mappa digitalizzata delle linee in 3D
- 2) Quantificazione dei consumi elettrici o di H₂ per ogni linea
- 3) Analisi temporale delle linee e percorribilità
- 4) Analisi strutture di ricarica e rifornimento
- 5) Conclusioni

1. Elaborazione della mappa digitalizzata delle linee in 3D

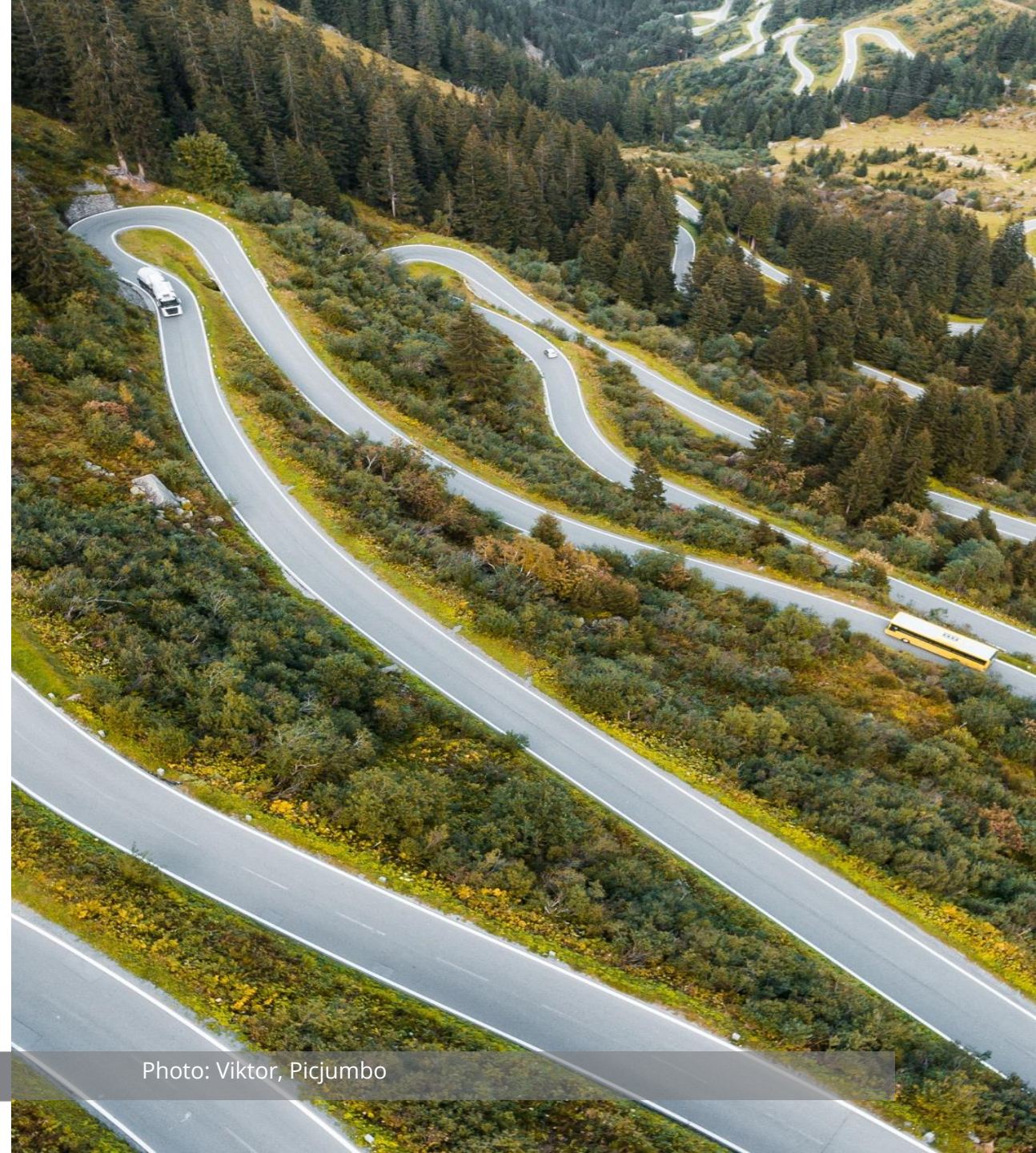


Obiettivo dell'elaborazione della mappa 3D

Lo scopo dell'analisi è quello di ricostruire i profili altimetrici delle 14 linee (341 tratte) per definire:

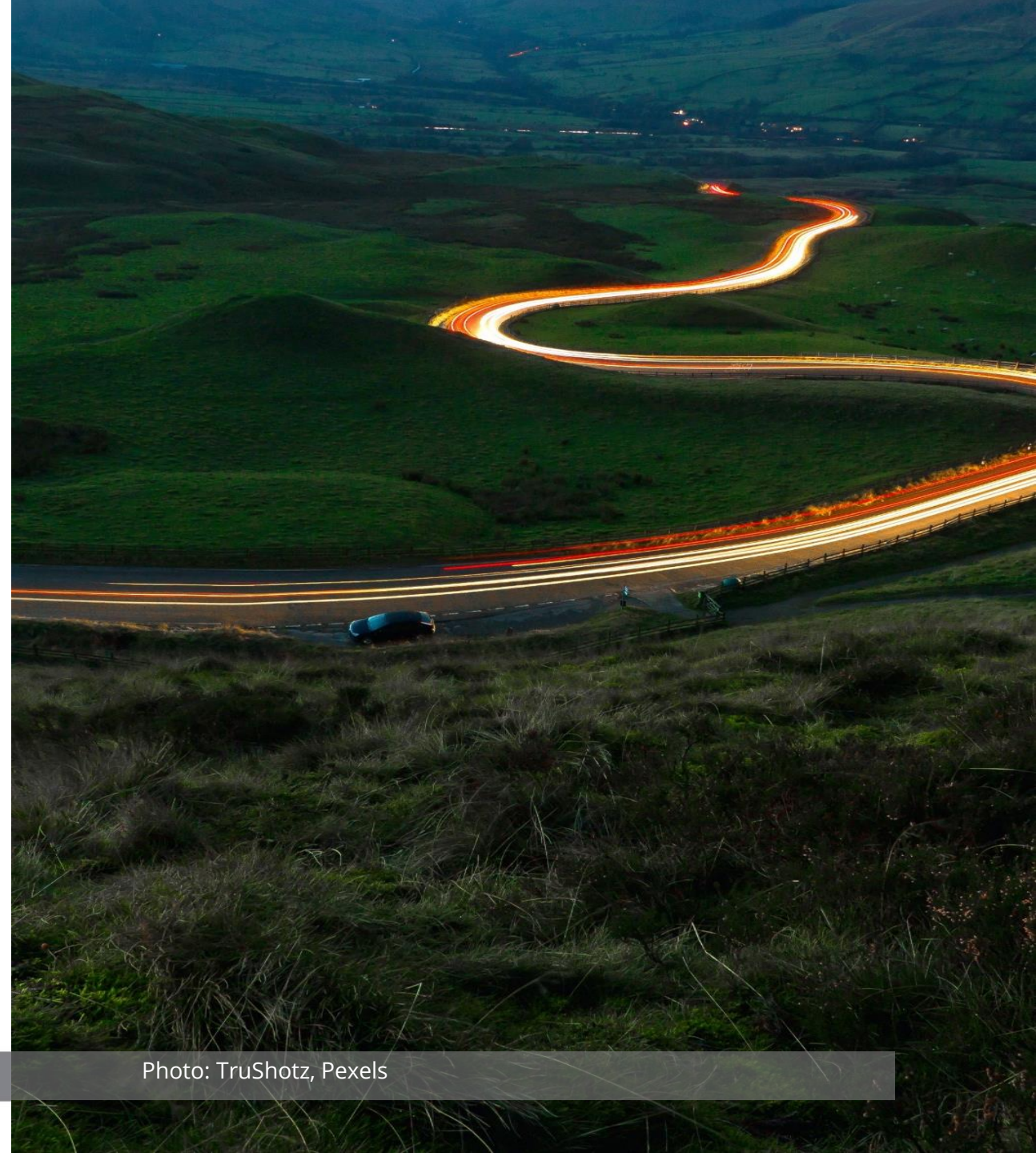
- Distanza
- Dislivello
- Pendenza massima

Questi parametri sono poi utilizzati per calcolare l'energia richiesta dagli autobus (e-bus e H₂) per percorrerle.



Dati di input

1. Tratte e linee dal General Transit Feed Specification (GTFS) file (source: VCO)
2. Stradario provinciale (source: OpenStreetMap)
3. Modello digitale del terreno 30m (Digital Terrain Model – DTM), estratto da dati SRTM e ASTER GDEM (source: CopernicusEU)
4. Analisi dei bus a zero emissioni presenti sul mercato (source: Eurac Research)



Classificazione dei percorsi per dislivello e distanza

35'074 strade sono state:

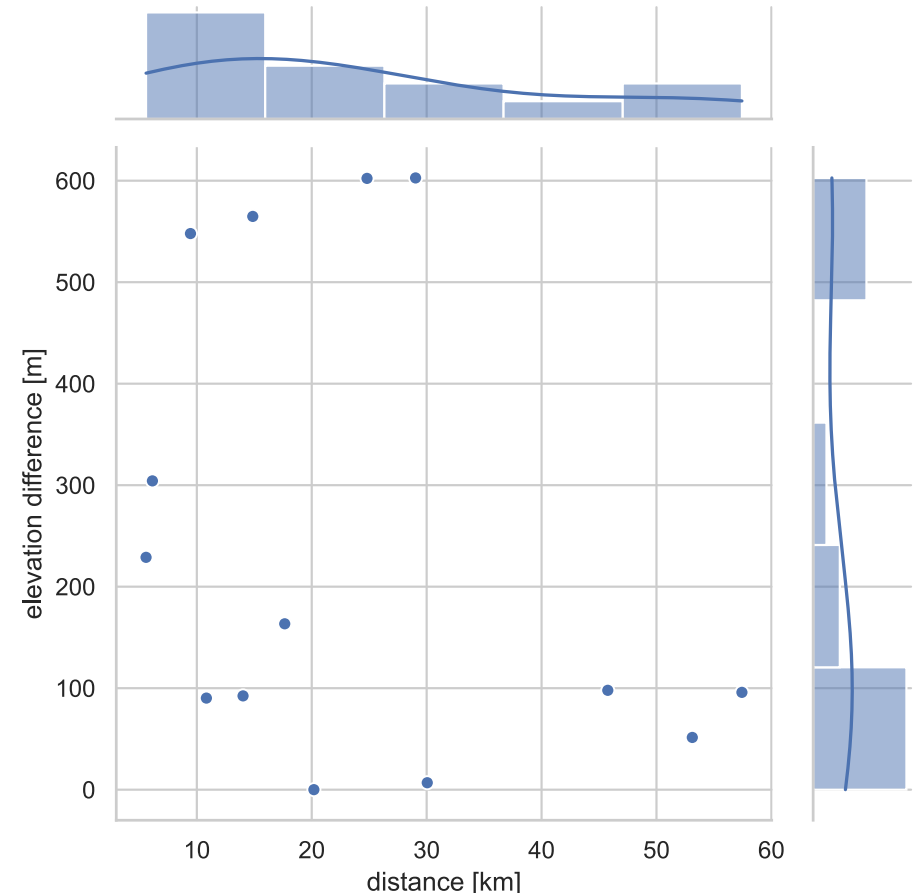
- trasformate da 2D a 3D
- controllate e ripulite dalle pendenze anomale

160'353 di punti dei **341** percorsi degli autobus presenti nella provincia di Verbania-Cusio-Ossola forniti da VCO, **sono stati fatti combaciare con lo stradario provinciale** ottenuto da OpenStreetMap.

La **distanza media** è di **19.96 km** con una distanza **massima** di **57.4 km**.

Il **dislivello medio** è di **187 m** con un dislivello **massimo** di **608 m**.

Dislivello e distanza del territorio della provincia di VCO



2. Quantificazione dei consumi elettrici o di H₂ per ogni linea



Quantificazione consumi energetici

L'energia per percorrere le differenti tratte/linee è calcolata in funzione:

- del profilo altimetrico e della distanza
- delle condizioni di carico dell'autobus

L'energia richiesta è confrontata con le capacità delle batterie (kWh) e dei serbatoi di H₂ (kg) dei diversi autobus.

La pendenza massima delle linee viene considerata in questa analisi come fattore limitante nella scelta di particolari modelli di autobus.



Metodologia: stima dell'energia → e-bus

Stimare l'energia richiesta per percorrere una linea con un modello di bus selezionato. Energia totale è definita come:

$$E_{tot} = E_{dist} + E_{disl_{up}} - E_{disl_{up}}$$

Con:

$$E_{dist} = cons_{ideal}^* \text{ [kWh/km]} * distance$$

$$E_{disl_{up}} = 9.81 * \frac{(peso_{bus} + peso_{persone} * \%affluenza) * \Delta disl_{up}}{\eta_{up}}$$

$$E_{disl_{down}} = 9.81 * (peso_{bus} + peso_{persone} * \%affluenza) * \Delta disl_{down} * \eta_{down}$$

*l'effetto della climatizzazione è stato considerato nel valore di consumi «ideali» e non attraverso un coefficiente ad hoc

$$\eta_{up} = 0.85 \quad \text{Efficienza dal motore alla ruota (up) [1]}$$

$$\eta_{down} = 0.75 \quad \text{Efficienza dalla ruota al motore (down) [2]}$$

$$\%affluenza = 0.7 \quad \text{Percentuale occupazione autobus}$$

(1) Design of Efficient In-Wheel Motor for Electric Vehicles Winai Chanpenga*, Prasert Hachanontba, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani, 12110, Thailand, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.188>

(2) Analysis of Kinetic Energy Recovery Systems in Electric Vehicles, <https://doi.org/10.3390/vehicles5020022>

Metodologia: stima dell'energia → H₂-bus

Stimare l'energia richiesta per percorrere una linea con un modello di bus selezionato. Energia totale è definita come:

$$E_{tot} = E_{dist} + E_{disl_{up}} - E_{disl_{down}}$$

Con:

$$E_{dist} = cons_{ideal}^* [kWh/km] * distance$$

$$E_{disl_{up}} = 9.81 * \frac{(peso_{bus} + peso_{persone} * \%affluenza) * \Delta disl_{up}}{\eta_{up} * \eta_{FC}}$$

$$E_{disl_{down}} = 9.81 * (peso_{bus} + peso_{persone} * \%affluenza) * \Delta disl_{down} * \eta_{down}$$

*l'effetto della climatizzazione è stato considerato nel valore di consumi «ideali» e non attraverso un coefficiente ad hoc

η_{up}	= 0.85	Efficienza dal motore alla ruota (up) [1]
η_{down}	= 0.75	Efficienza dalla ruota al motore (down) [2]
η_{FC}	= 0.54	Efficienza della FC da H ₂ a kWh [3]
$\%affluenza$	= 0.7	Percentuale occupazione autobus

(1) Design of Efficient In-Wheel Motor for Electric Vehicles Winai Chanpenga*, Prasert Hachanontba, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani, 12110, Thailand, <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.188>

(2) Analysis of Kinetic Energy Recovery Systems in Electric Vehicles, <https://doi.org/10.3390/vehicles5020022>

(3) Dodds, Paul E., Iain Staffell, Adam D. Hawkes, Francis Li, Philipp Grünewald, Will McDowall, and Paul Ekins. 'Hydrogen and Fuel Cell Technologies for Heating: A Review'. International Journal of Hydrogen Energy 40, no. 5 (9 February 2015): 2065-83. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.11.059>.

Validazione dati consumo e-bus: Simulazione & Monitoraggio

Per validare il metodo di calcolo dei consumi utilizzato in questa analisi, sono stati **confrontati i consumi** medi ottenuti tramite **misurazioni** nell'Alto Adige, relative a tratte **urbane ed extraurbane** [1] ed i valori ottenuti con il **modello** usato nelle **simulazioni, ricavati** partendo dai dati di consumo «ideali» forniti dai costruttori (terreno perfettamente pianeggiante). I valori ottenuti sono leggermente superiori ma comunque in linea con i dati reali.

	Dati Costruttore (Cond. Ideali) [2]	Misurazioni	Simulazioni
Solaris Urbino 12 E [kWh/km]	1.25	1.37	1.44
Solaris urbino m18 E [kWh/km]	1.35	1.54	1.58

(1) Monitored data and social perceptions analysis of battery electric and hydrogen fuelled buses in urban and suburban areas, Aaron Estrada Poggio, Jessica Balest, Alyona Zubaryeva, Wolfram Sparber

(2) <https://brakar-no.s3.amazonaws.com/uploads/documents/166799ee-7d95-452a-a147-cfccb4559b9d.pdf>

Validazione dati consumo H₂ : Simulazione & Monitoraggio

Analogamente a quanto compiuto per gli autobus elettrici, sono stati **confrontati i consumi** ottenuti tramite **simulazioni con i dati** ottenuti tramite **misurazioni** nell'Alto Adige, relative a tratte urbane ed extraurbane [1]. **I valori ottenuti sono leggermente sovrastimati ma** comunque **in linea** con i dati reali.

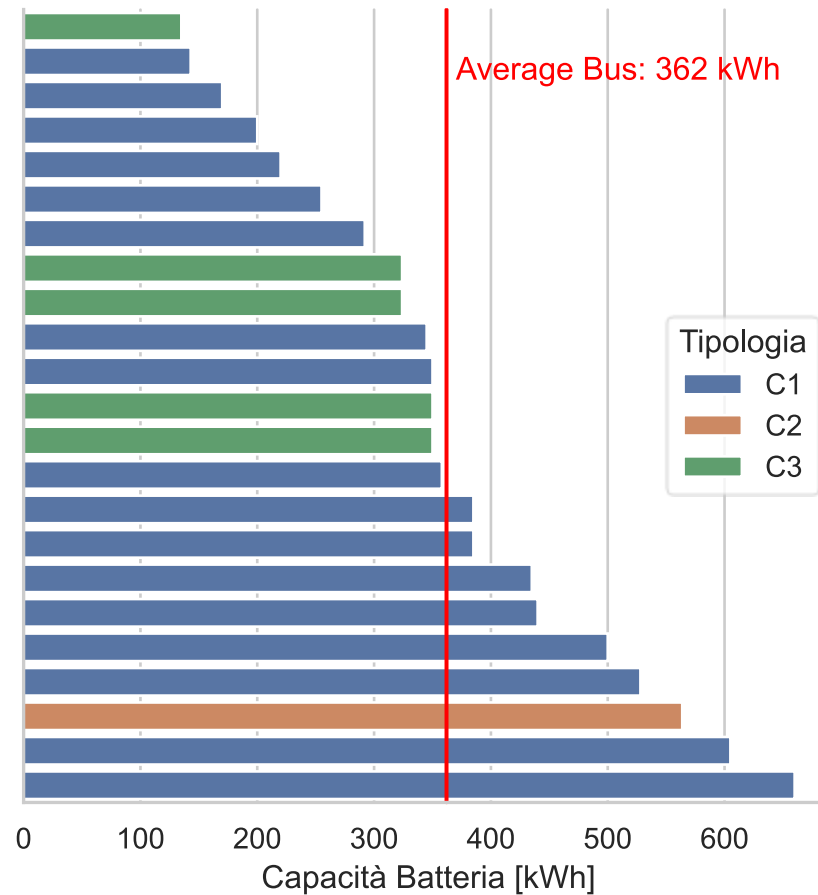
	Dati Costruttore (Cond. Ideali) [2] [3]	Misurazioni	Simulazioni
Solaris Urbino 12 Hydrogen [kgH ₂ /km]	0.090	0.093	0.103
Mercedes O530 Citaro Fuel Cell Hybrid [kgH ₂ /km]	0.080	0.107	0.114

[1] Monitored data and social perceptions analysis of battery electric and hydrogen fuelled buses in urban and suburban areas, Aaron Estrada Poggio, Jessica Balest, Alyona Zubaryeva, Wolfram Sparber

[2] <https://www.solarisbus.com/en/vehicles/zero-emissions/hydrogen>

[3] <https://www.greencarcongress.com/2020/04/20200402-ecitarorex.html>

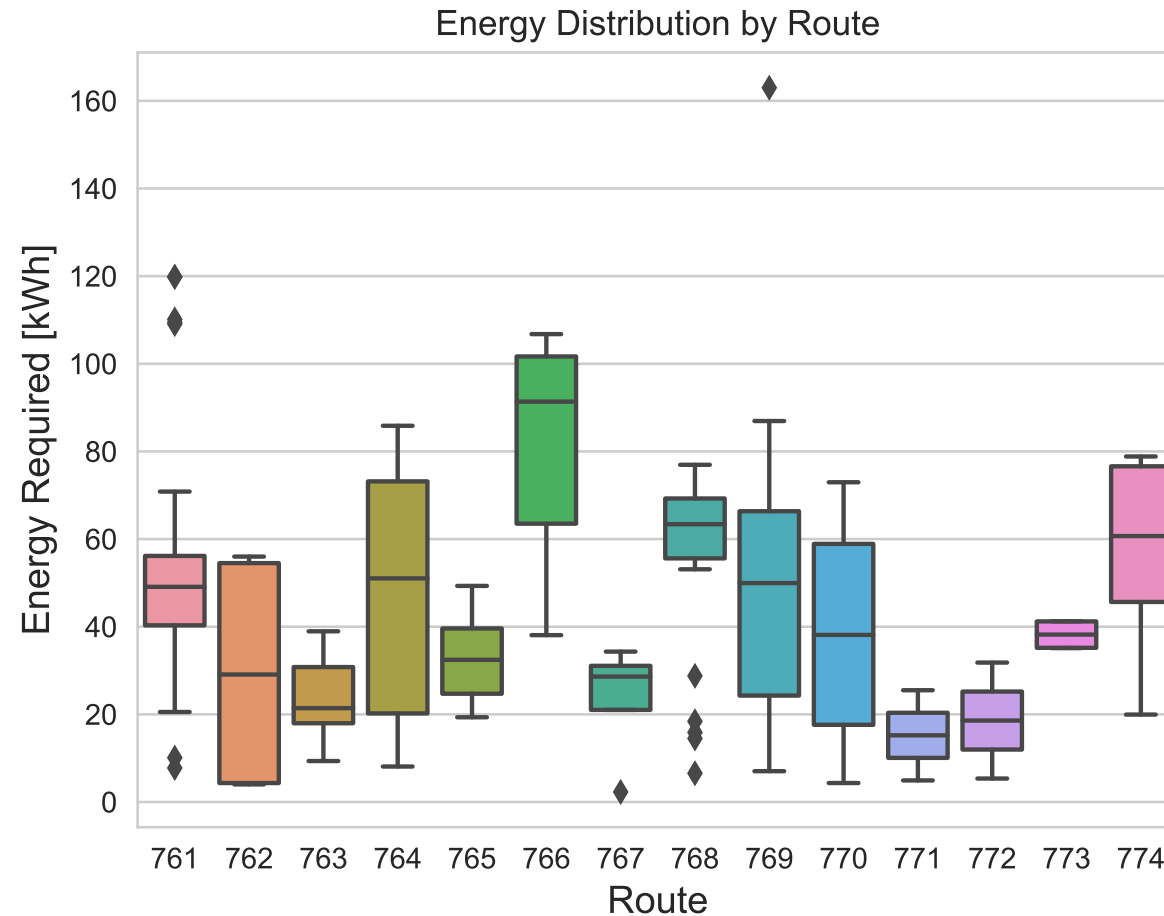
e-bus: capacità batterie



La **capacità delle batterie** degli autobus elettrici varia dai **143 ai 660 kWh**.

Per la simulazione è stato preso un **valore medio** fra i modelli disponibili nel mercato, pari a **362 kWh**.

e-bus: energia richiesta per linea



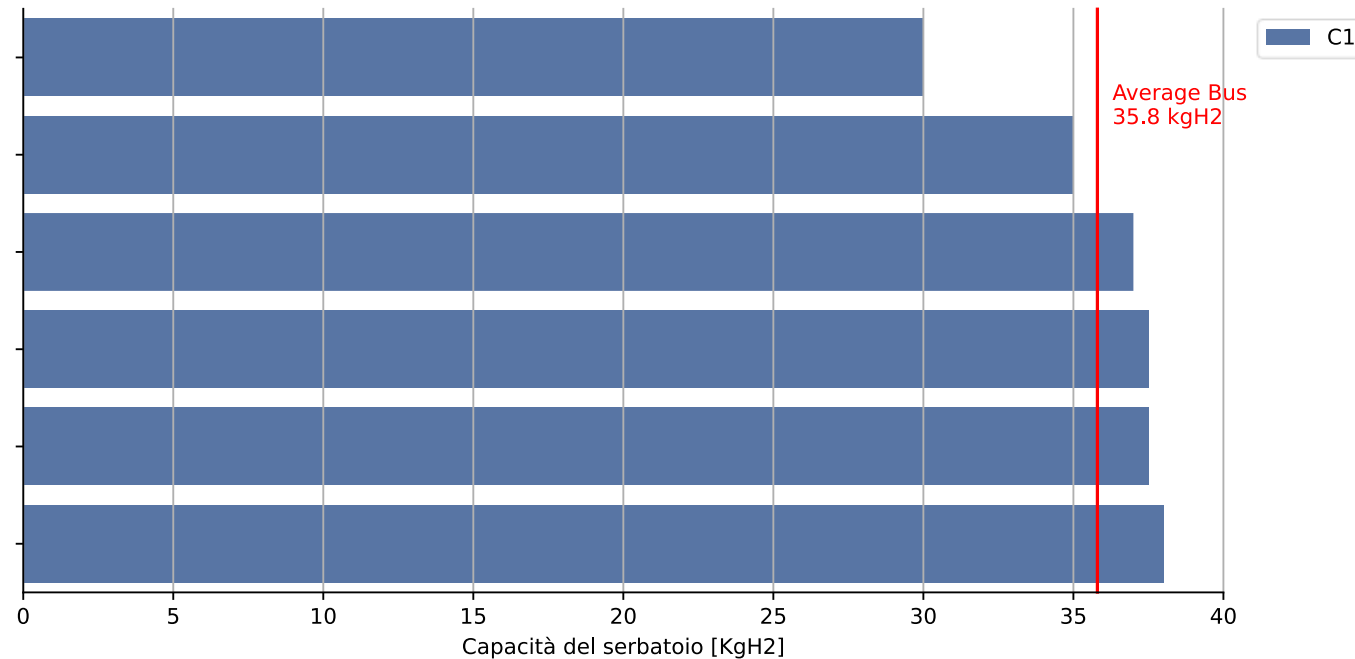
I **valori** sono in sempre al di **sotto** della **capacità della batteria** assunta per l'autobus, pari a 362 kWh.



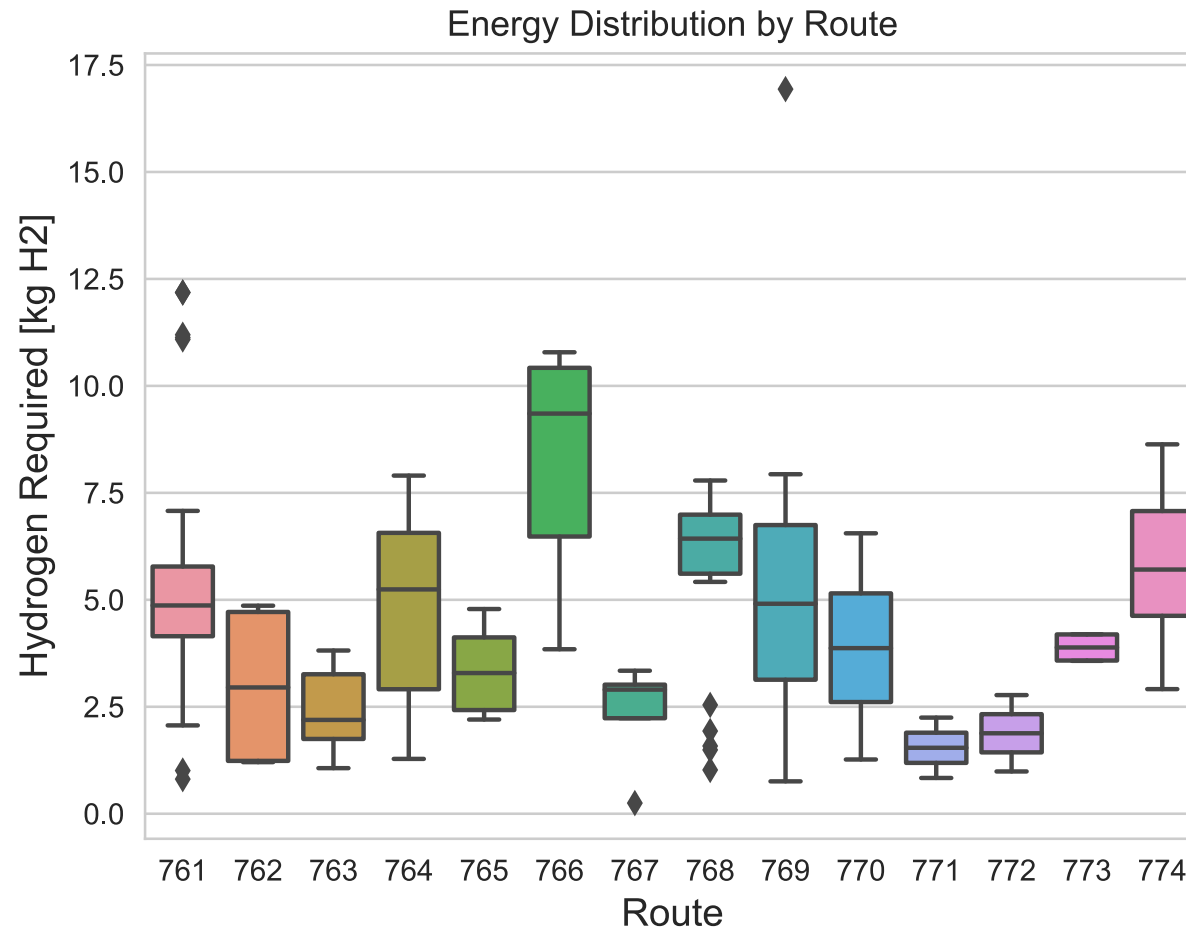
Gli autobus sono in grado di svolgere tutte le tratte coperte da VCO.

Idrogeno: capacità del serbatoio in kg H₂

Per la simulazione è stato utilizzato un **valore medio** della **capacità del serbatoio**, considerando i modelli di autobus ad idrogeno attualmente presenti sul mercato.



H₂ bus: energia richiesta per linea

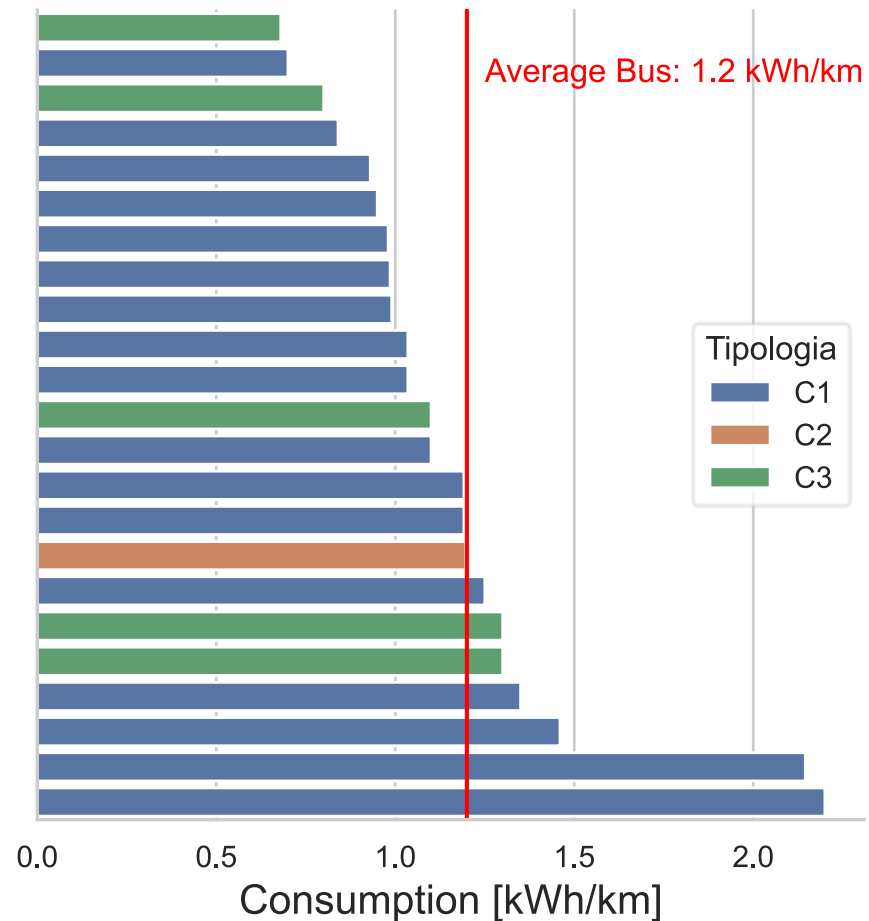


I **valori** sono in sempre al di **sotto** della **capacità del serbatoio** assunta per l'autobus, pari a 35,8 kg H₂.



Gli autobus sono in grado di svolgere tutte le tratte coperte da VCO.

e-bus: Consumi

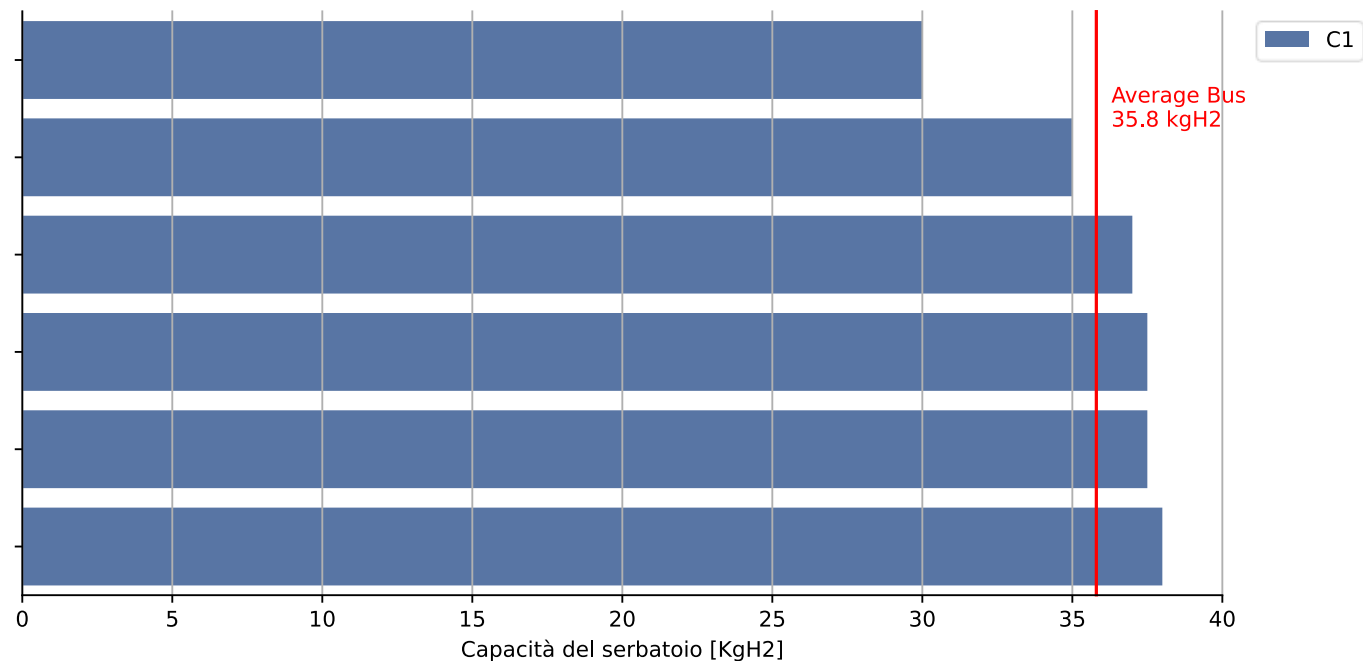


CASO STUDIO
Valore medio fra i consumi dichiarati dai costruttori e riferiti a **condizioni ideali** con **terreno perfettamente pianeggiante**.

Nel caso dei profili altimetrici reali
 $CONS_{reali} > CONS_{ideali}$

H₂-bus: Consumi

I valori di consumi utilizzati per le simulazioni per le tratte coperte sono frutto di una media dei modelli disponibili sul mercato, dichiarati dai costruttori e riferiti a **condizioni ideali** con **terreno perfettamente pianeggiante [1]**.



[1] Monitored data and social perceptions analysis of battery electric and hydrogen fuelled buses in urban and suburban areas", Aaron Estrada Poggio, Jessica Balest, Alyona Zubaryeva, Wolfram Sparber

Analisi Consumi richiesti per tratta

	e-bus [kWh/km]	H2-bus [kg H2/km]
min	-1.53	-0.023
mean	1.84	0.146
max	5.95	0.485

I consumi ottenuti per il caso studio di VCO Trasporti sono maggiori rispetto ai valori ideali forniti dai costruttori, principalmente a causa del dislivello compiuto dai veicoli nelle linee, in media pari a 187 m.

Considerando invece l'energia richiesta dai mezzi a idrogeno in kWh, essa corrisponde a oltre due volte e mezza quella dei mezzi a batteria, in linea con i risultati ottenuti dal monitoraggio degli autobus in Alto Adige (1). Ciò è in parte dovuto all'efficienza della Fuel Cell, pari a 54%.

[1] Monitored data and social perceptions analysis of battery electric and hydrogen fuelled buses in urban and suburban areas", Aaron Estrada Poggio, Jessica Balest, Alyona Zubaryeva, Wolfram Sparber

3. Analisi orari linee e percorribilità

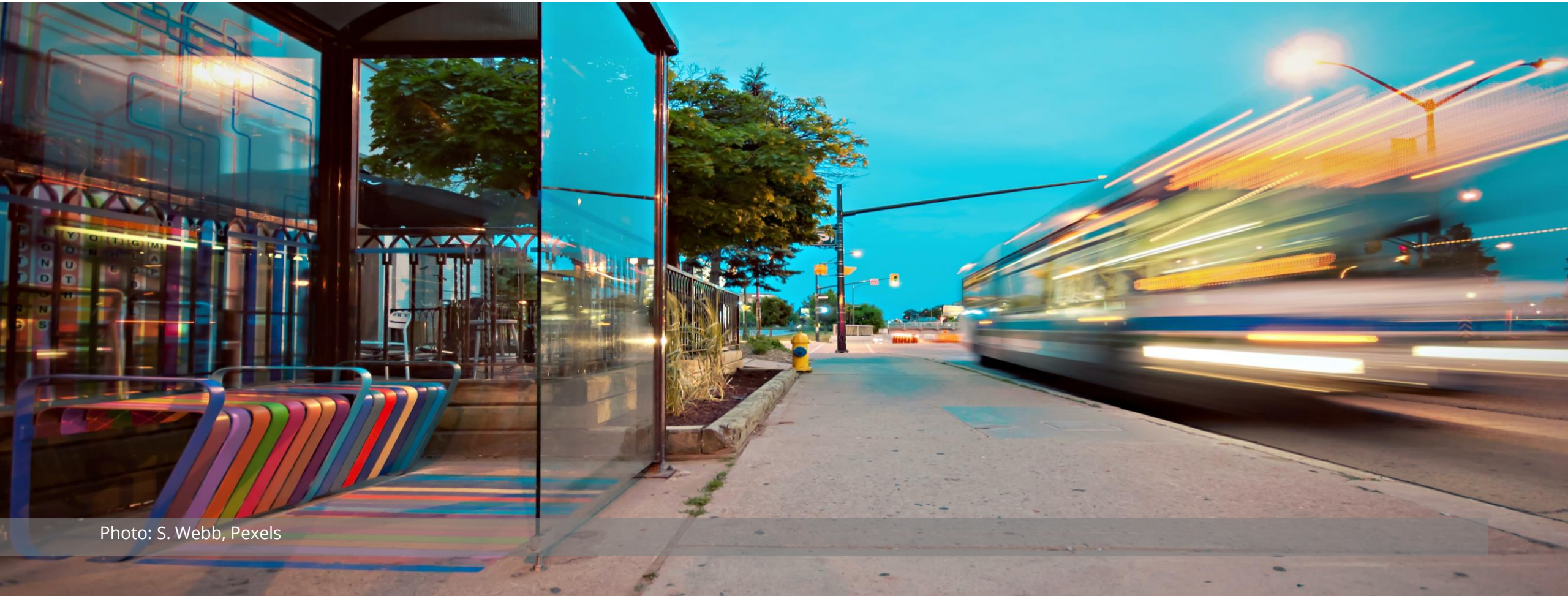


Photo: S. Webb, Pexels

Scopo dell'analisi temporale delle linee

Per tutte le linee, e in un particolare giorno dell'anno, sono state considerate:

- *l'energia richiesta per la singola tratta*
- *la capacità delle batterie o dei serbatoi*
- *i tempi di ricarica degli autobus*
- *gli orari (numeri autobus e pause)*

al fine di valutare il **numero di autobus** richiesti per coprire il servizio sulla specifica linea.

All'interno dell'analisi è stata considerata la possibilità che un autobus possa compiere più viaggi nell'arco della giornata, ma sempre operando sulla stessa linea.



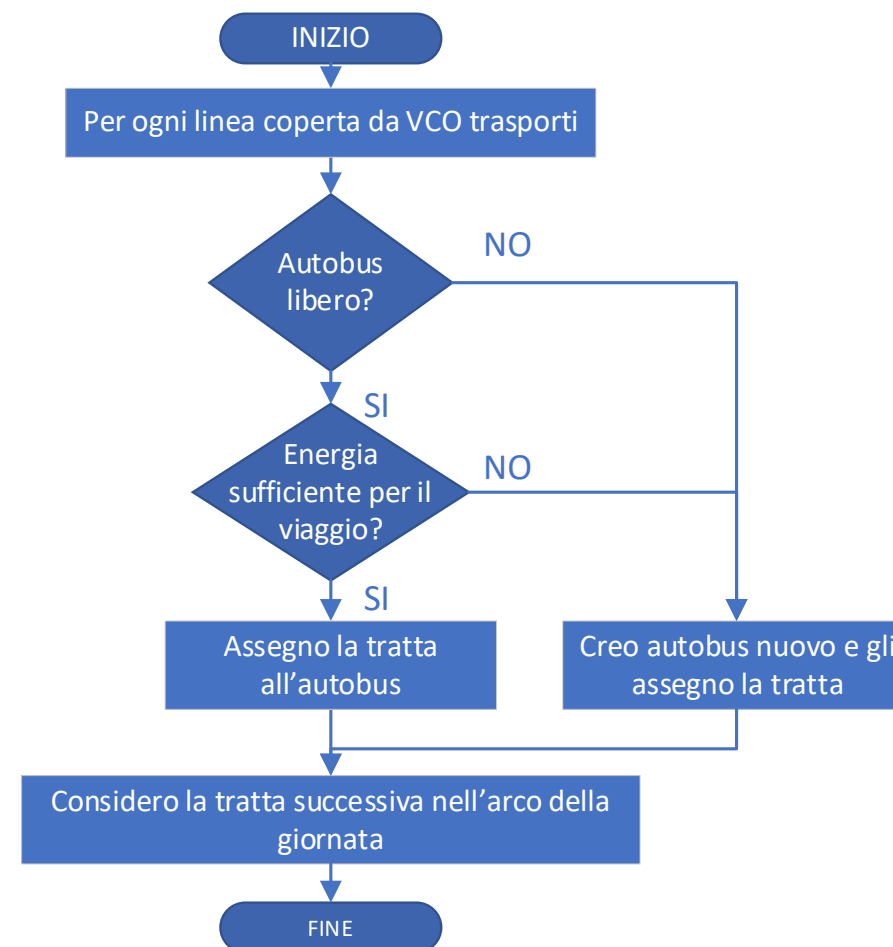
Photo: A. Morandarte, Wikimedia Commons

Metodologia e assunzioni per simulare tutte le corse in un giorno

Sono state estratte tutte le corse degli autobus per un giorno specifico. **Il giorno scelto è mercoledì 14 luglio 2022.** Si è assegnato ad ogni autobus una linea.

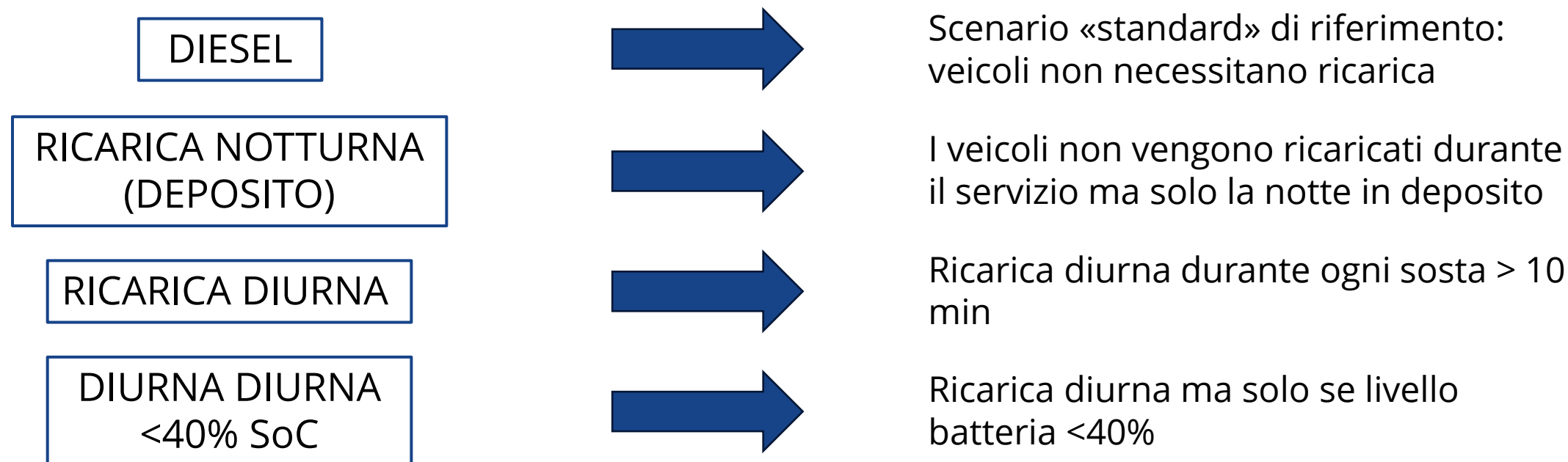
Parametri principali:

- Livello di partenza della batteria/serbatoio (90%)
- Livello massimo di scarica della batteria/serbatoio (15%)
- Livello minimo della batteria/serbatoio per ricaricare (40%)
- L'invecchiamento della batteria non è stato considerato
- Tempo minimo richiesto per poter mettere in carica il bus (> 10 min)
- Per gli autobus elettrici sono stati considerati punti di ricarica da 150 kW, mentre per i bus ad idrogeno il tempo minimo per un pieno è stato assunto pari a 10 minuti



Simulazione di un giorno: capacità batterie e serbatoi

Per le simulazioni (elettrico & idrogeno) sono stati considerati i seguenti scenari:



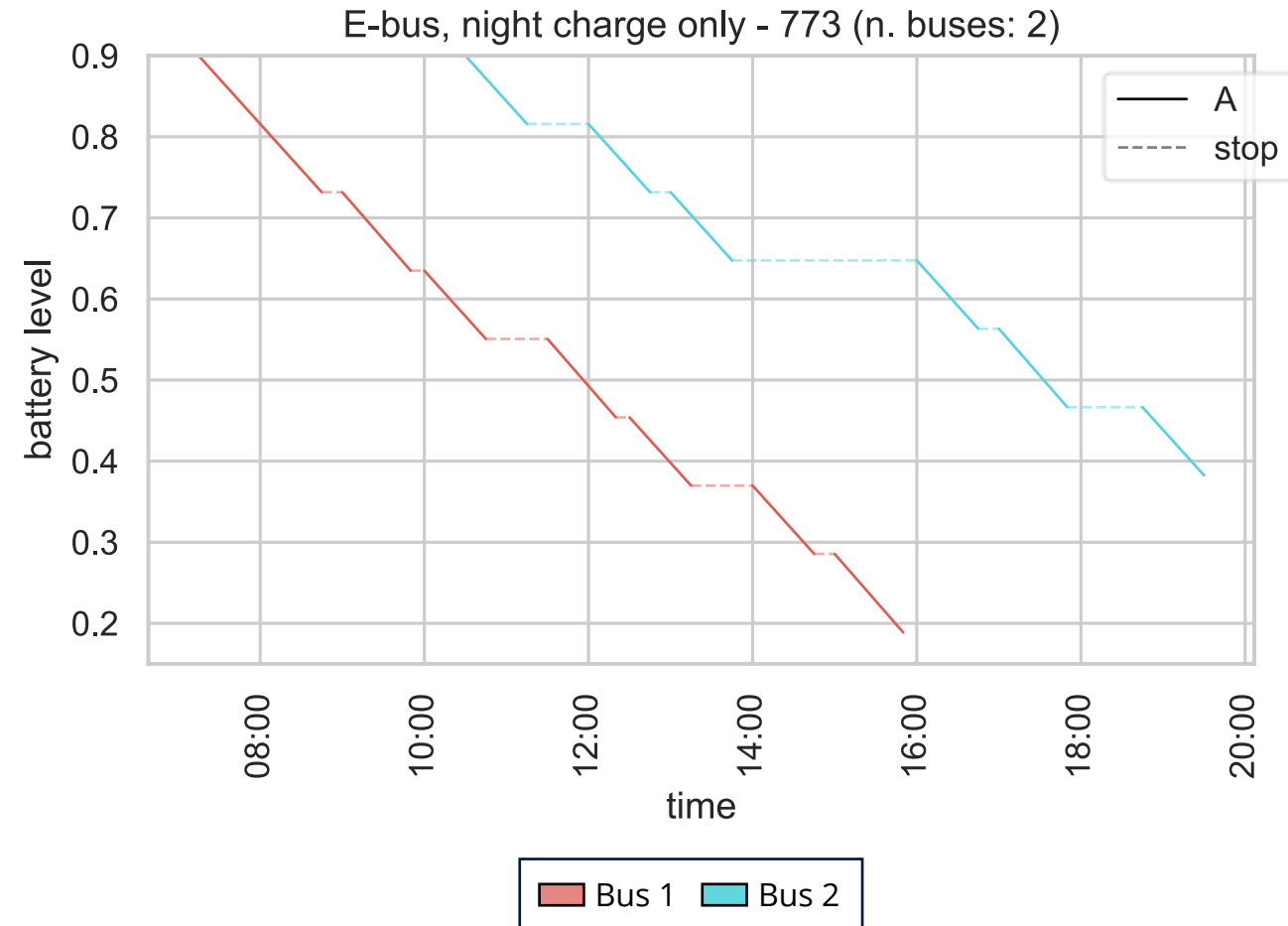
Le diverse configurazioni permettono di stimare e confrontare:

- Il numero di bus richiesti per linea
- La quantità dei punti di ricarica da installare e la loro posizione

e-bus, Linea 0-130-20a-2 : sola ricarica notturna

Il grafico mostra l'andamento giornaliero della batteria dei **2 e-bus** necessari a servire la linea considerata.

Il numero di veicoli richiesti è uguale al caso «diesel».
Tuttavia gli **autobus quasi esauriscono la batteria** durante il tragitto diurno.



e-bus, Linea 0-130-20a-2 : sola ricarica notturna

I veicoli vengono ora ricaricati durante ogni sosta più lunga di 10 minuti.

Il numero di autobus richiesti rimane invariato, ma il livello della batteria non è mai inferiore al 70%

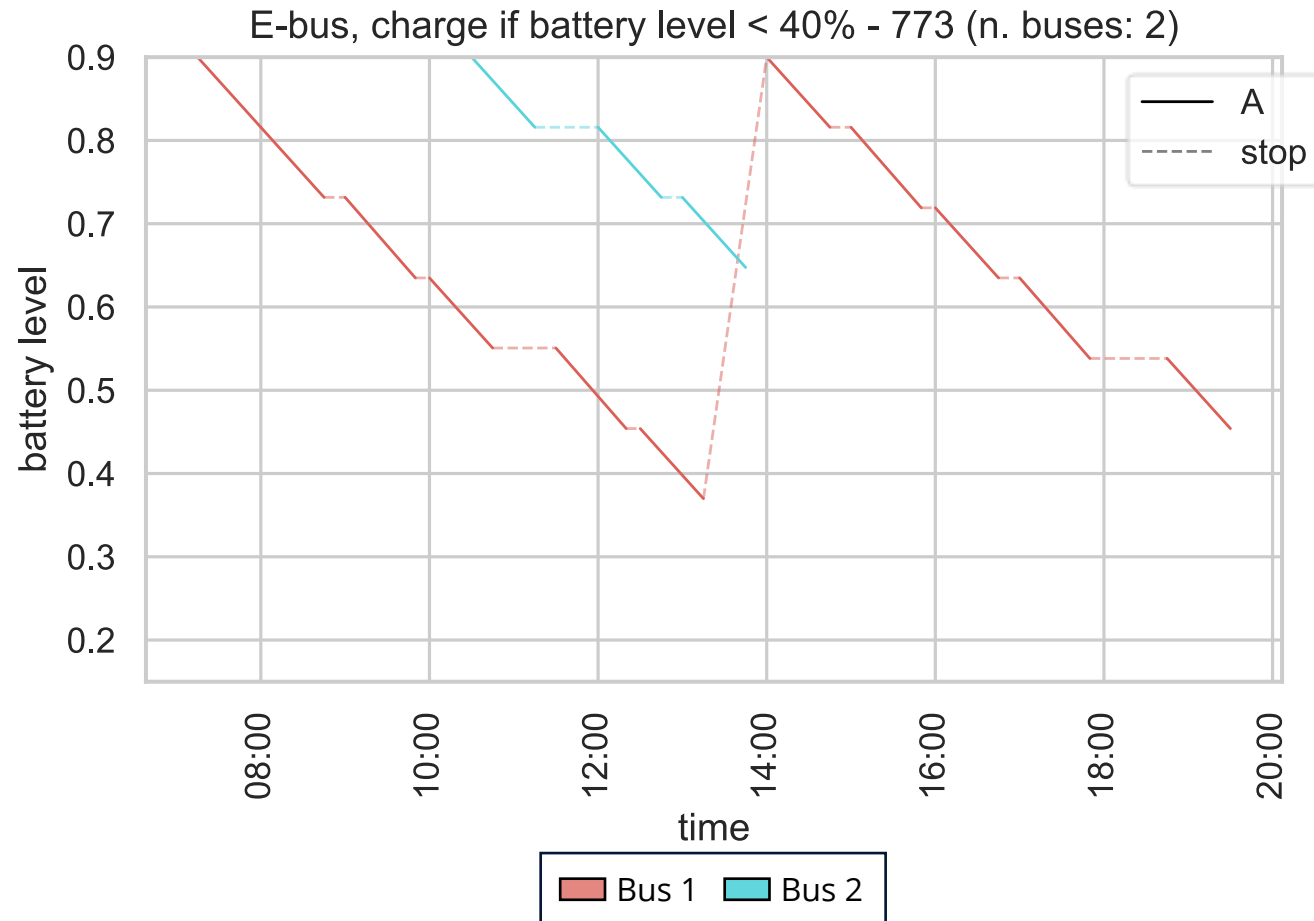


e-bus, Linea 0-130-20a-2 : ricarica con batteria sotto il 40%

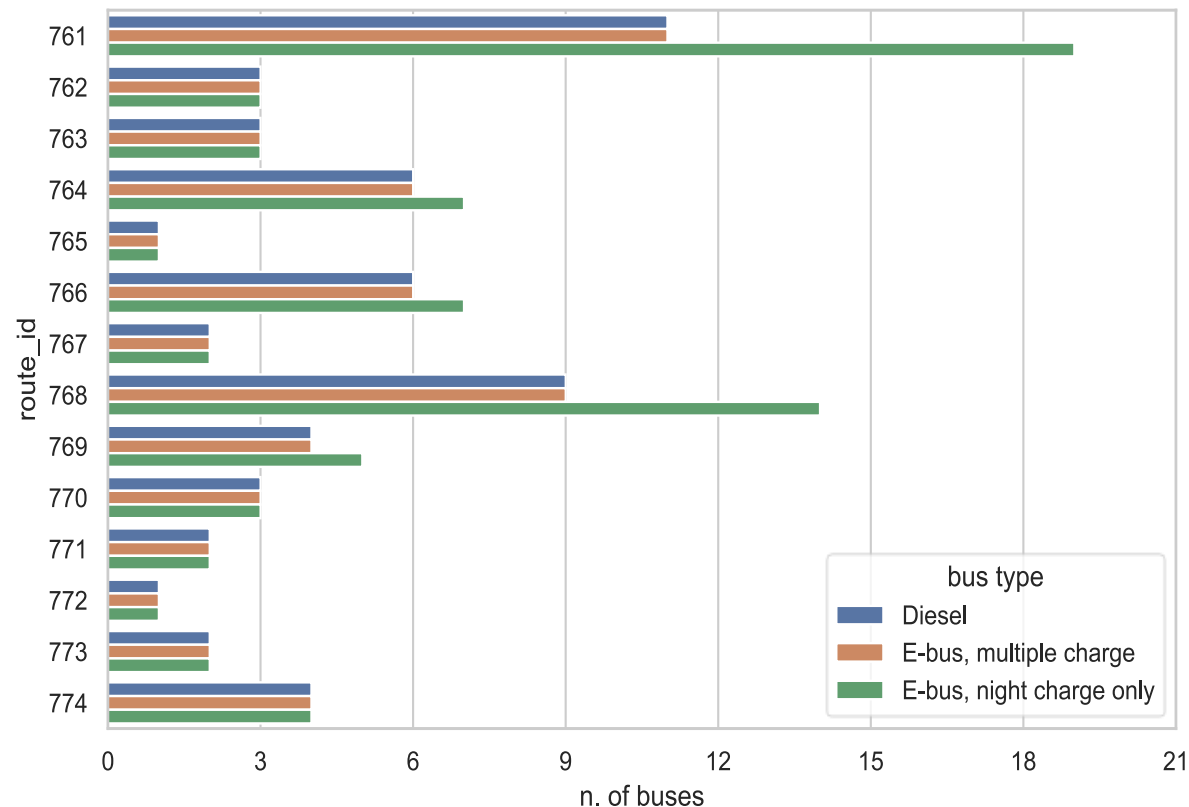
In questo **scenario** viene **vincolata la ricarica** tramite pantografo per ridurre i cicli di ricarica e **preservare la batteria** del veicolo.

Il bus viene ricaricato solo quando il livello di batteria è <40%.

La **tratta** è quindi comunque **soddisfatta** ma **riducendo le ricariche da 11 a 1.**



Linee suddivise per tipologia di autobus



Per ogni linea è stata calcolata l'energia massima richiesta dall'autobus ed individuato il mezzi necessari per ogni linea. Il **numero di autobus diesel necessari** per coprire tutte le linee gestite da VCO (utilizzato come parametro di riferimento per le flotte a zero emissioni) è **pari a 57**, in linea con l'attuale flotta di VCO trasporti (75 mezzi, scuolabus compresi [1]).

(1) https://www.vcotrasporti.it/it/profilo_e_storia.php

Analisi transizione Diesel → Zero Emissioni

Ognuna delle 14 linee simulate può essere **coperta sostituendo ogni autobus a diesel con un modello elettrico oppure ad idrogeno**, senza un sostanziale aumento del numero complessivo di veicoli appartenenti alla flotta.



9 Linee → Sufficiente ricarica notturna in deposito
5 Linee → Necessaria ricarica durante il giorno



9 Linee → Sufficiente ricarica notturna in deposito
5 Linee → Necessaria ricarica durante il giorno

4. Analisi strutture di ricarica e rifornimento



e-bus : Strategia Richiesta - Mezzi & Infrastruttura

	Bus DIESEL	Bus ELETTRICI		
STRATEGIA RICARICA		Notturna (Deposito)	Diurna	Diurna <40% SOC
N° AUTOBUS	56	72	56	58
N° PUNTI DI RICARICA/RIFORNIMENTO	-	-	10	7

RICARICA
DIURNA

Drastica riduzione degli autobus richiesti. Poiché lo scenario di ricarica notturna non ammette ricariche nel periodo simulato, non viene quindi inclusa la costruzione di alcun punto di ricarica al di fuori di quelli presenti nel deposito, non si può quindi paragonare l'infrastruttura richiesta.

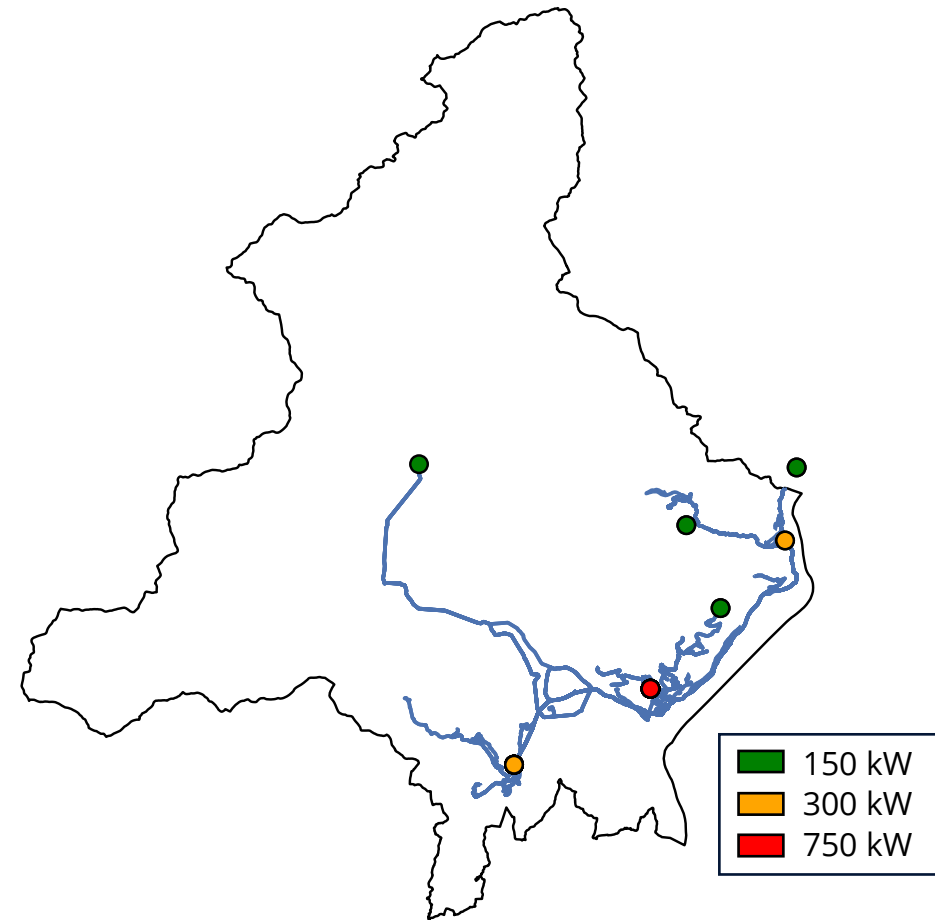
RICARICA
<40% SOC

Ricaricare i veicoli una volta raggiunta una certa soglia della batteria permette di **ridurre la quantità di punti di ricarica**, riducendo l'investimento iniziale. Inoltre, anche se da una parte vi è un **aumento dei veicoli richiesti**, con questa strategia si **riduce il numero di cicli di ricarica, prolungando la vita utile** della batteria dei veicoli.

e-bus : Punti di ricarica diurni

Il numero minimo di stazioni di ricarica richiesti è pari a 7:

- 4 punti di ricarica da 150 kW
(1 plug*150 kW)
- 2 Punti di ricarica da 300 kW
(2 plug*150kW)
- 1 punto di ricarica da 750 kW
(5 plug*150kW)



H₂-bus : Strategia Richiesta - Mezzi & Infrastruttura

	Bus DIESEL	Bus IDROGENO		
STRATEGIA RICARICA		Notturna (Deposito)	Diurna	Diurna <40% SOC
N° AUTOBUS	56	58	56	56
N° PUNTI DI RICARICA/RIFORNIMENTO	-	-	10	4

RICARICA
DIURNA

Riduzione degli autobus richiesti, grazie alla maggiore autonomia di questa tipologia di veicoli, è ridotto il caso di veicoli che si scaricherebbero completamente nel mezzo della giornata.

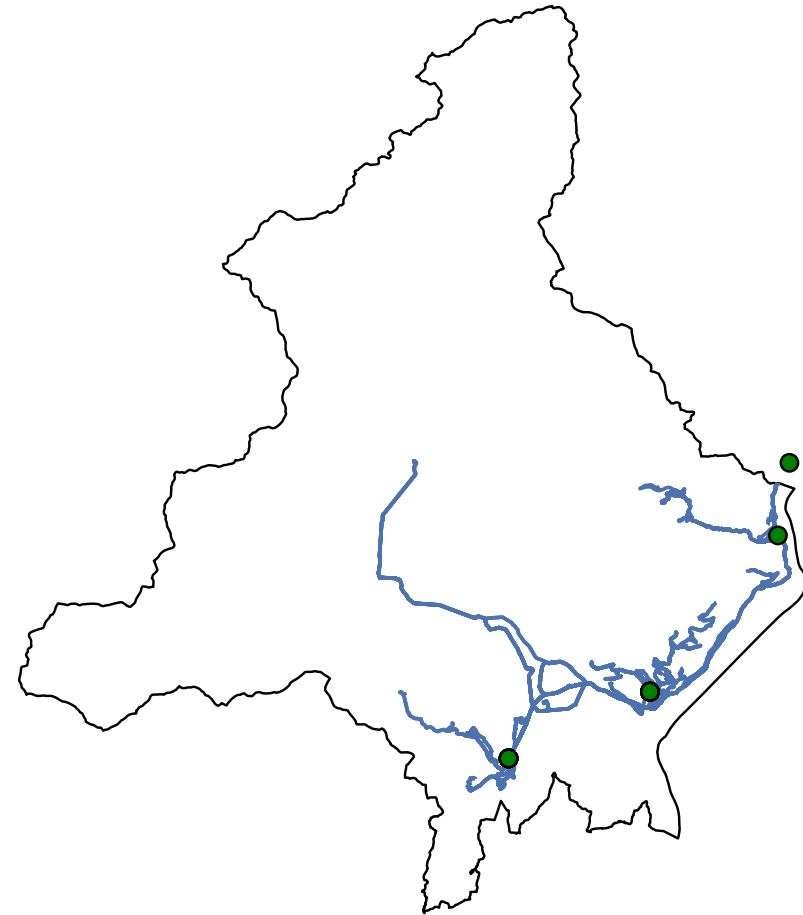
RICARICA
<40% SOC

Ricaricare i veicoli solo una volta raggiunta una certa soglia della batteria permette di **ridurre la quantità di punti di ricarica**, riducendo l'investimento iniziale

e-bus : Punti di ricarica diurni

Il numero di punti di ricarica minimi è pari a 4.

Vi è una maggiore presenza di colonnine nelle aree in cui vi è il numero maggiore di partenze delle tratte degli autobus.



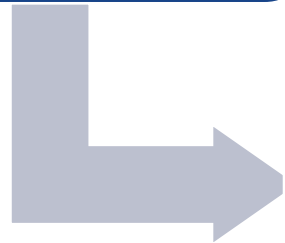
5. Conclusioni



Discussione Risultati



- **341 tratte**
- Distanza Media : **19,96 km**
- Dislivello Medio : **187 m**



- E-bus : **1.84 kWh/km**
- H₂-bus: **0.14 kg H₂/km**



**GRAZIE PER
L'ATTENZIONE**

Riferimenti bibliografici

- Design of Efficient In-Wheel Motor for Electric Vehicles Winai Chanpenga*, Prasert Hachanontba, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani, 12110, Thailand
- Boretti, A., "Analysis of the Regenerative Braking Efficiency of a Latest Electric Vehicle," SAE Technical Paper 2013-01-2872, 2013
- D. Göhlich, A. Kunitz, T. Ly, "Technology assessment of an electric urban bus system for Berlin", Department Methods for Product Development and Mechatronics, Technische Universität Berlin, Germany, May 2014
- 20 popular EVs tested in Norwegian winter conditions
- Dodds, Paul E., Iain Staffell, Adam D. Hawkes, Francis Li, Philipp Grünewald, Will McDowall, and Paul Ekins. 'Hydrogen and Fuel Cell Technologies for Heating: A Review'. International Journal of Hydrogen Energy 40, no. 5 (9 February 2015): 2065–83. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2014.11.059>.
- Chargepoint, "Electric Bus Performance Report"
- Analysis of Kinetic Energy Recovery Systems in Electric Vehicles, <https://doi.org/10.3390/vehicles5020022>
- "Monitored data and social perceptions analysis of battery electric and hydrogen fuelled buses in urban and suburban areas", Aaron Estrada Poggio, Jessica Balest, Alyona Zubaryeva, Wolfram Sparber
- <https://brakar-no.s3.amazonaws.com/uploads/documents/166799ee-7d95-452a-a147-cfccb4559b9d.pdf>
- <https://www.greencarcongress.com/2020/04/20200402-ecitarorex.html>

Contattaci



Giuseppe Rotondo



www.progettomobster.eu | mobster@eurac.edu



#progettomobster



CAPOFILA ITALIA

eurac
research

PARTNER DI PROGETTO

N E O G Y

CAPOFILA SVIZZERA

Protoscar

 **vcotrasporti**

 CITTÀ DI VERBANIA