



Ricerca di Sistema elettrico

Sviluppo software simulazione dei consumi e delle emissioni nocive in atmosfera dei veicoli per TPL su cicli reali di utilizzo

Prof. Carlo Villante – DIIE - Università degli Studi dell'Aquila



SVILUPPO SW SIMULAZIONE DEI CONSUMI E DELLE EMISSIONI NOCIVE IN ATMOSFERA DEI VEICOLI PER TPL SU CICLI REALI

Carlo Villante – DIIIIE - Università degli Studi dell'Aquila

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Area: Efficienza energetica negli usi finali elettrici e risparmio di energia negli usi finali elettrici ed interazione con altri vettori elettrici

Tematica di ricerca: Mobilità elettrica

Progetto: D.8 - Mobilità elettrica sostenibile

Obiettivo: a.1 "Strumenti di supporto al TPL"

Responsabile del Progetto: Ing. Antonino Genovese ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione *"Sviluppo SW simulazione dei consumi e delle emissioni nocive in atmosfera dei veicoli per TPL su cicli reali"*

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Maria Pia Valentini

Responsabile scientifico: Prof. Carlo Villante

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 SULLA MODELLISTICA DELLE PRESTAZIONI ENERGETICHE DI MEZZI IBRIDI PER IL TPL.....	5
2.2 SULLA SIMULAZIONE DELLE PRESTAZIONI ENERGETICHE DI MEZZI IBRIDI PER IL TPL.....	7
2.3 SULLA STIMA DELLE EMISSIONI INQUINANTI LOCALI DI BUS CONVENZIONALI ED IBRIDI	28
2.4 SULLE PRESTAZIONI DI FILOBUS E MEZZI ELETTRICI ALTERNATIVI CON RICARICA LENTA O RAPIDA	30
2.5 SULLA INTEGRAZIONE DEL SW SVILUPPATO CON I SW ENEA UTILIZZATI COME DSS NEL TPL.....	32
2.5.1 <i>La GUI</i>	33
2.5.2 <i>Importazione</i>	34
2.5.3 <i>Calcolo Emissioni (LPTSimulator) e Calcolo Costi (BEST)</i>	37
2.5.4 <i>Esplora Database</i>	38
2.5.5 <i>Impostazioni</i>	39
3 CONCLUSIONI.....	40
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	41
BREVE CV DEL RESPONSABILE SCIENTIFICO PER IL DIIIIE – UNIVERSITÀ DELL’AQUILA	41

Sommario

Questo rapporto contiene una descrizione dettagliata dei principali risultati di ricerca ottenuti dal parte del Dipartimento di Ing. Industriale, Informatica e di Economia (DIIIIE) dell'Università dell'Aquila nell'ambito del Piano Annuale di Realizzazione 2016 della Ricerca dei Sistema Elettrico. Tutte le attività sono state svolte in stretta e sinergica collaborazione con l'omologo gruppo di lavoro ENEA, hanno in parte integrato e proseguito un lavoro iniziato sullo stesso filone di ricerca nell'ambito del PAR 2015, ed hanno riguardato, in estrema sintesi, i seguenti ambiti di ricerca:

- Lo sviluppo di un modulo di simulazione energetica di autobus di diversa taglia (Mini, Midi, Full e Articolati) equipaggiati con un sistema propulsivo ibrido con architettura serie, in analogia con quanto fatto lo scorso anno per i mezzi convenzionali ed elettrici.
- Lo sviluppo di modelli dedicati alla simulazione energetica di filobus e di mezzi elettrici a ricarica rapida equipaggiati con Batterie Li-ion o super-capacitori.
- La stima delle emissioni nocive in atmosfera (CO₂, CO, HC, NO_x, PM) dei veicoli ibridi serie e convenzionali alimentati a gasolio per il TPL.
- L'integrazione del SW sviluppato dall'Università dell'Aquila con il SW sviluppato dall'ENEA

Tutti i SW realizzati, nello spirito della Ricerca di Sistema Elettrico, sono stati realizzati su piattaforme di comune accesso, in modo che possano essere modificati ed integrati da altri ricercatori senza alcuna difficoltà, e sono stati a tal fine messi a disposizione dell'ENEA e, per suo tramite, di chiunque intendesse farne uso.

1 Introduzione

Nell'ambito di un Accordo di collaborazione siglato con l'ENEA, l'Università degli studi dell'Aquila, per tramite del Gruppo di ricerca di Macchine e sistemi energetici, parte del Dipartimento di Ing. Industriale, Informatica e di Economia (DIIE), ha partecipato al Piano Annuale di Realizzazione 2016 della Ricerca di Sistema Elettrico (in continuità anche tematica con quanto già avvenuto nello scorso anno per il PAR 2015), per quanto attiene all'Area "Efficienza energetica negli usi finali elettrici e risparmio di energia negli usi finali elettrici ed interazione con altri vettori elettrici", tematica di ricerca "Mobilità elettrica".

Le attività svolte, nello specifico, si riferiscono all'obiettivo a.1 "Strumenti di supporto alle aziende di trasporto Pubblico Locale ed alle Amministrazioni territoriali per l'elettrificazione delle linee di trasporto" del PAR 2015 del progetto "D.8 - Mobilità elettrica sostenibile".

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

2.1 Sulla modellistica delle prestazioni energetiche di mezzi ibridi per il TPL

In analogia con quanto fatto nello scorso PAR 2015, in questo anno di lavoro, si sono sviluppati una serie di tool SW adatti alla simulazione di mezzi ibridi per il Trasporto Pubblico Locale (TPL). E' stato utilizzato lo stesso approccio modellistico, seppur specificato e validato nella sua completezza specificamente per mezzi ibridi. Le caratteristiche principali dei modelli sviluppati vengono pertanto qui brevemente richiamate per chiarezza espositiva.

La modellistica utilizzata è fisicamente consistente ("white box") e modulare, pienamente integrabile e modificabile da terzi al termine del presente contratto di ricerca. A tal fine sono stati utilizzati ambiti software di pubblico dominio, e più specificatamente l'ambiente Matlab-Simulink.

Lo strumento è stato finalizzato alla valutazione energetica comparativa di mezzi di trasporto alternativi in servizio su un determinato percorso. Come vedremo, con opportune modifiche, lo strumento permette anche la stima (seppur inevitabilmente di prima approssimazione) delle emissioni nocive in atmosfera (CO₂, CO, HC, NO_x, PM) dei veicoli ibridi serie e convenzionali alimentati a gasolio per il TPL. Questa stima, seppur approssimata, permette di tenere in conto (ad esempio in successive elaborazioni economiche a carico di ENEA), almeno in prima approssimazione, degli ulteriori costi (c.d. "esternalità" ambientali) generati in ambiente urbano dalle emissioni inquinanti di tali mezzi ove raffrontati a bus elettrici, filobus e tramvie.

In integrazione a quanto fatto lo scorso anno per bus con sistemi di propulsione convenzionali a gasolio od in configurazione BEV (puramente elettrici, equipaggiati con batterie Li-ion), in questo anno di attività si è provveduto a definire veicoli ibridi serie di riferimento relativi a 4 classi dimensionali di Bus (Mini, Midi, Full e Articolati).

Per ogni configurazione sono pertanto stati reperiti (tramite analisi di letteratura e tramite un sondaggio di tutti i principali costruttori del segmento) dati di dettaglio relativi alle prestazioni energetiche dei principali componenti utilizzati. Questi dati sono stati uniformati e mediati, in accordo con quanto suggerito a livello Europeo dalla procedura CORINAIR, per definire le caratteristiche medie dei componenti installati a bordo di veicoli delle quattro taglie di riferimento. I dati richiesti includono:

- la definizione semplificata del comportamento telaistico del veicolo: peso; rapporto finale di trasmissione; coefficienti di resistenza e di rotolamento; area frontale; carico pagante;

- le mappe di consumo di gasolio del MCI; i rapporti di trasmissione disponibili;
- le logiche di gestione della Alternative Power Unit (APU), così come le soglie impostate sullo stato di carico (SOC) del sistema di accumulo elettrico (ESS);
- le curve di efficienza di tutte le macchine elettriche e dei convertitori, sia per la trazione che per la generazione di energia elettrica a bordo veicolo, sia in esercizio diretto, che in esercizio inverso;
- le caratteristiche dei sistemi di accumulo elettrico, modellati attraverso un approccio semplificato puramente resistivo che racchiude tutte le perdite energetiche in una perdita ohmica equivalente.

Il comportamento del veicolo viene quindi valutato sulla missione data tramite modelli a parametri concentrati implementati in ambiente Simulink di tutti i principali componenti della catena cinematica. I modelli sono completamente modulari in modo che con approcci simili e coerenti possano essere facilmente utilizzati nel modellare tutte le possibili diverse opzioni veicolari.

Un'attenzione dettagliata viene data alla simulazione della frenatura rigenerativa che svolge un ruolo cruciale nella definizione delle prestazioni complessive del veicolo. Il calcolo dell'energia recuperata considera le opzioni veicolari a 2 e 4 ruote motrici, le ripartizioni dei pesi anteriori/posteriori ed i corrispondenti limiti di aderenza.

Tutta la modellistica del veicolo è stata sviluppata in ambiente Simulink. Come detto, i modelli dei componenti e delle singole parti del veicolo sono tutti dinamici a parametri concentrati e sono connessi tra loro in una logica di piena modularità. Diviene così molto semplice utilizzare i modelli presenti per la simulazione delle configurazioni di propulsione previste (Convenzionali, elettriche ed ibride serie) (Fig. 1-3).

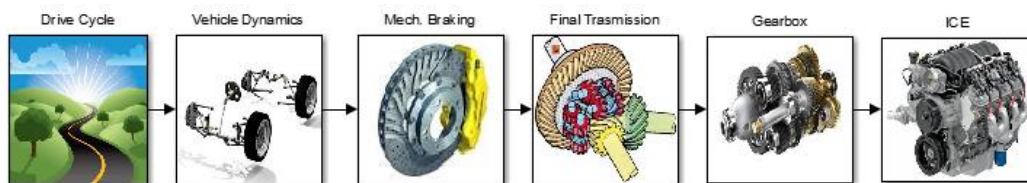


Figura 1: Modello Simulink del Veicolo convenzionale

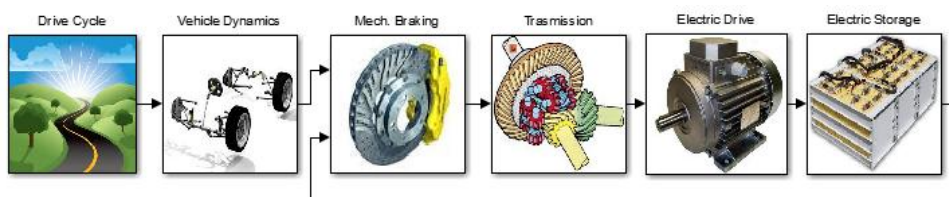


Figura 2: Modello Simulink del Veicolo puramente elettrico

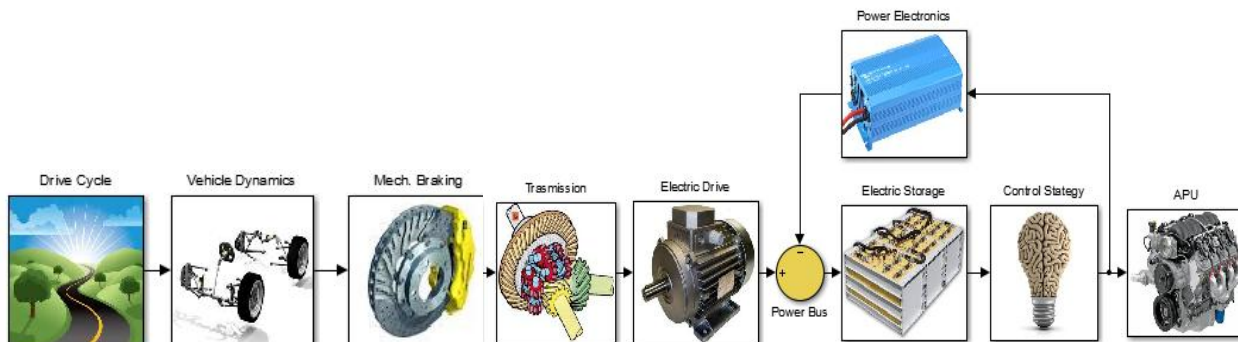


Figura 3: Modello Simulink dei veicoli ibridi serie

Il SW permette anche la valutazione complessive delle prestazioni dei mezzi dal pozzo alle ruote (Well to Wheels (WTW)), integrando i risultati delle simulazioni dal serbatoio alle ruote (Tank to Wheels (TTW)) su una missione definita con le banche dati UE (a cura del JRC [1]) che valutano i consumi energetici e le emissioni di CO₂ dal pozzo al serbatoio, tenendo conto delle potenzialità connesse all'utilizzo di vettori energetici alternativi.

Nel complesso, quindi, i risultati della simulazione riguardano sia la variazione dinamica delle principali variabili operative, sia le prestazioni energetiche globali dei principali componenti della catena cinematica all'interno della missione complessiva del veicolo. In particolare, questi ultimi risultati sono rappresentati graficamente in maniera del tutto automatizzata da una rappresentazione di tipo Sankey dei flussi energetici, (nelle fasi di trazione e quelle rigenerative).

L'approccio modellistico fin qui descritto è stato soggetto negli scorsi anni ad una intensa attività di validazione per quanto riguarda la simulazione di veicoli convenzionali e puramente elettrici. In questo anno di lavoro si è anche operata una validazione dei modelli realizzati per la simulazione di veicoli ibridi serie. In particolare, tramite estesi contatti con la ditta costruttrice, che ha messo a disposizione risultati sperimentali su missioni di prova, si è verificata la precisione del modello nella simulazione di un EPT Horus in configurazione ibrida. Altre estese verifiche dell'approccio modellistico si sono realizzate sulla base di numerose prove sperimentali effettuate su un piccolo veicolo ibrido serie realizzato dell'ENEA e noto come UrbE: la dimensione del veicolo, infatti, non è significativa per verificare la capacità previsionale del modello. Lo stesso approccio modellistico si può ritenere pertanto valido anche per veicoli heavy duty di grande taglia.

2.2 Sulla simulazione delle prestazioni energetiche di mezzi ibridi per il TPL

Lo strumento SW sviluppato è stato quindi utilizzato per simulare autobus ibridi in analogia con quanto fatto lo scorso anno di attività con i veicoli elettrici e convenzionali diesel. Il confronto tra le varie configurazioni di propulsione viene effettuato in termini di consumo specifico di carburante, utilizzando un approccio consolidato tramite la procedura CorinAIR-Copert (approccio riconosciuto all'interno dell'Unione europea [2]).

Come accennato, più in dettaglio, il SW derivato è stato qui utilizzato per determinare il consumo specifico di carburante di autobus di quattro diverse taglie (che vanno dai minibus al bus articolato) in funzione della velocità media di viaggio durante il servizio, carico trasportato e pendenza media della missione.

Secondo le procedure CORINAIR, infatti, le curve di consumo sono ottenute sulla base di dati sperimentali e/o simulazioni di una serie di missioni standard con velocità di servizio media variabile. I risultati vengono quindi elaborati per ottenere curve di consumo specifiche a seconda anche della pendenza della missione e del carico del veicolo.

Pertanto, nell'attività qui riportata, un approccio simile è stato utilizzato simulando autobus convenzionali Diesel, ibridi in serie e completamente elettrici su una serie di 23 missioni reali con velocità di crociera media diversa: i dati sono stati misurati sperimentalmente dall'ENEA (Agenzia nazionale per l'energia, ambiente e nuove tecnologie) su veri autobus circolanti a Ravenna, Bologna e Torino.

I profili di velocità delle 23 missioni sono riportati nelle Figure 4-6, mentre le principali caratteristiche generali dei veicoli sono riprese nella Tabella 1.

TORINO			RAVENNA			BOLOGNA					
Duration	Mean V	Distance	Duration	Mean V	Distance	Duration	Mean V	Distance			
s	km/h	km	s	km/h	km	s	km/h	km			
T-S1	1169	10,4	3,4	R-S1	6379	22,0	39,1	B-S1	2585	14,9	10,7
T-S2	925	13,3	3,4	R-S2	2903	24,4	19,7	B-S2	2801	15,3	11,9
T-S3	2092	11,7	6,8	R-S3	2958	23,9	19,6	B-S3	2772	16,8	13,0
T-S4	1090	11,4	3,5	R-S4	2950	23,9	19,6	B-S4	2667	16,6	12,3
T-S5	1034	11,7	3,4	R-S5	3059	23,1	19,6				
T-S6	1063	11,7	3,4	R-S6	3078	22,9	19,6				
T-S7	995	12,1	3,4	R-S7	3248	21,7	19,6				
T-S8	1005	12,3	3,4	R-S8	6023	22,0	36,8				
T-D	2123	19,6	11,6	R-S9	3680	27,4	28,0				
T-R	2292	17,4	11,1								

Tabella 1 – Caratteristiche dei profili dimissione

Nelle 23 missioni, è stato simulato il comportamento di 4 bus di dimensioni diverse (MINI, MIDI, FULL e ARTICOLATO). Le caratteristiche principali dei veicoli simulati sono riassunte nella Tabella 2.

	Vehicle LENGTH	WEIGHT (without ESS)	POWER ICE	POWER El. Motor	ESS Capacitance	MAX Passengers
	m	t	kW	kW	kWh	-
MINI	6	4,0	85	60	70	32
MIDI	8	6,7	165	120	180	44
FULL	12	10,5	210	160	210	86
ARTICULATED	18	15,0	230	200	230	126

Tabella 2 – Principali caratteristiche dei veicoli simulati

Mission Profiles: Speed [km/h] Vs Time [s]

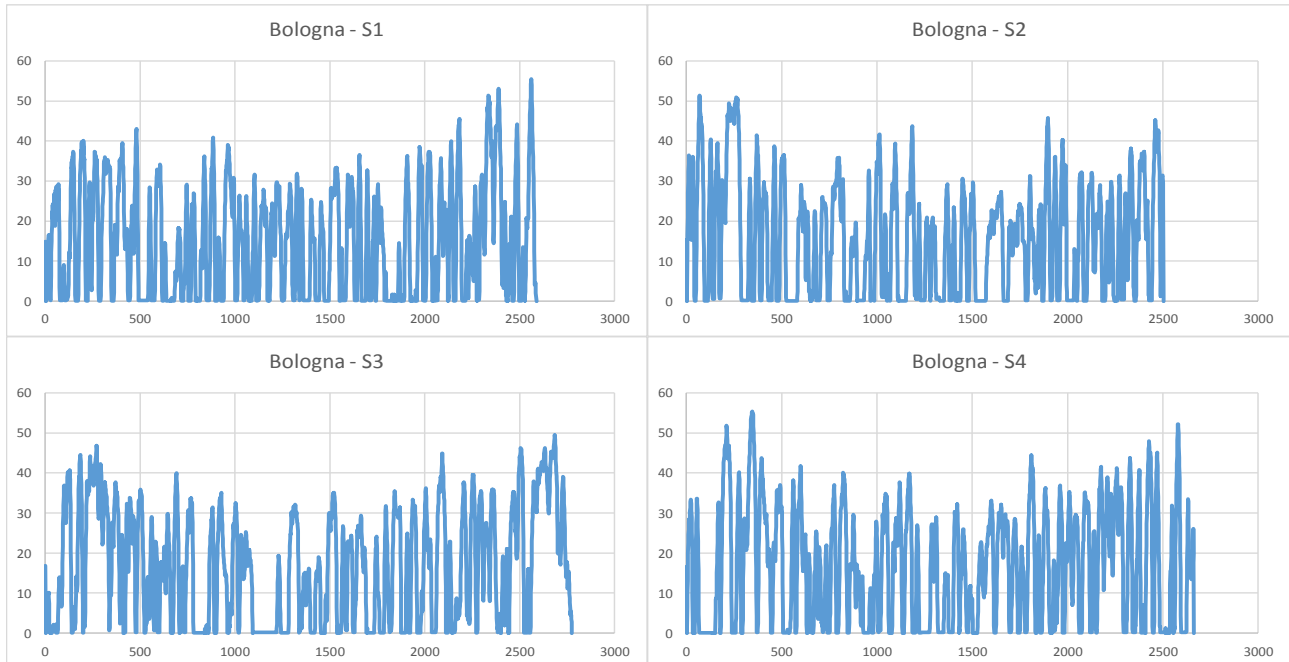


Figure 4 – Mission Profiles measured in Bologna

Mission Profiles: Speed [km/h] Vs Time [s]

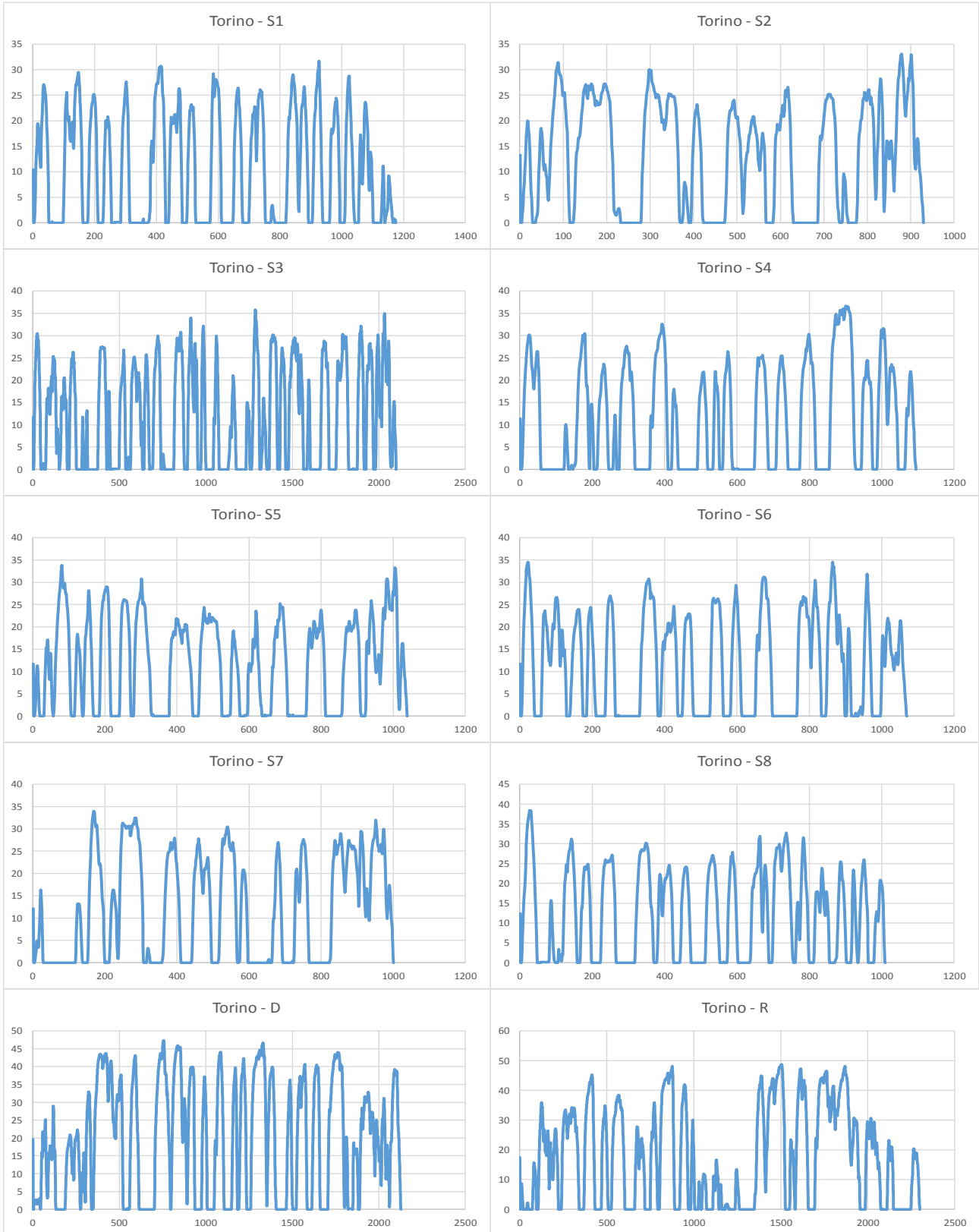


Figure 5 – Mission Profiles measured in Turin (Torino)

Mission Profiles: Speed [km/h] Vs Time [s]

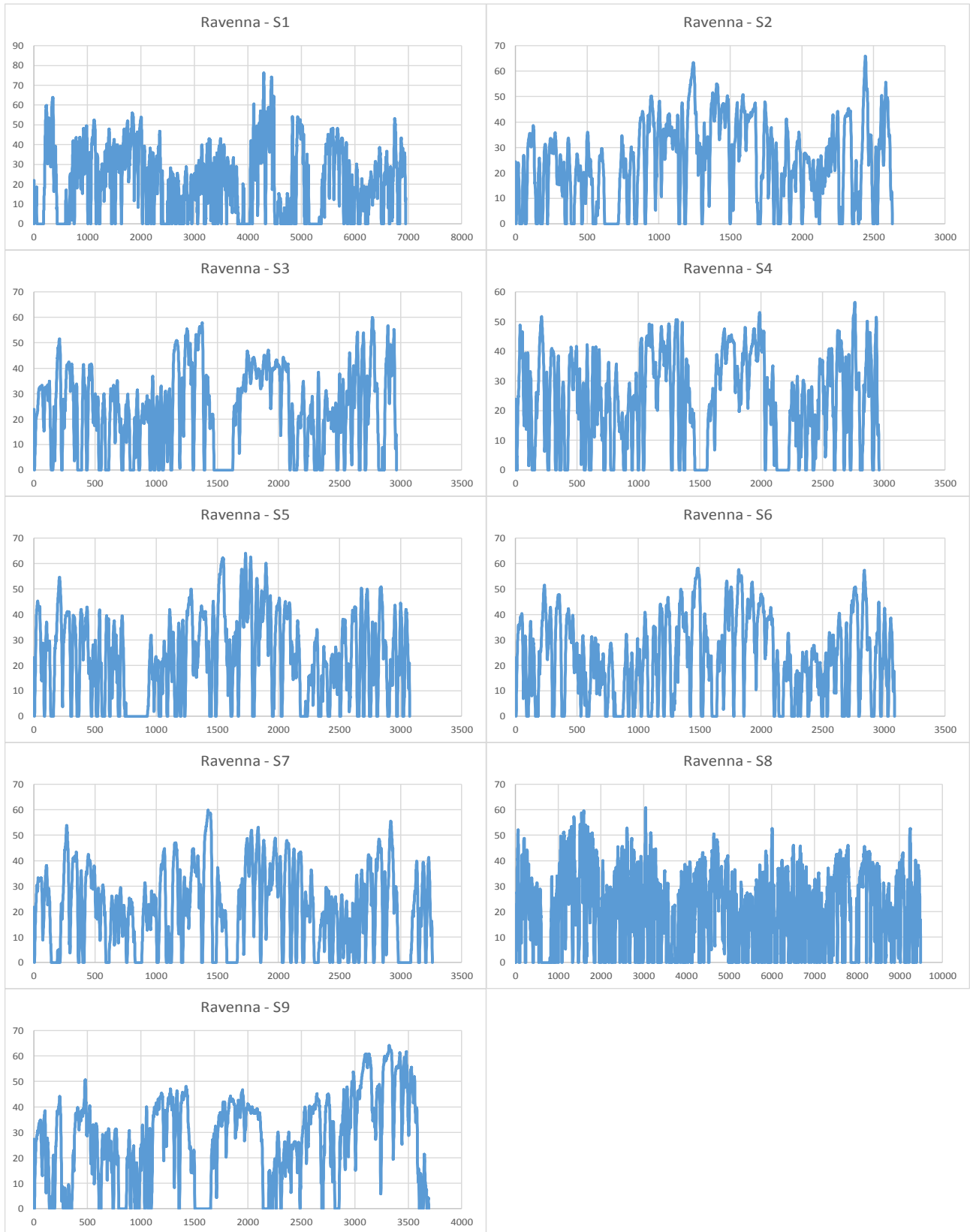


Figure 6 – Mission Profiles measured in Ravenna

Come consigliato nella procedure CORINAIR, tutte le simulazioni sono state ripetute variando anche la pendenza media del percorso (-4, -2, 0, 2, 4%) ed il carico passeggeri trasportato durante il servizio: 0, 50 e 100%, con rispetto alla capacità massima dei vari veicoli.

Questo approccio ha portato a quasi 2500 diverse configurazioni, corrispondenti a tutte le possibili combinazioni di pendenza (5 valori: -4, -2, 0, 2, 4), carico (0, 50, 100%), configurazione (Mini, Midi, Full, Articulated), sistema di trazione Ibrido, su tutti i 23 cicli misurati a Ravenna, Torino e Bologna. I risultati ottenuti si aggiungono alle circa 5000 simulazioni effettuate lo scorso anno per i veicoli convenzionali e puramente elettrici.

Di seguito, per brevità, possono essere inclusi solo i principali risultati di questa attività. Tuttavia, tutti i risultati di simulazione, così come i dati di input utilizzati per le simulazioni, sono raccolti in un database di pubblico dominio e possono essere richiesti al DIIE dell'Università dell'Aquila ovvero al Laboratorio di Sistemi e Tecnologie per la Mobilità e l'Accumulo dell'ENEA, al quale sono stati trasferiti in conformità con l'accordo di collaborazione siglato.

La Figura 7 descrive l'influenza della pendenza del percorso e del tipo di sistema di propulsione sul fabbisogno energetico delle ruote. Tutti i dati sono relativi ad una stessa missione (media tra le 23 in termini di velocità media di percorrenza), al bus di dimensioni FULL e al carico utile del 50%: questa configurazione, rappresentando una situazione media, è stata scelta come riferimento per la discussione sull'influenza dei parametri.

Limitando l'attenzione alle condizioni del terreno pianeggiante (parte centrale della figura), la figura mostra la differenza di fabbisogno energetico per km (che dipende ancora dal peso del veicolo) sull'architettura di propulsione scelta: il fabbisogno energetico alle ruote, infatti, aumenta leggermente passando dal bus convenzionale più leggero (che richiede 865 Wh/km su un terreno piano) alla sua versione ibrida (907) e infine al bus BEV (991). Il recupero di energia attraverso la frenata rigenerativa riesce ampiamente a compensare questo incremento (recuperando 278 Wh/km nella configurazione ibrida (HybICE) e 297 nel bus elettrico (BEV).

Quindi, spostandosi "indietro" verso il serbatoio, il veicolo convenzionale è gravato anche dalle perdite dovute al funzionamento al minimo del motore a combustione interna (ICE) MCI ed alla sua bassa efficienza in funzionamento pienamente transitorio (24,7%), rendendo il fabbisogno energetico del serbatoio di 3637 Wh/km. Integrando i dati del JRC sulle perdite di energia aggiuntive di Well to Tank (WTT) (+ 20%, [1]), i fabbisogni energetici complessivi di WTW raggiungono per il veicolo convenzionale i 4643 Wh/km.

Nella configurazione HybICE, le perdite al minimo sono evitate e l'ICE (quasi costantemente utilizzato nel suo punto di massima efficienza, utilizzato come unità di potenza ausiliaria, APU) aumenta la sua efficienza fino al 31,7%. Tuttavia, dalla propulsione elettrica vengono introdotte ulteriori perdite (84,3% di efficienza media durante le fasi di trazione). Il fabbisogno energetico complessivo del serbatoio è di 2865 Wh/km. Nel computo viene fatto l'ipotesi di una piena ricarica della batteria a bordo effettuata dall'APU (il bilancio energetico di ESS si chiude a 0). I requisiti WTW salgono quindi a 3438.

Infine, la figura mostra che in configurazione BEV i flussi energetici sono molto più efficienti, portando a un fabbisogno di energia TTW di 909 Wh/km (80% in meno rispetto alla configurazione CONV). Tuttavia, l'utilizzo di energia elettrica come combustibile determina elevate perdite nel percorso WTT (+ 226% secondo il JRC), facendo aumentare il fabbisogno energetico WTW fino a 2963 Wh/km sulla base del WTW (rimanendo ancora del 36% inferiore rispetto al convenzionale). Ovviamente, queste ultime perdite del WTT dipendono fortemente dal mix locale nella produzione di energia elettrica (i dati utilizzati sono relativi alla condizione di riferimento del mix UE [1]).

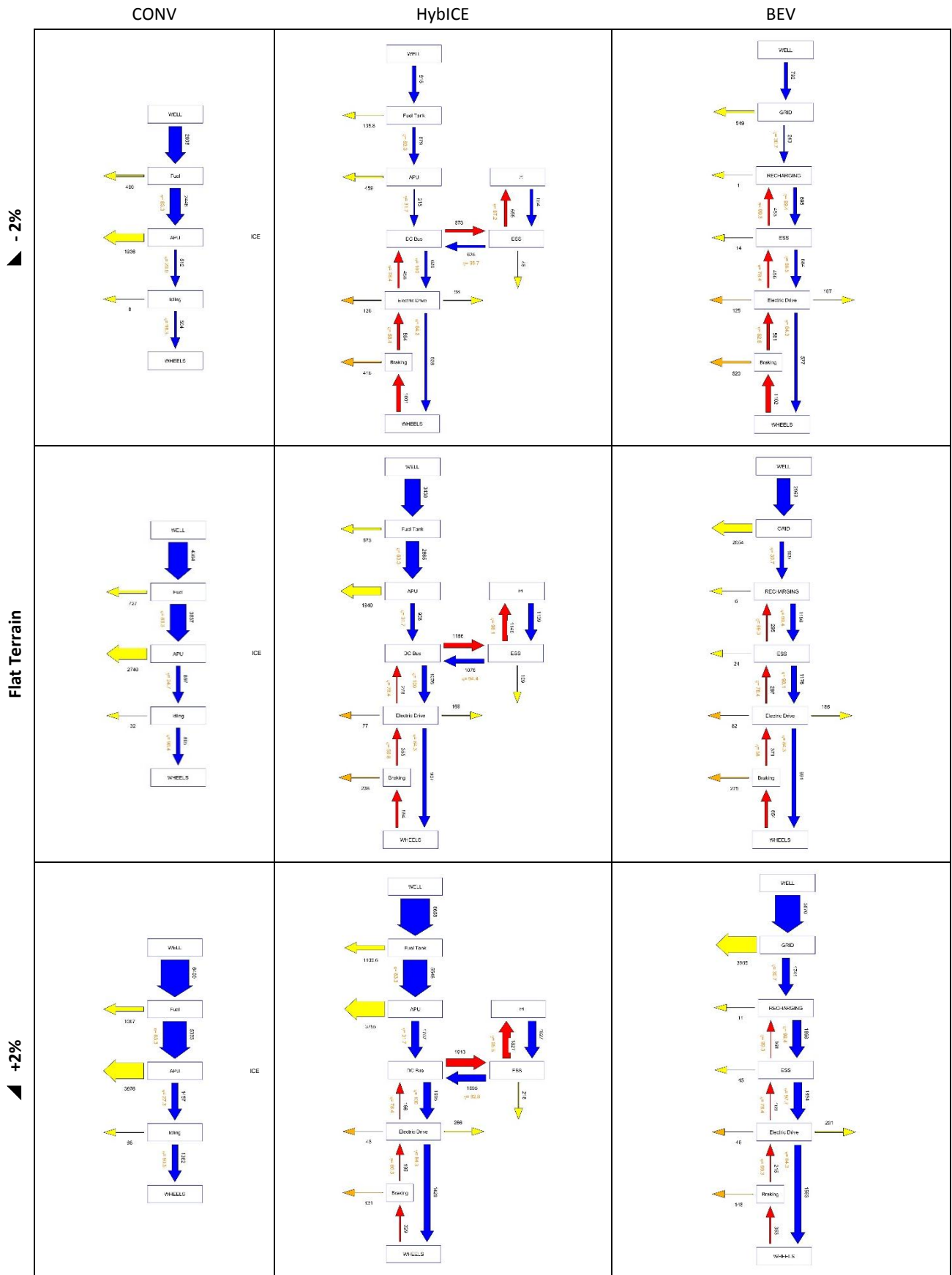


Figura 7 – FULL Bus; Path “B3”; 50% Carico: Effetto della pendenza e del sistema di prop. sui flussi energetici

I vantaggi delle configurazioni HybICE e BEV rispetto al CONV dipendono fortemente anche dalla pendenza della strada, come mostrato dalle parti superiore e inferiore della figura. L'influenza del recupero di energia attraverso la frenata rigenerativa è molto più alta quando la strada scende (pendenza del -2%): il bus HybICE recupera 126 dei 528 wh/km richiesti per la corsa; circa lo stesso accade per il bus BEV (125 su 577).

Esattamente il contrario accade se la strada sale (pendenza + 2%): HybICE recupera solo 156 su 1429 Wh/km; il BEV recupera 169 su 1563. Questo rende il fabbisogno energetico del veicolo HybICE più alto rispetto al CONV (5548 vs 5333 WTW), mentre BEV ha ancora un alto vantaggio rispetto ai sistemi convenzionali quando si considera il consumo di energia TTW (1741 vs 5333). Tuttavia, la maggior parte del vantaggio si perde considerando il consumo di energia WTW al mix-UE (5676 vs 6400 Wh/km).

La successiva Figura 8 mostra invece gli effetti della missione di prova (e quindi della velocità media di percorrenza): vengono confrontati 3 casi, passando dalla missione T1 (con una bassa velocità media di servizio di 10 km/h, caratteristica degli ambienti congestionati), al ciclo medio di riferimento B3 (velocità 17 km/h), fino ad un ciclo R9 molto più veloce (misurato in un servizio di centro città a corsia veloce).

Come mostrato dalla Figura, l'aumento della velocità media di servizio tende a ridurre il fabbisogno energetico. Comunque, nonostante gli stessi comportamenti decrescenti siano mostrati per tutte le configurazioni di propulsione, un'influenza molto più alta della velocità di servizio media sul consumo di energia è dimostrata dai sistemi convenzionali rispetto alle configurazioni ibride e completamente elettriche. In particolare, il fabbisogno energetico è molto più stabile per le configurazioni HybICE e BEV, dove la presenza di azioni di rigenerazione può compensare (e, in alcuni casi, superare) l'incremento del fabbisogno energetico specifico alle ruote previsto quando la velocità media di servizio diminuisce. Lo stesso comportamento è confermato in tutte le simulazioni eseguite.

La figura 9 mostra invece l'effetto della dimensione del veicolo sul consumo energetico specifico. Ovviamente, il fabbisogno energetico in Wh/km aumenta fortemente passando dai bus MINI a quelli articolati (ART) (si sottolinea come in Figura, per esigenze grafiche, siano state utilizzate diverse scale per le diverse taglie di veicoli).

Tuttavia, la Figura mostra chiaramente che il vantaggio di HybICE e BEV rispetto al CONV aumenta tanto più aumenta la dimensione del veicolo. In particolare, per gli autobus di dimensioni MINI, a seconda dei cicli particolari e della qualità stradale, i bus HybICE e BEV possono divenire paragonabili con il CONV in termini di fabbisogno energetico WTW.

Le figure 10-13 riassumono tutti i casi simulati riportando in maniera il più possibile sintetica il consumo energetico specifico TTW calcolato (kWh/km) per tutte le configurazioni simulate. E' il caso di ricordare e sottolineare nuovamente come già durante le attività dello scorso anno, per i bus convenzionali e le taglie dimensionali MIDI, FULL e ARTICOLATED, i dati calcolati sono stati anche confrontati con quelli presentati nella relazione CORINAIR. I risultati di questo confronto hanno mostrato un buon accordo (l'errore è sempre inferiore al 10%) tra i dati CORINAIR (basati su specifici cicli di guida, non resi disponibili con il necessario dettaglio) e quelli calcolati dal SW proposto (usando i 23 descritti cicli di funzionamento): si ricorda che non sono disponibili dati CORINAIR per veicoli ibridi ed elettrici, né per bus convenzionali di piccola taglia (MINI).

In relazione alle Figure 10-13, come considerazione di carattere generale, si può sottolineare che tutte le curve riportate confermano l'andamento dei parametri di influenza sul consumo di energia che è già stato discusso relativamente ai dati presentati nelle precedenti Figure 7-9.

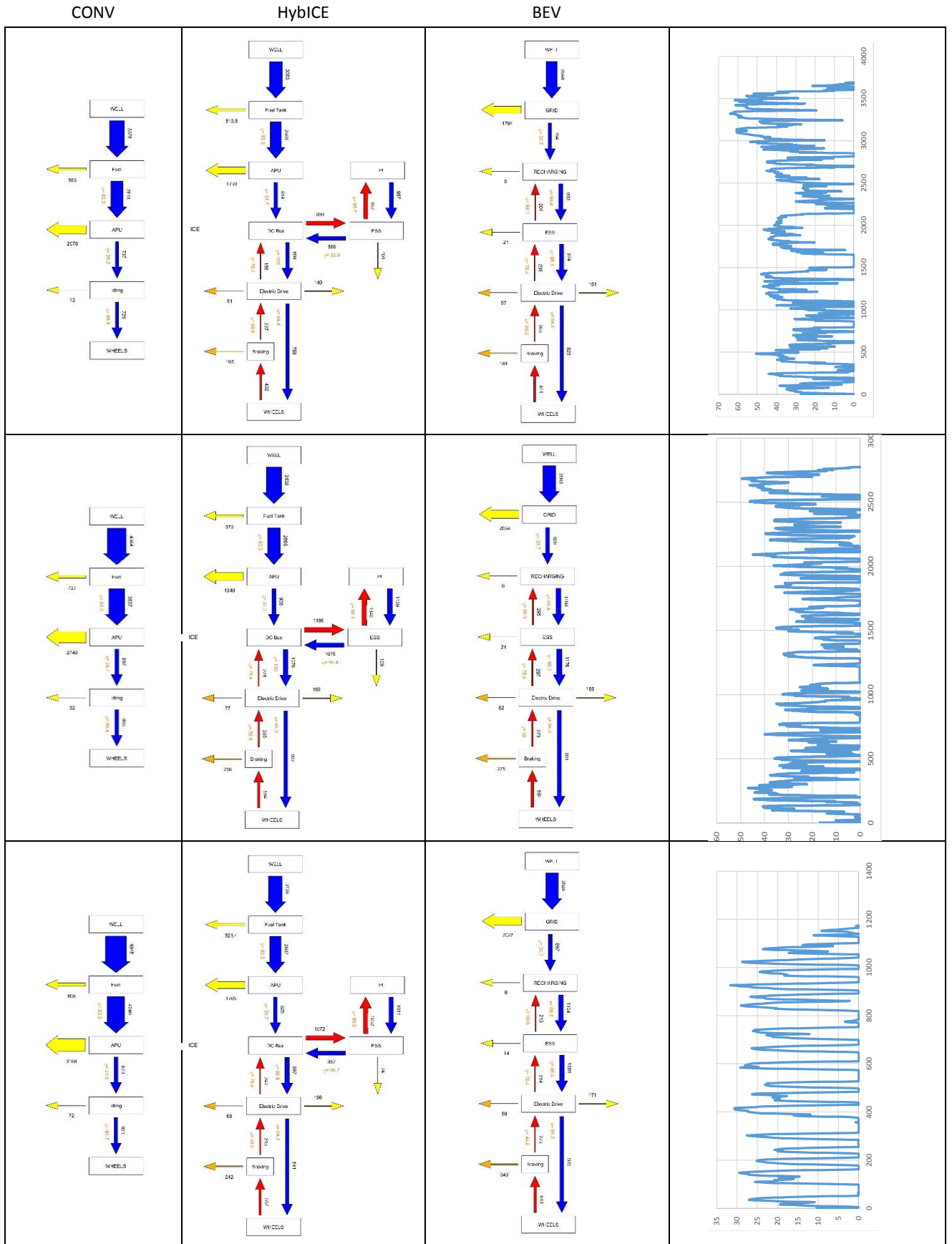


Figura 8 – FULL Bus; 50% Carico: Effetto della velocità media e del sistema di prop. sui flussi energetici

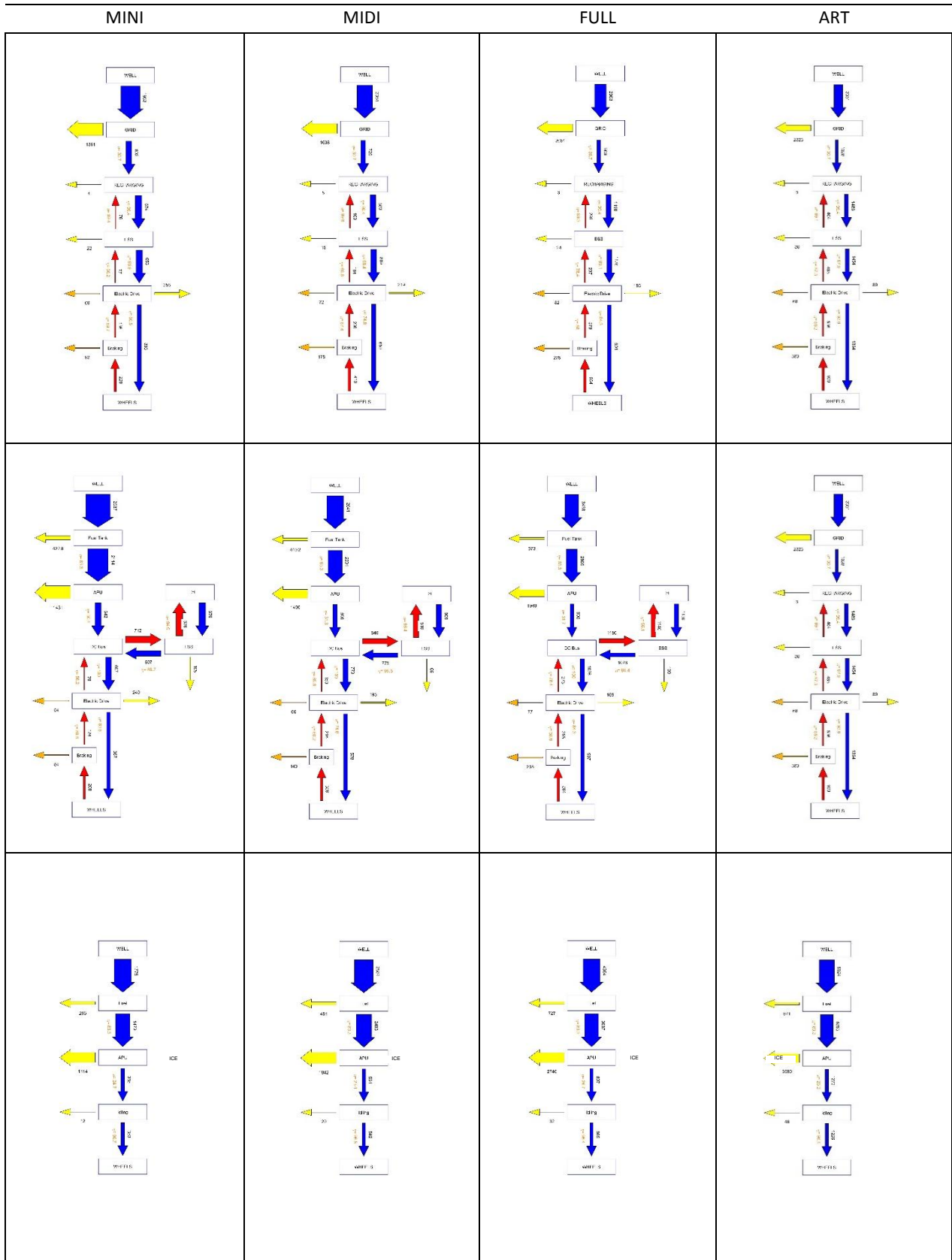


Figura 9 – Missione “B3”; 50% Carico: Effetto della taglia e del sistema di prop. sui flussi energetici

Le figure 10-13 includono anche la rappresentazione di tutte le curve di “fitting” tramite regressione esponenziale che descrivono la variazione del consumo specifico di energia TTW con la velocità media di servizio. Come intuibile nelle Figure, questa modalità di analisi e “fitting” dei dati non appare particolarmente soddisfacente poiché la velocità di servizio media del veicolo sembra non essere correlata univocamente al consumo di energia. In ogni caso, questo approccio è consolidato nella procedura CorinAIR, ampiamente utilizzata all'interno dell'Unione europea [2].

Tutti i coefficienti di queste curve sono riportati nella Tabella 3: il consumo di energia TTW calcolato dall'approccio CorinAIR, infatti, può essere la base per valutare tutti i costi di esercizio dei veicoli, nonché i costi indiretti associati alle loro emissioni di CO₂ e inquinanti. Questo, a sua volta, è un elemento cruciale nella valutazione del Total Cost of Ownership (TCO) dei veicoli, che è il parametro principale che oggi viene utilizzato dalle autorità di trasporto locali per decidere se introdurre o meno mezzi di trasporto innovativi all'interno delle proprie flotte.

Le curve calcolate sono state quindi utilizzate nell'ambito di una collaborazione con ENEA (Agenzia Nazionale per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile) per la realizzazione di un sistema integrato di supporto alle decisioni (DSS) che le autorità locali di trasporto potranno utilizzare nella definizione delle loro politiche di gestione della flotta.

Guardando le Figure 10-13, è chiaro che la convenienza di una configurazione su un'altra (specialmente quando sono inclusi i costi) non è evidente, ma deve essere valutata in ogni missione nel servizio reale. Tuttavia, al fine di fornire alcune considerazioni riassuntive, i dati riportati nelle figure 10-13 sono stati combinati utilizzando alcuni fattori di ponderazione ragionevoli che danno una possibile incidenza dei vari parametri durante l'utilizzo reale dei mezzi.

A tal fine, volendo simulare un utilizzo medio dei mezzi durante il loro servizio di linea, si sono ipotizzati fattori di ponderazione del 15, 70 e 15% rispettivamente per le condizioni di carico variabili da 0 a 50, a 100%. Fattori di ponderazione del 10, 20, 40, 20 e 10% sono stati invece utilizzati per la ricorrenza media delle pendenze stradali rispettivamente del -4, a -2, 0, +2, + 4%.

Applicando tali pesi alle curve riportate nella Figura 10-13, sono stati calcolati gli andamenti medi riportati nella Figura 14. Questi mostrano più chiaramente ciò che è stato già sottolineato discutendo quanto riportato in Figura 9: il vantaggio delle configurazioni BEV rispetto a quelle HybICE e CONV aumenta all'aumentare della taglia del veicolo.

In particolare, al variare della velocità media di percorrenza, limitando l'attenzione ai veicoli di piccola taglia (MINI) si evidenzia ancora come le configurazioni BEV e HybICE perdono parte o tutto il loro vantaggio rispetto ai veicoli convenzionali. Va considerato, tuttavia, che questi autobus sono particolarmente utili nei centri storici molto affollati dove l'inquinamento è un aspetto estremamente vincolante: le configurazioni BEV infatti non generano emissioni locali, ma anche quelle HybICE hanno emissioni specifiche (come vedremo anche nel seguito) generalmente molto più limitate rispetto ai veicoli convenzionali e, ove necessario, in ambiti territoriali limitati, possono operare in modalità puramente elettrica. La riduzione del consumo di energia e del costo della proprietà dei veicoli non è quindi certamente l'unico obiettivo primario in questi specifici ambiti.

I dati nella Figura 14 possono quindi essere estesi su base WTW per valutare l'effetto del consumo di energia e delle emissioni di CO₂ connesse alla produzione e distribuzione del vettore di energia utilizzato. A tale riguardo, le Figure 15, 16 e 17 mostrano il consumo di energia WTW e le emissioni di CO₂.

MINI BUS - TTW Energy Consumption

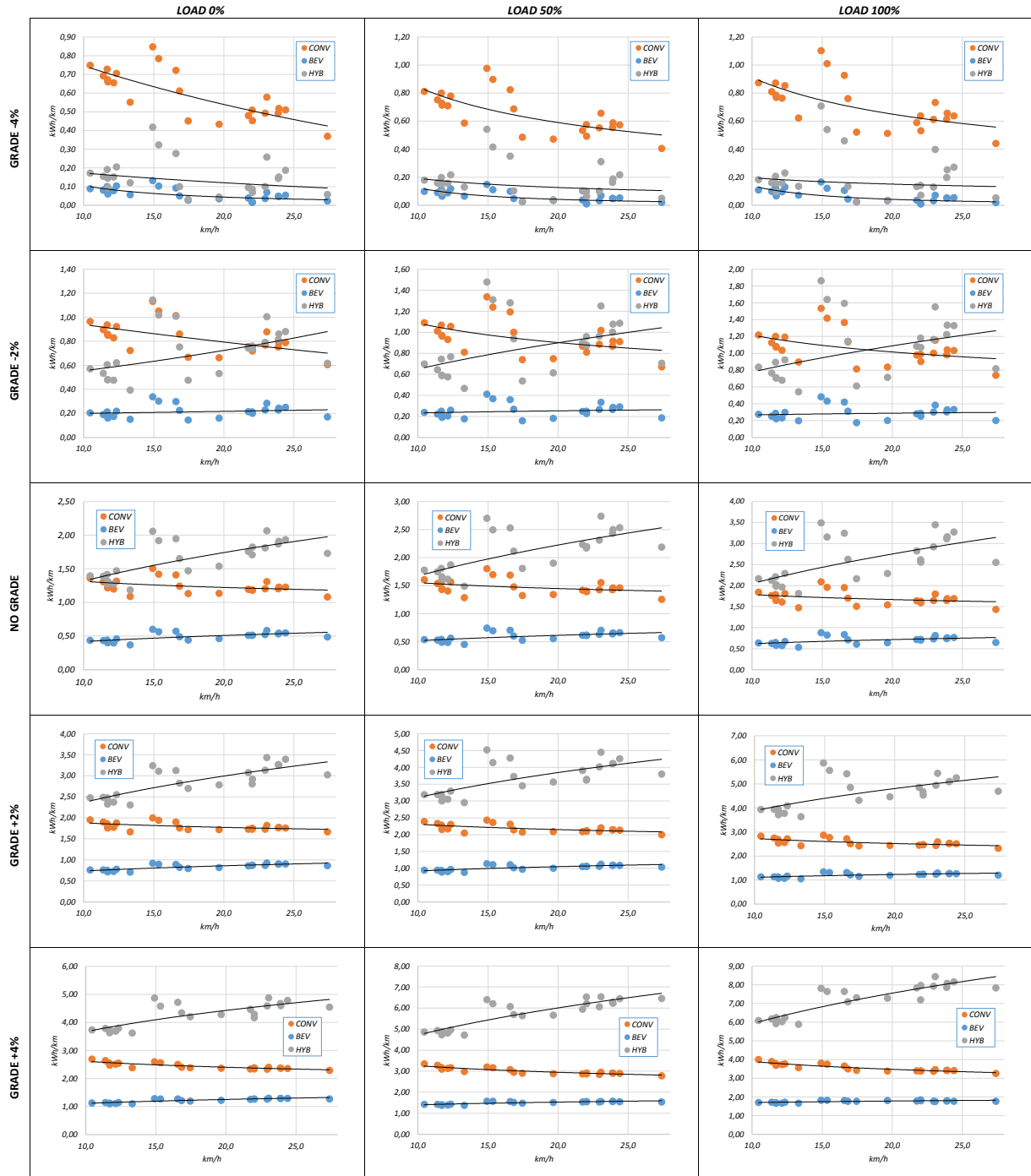


Figura 10 – Consumo energetico specifico TTW per MINI bus Convenzionali, Ibridi ed Elettrici

MIDI BUS - TTW Energy Consumption

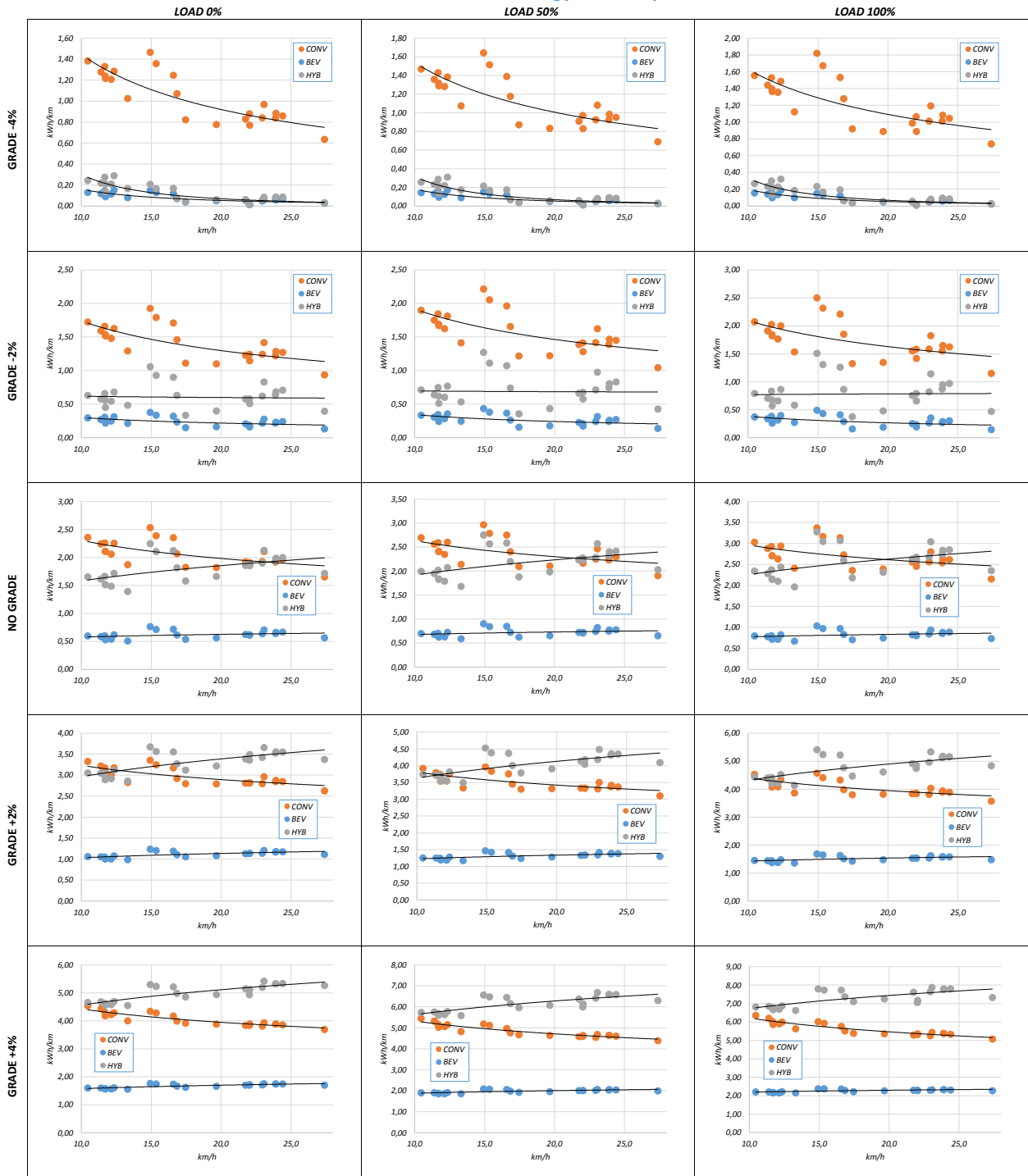


Figura 11 – Consumo energetico specifico TTW per MIDI bus Convenzionali, Ibridi ed Elettrici

FULL BUS - WTW Energy Consumption

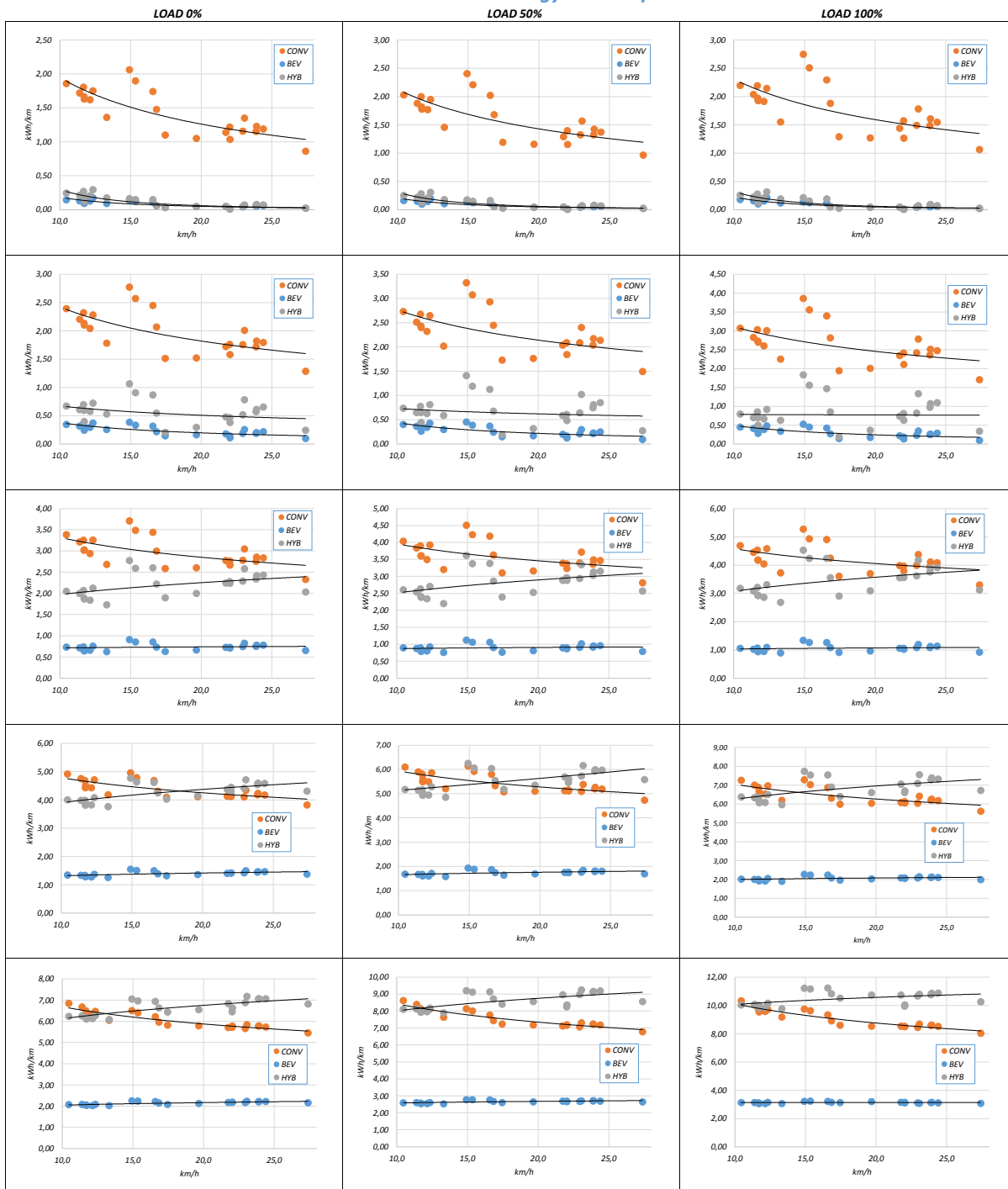


Figura 12 – Consumo energetico specifico TTW per FULL bus Convenzionali, Ibridi ed Elettrici

ARTICULATED BUS - TTW Energy Consumption

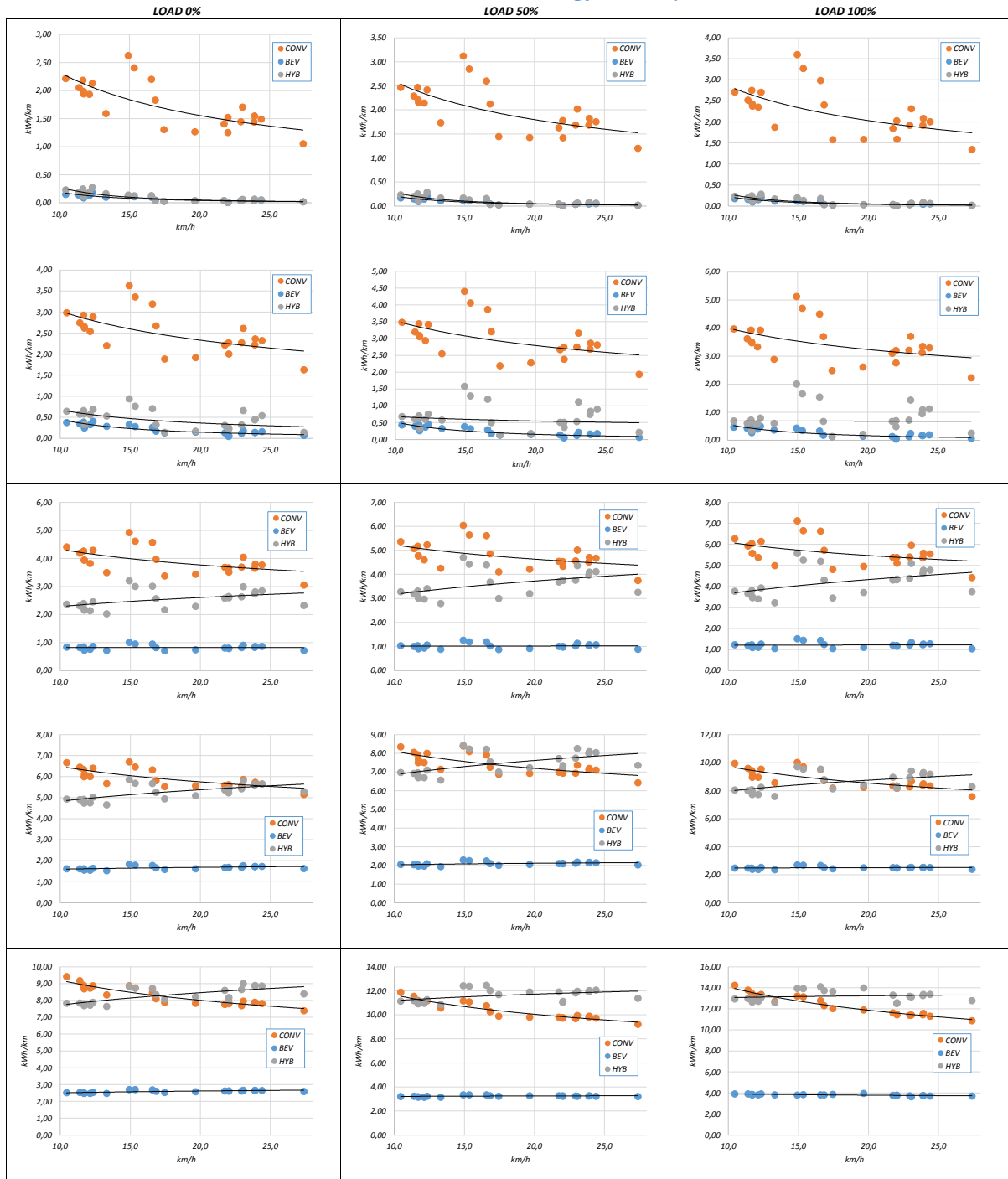


Figura 13 – Consumo energetico specifico TTW per bus ARTICOLATI Convenzionali, Ibridi ed Elettrici

Tabella 3 – Coefficienti di regressione esponenziale per il Consumo energetico specifico TTW

TTW Energy Consumption Correlations

$$TTW_{EC} [kWh/km] = \alpha * e^{\beta * v \text{ mean [km/h]}}$$

CONVENTIONAL MINI BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	1,031E+00	-3,246E-02	1,108E+00	-3,076E-02	1,182E+00	-2,939E-02
-2%	1,111E+00	-1,680E-02	1,261E+00	-1,636E-02	1,407E+00	-1,595E-02
0	1,391E+00	-6,304E-03	1,646E+00	-6,288E-03	1,893E+00	-6,220E-03
2%	1,966E+00	-5,017E-03	2,437E+00	-6,062E-03	2,895E+00	-6,751E-03
4%	2,777E+00	-7,082E-03	3,505E+00	-8,428E-03	4,224E+00	-9,503E-03

CONVENTIONAL MISTI BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	2,019E+00	-3,829E-02	2,108E+00	-3,602E-02	2,201E+00	-3,418E-02
-2%	2,172E+00	-2,514E-02	2,357E+00	-2,326E-02	2,544E+00	-2,181E-02
0	2,586E+00	-1,298E-02	2,927E+00	-1,178E-02	3,272E+00	-1,101E-02
2%	3,508E+00	-9,360E-03	4,126E+00	-9,090E-03	4,768E+00	-9,206E-03
4%	4,805E+00	-9,582E-03	5,806E+00	-1,015E-02	6,808E+00	-1,067E-02

CONVENTIONAL FULL BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	2,692E+00	-3,694E-02	2,873E+00	-3,406E-02	3,060E+00	-3,186E-02
-2%	3,017E+00	-2,469E-02	3,380E+00	-2,230E-02	3,746E+00	-2,065E-02
0	3,733E+00	-1,316E-02	4,401E+00	-1,176E-02	5,048E+00	-1,072E-02
2%	5,272E+00	-9,993E-03	6,475E+00	-9,948E-03	7,684E+00	-9,908E-03
4%	7,333E+00	-1,077E-02	9,285E+00	-1,138E-02	1,121E+01	-1,202E-02

CONVENTIONAL ART BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	3,148E+00	-3,428E-02	3,425E+00	-3,143E-02	3,703E+00	-2,931E-02
-2%	3,707E+00	-2,264E-02	4,239E+00	-2,042E-02	4,743E+00	-1,868E-02
0	4,825E+00	-1,211E-02	5,764E+00	-1,067E-02	6,669E+00	-9,714E-03
2%	7,089E+00	-1,018E-02	8,659E+00	-1,014E-02	1,072E+01	-1,109E-02
4%	1,016E+01	-1,154E-02	1,298E+01	-1,243E-02	1,593E+01	-1,429E-02

BEV MINI BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	1,989E-01	-7,396E-02	2,702E-01	-9,088E-02	3,243E-01	-9,960E-02
-2%	1,844E-01	8,172E-03	2,235E-01	5,896E-03	2,603E-01	4,779E-03
0	3,675E-01	1,570E-02	4,633E-01	1,353E-02	5,643E-01	1,147E-02
2%	6,228E-01	1,263E-02	8,446E-01	1,055E-02	1,041E+00	8,110E-03
4%	1,023E+00	9,790E-03	1,318E+00	7,164E-03	1,642E+00	3,834E-03

BEV MISTI BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	3,510E-01	-9,169E-02	4,293E-01	-1,033E-01	4,997E-01	-1,085E-01
-2%	3,338E-01	-2,768E-02	4,487E-01	-3,023E-02	5,032E-01	-3,119E-02
0	5,508E-01	6,084E-03	6,475E-01	5,683E-03	7,453E-01	5,324E-03
2%	9,684E-01	7,580E-03	1,159E+00	6,841E-03	1,357E+00	5,917E-03
4%	1,493E+00	6,198E-03	1,800E+00	5,167E-03	2,126E+00	3,655E-03

BEV FULL BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	4,752E-01	-1,106E-01	5,781E-01	-1,201E-01	6,602E-01	-1,265E-01
-2%	6,129E-01	-5,551E-02	7,395E-01	-5,933E-02	8,305E-01	-5,997E-02
0	7,632E-01	2,348E-03	8,584E-01	2,567E-03	1,020E+00	2,273E-03
2%	1,263E+00	5,667E-03	1,598E+00	4,654E-03	1,957E+00	2,919E-03
4%	1,969E+00	4,666E-03	2,525E+00	2,806E-03	3,130E+00	1,386E-03

BEV ART BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	5,524E-01	-1,229E-01	6,425E-01	-1,315E-01	7,121E-01	-1,369E-01
-2%	1,015E+00	-9,472E-02	1,236E+00	-1,012E-01	1,371E+00	-1,026E-01
0	8,284E-01	4,815E-04	1,015E+00	2,632E-04	1,218E+00	1,801E-04
2%	1,540E+00	-3,09E-03	1,986E+00	2,918E-03	2,468E+00	6,332E-04
4%	2,438E+00	3,419E-03	3,197E+00	8,187E-04	4,019E+00	-2,849E-03

HYBRID MINI BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	2,464E-01	-3,593E-02	2,632E-01	-3,581E-02	2,435E-01	-2,367E-02
-2%	4,253E-01	2,661E-02	5,295E-01	2,553E-02	6,298E-01	2,634E-02
0	1,092E+00	2,256E-02	1,376E+00	2,319E-02	1,681E+00	2,381E-02
2%	2,013E+00	1,923E-02	2,688E+00	1,730E-02	3,388E+00	1,686E-02
4%	3,236E+00	1,513E-02	3,996E+00	1,973E-02	5,004E+00	1,989E-02

HYBRID MISTI BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	8,403E-01	-1,209E-01	9,256E-01	-1,264E-01	9,899E-01	-1,294E-01
-2%	6,445E-01	-3,789E-03	7,200E-01	-2,604E-03	7,782E-01	6,916E-05
0	1,426E+00	1,264E-02	1,739E+00	1,205E-02	2,049E+00	1,193E-02
2%	2,707E+00	1,084E-02	3,328E+00	1,044E-02	3,961E+00	1,022E-02
4%	4,210E+00	9,392E-03	5,214E+00	8,970E-03	6,291E+00	8,105E-03

HYBRID FULL BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	9,459E-01	-1,328E-01	9,849E-01	-1,370E-01	1,028E+00	-1,378E-01
-2%	8,348E-01	-2,433E-02	8,433E-01	-1,508E-02	8,154E-01	-3,052E-03
0	1,815E+00	1,037E-02	2,301E+00	1,106E-02	2,803E+00	1,161E-02
2%	3,618E+00	9,202E-03	4,683E+00	9,223E-03	5,844E+00	8,422E-03
4%	5,723E+00	8,017E-03	7,560E+00	7,036E-03	9,778E+00	3,666E-03

HYBRID ART BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	9,435E-01	-1,432E-01	9,881E-01	-1,455E-01	9,787E-01	-1,441E-01
-2%	1,057E+00	-5,199E-02	8,057E-01	-1,874E-02	7,078E-01	-1,945E-03
0	2,101E+00	1,034E-02	2,861E+00	1,268E-02	3,295E+00	1,309E-02
2%	4,491E+00	8,678E-03	6,393E+00	8,415E-03	7,512E+00	7,312E-03
4%	7,258E+00	7,412E-03	1,089E+01	3,519E-03	1,304E+01	6,681E-04

Tabella 4 – Coefficienti di regressione esponenziale per il Consumo energetico specifico BTW

WTW Energy Consumption Correlations

$$WTW EC [kWh/km] = \alpha * e^{\beta * v \text{ mean [km/h]}}$$

CONVENTIONAL MINI BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	1.237E+00	-3.246E-02	1.329E+00	-3.076E-02	1.418E+00	-2.919E-02
-2%	1.333E+00	-1.680E-02	1.513E+00	-1.636E-02	1.689E+00	-1.595E-02
0	1.669E+00	-6.304E-03	1.975E+00	-6.288E-03	2.272E+00	-6.220E-03
2%	2.360E+00	-5.017E-03	2.925E+00	-6.062E-03	3.474E+00	-6.751E-03
4%	3.333E+00	-7.082E-03	4.206E+00	-8.428E-03	5.069E+00	-9.503E-03

BEV MINI BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	6.485E-01	-7.396E-02	8.809E-01	-9.088E-02	1.057E+00	-9.960E-02
-2%	6.012E-01	8.172E-03	7.285E-01	5.896E-03	8.486E-01	4.779E-03
0	1.198E+00	1.570E-02	1.510E+00	1.353E-02	1.940E+00	1.147E-02
2%	2.161E+00	1.263E-02	2.753E+00	1.055E-02	3.392E+00	8.110E-03
4%	3.335E+00	9.790E-03	4.298E+00	7.164E-03	5.352E+00	3.894E-03

HYBRID MINI BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	2.957E-01	-3.939E-02	3.158E-01	-3.581E-02	2.922E-01	-2.367E-02
-2%	5.104E-01	2.661E-02	6.354E-01	2.553E-02	7.558E-01	2.634E-02
0	1.310E+00	2.256E-02	1.652E+00	2.319E-02	2.017E+00	2.381E-02
2%	2.415E+00	1.923E-02	3.226E+00	1.730E-02	4.065E+00	1.686E-02
4%	3.884E+00	1.513E-02	4.795E+00	1.973E-02	6.005E+00	1.989E-02

CONVENTIONAL MIDI BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	2.423E+00	-3.829E-02	2.529E+00	-3.602E-02	2.641E+00	-3.418E-02
-2%	2.606E+00	-2.514E-02	2.828E+00	-2.326E-02	3.053E+00	-2.181E-02
0	3.103E+00	-1.298E-02	3.513E+00	-1.178E-02	3.926E+00	-1.101E-02
2%	4.209E+00	-9.360E-03	4.952E+00	-9.090E-03	5.722E+00	-9.206E-03
4%	5.766E+00	-9.582E-03	6.967E+00	-1.015E-02	8.170E+00	-1.067E-02

BEV MIDI BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	1.144E+00	-9.169E-02	1.399E+00	-1.013E-01	1.629E+00	-1.085E-01
-2%	1.251E+00	-2.788E-02	1.463E+00	-3.023E-02	1.640E+00	-3.119E-02
0	1.796E+00	6.084E-03	2.111E+00	5.683E-03	2.430E+00	5.324E-03
2%	3.157E+00	7.580E-03	3.779E+00	6.841E-03	4.425E+00	5.917E-03
4%	4.866E+00	6.198E-03	5.867E+00	5.167E-03	6.932E+00	3.655E-03

HYBRID MIDI BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	1.008E+00	-1.209E-01	1.111E+00	-1.264E-01	1.188E+00	-1.294E-01
-2%	7.734E-01	-3.789E-03	8.640E-01	-2.604E-03	9.338E-01	6.916E-05
0	1.712E+00	1.264E-02	2.086E+00	1.205E-02	2.459E+00	1.193E-02
2%	3.248E+00	1.084E-02	3.994E+00	1.044E-02	4.753E+00	1.022E-02
4%	5.052E+00	9.392E-03	6.257E+00	8.970E-03	7.549E+00	8.105E-03

CONVENTIONAL FULL BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	3.230E+00	-3.694E-02	3.447E+00	-3.406E-02	3.672E+00	-3.186E-02
-2%	3.620E+00	-2.469E-02	4.057E+00	-2.230E-02	4.496E+00	-2.065E-02
0	4.479E+00	-1.316E-02	5.282E+00	-1.176E-02	6.058E+00	-1.072E-02
2%	6.272E+00	-9.993E-03	7.770E+00	-9.948E-03	9.221E+00	-9.908E-03
4%	8.800E+00	-1.077E-02	1.114E+01	-1.138E-02	1.345E+01	-1.202E-02

BEV FULL BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	1.549E+00	-1.106E-01	1.885E+00	-1.201E-01	2.152E+00	-1.265E-01
-2%	1.998E+00	-5.551E-02	2.411E+00	-5.933E-02	2.707E+00	-5.997E-02
0	2.292E+00	2.348E-03	2.798E+00	2.567E-03	3.327E+00	2.273E-03
2%	4.118E+00	5.667E-03	5.208E+00	4.694E-03	6.381E+00	2.919E-03
4%	6.419E+00	4.666E-03	8.232E+00	2.806E-03	1.020E+01	1.386E-03

HYBRID FULL BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	1.099E+00	-1.323E-01	1.182E+00	-1.370E-01	1.233E+00	-1.378E-01
-2%	1.002E+00	-2.433E-02	1.012E+00	-1.508E-02	9.785E-01	-3.052E-03
0	2.178E+00	1.037E-02	2.761E+00	1.106E-02	3.364E+00	1.161E-02
2%	4.341E+00	9.202E-03	5.619E+00	9.223E-03	7.013E+00	8.422E-03
4%	6.868E+00	8.017E-03	9.072E+00	7.036E-03	1.173E+01	3.686E-03

CONVENTIONAL ART BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	3.778E+00	-3.428E-02	4.110E+00	-3.143E-02	4.443E+00	-2.931E-02
-2%	4.449E+00	-2.264E-02	5.087E+00	-2.042E-02	5.692E+00	-1.868E-02
0	5.790E+00	-1.211E-02	6.917E+00	-1.067E-02	8.003E+00	-9.714E-03
2%	8.507E+00	-1.018E-02	1.063E+01	-1.014E-02	1.286E+01	-1.109E-02
4%	1.219E+01	-1.154E-02	1.557E+01	-1.243E-02	1.912E+01	-1.429E-02

BEV ART BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	1.801E+00	-1.239E-01	2.095E+00	-1.315E-01	2.322E+00	-1.369E-01
-2%	3.310E+00	-9.472E-02	4.028E+00	-1.012E-01	4.471E+00	-1.026E-01
0	2.701E+00	-4.815E-04	3.310E+00	-2.632E-04	3.972E+00	-1.801E-04
2%	5.021E+00	4.309E-03	6.475E+00	2.918E-03	8.046E+00	6.332E-04
4%	7.948E+00	3.419E-03	1.042E+01	8.187E-04	1.310E+01	-2.849E-03

HYBRID ART BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	1.132E+00	-1.432E-01	1.186E+00	-1.455E-01	1.174E+00	-1.441E-01
-2%	1.269E+00	-5.196E-02	9.668E-01	-1.874E-02	8.494E-01	-1.945E-03
0	2.521E+00	1.034E-02	3.433E+00	1.268E-02	3.954E+00	1.309E-02
2%	5.390E+00	8.678E-03	7.672E+00	8.415E-03	9.014E+00	7.312E-03
4%	8.709E+00	7.412E-03	1.307E+01	3.519E-03	1.565E+01	6.681E-04

Tabella 5 – Coefficienti di regressione esponenziale per le Emissioni specifiche di CO2 WTW

CO2 Emissions Correlations

$$WTW\ CO_2 [g/km] = \alpha * e^{\beta * v} \text{ mean } [km/h]$$

CONVENTIONAL MINI BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	3,289E+02	-3,246E-02	3,533E+02	-3,076E-02	3,769E+02	-2,919E-02
-2%	3,544E+02	-1,680E-02	4,021E+02	-1,636E-02	4,489E+02	-1,595E-02
0	4,436E+02	-6,304E-03	5,249E+02	-6,288E-03	6,039E+02	-6,220E-03
2%	6,272E+02	-5,017E-03	7,774E+02	-6,062E-03	9,234E+02	-6,751E-03
4%	8,859E+02	-7,082E-03	1,118E+03	-8,428E-03	1,347E+03	-9,503E-03

BEV MINI BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	1,075E+02	-7,396E-02	1,460E+02	-9,088E-02	1,753E+02	-9,960E-02
-2%	9,965E+01	8,172E-03	1,208E+02	5,896E-03	1,407E+02	4,779E-03
0	1,986E+02	1,570E-02	2,504E+02	1,353E-02	3,049E+02	1,147E-02
2%	3,582E+02	1,263E-02	4,564E+02	1,055E-02	5,623E+02	8,110E-03
4%	5,528E+02	9,790E-03	7,124E+02	7,164E-03	8,871E+02	3,834E-03

HYBRID MINI BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	7,859E+01	-3,593E-02	8,394E+01	-3,581E-02	7,768E+01	-2,367E-02
-2%	1,357E+02	2,661E-02	1,689E+02	2,553E-02	2,009E+02	2,634E-02
0	3,482E+02	2,256E-02	4,390E+02	2,319E-02	5,361E+02	2,381E-02
2%	6,420E+02	1,923E-02	8,574E+02	1,730E-02	1,080E+03	1,686E-02
4%	1,032E+03	1,513E-02	1,275E+03	1,973E-02	1,596E+03	1,988E-02

CONVENTIONAL MIDI BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	6,441E+02	-3,829E-02	6,722E+02	-3,602E-02	7,020E+02	-3,418E-02
-2%	6,927E+02	-2,514E-02	7,517E+02	-2,326E-02	8,115E+02	-2,181E-02
0	8,247E+02	-1,298E-02	9,338E+02	-1,178E-02	1,044E+03	-1,101E-02
2%	1,119E+03	-9,300E-03	1,316E+03	-9,090E-03	1,521E+03	-9,206E-03
4%	1,533E+03	-9,582E-03	1,852E+03	-1,015E-02	2,172E+03	-1,067E-02

BEV MIDI BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	1,896E+02	-7,396E-02	2,320E+02	-9,088E-02	2,700E+02	-9,960E-02
-2%	2,074E+02	8,172E-03	2,425E+02	5,896E-03	2,719E+02	4,779E-03
0	2,976E+02	1,570E-02	3,499E+02	1,353E-02	4,027E+02	1,147E-02
2%	5,233E+02	1,263E-02	6,264E+02	1,055E-02	7,334E+02	8,110E-03
4%	8,066E+02	9,790E-03	9,725E+02	7,164E-03	1,149E+03	3,834E-03

HYBRID MIDI BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	2,680E+02	-1,209E-01	2,952E+02	-1,264E-01	3,157E+02	-1,294E-01
-2%	2,056E+02	-3,789E-03	2,296E+02	-2,604E-03	2,482E+02	6,916E-05
0	4,549E+02	1,264E-02	5,546E+02	1,205E-02	6,539E+02	1,193E-02
2%	8,634E+02	1,084E-02	1,062E+03	1,044E-02	1,263E+03	1,022E-02
4%	1,343E+03	9,392E-03	1,663E+03	8,970E-03	2,006E+03	8,105E-03

CONVENTIONAL FULL BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	8,586E+02	-3,694E-02	9,163E+02	-3,406E-02	9,761E+02	-3,186E-02
-2%	9,623E+02	-2,469E-02	1,078E+03	-2,230E-02	1,195E+03	-2,065E-02
0	1,191E+03	-1,316E-02	1,404E+03	-1,176E-02	1,610E+03	-1,072E-02
2%	1,667E+03	-9,993E-03	2,065E+03	-9,948E-03	2,451E+03	-9,908E-03
4%	2,339E+03	-1,077E-02	2,961E+03	-1,138E-02	3,575E+03	-1,202E-02

BEV FULL BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	2,568E+02	-7,396E-02	3,124E+02	-9,088E-02	3,568E+02	-9,960E-02
-2%	3,312E+02	8,172E-03	3,996E+02	5,896E-03	4,488E+02	4,779E-03
0	3,800E+02	1,570E-02	4,639E+02	1,353E-02	5,514E+02	1,147E-02
2%	6,826E+02	1,263E-02	8,633E+02	1,055E-02	1,058E+03	8,110E-03
4%	1,064E+03	9,790E-03	1,364E+03	7,164E-03	1,691E+03	3,834E-03

HYBRID FULL BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	2,921E+02	-1,328E-01	3,141E+02	-1,370E-01	3,278E+02	-1,378E-01
-2%	2,663E+02	-2,433E-02	2,690E+02	-1,508E-02	2,601E+02	-3,052E-03
0	5,790E+02	1,037E-02	7,339E+02	1,106E-02	8,941E+02	1,161E-02
2%	1,154E+03	9,202E-03	1,494E+03	9,223E-03	1,864E+03	8,422E-03
4%	1,825E+03	8,017E-03	2,411E+03	7,036E-03	3,119E+03	3,686E-03

CONVENTIONAL ART BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	1,004E+03	-3,428E-02	1,092E+03	-3,143E-02	1,181E+03	-2,931E-02
-2%	1,183E+03	-2,264E-02	1,352E+03	-2,042E-02	1,513E+03	-1,868E-02
0	1,539E+03	-1,211E-02	1,839E+03	-1,067E-02	2,127E+03	-9,714E-03
2%	2,261E+03	-1,018E-02	2,826E+03	-1,014E-02	3,418E+03	-1,109E-02
4%	3,240E+03	-1,154E-02	4,139E+03	-1,243E-02	5,082E+03	-1,429E-02

BEV ART BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	2,985E+02	-7,396E-02	3,472E+02	-9,088E-02	3,848E+02	-9,960E-02
-2%	5,486E+02	8,172E-03	6,677E+02	5,896E-03	7,410E+02	4,779E-03
0	4,477E+02	1,570E-02	5,487E+02	1,353E-02	6,583E+02	1,147E-02
2%	8,323E+02	1,263E-02	1,073E+03	1,055E-02	1,334E+03	8,110E-03
4%	1,317E+03	9,790E-03	1,727E+03	7,164E-03	2,171E+03	3,834E-03

HYBRID ART BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	3,009E+02	-1,432E-01	3,152E+02	-1,455E-01	3,122E+02	-1,441E-01
-2%	3,372E+02	-5,196E-02	2,570E+02	-4,874E-02	2,258E+02	-1,945E-03
0	6,701E+02	1,034E-02	9,126E+02	1,268E-02	1,051E+03	1,308E-02
2%	1,433E+03	8,678E-03	2,039E+03	8,415E-03	2,396E+03	7,312E-03
4%	2,315E+03	7,412E-03	3,473E+03	3,519E-03	4,160E+03	6,681E-04

La Figura 15 mostra che, in termini di consumo di energia WTW, la configurazione BEV è normalmente la soluzione ottimale, ad eccezione di alcune condizioni operative degli autobus MINI. Invece, in termini di emissioni specifiche di CO2 (Figure 16-17), la BEV è sempre la soluzione migliore, mentre la convenienza tra le configurazioni CONV e HyBICE della serie dipende fortemente dalle dimensioni del veicolo e dal suo ciclo operativo specifico.

Infine, la Figura 18 confronta le prestazioni dei veicoli di dimensione anche diverse sulle stesse missioni: a tal fine, emissioni e consumi energetici sono stati confrontati facendo riferimento al passeggero unitario trasportato. Tutti i dati sono stati riferiti all'emissione e al consumo del veicolo convenzionale di dimensioni FULL, con una velocità di servizio media di 20 km/h (assunta come configurazione e missione di riferimento per il confronto).

Come atteso, i risultati mostrano che per tutte le configurazioni di propulsione il consumo di energia e le emissioni di CO2 per il trasporto passeggeri unitario diminuiscono se le dimensioni del veicolo diminuiscono. La velocità di servizio media sembra giocare un ruolo diverso per i mezzi convenzionali (dove sembra conveniente aumentare la velocità di servizio) e mezzi ibridi (dove ha un effetto opposto). La velocità media dei servizi, invece, sembra non influenzare in modo così profondo le emissioni dei veicoli BEV.

TTW Energy Consumption (kwh/km vs km/h)

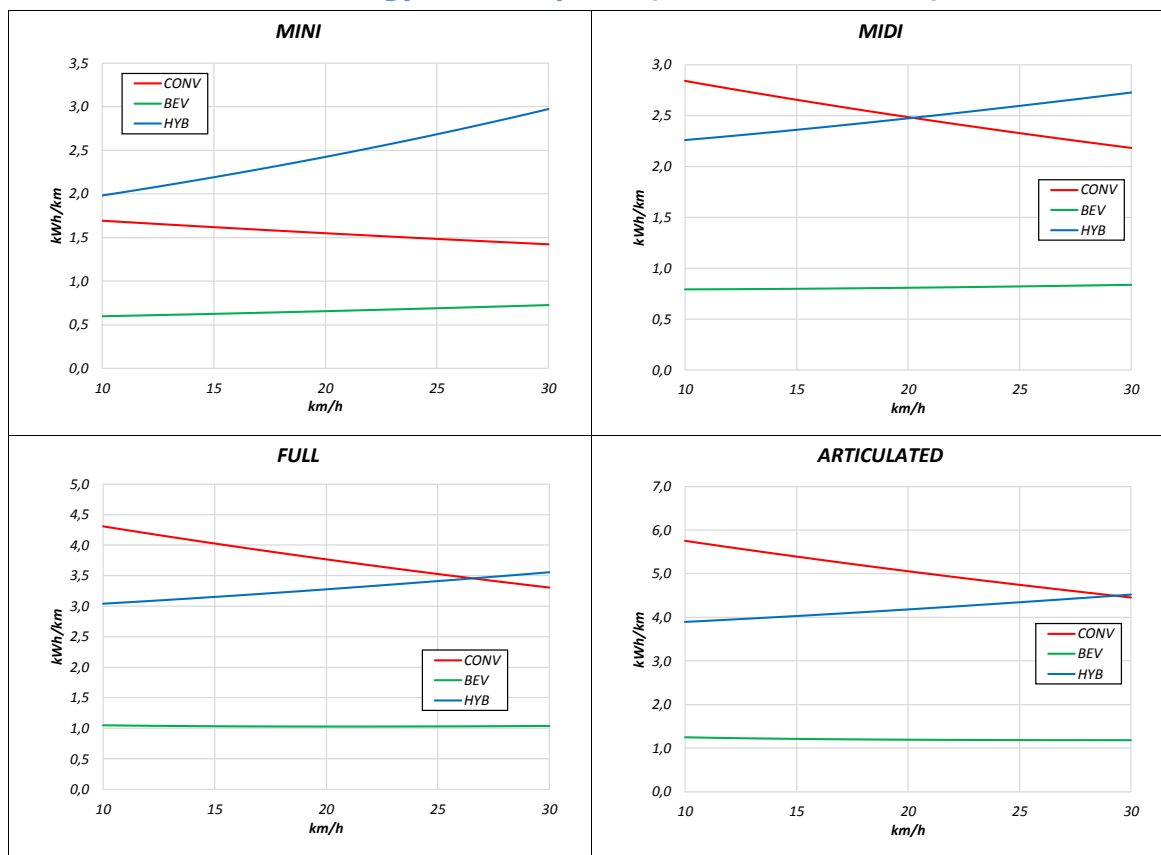


Figura 14 – Curve “pesate” di Consumo specifico di energia TTW

WTW Energy Consumption (kwh/km vs km/h)

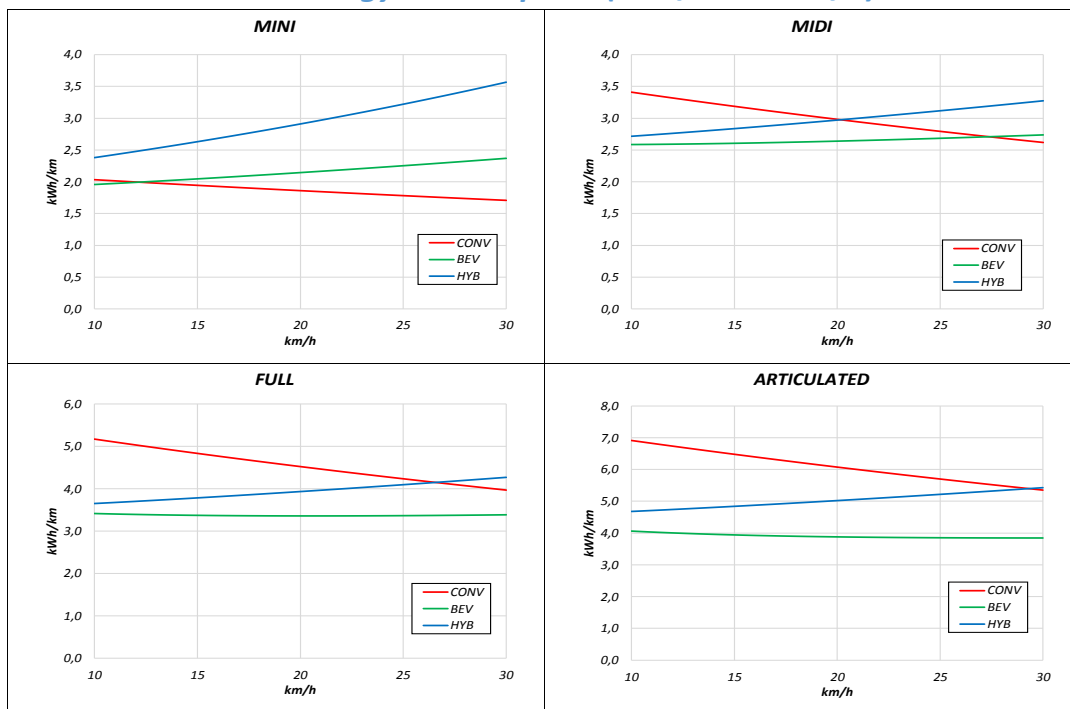


Figura 15 – Curve “pesate” di Consumo specifico di energia WTW

WTW CO2 Emissions (g/km vs km/h)

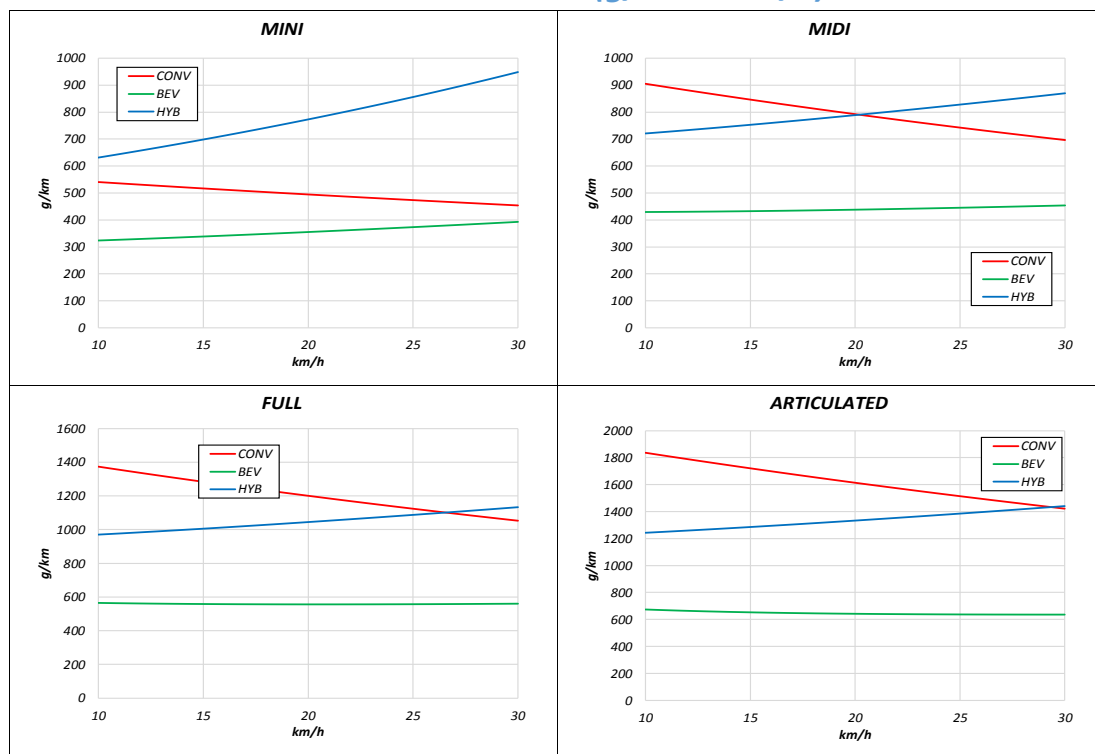


Figura 16 – Curve “pesate” di Emissioni specifiche di CO2 WTW

Δ WTW CO2 Emissions (% vs km/h)

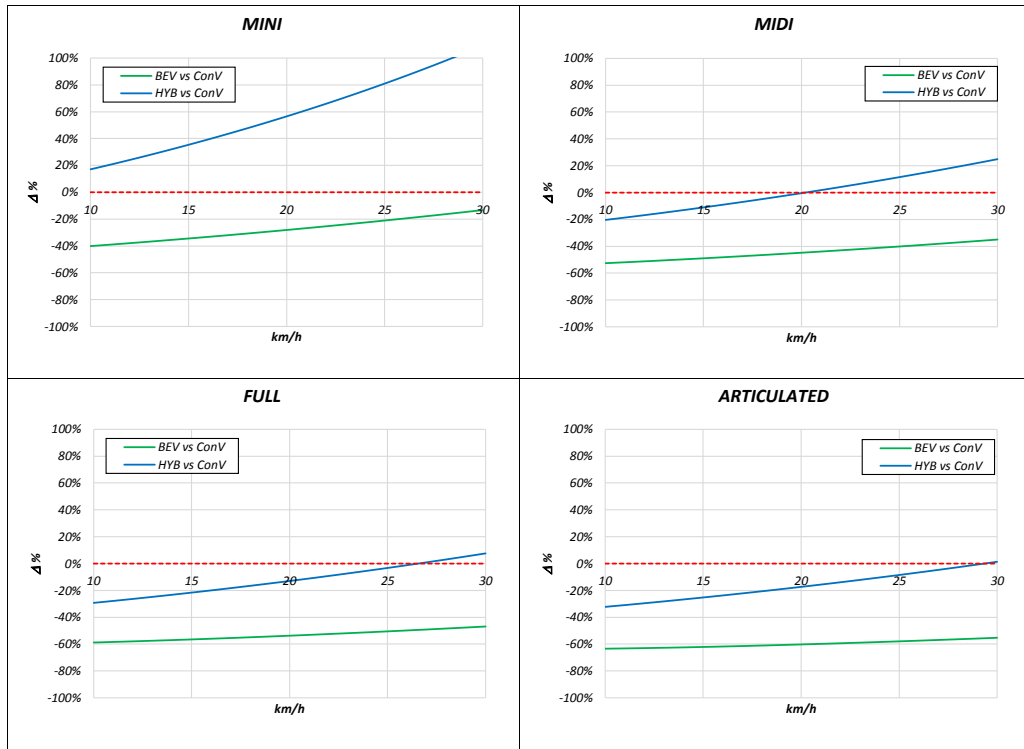


Figura 17 – Curve “pesate” di Variazioni Emissioni specifiche di CO2 WTW rispetto al caso base

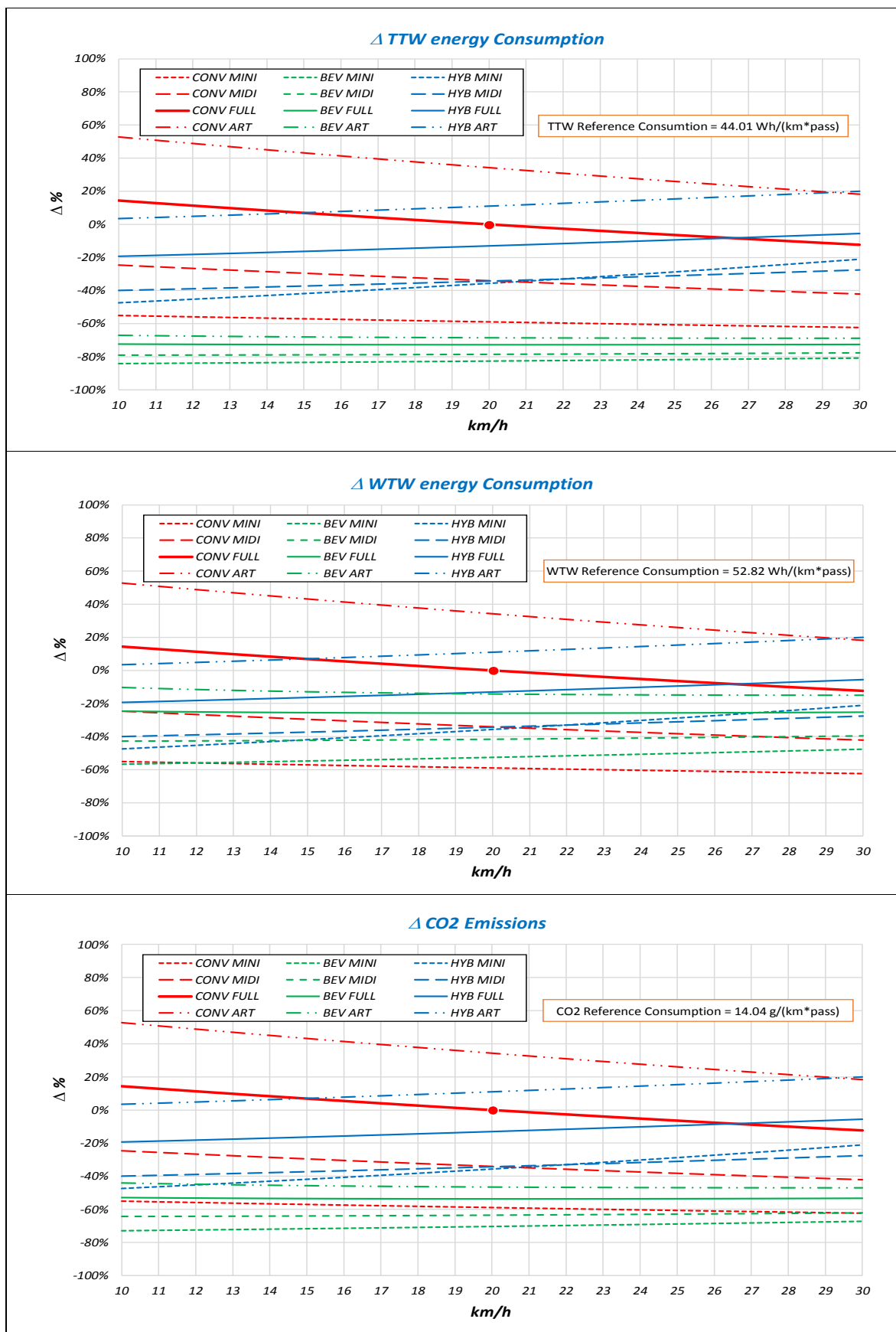


Figura 18 – Consumi energetici TTW e WTW ed emissioni specifiche di CO2 (per passeggero km)

2.3 Sulla stima delle emissioni inquinanti locali di bus convenzionali ed ibridi

Come definito nell'ambito dell'accordo di collaborazione con l'ENEA, in questo anno di attività si è anche provveduto a stimare le emissioni inquinanti allo scarico di bus convenzionali ed ibridi. In coerenza con l'approccio CorinAIR, si sono acquisite le mappe di emissione inquinante di alcuni propulsori IVECO e Mercedes di media grande taglia e si sono ottenute tramite queste delle mappe medie di emissioni inquinanti per i motori equipaggianti i quattro veicoli MINI, MIDI, FULL ed ART di riferimento per le tre configurazioni di trazione.

Il SW è in grado, come visto di prevedere i punti di funzionamento delle mappe in cui i mezzi lavoreranno sulle 23 missioni di prova, per le varie combinazioni di pendenze strada e carico già descritte. E' quindi possibile ottenere in questo modo una previsione di prima approssimazione delle emissioni generate. Poiché la procedura utilizzata non ha potuto avere ancora alcuna verifica sperimentale, si ritiene più corretto in questa fase utilizzare i dati ottenuti in via qualitativa più che quantitativa. In particolare, ad ogni modo, i dati calcolati sono già sufficienti per individuare i trend tipici di riduzione delle emissioni ottenibili nel passaggio da configurazioni convenzionali a mezzi ibridi serie che tendono a mettere in esercizio il motore termico solo nei punti di minimo consumo (con emissioni normalmente considerevolmente minori delle emissioni medie sulla mappa a parità di energia erogata).

I risultati ottenuti in termini di rapporto tra emissioni del veicolo convenzionale e quello ibrido corrispondente, per il quattro principali inquinanti (CO, HC, NOx e PM) sono riportati nelle successive Tabelle 6-9. Per ogni inquinante, in ossequio alle procedure CorinAIR, si sono ottenuti anche curve di regressione di Potenza i cui coefficienti sono riportati nella parte sinistra delle tabelle stesse. I dati mostrano una notevole riduzione delle emissioni inquinanti nella maggior parte delle circa 2500 configurazioni (taglia mezzo, velocità media, pendenza, carico) simulate.

CO Emissions Correlations

$$HYB/CONV CO = \alpha * v \text{ mean [km/h]}^\beta \quad @ \text{ various } v \text{ mean values}$$

MINI BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%		LOAD 0%			LOAD 50%			LOAD 100%		
	α	β	α	β	α	β	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h
-4%	6,848E-01	-3,040E-01	4,996E-01	-2,050E-01	3,935E-01	-1,210E-01	34,0	27,5	24,4	31,2	27,0	24,9	29,8	27,4	26,1
-2%	3,295E-01	-5,700E-02	2,287E-01	8,700E-02	1,773E-01	1,970E-01	28,9	27,8	27,1	27,9	29,7	30,7	27,9	32,0	34,6
0	1,651E-01	1,740E-01	1,054E-01	3,820E-01	7,963E-02	5,210E-01	24,6	27,8	29,8	25,4	33,1	38,7	26,4	37,9	46,8
2%	5,654E-02	5,840E-01	4,175E-02	7,470E-01	3,592E-02	8,560E-01	21,7	32,5	41,2	23,3	39,1	53,0	25,8	46,7	66,0
4%	2,910E-02	8,721E-01	2,008E-02	1,080E+00	2,334E-02	1,074E+00	21,7	39,7	56,5	24,1	51,0	79,1	27,7	58,3	90,0

MIDI BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%		LOAD 0%			LOAD 50%			LOAD 100%		
	α	β	α	β	α	β	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h
-4%	7,645E-01	-3,370E-01	6,657E-01	-3,070E-01	5,561E-01	-2,560E-01	35,2	27,9	24,3	32,8	26,5	23,4	30,8	25,8	23,3
-2%	5,634E-01	-2,840E-01	4,258E-01	-1,920E-01	3,496E-01	-1,220E-01	29,3	24,1	21,4	27,4	24,0	22,2	26,4	24,3	23,1
0	2,721E-01	-4,900E-02	1,965E-01	7,400E-02	1,485E-01	1,890E-01	24,3	23,5	23,0	23,3	24,5	25,3	23,0	26,2	28,2
2%	1,077E-01	2,660E-01	6,744E-02	4,590E-01	4,814E-02	6,140E-01	19,9	23,9	26,6	19,4	26,7	32,1	19,8	30,3	38,9
4%	4,092E-02	6,370E-01	2,765E-02	8,270E-01	2,430E-02	9,140E-01	17,7	27,6	35,7	18,6	32,9	46,0	19,9	37,6	54,4

FULL BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%		LOAD 0%			LOAD 50%			LOAD 100%		
	α	β	α	β	α	β	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h
-4%	6,397E-01	-2,920E-01	4,944E-01	-2,200E-01	4,312E-01	-1,810E-01	32,7	26,7	23,7	29,8	25,6	23,4	28,4	25,1	23,3
-2%	5,031E-01	-2,730E-01	3,805E-01	-1,760E-01	2,965E-01	-8,300E-02	26,8	22,2	19,9	25,4	22,5	20,9	24,5	23,1	22,4
0	2,204E-01	7,000E-03	1,435E-01	1,800E-01	1,119E-01	2,970E-01	22,4	22,5	22,6	21,7	24,6	26,5	22,2	27,2	30,7
2%	7,612E-02	3,830E-01	4,168E-01	-3,000E-02	3,969E-02	7,070E-01	18,4	24,0	28,0	38,9	38,1	37,6	20,2	33,0	44,0
4%	2,998E-02	7,600E-01	2,558E-02	8,750E-01	3,814E-02	7,610E-01	17,2	29,2	39,8	19,2	35,2	50,2	22,0	37,3	50,7

ART BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%		LOAD 0%			LOAD 50%			LOAD 100%		
	α	β	α	β	α	β	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h
-4%	4,854E-01	-2,150E-01	4,124E-01	-1,690E-01	3,873E-01	-1,510E-01	29,6	25,5	23,4	27,9	24,9	23,2	27,4	24,6	23,2
-2%	4,598E-01	-2,650E-01	3,286E-01	-1,360E-01	2,716E-01	-6,100E-02	25,0	20,8	18,7	24,0	21,9	20,7	23,6	22,6	22,1
0	1,563E-01	1,240E-01	1,073E-01	3,040E-01	1,021E-01	3,370E-01	20,8	22,7	23,8	21,6	26,7	30,2	22,2	28,0	32,1
2%	4,796E-02	5,700E-01	3,969E-02	7,050E-01	4,738E-02	6,530E-01	17,8	26,5	33,3	20,1	32,8	43,7	21,3	33,5	43,7
4%	2,471E-02	8,600E-01	4,313E-02	7,100E-01	7,593E-02	4,900E-01	17,9	32,5	46,1	22,1	36,2	48,2	23,5	33,0	40,2

Tabella 6 – Coefficienti di regressione di Potenza per le emissioni TTW di CO

HC Emissions Correlations

$$HYB/CONV HC = \alpha * v \text{ mean [km/h]}^\beta$$

@ various v mean values

MINI BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	5,136E-01	-2,341E-01	3,947E-01	-1,661E-01	3,266E-01	-1,029E-01
-2%	2,537E-01	-4,503E-02	1,853E-01	7,221E-02	1,507E-01	1,714E-01
0	1,238E-01	1,340E-01	8,329E-02	3,094E-01	6,610E-02	4,429E-01
2%	4,580E-02	4,847E-01	3,549E-02	6,499E-01	3,197E-02	7,790E-01
4%	2,502E-02	7,674E-01	1,807E-02	9,936E-01	2,194E-02	1,031E+00

GRADE	LOAD 0%			LOAD 50%			LOAD 100%		
	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h
-4%	30,0	25,5	23,2	26,9	24,0	22,4	25,8	24,0	23,0
-2%	22,9	22,2	21,8	21,9	23,0	23,7	22,4	25,2	27,0
0	16,9	18,5	19,5	17,0	21,0	23,9	18,3	24,9	29,8
2%	14,0	19,6	23,8	15,8	24,9	32,4	19,2	33,0	45,2
4%	14,6	24,9	34,0	17,8	35,5	53,1	23,6	48,1	73,1

MIDI BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	5,658E-01	-2,561E-01	5,193E-01	-2,456E-01	4,560E-01	-2,150E-01
-2%	4,282E-01	-2,215E-01	3,407E-01	-1,574E-01	2,937E-01	-1,049E-01
0	2,013E-01	-3,724E-02	1,533E-01	5,920E-02	1,218E-01	1,588E-01
2%	8,615E-02	2,181E-01	5,665E-02	3,947E-01	4,236E-02	5,526E-01
4%	3,478E-02	5,542E-01	2,460E-02	7,526E-01	2,260E-02	8,683E-01

GRADE	LOAD 0%			LOAD 50%			LOAD 100%		
	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h
-4%	31,4	26,3	23,7	29,5	24,9	22,5	27,8	23,9	21,9
-2%	25,7	22,1	20,2	23,7	21,3	19,9	23,1	21,4	20,6
0	18,5	18,0	17,7	17,6	18,3	18,7	17,6	19,6	20,9
2%	14,2	16,6	18,1	14,1	18,5	21,7	15,1	22,2	27,7
4%	12,5	18,3	22,9	13,9	23,4	31,8	16,7	30,5	43,3

FULL BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	4,862E-01	-2,278E-01	3,955E-01	-1,804E-01	3,622E-01	-1,557E-01
-2%	3,924E-01	-2,184E-01	3,120E-01	-1,478E-01	2,550E-01	-7,304E-02
0	1,675E-01	5,460E-03	1,148E-01	1,476E-01	9,399E-02	2,554E-01
2%	6,242E-02	3,217E-01	3,585E-01	-2,640E-02	3,572E-02	6,504E-01
4%	2,608E-02	6,764E-01	2,328E-02	8,138E-01	3,623E-02	7,382E-01

GRADE	LOAD 0%			LOAD 50%			LOAD 100%		
	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h
-4%	28,8	24,6	22,4	26,1	23,0	21,4	25,3	22,7	21,3
-2%	23,7	20,4	18,7	22,2	20,0	18,9	21,5	20,5	19,9
0	17,0	17,0	17,1	16,1	17,9	19,0	16,9	20,2	22,4
2%	13,1	16,4	18,6	13,7	18,3	22,8	16,0	25,1	32,6
4%	12,4	19,8	26,0	15,2	26,7	37,1	19,8	33,1	44,6

ART BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	3,835E-01	-1,742E-01	3,423E-01	-1,437E-01	3,369E-01	-1,344E-01
-2%	3,725E-01	-2,200E-01	2,793E-01	-1,183E-01	2,417E-01	-5,551E-02
0	1,235E-01	1,004E-01	8,905E-02	2,584E-01	8,882E-02	2,999E-01
2%	4,077E-02	4,959E-01	3,532E-02	6,416E-01	4,406E-02	6,204E-01
4%	2,224E-02	7,912E-01	4,054E-02	6,816E-01	7,441E-02	4,900E-01

GRADE	LOAD 0%			LOAD 50%			LOAD 100%		
	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h
-4%	25,7	22,8	21,2	24,6	22,3	21,0	24,7	22,5	21,3
-2%	22,4	19,3	17,6	21,3	19,6	18,7	21,3	20,5	20,0
0	15,6	16,7	17,4	16,1	19,3	21,4	17,7	21,8	24,6
2%	12,8	18,0	22,0	15,5	24,1	31,3	18,4	28,3	36,3
4%	13,8	23,8	32,8	19,5	31,2	41,2	23,0	32,3	39,4

Tabella 7 – Coefficienti di regressione di Potenza per le emissioni TTW di HC

NOx Emissions Correlations

$$HYB/CONV NOx = \alpha * v \text{ mean [km/h]}^\beta$$

@ various v mean values

MINI BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	4,240E-01	7,000E-02	4,227E-01	7,800E-02	4,015E-01	1,030E-01
-2%	1,750E-01	4,940E-01	1,654E-01	5,200E-01	1,637E-01	5,510E-01
0	1,258E-01	6,330E-01	1,302E-01	5,670E-01	1,463E-01	5,620E-01
2%	1,100E-01	6,550E-01	1,653E-01	5,390E-01	2,001E-01	5,110E-01
4%	1,515E-01	6,090E-01	1,911E-01	5,670E-01	2,610E-01	4,573E-01

GRADE	LOAD 0%			LOAD 50%			LOAD 100%		
	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h
-4%	49,8	52,3	53,8	50,6	53,4	55,1	50,9	54,7	57,0
-2%	54,6	76,9	93,9	54,8	78,5	97,0	58,2	85,3	106,7
0	54,0	83,8	108,3	48,0	71,2	89,6	53,4	78,8	98,9
2%	49,7	78,3	102,1	57,2	83,1	103,4	64,9	92,5	113,8
4%	61,6	93,9	120,2	70,5	104,5	131,5	74,8	102,7	123,6

MIDI BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	5,049E-01	-1,000E-02	5,066E-01	-1,500E-02	5,153E-01	-1,900E-02
-2%	3,295E-01	1,920E-01	3,167E-01	2,170E-01	3,056E-01	2,420E-01
0	1,777E-01	4,150E-01	1,745E-01	4,520E-01	1,809E-01	5,000E-01
2%	1,444E-01	5,850E-01	1,673E-01	4,660E-01	1,963E-01	4,610E-01
4%	1,646E-01	6,070E-01	2,107E-01	5,060E-01	2,932E-01	4,000E-01

GRADE	LOAD 0%			LOAD 50%			LOAD 100%		
	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h
-4%	49,3	49,0	48,8	48,9	48,4	48,1	49,3	48,7	48,3
-2%	51,3	58,6	63,3	52,2	60,7	66,3	53,3	63,1	69,6
0	46,2	61,6	72,9	49,4	67,6	81,2	57,2	80,9	99,1
2%	55,6	83,3	105,6	48,9	67,6	81,6	56,7	78,1	94,2
4%	66,6	101,4	129,7	67,5	95,9	117,8	73,7	97,2	114,3

FULL BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	4,869E-01	-5,000E-03	4,969E-01	-1,200E-02	5,125E-01	-2,200E-02
-2%	3,988E-01	1,050E-01	3,797E-01	1,340E-01	3,619E-01	1,630E-01
0	1,958E-01	4,750E-01	2,008E-01	4,800E-01	2,213E-01	4,600E-01
2%	1,740E-01	5,250E-01	2,177E-01	5,000E-01	2,816E-01	4,200E-01
4%	2,085E-01	5,200E-01	3,367E-01	3,600E-01	5,751E-01	2,400E-01

GRADE	LOAD 0%			LOAD 50%			LOAD 100%		
	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h
-4%	48,1	48,0	47,9	48,3	47,9	47,7	48,7	48,0	47,6
-2%	50,8	54,6	57,0	51,7	56,7	59,9	52,7	59,0	63,0
0	58,5	81,2	98,5	60,6	84,6	102,7	63,8	87,8	105,8
2%	58,3	83,9	103,7	68,8	97,3	119,2	74,1	99,1	117,5
4%	69,0	99,0	122,2	77,1	99,0	114,6	99,9	118,0	130,1

ART BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	4,863E-01	-6,000E-03	5,076E-01	-2,200E-02	5,423E-01	-4,800E-02
-2%	4,842E-01	2,000E-02	4,396E-01	6,800E-02	4,292E-01	7,900E-02
0	2,178E-01	4,400E-01	2,286E-01	4,640E-01	2,649E-01	4,150E-01
2%	2,207E-01	4,800E-01	3,008E-01	4,000E-01	4,070E-01	3,000E-01
4%	3,185E-01	4,000E-01	6,170E-01	2,000E-01	8,443E-01	1,010E-01

GRADE	LOAD 0%			LOAD 50%			LOAD 100%		
	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h
-4%	48,0	47,8	47,6	48,3	47,5	47,1	48,6	47,0	46,1
-2%	50,7	51,4	51,8	51,4	53,9	55,4	51,5	54,4	56,2
0	60,0	81,4	97,3	66,5	91,8	110,8	68,9	91,9	108,7
2%	66,7	93,0	113,0	75,5	99,7	117,2	81,2	100,0	112,9
4%	80,0	105,6	124,1	97,8	112,3	121,8	106,5	114,3	119,0

Tabella 8 – Coefficienti di regressione di Potenza per le emissioni TT

PM Emissions Correlations

$HYB/CONV PM = \alpha * v \text{ mean [km/h]}^\beta$

@ various v mean values

MINI BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	3,307E-01	5,600E-02	3,466E-01	6,552E-02	3,453E-01	9,064E-02
-2%	1,400E-01	4,051E-01	1,389E-01	4,472E-01	1,441E-01	4,959E-01
0	9,814E-02	5,064E-01	1,068E-01	4,763E-01	1,258E-01	4,946E-01
2%	9,242E-02	5,633E-01	1,455E-01	4,851E-01	1,841E-01	4,803E-01
4%	1,349E-01	5,542E-01	1,778E-01	5,387E-01	2,532E-01	4,527E-01

GRADE	LOAD 0%			LOAD 50%			LOAD 100%		
	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h
-4%	37,6	39,1	40,0	40,3	42,2	43,3	42,5	45,3	47,0
-2%	35,6	47,1	55,5	38,9	53,0	63,6	45,1	63,7	77,8
0	31,5	44,7	54,9	32,0	44,5	53,9	39,3	55,4	67,6
2%	33,8	50,0	62,8	44,4	62,2	75,7	55,6	77,6	94,3
4%	48,3	70,9	88,8	61,4	89,3	111,0	71,8	98,3	118,1

MIDI BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	3,887E-01	-7,900E-03	4,104E-01	-1,245E-02	4,380E-01	-1,653E-02
-2%	2,603E-01	1,555E-01	2,629E-01	1,845E-01	2,658E-01	2,154E-01
0	1,369E-01	3,279E-01	1,413E-01	3,752E-01	1,538E-01	4,350E-01
2%	1,199E-01	4,973E-01	1,455E-01	4,147E-01	1,786E-01	4,287E-01
4%	1,448E-01	5,463E-01	1,938E-01	4,756E-01	2,815E-01	3,920E-01

GRADE	LOAD 0%			LOAD 50%			LOAD 100%		
	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h
-4%	38,2	38,0	37,8	39,9	39,5	39,3	42,2	41,7	41,4
-2%	37,2	41,5	44,2	40,2	45,7	49,2	43,7	50,7	55,3
0	29,1	36,5	41,7	33,5	43,5	50,6	41,9	56,6	67,5
2%	37,7	53,2	65,1	37,8	50,4	59,6	47,9	64,5	76,8
4%	51,0	74,4	92,9	57,9	80,6	97,7	69,4	91,1	106,8

FULL BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	3,847E-01	-4,050E-03	4,124E-01	-1,020E-02	4,459E-01	-1,958E-02
-2%	3,230E-01	8,715E-02	3,228E-01	1,166E-01	3,221E-01	1,483E-01
0	1,547E-01	3,848E-01	1,666E-01	4,080E-01	1,925E-01	4,094E-01
2%	1,479E-01	4,568E-01	1,937E-01	4,550E-01	2,619E-01	3,990E-01
4%	1,877E-01	4,784E-01	3,165E-01	3,456E-01	5,636E-01	2,400E-01

GRADE	LOAD 0%			LOAD 50%			LOAD 100%		
	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h
-4%	38,1	38,0	37,9	40,3	40,0	39,8	42,6	42,0	41,7
-2%	39,5	41,9	43,4	42,2	45,8	48,0	45,3	50,2	53,3
0	37,5	49,0	57,2	42,6	56,6	66,7	49,4	65,6	77,5
2%	42,3	58,1	69,9	55,2	75,7	91,0	65,6	86,5	101,7
4%	56,5	78,7	95,5	70,1	89,1	102,5	97,9	115,7	127,5

ART BUS

GRADE	LOAD 0%		LOAD 50%		LOAD 100%	
	α	β	α	β	α	β
-4%	3,987E-01	-5,040E-03	4,365E-01	-1,936E-02	4,881E-01	-4,416E-02
-2%	4,068E-01	1,720E-02	3,868E-01	6,120E-02	3,949E-01	7,426E-02
0	1,786E-01	3,696E-01	1,966E-01	4,083E-01	2,385E-01	3,818E-01
2%	1,943E-01	4,320E-01	2,767E-01	3,760E-01	3,907E-01	2,940E-01
4%	2,962E-01	3,800E-01	5,985E-01	1,980E-01	8,528E-01	1,040E-01

GRADE	LOAD 0%			LOAD 50%			LOAD 100%		
	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h	10km/h	20km/h	30km/h
-4%	39,4	39,3	39,2	41,7	41,2	40,9	44,1	42,8	42,0
-2%	42,3	42,8	43,1	44,5	46,5	47,6	46,9	49,3	50,8
0	41,8	54,0	62,8	50,3	66,8	78,8	57,4	74,8	87,4
2%	52,5	70,9	84,4	65,8	85,3	99,4	76,9	94,3	106,2
4%	71,1	92,5	107,9	94,4	108,3	117,4	108,4	116,5	121,5

Tabella 9 – Coefficienti di regressione di Potenza per le emissioni TTW di PM

2.4 Sulle prestazioni di filobus e mezzi elettrici alternativi con ricarica lenta o rapida

Un ulteriore utilizzo del tool SW sviluppato è stato, come previsto nell'ambito dell'accordo di collaborazione con l'ENEA, la simulazione di un filobus (FILO) in esercizio nella città di Roma sulla linea 90 ed il confronto con mezzi di analogia taglia convenzionali (CONV), ibridi (HYBICE) ed elettrici (BEV). In questo ultimo caso, si è valutata anche l'opzione di mezzi BEV a ricarica rapida al capolinea del mezzo (BEVRC). Si sono pertanto simulati nel complesso 5 mezzi (FILO, CONV, HYBICE, BEV, BEVRC). Le caratteristiche dei mezzi sono state descritte nel dettaglio utilizzando i datasheet di mezzi Solaris Ganz-Transelektro da 18m a 3 assi:

- FILO - "new Trollino 18": Drive Train Skoda IGBT Asincrono: 1 asse di trazione 250 kW 6 poli asincrono; Peso Scarico 18 tonn; Capacità massima: 149+1.
- BEV - "new Urbino 18 Electric": Motore di trazione 240 kW, batterie Li-ion 260 kWh; Peso Scarico 18 tonn (senza batterie); Capacità massima: 149+1.
- BEVRC - "new Urbino 18 Electric": Motore di trazione 240 kW, batterie Li-ion 104 kWh; Peso Scarico 18 tonn (senza batterie); Capacità massima: 149+1.
- CONV - "new Urbino 18 Gasolio": Trazione DAF MX-11 240 EURO6 326 kW; Capacità massima: 158+1
- HIBICE - "Urbino 18 Hybrid" gasolio-elettrico Euro6: Trazione 240 kW elettrica; Motogeneratore Cutipio.mins 157 kW gasolio; Peso Scarico 18 tonn; Capacità massima: 149+1.

La missione dei mezzi sulla Linea 90 è stata simulata in accordo ai piani di programmazione dell'azienda pubblica di trasporto. Si sono analizzate tutte le fermate richieste ed i tempi di percorrenza previsti. Per

ogni tratta tra due fermate si è simulato una fase di accelerazione, una velocità di crociera definibile da piano di programmazione ed una successiva fase di decelerazione.

L'elaborazione del piano di programmazione secondo le regole qui definite ha portato alla definizione della missione riportata in Figura 19.

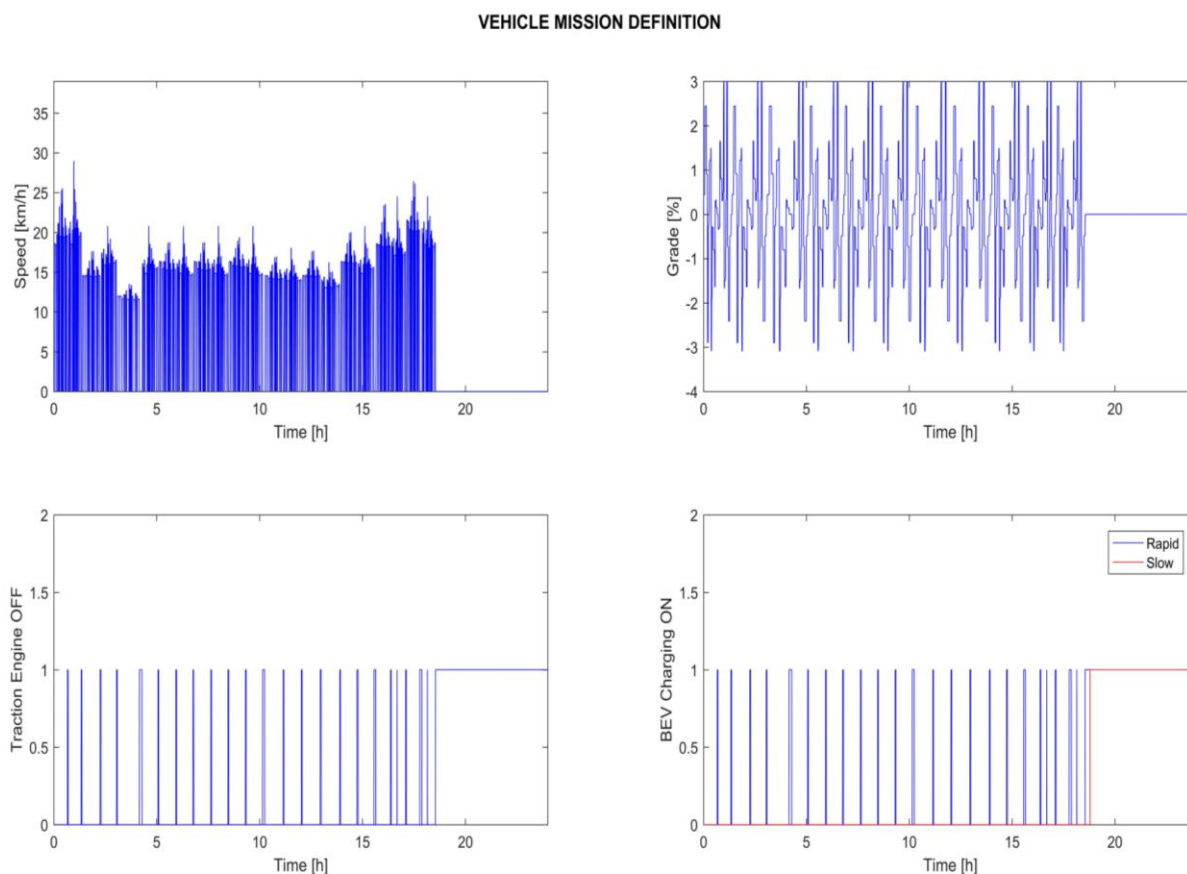


Figura 19 – Missione dei mezzi sulla Linea 90.

La parte bassa di Figura 19 individua le fermate al capolinea e le corrispondenti fasi di spegnimento del motore termico (ove presente), l'attivazione della ricarica rapida per il tempo a disposizione (ove presente) e quella della ricarica lenta a fine missione giornaliera. La dimensione dei pacchi di accumulo dei mezzi BEV e BEVRC sono stati calcolati come quelli minimi necessari per la realizzazione della missione. Come già indicato in fase di definizione dei mezzi, il BEVRC, grazie alle ripetute azioni di ricarica rapida durante la missione giornaliera, richiede un sistema di accumulo sensibilmente inferiore al mezzo BEV (104 kWh contro 260). La ricarica rapida (a corrente 1C) è però meno efficiente ed il consumo complessivo di energia del mezzo risulta pertanto leggermente superiore a quelli del mezzo BEV, seppure quest'ultimo sia aggravato da un peso maggiore del pacco di accumulo.

I dati di consumo delle 5 configurazioni simulate sono riportate in Tabella 10 su base TTW e su base WTW.

	TTW [Wh/km]	WTW [Wh/km]
FILO	623	2031
BEV	678	2210
BEV-RC	710	2315
HYBICE	2372	2846
CONV	4021	4825

Tabella 10 – Consumi energetici sulla Linea 90

2.5 Sulla integrazione del SW sviluppato con i SW ENEA utilizzati come DSS nel TPL

Durante l’attività dello scorso anno, ENEA ha sviluppato un software di importazione di una rete del trasporto pubblico in formato GTFS. Questo SW ha lo scopo di trasformare l’informazione, così come fornita dal GTFS in un formato utile per lo sviluppo di un DSS usato per la valutazione dell’elettrificazione delle reti di trasporto pubblico. Il Database risultante da questa importazione (il cui schema ER è rappresentato nella figura seguente) è stato realizzato in PostgreSQL 9.5 ed è stato utilizzato per diverse finalità:

- per l’interrogazione della banca dati da parte di ulteriori moduli di calcolo sviluppati dall’ENEA;
- come strumento di Inter Process Comuncation e Data Exchange tra i software eterogenei sviluppati nell’ambito del progetto;
- come strumento di elaborazione per il calcolo di alcuni indicatori di rete;

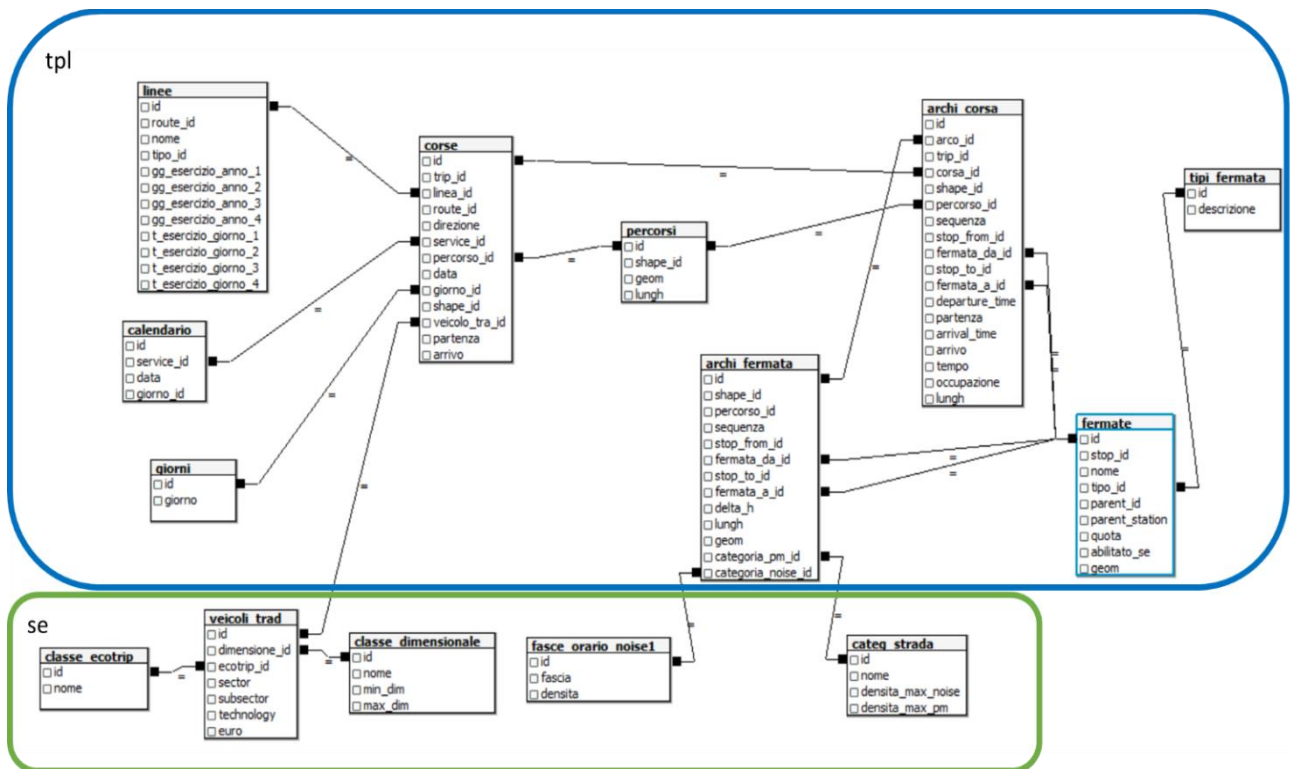


Figura 20 - Schema ER dello schema TPL per la rappresentazione della rete di trasporto pubblico di RSE.

Tra le attività richieste nell'ambito del progetto di quest'anno vi era lo sviluppo di una veste grafica integrata che permettesse:

- l'applicazione del modulo di importazione attraverso una procedura guidata;
- l'esecuzione automatica del software sviluppato dall'Università dell'Aquila;
- l'integrazione con i software presenti in ENEA;
- la navigazione del database

Durante l'esecuzione di queste attività sono emersi alcuni aspetti critici che hanno portato allo sviluppo di nuove attività propedeutiche allo sviluppo del software principale ed in particolare all'aggiornamento della procedura di importazione del GTFS con le seguenti funzionalità:

- l'importazione parziale della rete;
- l'importazione aggregata di più GTFS di periodi differenti;
- calcolo delle distanze tra fermate in assenza di informazione.

Il software che è stato sviluppato ha avuto come obiettivo, anche quello di essere integrato con il modulo BEST di confronto economico delle alternative di powertrain e con il relativo modulo di ottimizzazione e per questo motivo si è scelta la medesima tecnologia per il suo sviluppo ovvero C# .NET.

Al SW così risultante dall'integrazione di diversi software nati all'interno del progetto Ricerca di Sistema Elettrico, si è deciso di dare il nome di RSE Integrator.

2.5.1 La GUI

L'interfaccia è stata studiata per integrare gli applicativi sviluppati dall'Università dell'Aquila e quelli in essere presso l'ENEA cercando di aiutare l'utente nella realizzazione del corretto flusso di lavoro. Pertanto è stata studiata un'interfaccia a schede, una per ogni step fondamentale del flusso di lavoro:

1. Pagina iniziale: breve scheda di presentazione del software;
2. Importazione: scheda per l'avvio della procedura di importazione del GTFS
3. Calcolo Consumi: scheda per l'avvio delle procedure sviluppate dall'Università dell'Aquila per il calcolo dei consumi e delle emissioni;
4. Calcolo Costi: scheda per l'avvio delle procedure ENEA per l'avvio del modulo di calcolo BEST;
5. Esplora Database: scheda per l'ispezione dei contenuti del database e l'esportazione dei dati per il modulo ONEBus;

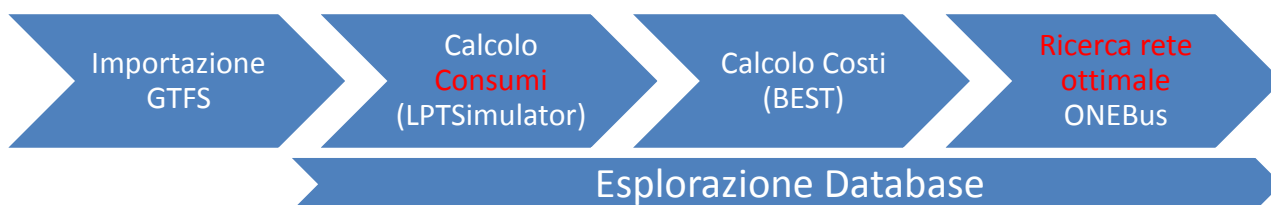


Figura 21 – Flusso di lavoro

Il modulo di ottimizzazione ONEBus è stato sviluppato parallelamente come applicato stand-alone e quindi la relativa integrazione è avvenuta attraverso una procedura di esportazione dei dati dal database che vengono successivamente letti dal modulo di ottimizzazione.

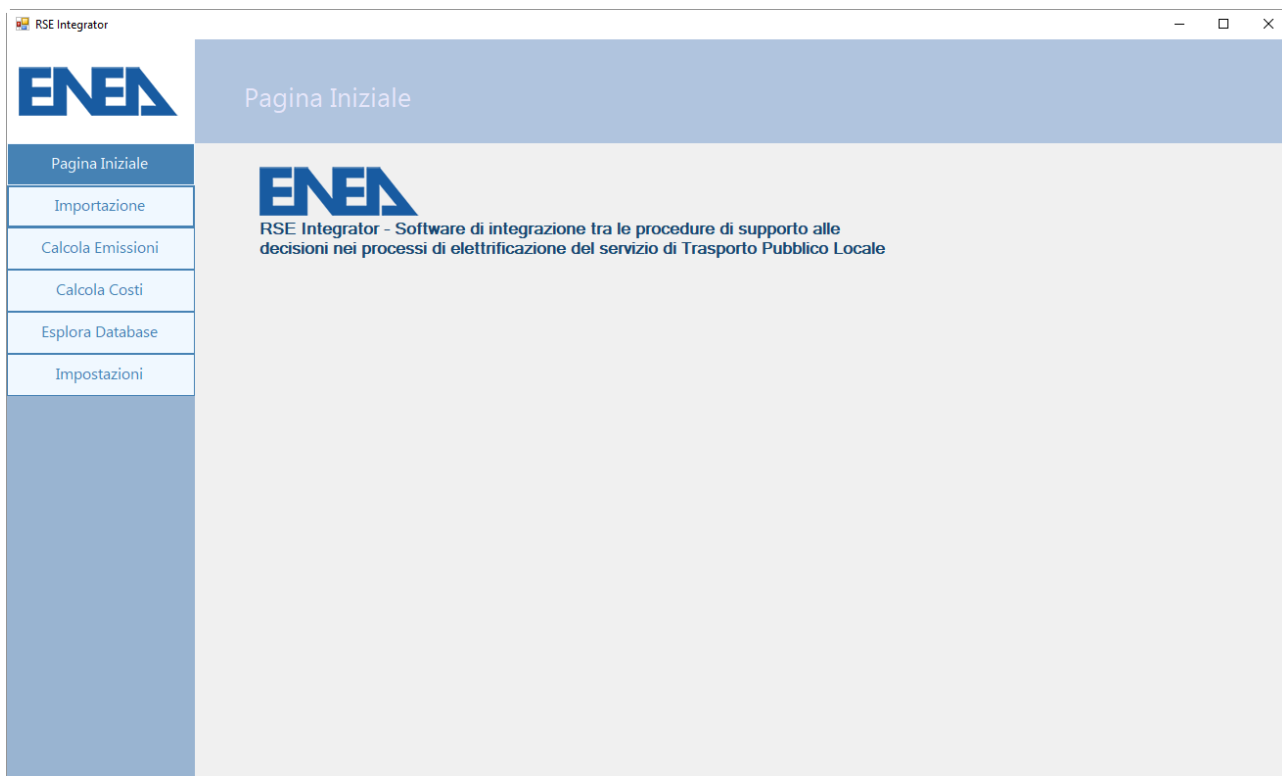


Figura 22 - Scheda iniziale del software

2.5.2 Importazione

La scheda di importazione prevede la possibilità di importare una rete in formato GTFS ed in particolare, attraverso la funzione *Seleziona Scenario* è in grado di leggere i file presenti nello standard GTFS, costituiti da valori separati da virgola. Per ogni file obbligatorio si riporta la lista dei campi che viene letta:

- agency.txt: "agency_id", "agency_name";
- calendar_dates.txt: "service_id", "date";
- routes.txt: "route_id", "agency_id", "route_short_name", "route_long_name", "route_type";
- shapes.txt: "shape_id", "shape_pt_lat", "shape_pt_lon", "shape_pt_sequence", "shape_dist_traveled";
- stop_times.txt: "trip_id", "arrival_time", "departure_time", "stop_id", "stop_sequence", "shape_dist_traveled";
- stops.txt: "stop_id", "stop_name", "stop_lat", "stop_lon";
- trips.txt: "route_id", "service_id", "trip_id", "trip_short_name", "direction_id", "shape_id";

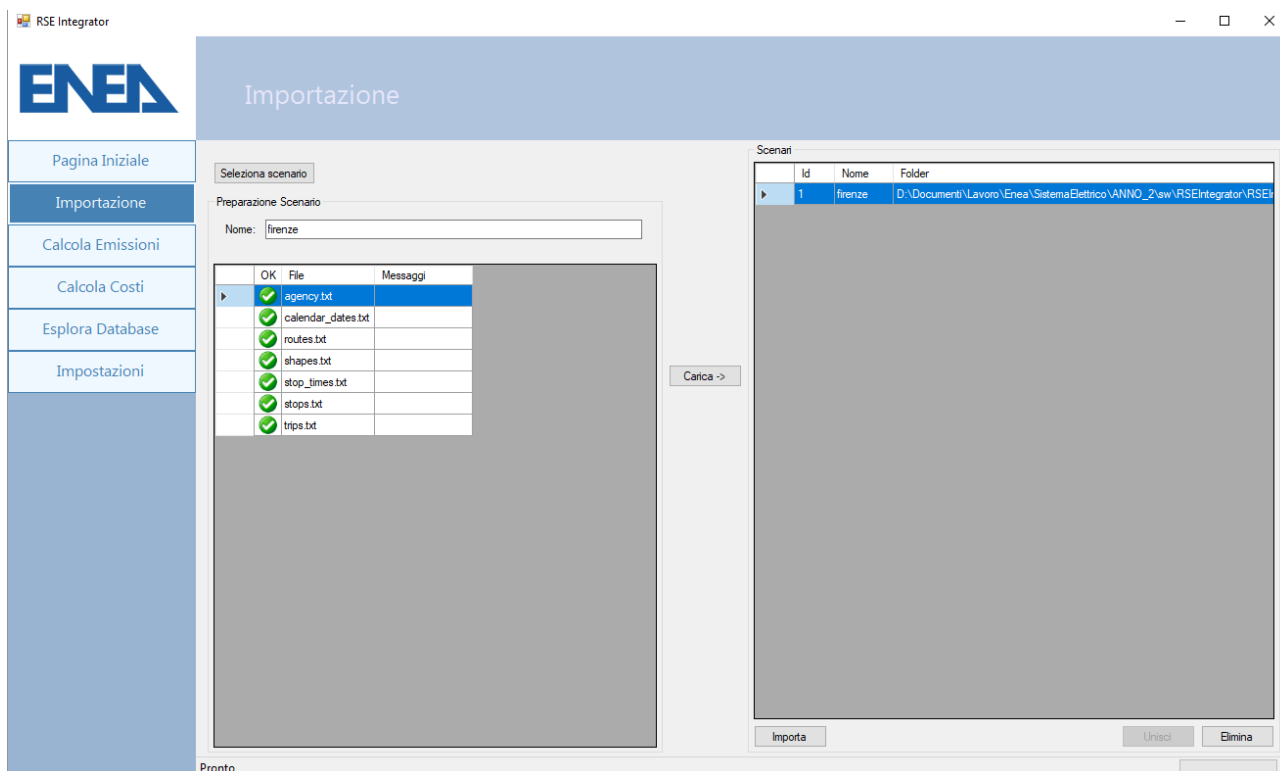


Figura 23 - Schermata della scheda di importazione

Selezionata la cartella contenente i file del GTFS il sistema esegue una verifica sul formato dei file segnalando eventuali anomalie. Qualora tutti i test vengano superati viene abilitata la funzione *Carica* che salva in memoria tutto il GTFS. In questa fase, reiterando le operazioni, è possibile caricare più GTFS contemporaneamente ed effettuare un'unione delle reti. Questa funzione può essere per unire GTFS di periodi differenti (es: orario estivo e invernale) in modo da poterle importare come un unico periodo un unico periodo. Caricato il GTFS in memoria ed eventualmente unito con altri GTFS è possibile avviare la procedura di importazione attraverso il pulsante *Importa*.

Nella procedura di importazione è possibile filtrare il GTFS secondo le seguenti grandezze:

- Agenzia: operatore del TPL come ad esempio: ATAC, ROMA TPL, Trenitalia, ATM, ATF ...;
- Tipi di linea: tipologia di servizio definito dallo standard GTFS;
- Linea: Specifica linea
- Data: giorno da importare. E' stato concordato con ENEA che i giorni da importare sarebbero stati 4 e rappresentativi dell'intera annualità ed in particolare un giorno festivo ed uno feriale per periodi estivi o invernali. La codifica per i giorni da importare è la seguente:
 - 1: feriale invernale;
 - 2: festivo invernale;
 - 3: feriale estivo;
 - 4: festivo estivo;

è lasciata comunque all'utente la possibilità di scegliere un qualsiasi giorno come rappresentativo del periodo e del servizio.

Al termine della procedura di filtraggio è possibile salvare i dati nel database attraverso il pulsante *Salva*. Una volta salvati i risultati sono subito accessibili dalla scheda *Esplora Database*. La procedura di salvataggio, sovrascrive i dati preesistenti all'interno del database.

Durante lo sviluppo di questo software, sono state integrate nella procedura di importazione, delle funzioni di clustering spaziale usate nella stima dei capolinea e anche delle funzioni di aggregazione per il calcolo di alcuni indicatori utili per l'esecuzione degli algoritmi presenti nel progetto ONEBus e sviluppati dall'Università di Roma Tre e dall'Università di TorVergata. Le modifiche apportate al software sono state suggerite e supportate dalle due università e realizzate da Roma Tre. Il funzionamento di tale procedure è descritto nei report dell'Università di Roma Tre. E' utile riportare, all'interno di questo documento che, la procedura di clustering ha richiesto l'introduzione di un ulteriore parametro per la rappresentazione della dimensione massima dei cluster imputabile nella scheda *Impostazioni* e che le procedure di aggregazione sono state integrate all'interno della scheda *Esplora Database*.

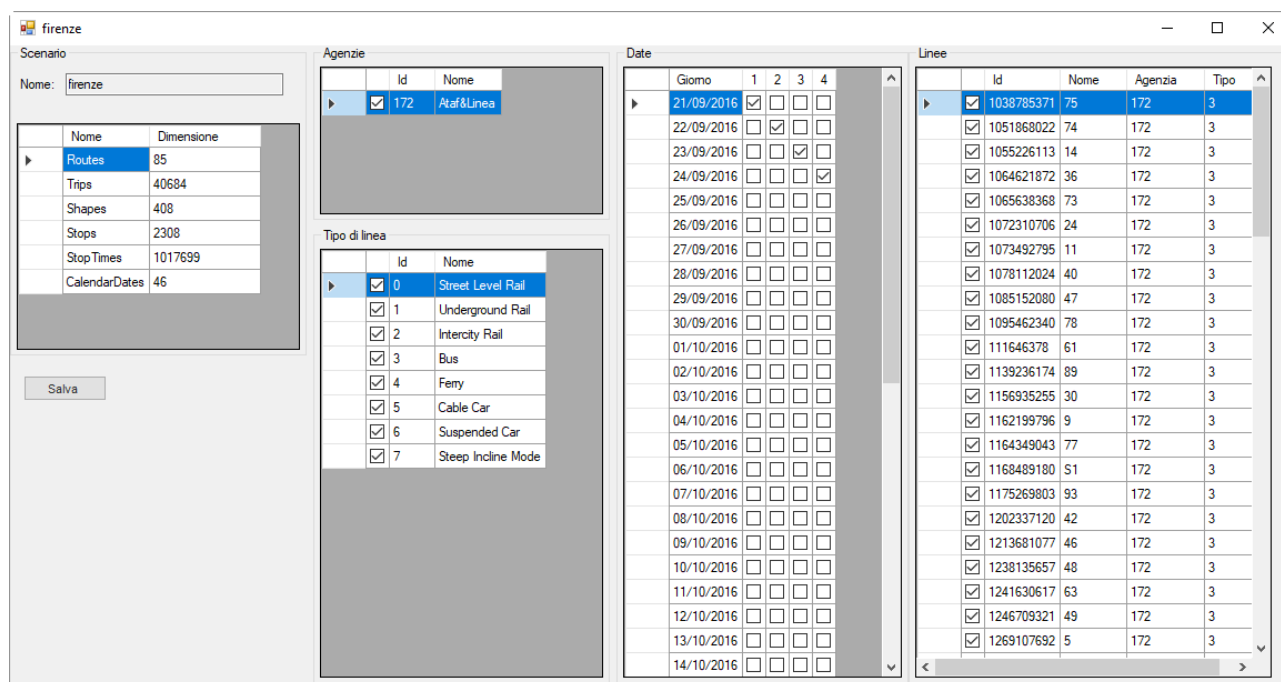


Figura 24 - Schermata della procedura di importazione

Oltre alle procedure sviluppate da Roma Tre, all'interno del software sono state integrate delle funzioni per il calcolo della distanza tra fermate, qualora queste non siano fornite attraverso il GTFS.

Questa procedura, analizzando la distribuzione delle fermate e la distanza dal tracciato del percorso, cerca di stimare il punto di fermata lungo l'arco in funzione della sequenza delle fermate della distanza della fermata dal percorso. In particolare la procedura esegue i seguenti passi:

1. Per ogni percorso prende la prima e la seconda fermata *F0* e *F1* non georeferita al percorso, ovvero sia che non sia stata associata ad un punto spaziale del percorso;
2. A partire dall'ultima fermata geo-referita del percorso, per ogni punto di percorso successivo si calcola la distanza dalla fermata *F0*. Quando questa distanza è inferiore a 10m allora si associa la fermata al punto selezionato. La ricerca termina quando i punti del percorso sono terminati o quando *F1* risulta più vicina di *F0* al percorso. Infatti qualora *F1* sia più vicino di *F0* questo significherebbe che nella ricerca lungo il percorso ci si sta avvicinando alla fermata successiva a *F0*.
3. Se non viene trovato nessun punto nello step 2. Si itera lo step 2 fissando una soglia a 20m e successivamente a 30m. Se non viene trovato nessun punto allora viene associato il punto più vicino.
4. Scelto un punto la distanza viene calcolata come progressiva lungo il percorso.

2.5.3 Calcolo Emissioni (LPTSimulator) e Calcolo Costi (BEST)

Terminata l'importazione del GTFS attraverso la scheda *Emissioni* è possibile avviare il calcolo delle emissioni con la procedura LPTSimulator sviluppata dall'Università dell'Aquila che, attraverso il RSE Integrator, viene eseguita su tutte le corse importate e i cui risultati vengono salvati all'interno del database.

Come già descritto, il SW LPTSimulator è stato sviluppato dall'Università dell'Aquila in Matlab 2016 e per poter essere integrato è stato trasformato in una libreria .NET che è stata integrata direttamente all'interno del software. Per poter essere eseguito correttamente devono essere installate le librerie runtime di Matlab scaricabili gratuitamente dal sito della Mathworks.

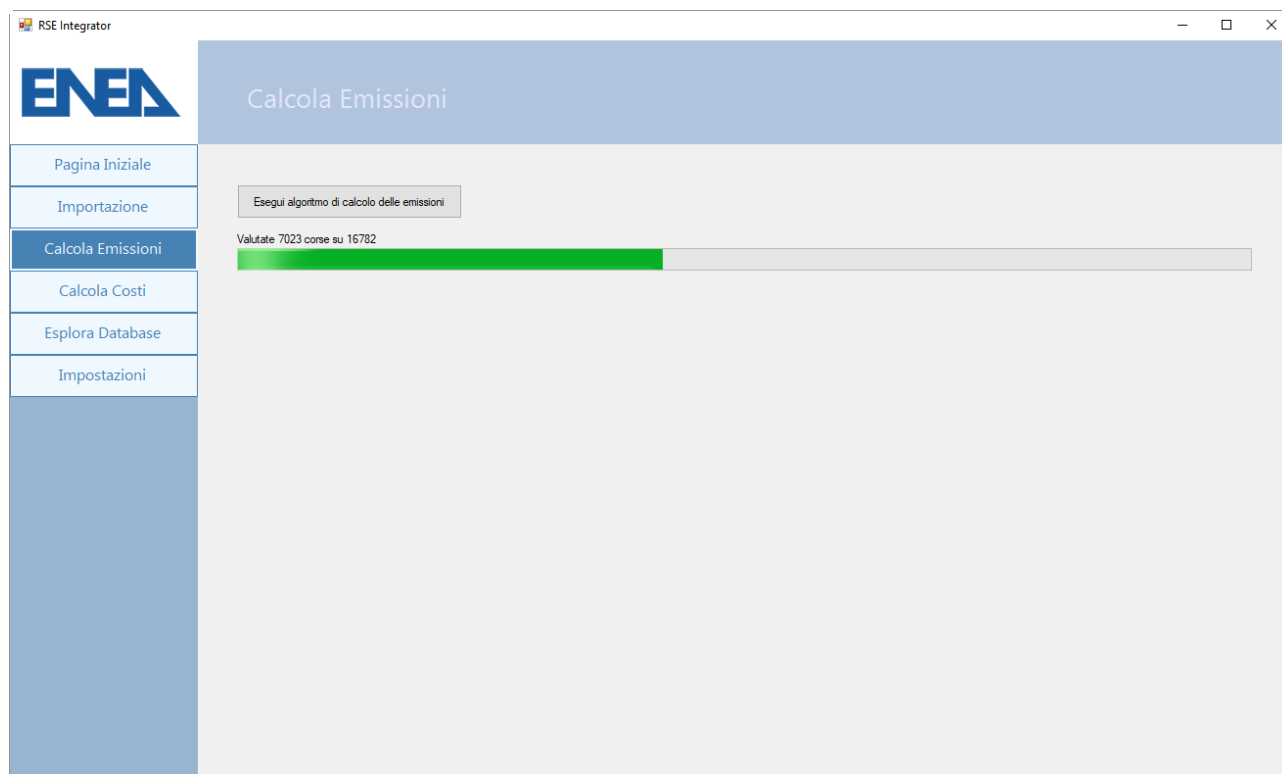


Figura 25 - Schermata per il calcolo delle emissioni

Il SW LPT Simulator simula la dinamica del veicolo in analogia con quanto già descritto nella prima parte di questa relazione e nella relazione delle attività dell'Università dell'Aquila della scorsa annualità. Perché l'integrazione della funzionalità SW siano integrabili nella procedura complessiva è necessario definire un percorso tipo coerente con la missione dei mezzi sulla rete e con il piano di programmazione impostato dell'azienda pubblica di trasporto. Il SW perciò lavora sui singoli archi della rete di trasporto, costruendo missioni tipo dei mezzi tra due fermate, in analogia con quanto già descritto nel precedente paragrafo in relazione alla simulazione della Linea 90 di Roma: per ogni arco viene simulata una fase di accelerazione, un avanzamento a velocità di crociera (coerente con il tempo di servizio previsto tra le fermate definibile da piano di programmazione), ed una successiva fase di decelerazione.

Analogamente alle emissioni è possibile lanciare la procedura BEST per il calcolo dei costi e per la valutazione tecnica ed economica dell'elettrificazione delle linee del TPL. Anche in questo caso BEST è stato sviluppato in Matlab 2016 ed è stato trasformato in una libreria .NET integrata direttamente nel codice dell'interfaccia grafica. Per poter lavorare correttamente devono essere, pertanto, installate le librerie runtime di Matlab.

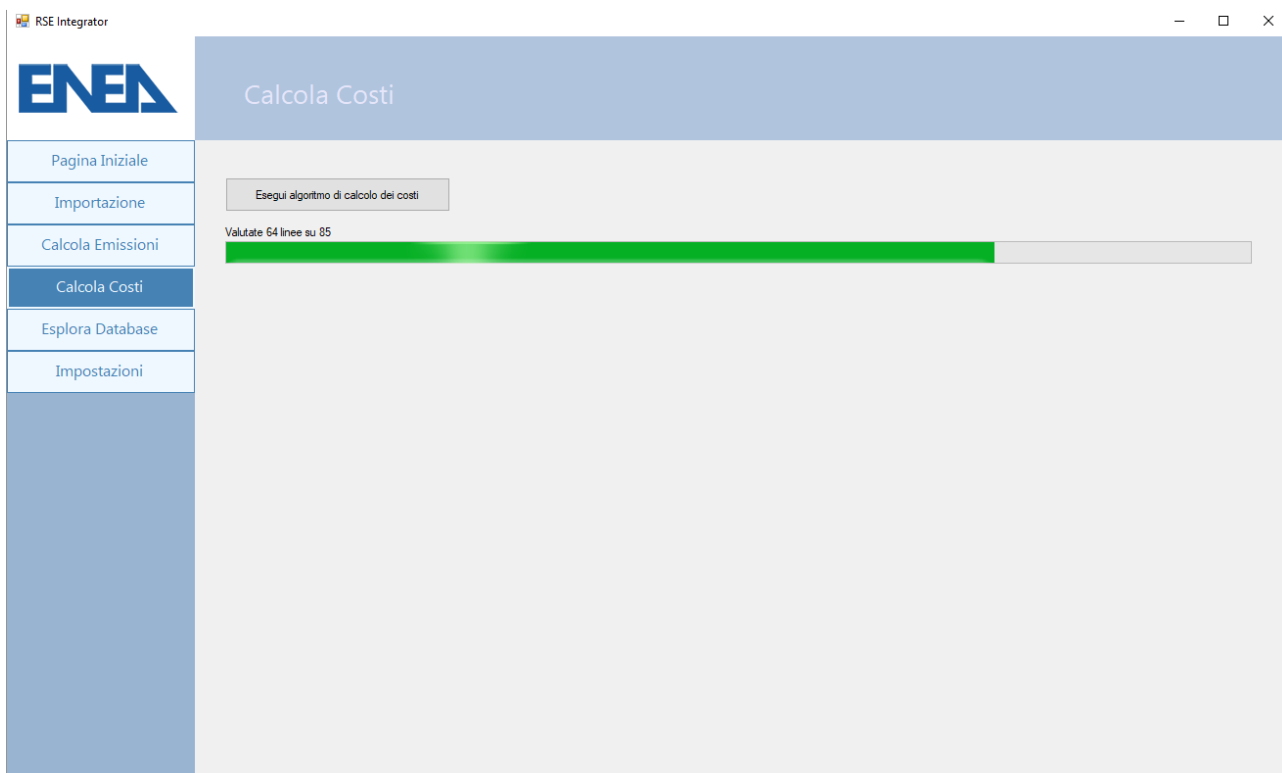


Figura 26 - Schermata per il calcolo dei costi

Sia per i costi che per le emissioni, i dati di input vengono letti direttamente dal database e dopo l’elaborazione i relativi dati di output vengono salvati nel medesimo database.

Per permettere il debug e il testing del modulo BEST, durante questo progetto, sono state sviluppate o modificati degli script di lettura e scrittura dei dati dal DB, alcuni dei quali già sviluppati durante le attività dell’anno precedente.

2.5.4 Esplora Database

La scheda, esplora database, è stata pensata per poter interrogare la banca dati in modo semplice e immediato, pertanto permette una navigazione intuitiva attraverso tutte le tabelle del database e tutti i campi memorizzati.

La navigazione permette di esplorare input:

- Linee: linee del TPL;
- Percorsi: i percorsi che compongono una linea (es: andata/ritorno, limitata ecc);
- Corse: Le corse di una linea del TPL che avvengono tra specifici capolinea su uno specifico percorso;
- Archi Corsa: gli archi tra le fermate delle corse riportante gli orari le velocità e le pendenze;
- Fermate: fermate lungo i percorsi;
- Capolinea: capolinea iniziale e finale dei percorsi;

E’ possibile filtrare anche la ricerca in funzione di alcuni campi principali come:

- Linea
- Giorno
- Fermata

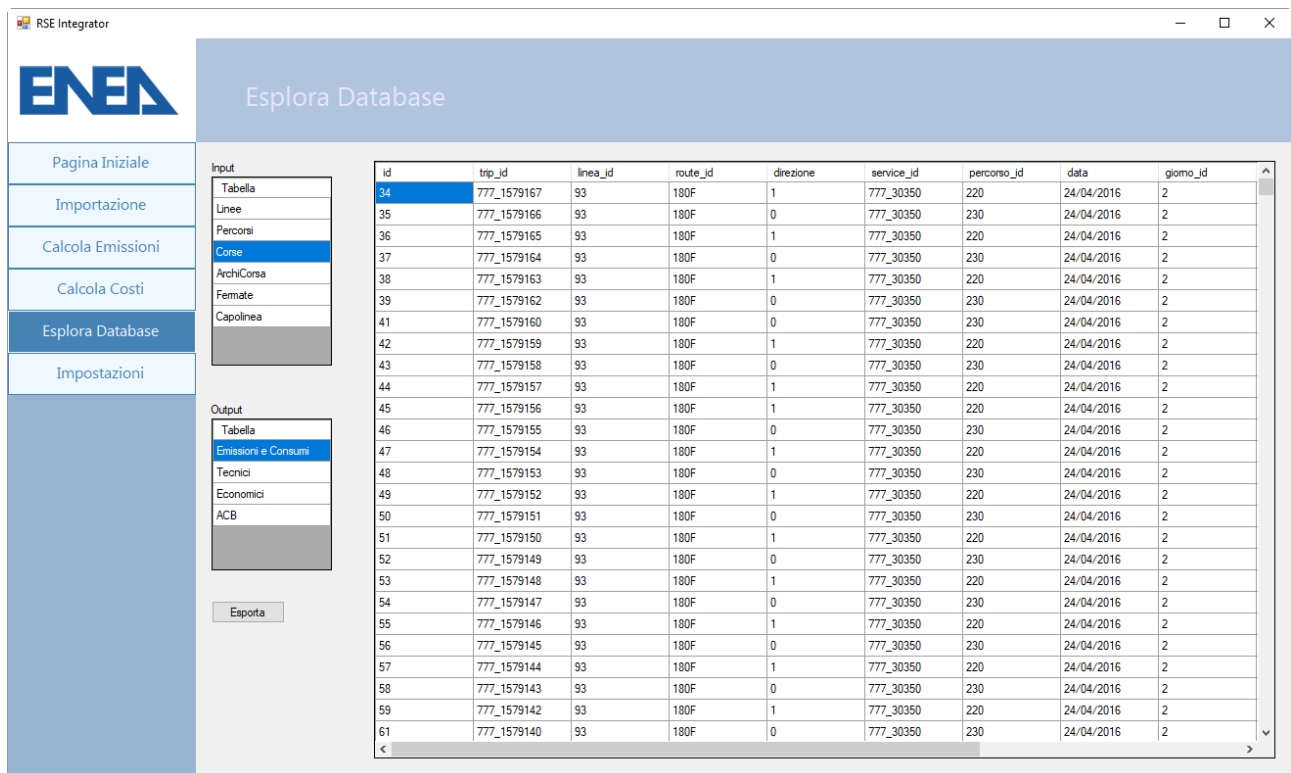
- Capolinea

Attraverso il pulsante *Esporta* è possibile esportare i dati per il software ONEBus costituito dai file:

- linee.csv: descrizione delle linee;
- linee_output_best.csv: descrizione degli output di best;
- nodi.csv: descrizione dei nodi;
- numero_stalli.csv: capacità dei nodi per tipo di tecnologia;
- percorsi.csv: descrizione dei percorsi;
- percorsi_fermate.csv: descrizione della matrice di incidenza percorsi-fermate.

La descrizione dettagliata di tali file è presente nella documentazione di ONEBus.

Oltre ai dati del TPL, importati attraverso il GTFS, è possibile navigare le tabelle contenenti i dati di funzionamento del modulo BEST.



id	trip_id	linea_id	route_id	direzione	service_id	percorso_id	data	giorno_id
34	777_1579167	93	180F	1	777_30350	220	24/04/2016	2
35	777_1579166	93	180F	0	777_30350	230	24/04/2016	2
36	777_1579165	93	180F	1	777_30350	220	24/04/2016	2
37	777_1579164	93	180F	0	777_30350	230	24/04/2016	2
38	777_1579163	93	180F	1	777_30350	220	24/04/2016	2
39	777_1579162	93	180F	0	777_30350	230	24/04/2016	2
41	777_1579160	93	180F	0	777_30350	230	24/04/2016	2
42	777_1579159	93	180F	1	777_30350	220	24/04/2016	2
43	777_1579158	93	180F	0	777_30350	230	24/04/2016	2
44	777_1579157	93	180F	1	777_30350	220	24/04/2016	2
45	777_1579156	93	180F	1	777_30350	220	24/04/2016	2
46	777_1579155	93	180F	0	777_30350	230	24/04/2016	2
47	777_1579154	93	180F	1	777_30350	220	24/04/2016	2
48	777_1579153	93	180F	0	777_30350	230	24/04/2016	2
49	777_1579152	93	180F	1	777_30350	220	24/04/2016	2
50	777_1579151	93	180F	0	777_30350	230	24/04/2016	2
51	777_1579150	93	180F	1	777_30350	220	24/04/2016	2
52	777_1579149	93	180F	0	777_30350	230	24/04/2016	2
53	777_1579148	93	180F	1	777_30350	220	24/04/2016	2
54	777_1579147	93	180F	0	777_30350	230	24/04/2016	2
55	777_1579146	93	180F	1	777_30350	220	24/04/2016	2
56	777_1579145	93	180F	0	777_30350	230	24/04/2016	2
57	777_1579144	93	180F	1	777_30350	220	24/04/2016	2
58	777_1579143	93	180F	0	777_30350	230	24/04/2016	2
59	777_1579142	93	180F	1	777_30350	220	24/04/2016	2
61	777_1579140	93	180F	0	777_30350	230	24/04/2016	2

Figura 27 - Schermata di esplorazione del database

2.5.5 Impostazioni

Il software prevede una scheda dedicata all’inserimento delle opzioni di delle singole procedure. Molti di questi parametri in realtà sono interni al database e pertanto le uniche impostazioni esplicitamente impostabili dal software sono:

- I parametri di connessione del database
- La massima distanza nell’algoritmo di clustering per la stima dei capolinea;

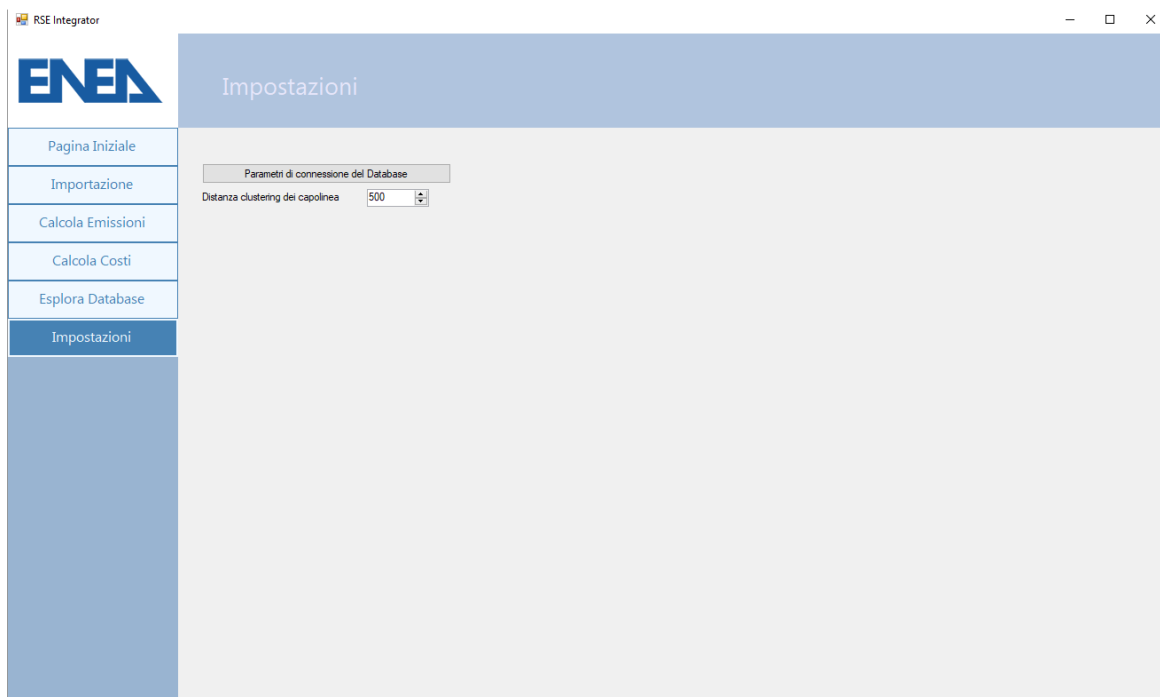


Figura 28 - Schermata della scheda delle impostazioni

3 Conclusioni

In sintesi in questa attività di ricerca si è fatto uso di uno strumento SW appositamente progettato per valutare il consumo di energia degli autobus per le applicazioni urbane.

Si sono presi in considerazione sia mezzi convenzionali, sia mezzi innovativi, ibridi ed elettrici puri. In particolare nel periodo di ricerca 2016-17 è stato modellizzato il powertrain di autobus ibridi di tipo serie e di filobus, mentre nel precedente periodo di ricerca 2015-16 erano stati modellizzate le motorizzazioni diesel convenzionali e quelle elettriche a batteria.

Lo strumento SW simula il comportamento dinamico dei veicoli su percorsi realmente misurati, consentendo di valutare le loro prestazioni energetiche su base Tank to Wheel (TTW). I risultati vengono poi estesi a una base Well to Wheel (WTW) utilizzando i risultati numerici e sperimentali relativi al consumo di energia Well to Tank (WTT) da parte del Centro comune di ricerca dell'Unione europea, per tenere conto dei potenziali benefici per la comunità connessa con utilizzare diversi vettori di energia.

La sensibilità del consumo di energia con i principali parametri di influenza è stata valutata in coerenza con l'approccio CorinAIR definito all'interno dell'UE e già applicato ai mezzi convenzionali. I coefficienti delle curve interpolanti richieste che descrivono la dipendenza dal consumo di energia TTW dal carico utile dell'autobus, dalla pendenza stradale e dalla velocità media di servizio sono stati calcolati e resi disponibili per la comunità scientifica.

Con questo approccio, anche i risultati presentati, come lo strumento SW, con il supporto dell'ENEA, sono stati integrati all'interno di un Decision Support System (DSS) che potrà essere utilizzato dalle autorità locali dei trasporti per la selezione delle soluzioni tecnologiche più idonee alle diverse situazioni. Il DSS sarà presto presentato in pubblicazioni separate.

I dati calcolati hanno mostrato chiaramente che, in termini di consumo di energia WTW, BEV è normalmente la soluzione ottimale, ad eccezione di alcune condizioni operative degli autobus MINI.

Invece, in termini di emissioni specifiche di CO₂, la configurazione BEV è sempre la soluzione migliore, mentre la convenienza tra le configurazioni CONV e HybICE della serie dipende fortemente dalle dimensioni del veicolo e dal suo ciclo operativo specifico.

4 Riferimenti bibliografici

- [1] R. Edwards, J. F. Larive, D. Rikeard, W. Weindorf. JEC Well-To-Wheels Analysis: WellTo-Tank Report Version 4.0. Report EUR 26027 EN, Joint Research Center of the European Commission, Luglio 2013.
- [2] EMEP/EEA emission inventory guidebook 2013 update Sept 2014. Section 1.A.3.b: Passenger cars, light commercial trucks, heavy-duty vehicles including buses and motor cycles, European Environment Agency, <http://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2013/>, EMEP/EEA, Settembre 2014

Breve CV del Responsabile scientifico per il DIIE – Università dell’Aquila

Carlo Villante è Professore Associato di "Sistemi per l'Energia e l'Ambiente" all'Università degli Studi dell'Aquila. È Ingegnere Meccanico e Dottore di ricerca (dal 2001) in Energetica: Impianti motori termici, con un focus principale sui Motori a Combustione Interna (MCI) alimentati a GPL.

In precedenza è stato Prof. Associato all'Università del Sannio, con sede a Benevento e Ricercatore ENEA (Ente pubblico di ricerca) nel Laboratorio Veicoli a Basso impatto ambientale. Precedentemente Ricercatore e Professore a contratto (Impianti a Fonte Rinnovabile; Macchine a Fluido; Gestione dei Sistemi Energetici; Mobilità Sostenibile; Sicurezza degli Impianti industriali) presso l'Università degli studi dell'Aquila.

I suoi principali interessi scientifici sono:

- *La mobilità sostenibile, con particolare riferimento al miglioramento delle performance, del consumo e delle emissioni: in questo ambito la sua ricerca verte sulla modellistica real-time dei MCI, sulla simulazione non stazionaria di flussi di aspirazione e scarico, sulla sovralimentazione, sulla definizione ed implementazione di strategie di controllo di veicoli a basso impatto;*
- *L’Impatto ambientale di sistemi energetici, con particolare riferimento agli aspetti legati alla riduzione del consumo energetico di fonti primarie e delle emissioni inquinanti: in questo ambito è coinvolto nell'applicazione di sistemi ad alta efficienza (cogenerativi e trigenerativi), fonti rinnovabili, analisi energetico-economica delle performance di sistemi energetici, energy audit.*

Nei suddetti ambiti, il Prof. Villante è autore di più di 50 pubblicazioni edite sulle principali riviste di settore e/o presentate nei principali consessi internazionali.