



Ricerca di Sistema elettrico

Progetto mobilità sostenibile

Fernando Ortenzi, Adriano Alessandrini, Fabio Cignini

PROGETTO MOBILITÀ SOSTENIBILE

Adriano Alessandrini, Fabio Cignini (Università di Firenze)
Fernando Orteni (ENEA)

Settembre 2017

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

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

Progetto: Mobilità elettrica.

Obiettivo: "Scenari mobilità elettrica", sub-obiettivo a.3 "Simulatore fabbisogno energetico mobilità".

Responsabile del Progetto: Ing. Antonino Genovese, ENEA.

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione tra ENEA e il dipartimento DICEA dell'università di Firenze (in breve UniFI) "Raccolta dati per caratterizzare il comportamento su strada dei bus elettrici e determinare curve velocità-consumi"

Responsabile scientifico ENEA: Ing. Fernando Orteni

Responsabile scientifico per L'università di Firenze: Prof. Adriano Alessandrini

Si ringrazia per la collaborazione e disponibilità la società TPER S.p.a.

Indice

SOMMARIO	5
1 INTRODUZIONE	6
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ E METODOLOGIA ADOTTATA	8
2.1 RACCOLTA DATI NOMINALI ED INFORMAZIONI COSTRUTTIVE DEI VEICOLI TESTATI	9
2.1.1 IVECO Crealis Neo (Bologna)	9
2.1.1.1 Dati di targa bus	9
2.1.1.1.1 Capacità di trasporto	9
2.1.1.1.2 Pesì	10
2.1.1.1.3 Misure del veicolo e sagoma	10
2.1.1.1.4 Pneumatici	11
2.1.1.1.5 Sistema di illuminazione	11
2.1.1.2 Sistemi di accumulo, generazione e trazione	11
2.1.1.2.1 Motore termico FTP F4AFE411A*C004	13
2.1.1.2.2 Motore elettrico di trazione SKODA 2ML 3844 K/6	14
2.1.1.2.3 Sistema di accumulo energetico	15
2.1.2 MAN A 37 Lion's city hybrid (Ferrara)	15
2.1.2.1 Dati di targa bus	16
2.1.2.1.1 Capacità di trasporto	16
2.1.2.1.2 Pesì	16
2.1.2.1.3 Misure del veicolo e sagoma	16
2.1.2.1.4 Pneumatici	16
2.1.2.1.5 Sistema di illuminazione	17
2.1.2.2 Sistemi di accumulo, generazione e trazione	17
2.1.2.2.1 Motore termico	17
2.1.2.2.2 Motore elettrico	17
2.1.2.2.3 Sistema di accumulo energetico	17
2.1.3 TECNOBUS Gulliver ESP 520 (Roma)	17
2.1.3.1 Dati di targa bus	18
2.1.3.1.1 Capacità di trasporto	18
2.1.3.1.2 Pesì	18
2.1.3.1.3 Misure del veicolo e sagoma	18
2.1.3.1.4 Pneumatici	20
2.1.3.1.5 Sistema di illuminazione	20
2.1.3.2 Sistemi di accumulo, generazione e trazione	20
2.2 SET-UP DELLA CATENA DI ACQUISIZIONE E DATI PRESENTI ATTRAVERSO LA PRESA DI DIAGNOSI OBD	21
2.3 ACQUISIZIONE DEI DATI, VALIDAZIONE E PROCEDURA DI CALCOLO DEI CONSUMI	22
2.3.1 Caratterizzazione statica dei consumi dei servizi ausiliari	23
2.3.2 Caratterizzazione dinamica dei consumi e delle resistenze al moto	23
2.3.3 Raccolta del ciclo di marcia della linea per il trasporto passeggeri	25
2.3.3.1 Filtro dei dati GPS	25
2.3.3.2 Divisione del percorso in porzioni di percorso	27
2.3.3.3 Calcolo dei risultati per ogni porzione di percorso	28
3 ANALISI RISULTATI	30
3.1 IVECO CREALIS NEO (BOLOGNA)	30
3.1.1 Resistenze al moto	30
3.1.2 Consumi e rendimenti del powertrain	32
3.1.3 Assorbimento misurato dei servizi ausiliari	33
3.1.4 Acquisizione dei cicli di marcia ed esame della linea urbana di riferimento	34
3.1.5 Curva di consumo medio	37
3.2 MAN A 37 LION'S CITY HYBRID (FERRARA)	38
3.2.1 Resistenze al moto	38
3.2.2 Consumi e rendimenti del powertrain	40
3.2.3 Assorbimento misurato dei servizi ausiliari	41
3.2.4 Acquisizione dei cicli di marcia ed esame della linea urbana di riferimento	42
3.2.5 Curva di consumo medio	44

3.3	TECNOBUS GULLIVER ESP 520.....	45
3.3.1	<i>Resistenze al moto</i>	45
3.3.2	<i>Consumi e rendimenti del powertrain</i>	46
3.3.3	<i>Assorbimento misurato dei servizi ausiliari</i>	46
3.3.4	<i>Acquisizione dei cicli di marcia ed esame della linea urbana di riferimento</i>	47
3.3.5	<i>Curva di consumo medio</i>	47
4	CONCLUSIONI.....	49
5	RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	51
	APPENDICE: CURRICULUM DEL GRUPPO DI LAVORO.....	52

Sommario

Il report si configura all'interno del programma di ricerca di sistema elettrico 2016 dell'ENEA con il progetto mobilità sostenibile.

L'obiettivo di questo progetto è misurare il fabbisogno energetico di veicoli a trazione elettrica per il trasporto urbano di persone. Il particolare tale misura ha l'obiettivo di determinare gli andamenti sotto forma di equazioni matematiche, per il consumo di energia specifico per unità di lunghezza (kWh/km) al variare della velocità media del veicolo.

L'analisi è stata condotta su veicoli di diversa taglia, indagando le tre principali tipologie di veicoli presenti nell'offerta di mercato attuale per il trasporto urbano di passeggeri con trazione elettrica, ovvero: la piccola taglia (6 metri di lunghezza, 4-6 Tonnellate di peso con capienza meno di 30 posti), la media (12 metri, 13-19 Tonnellate e 90-100 posti) e la grande taglia (18 metri, 16-29 Tonnellate e 160-180 posti).

La metodologia adottata, descritta ampiamente nel capitolo 2, prevedeva: una prima fase di installazione e taratura della strumentazione di misura, una serie di prove statiche e dinamiche per la caratterizzazione del veicolo, dei servizi ausiliari e del sistema di trazione, una campagna di acquisizione durante il servizio di trasporto e l'ultima fase quella di elaborazione delle curve di consumo medio.

I risultati della campagna di misura ed elaborazione sono riportati nel capitolo 3 sotto forma di grafici per il consumo energetico al variare della velocità media del veicolo, per tutte e tre le dimensioni individuate, il medesimo capitolo contiene tutte le informazioni riguardo ogni veicolo testato. Ognuna delle curve ha una tolleranza per considerare la variabilità del carico trasportato (passeggeri a bordo), la tolleranza cresce con la dimensione del veicolo (da 0.1 kWh/km a 0.25 kWh/km).

Le curve trovate hanno una velocità media di minimo consumo specifico, compresa tra 18 e 23 km/h e in tali condizioni il consumo medio che va da 0.4 kWh/km a 2.4 kWh/km.

1 Introduzione

Il presente lavoro si inquadra nel progetto ricerca di sistema elettrico dell'ENEA presso il C.R. di Casaccia, il quale da tempo si occupa di gestire, organizzare ed incentivare la ricerca di base, la ricerca industriale e lo sviluppo sperimentale garantendo la massima diffusione dei risultati di tali attività a tutti i cittadini e utenti finali. Per l'anno 2016, parte della ricerca verte sulla razionalizzazione del consumo dell'energia elettrica per il trasporto pubblico condiviso, che adotta sempre diffusamente soluzioni a trazione elettrica e l'offerta di tecnologie atte a soddisfarla è variegata a tal punto da consentire di progettare e realizzare tutte o quasi le esigenze di trasporto. L'ENEA ha commissionato all'università di Firenze (UNIFI) il presente lavoro, riguardante le campagne di acquisizione ed elaborazione dati.

Nell'ultimo ventennio l'utilizzo della trazione elettrica senza l'ausilio di una catenaria è stato relegato alle applicazioni cittadine ove la necessità preponderante era usare autobus di piccola taglia con un basso impatto ambientale, tipiche sono le soluzioni con autobus da 6-9 metri e di peso inferiori alle 10 tonnellate. Negli ultimi anni, grazie all'impiego di nuove soluzioni tecniche nel campo degli accumulatori e dei powertrain elettrici, sono stati prodotti dei modelli di autobus interessanti dal punto di vista della sostenibilità economica anche per dimensioni e peso superiori ai limiti appena citati.

Inoltre, la presenza di soluzione ibride, che prevedano l'impiego congiunto della componente elettrica ed endotermica, ha contribuito ad aumentare la varietà di tipologie costruttive utili al trasporto urbano di passeggeri, rendendo sempre più difficile la scelta della migliore soluzione per ogni singolo caso.

Ogni configurazione, ibrida o puramente elettrica che sia, ha come fattore comune l'energia meccanica fornita alle ruote, prodotta con un motore elettrico (tranne nel caso della ibrida parallela). L'utilizzo dell'elettrico per la marcia massimizza i vantaggi di gestione energetica per i servizi di trasporto urbano, data la ridotta velocità di esercizio e i frequenti stop & go.

Dal punto di vista scientifico attualmente non è presente una linea guida che stimi il fabbisogno energetico degli autobus elettrici in base alla dimensione e a prescindere dalla tecnologia usata.

In questo rapporto si coglie la necessità di caratterizzare tale fabbisogno energetico in base alla dimensione del veicolo, quindi in base alla capacità di trasporto. Questo parametro è usato per dimensionare un servizio di trasporto in area urbana.

Facendo l'analogia con i sistemi di trazione convenzionali a combustione, esistono da tempo curve di caratterizzazione per il consumo di combustibile al variare della velocità media, così come per l'emissione in atmosfera delle principali emissioni inquinanti. Tali caratterizzazioni, denominate curve di "COPERT", indicano sullo stesso grafico l'andamento del consumo specifico (per unità di lunghezza) al variare della velocità media del veicolo e consentono di conoscere a priori e stimare quale sia il consumo di massima di una linea per trasporto passeggeri con determinate caratteristiche.

Si riporta in Figura 1 a titolo di esempio, la curva di COPERT di un veicolo a combustione, essa riporta l'andamento dell' "emission factor" di combustibile, ovvero del consumo (in g/km), al variare della velocità media.

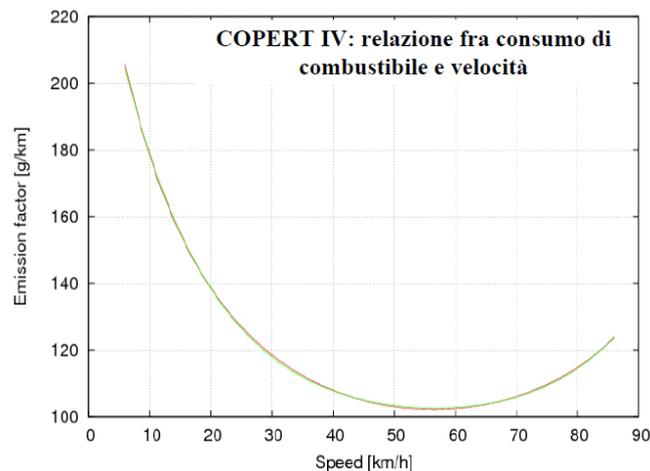


Figura 1 Curva di COPERT IV per il consumo di combustibile al variare della velocità

Ritornando a sistemi di trazione elettrica, può essere ricavata una curva analoga per quanto riguarda il consumo energetico specifico a prescindere dalla generazione della stessa energia.

Pertanto, l'obiettivo di questo lavoro è determinare quali siano i consumi energetici per kilometro di percorso, per veicoli elettrici usati nel trasporto urbano dei passeggeri (autobus) sotto forma di curve tipo quelle di COPERT.

L'analisi considera la dimensione di questi mezzi ed è implicito che analizzando veicoli di diversa dimensione, si avranno capacità di trasporto e peso in esercizio diversi.

La definizione di curve tipo COPERT che chiameremo d'ora in poi "curve di consumo medio" potrà esser d'aiuto per la messa a punto di una linea guida per dimensionare sistemi di trasporto elettrici basati su pochi parametri a livello macro.

2 Descrizione delle attività e metodologia adottata

Il consumo di un veicolo può essere misurato attraverso i sensori installati dai costruttori e disponibili attraverso la presa di diagnosi OBD, in questa presa è disponibile la linea CAN la quale viene usata per veicolare le informazioni codificate con protocollo standard SAE J1939 [1] tra le numerose centraline.

La metodologia per la messa a punto dei per la misura dei consumi, si componeva di tre fasi (descritte una ad una nei paragrafi successivi):

- Raccolta dati nominali ed informazioni costruttive dei veicoli testati;
- Set-up della catena di acquisizione;
- Acquisizione dei dati, validazione e procedura di calcolo dei consumi.

Tale metodologia è stata ripetuta su due autobus ibridi serie (a trazione elettrica) e su uno puramente elettrico con misure diverse:

- 18 m, IVECO mod. Crealis Neo, peso in ordine di marcia con il solo autista 17 Tonn (Figura 2)
- 12 m, MAN mod. A37, peso in ordine di marcia con il solo autista 13 Tonn (Figura 6)
- 6 m, TECNOBUS mod. Gulliver ESP520, peso in ordine di marcia con il solo autista 4 Tonn (Figura 7)

I veicoli IVECO e MAN sono stati messi a disposizione dalla società TPER S.p.a nelle flotte di Bologna e Ferrara.

Tale società è una delle poche realtà in Italia a disporre e usare con successo, veicoli ibridi serie (a trazione elettrica) di dimensioni uguali o superiori di 12 m.

I costruttori dei veicoli esaminati hanno installato due linee di comunicazioni CAN separate, quindi due prese di diagnosi, una per ogni tipologia di motore a bordo. Questa scelta ha principalmente delle motivazioni di sicurezza e semplicità di gestione dei dati per le centraline.

Alla presa di diagnosi cui ci si è collegati, si potevano leggere tutti i dati del motore termico e i dati cinematici del veicolo mentre i dati del sistema di trazione elettrico erano sulla seconda linea di comunicazione CAN, separata dalla prima e non accessibile.

Alla luce del fatto che tramite questa linea non sono presenti i dati della trazione elettrica, i consumi sono stati stimati basandosi sulle misure di consumo con motore termico acceso, in particolare:

- Misure statiche (a veicolo fermo)
- Misure dinamiche, suddivise a sua volta in
 - Coast down (calcolo delle resistenze al moto)
 - Cicli di marcia sulla linea urbana

Seppure il protocollo di comunicazione era lo stesso per i due veicoli ibridi, i sensori installati erano diversi, pertanto la misura dei consumi ha seguito percorsi di elaborazione e validazione differenti.

Il veicolo TECNOBUS puramente elettrico, collegandosi alla linea CAN attraverso un protocollo RS-232 rendeva disponibili tutte le informazioni del powertrain elettrico e quelle cinematiche.

Tal veicolo è stato usato nel progetto di ricerca "Quibus" e nel progetto "Stazione di ricarica con braccio robotizzato e tecnologia FAST CHARGE", entrambi realizzati dal gruppo di lavoro di questo report in collaborazione con l'ENEA.

Il team composto ora dalle figure del prof. Alessandrini e dall'ing. Cignini ed afferenti entrambi al dipartimento DICEA dell'università di Firenze, al tempo dei progetti citati, era nella fila del centro di ricerca per il trasporto e la logistica dell'università di Roma la Sapienza.

In sintesi, la scelta di questi veicoli è motivata dalla disponibilità di presa di diagnosi accessibile e di protocollo di comunicazione standard, quindi dalla disponibilità di lettura delle informazioni dei sensori preinstallati dai costruttori, e dalla scelta di coprire le tre dimensioni tipicamente adottate nel trasporto pubblico.

La piccola taglia solitamente comprende i bus tra 5 e 9 m, la taglia media con lunghezze maggiori di 9 m e minore di 13 m, la taglia più grande usata nel trasporto con powertrain elettrici che non siano tram o filobus è maggiore di 13 m e solitamente è di 18 m perché realizzata con bus autoarticolati.

I tram così come i filobus non hanno problemi di autonomia (non c'è sistema di accumulo) e l'uso della catenaria li esclude da tutte quelle linee urbane dove non esiste.

L'ultimo passo della metodologia è la validazione dei dati misurati e delle elaborazioni.

Nel proseguo del capitolo saranno illustrate una ad una le fasi della metodologia qui proposta.

2.1 Raccolta dati nominali ed informazioni costruttive dei veicoli testati

L'obiettivo di questa fase è reperire quante più informazioni possibili al fine di comprendere più rapidamente l'architettura e logica di funzionamento dei veicoli testati, di seguito si propone una serie di dati salienti utili a questo scopo:

- Dati di targa
 - o Capacità di trasporto
 - o Pesì
 - o Misure del veicolo
 - o Pneumatici
 - o Sistema di illuminazione
- Sistemi di accumulo, generazione e di trazione

Nei paragrafi seguenti si riportano le informazioni raccolte per ogni veicolo.

2.1.1 IVECO Crealis Neo (Bologna)

In Figura 2 è riportato il bus mentre circola a Bologna.



Figura 2 IVECO Crealis Neo in servizio nella flotta TPER di Bologna

2.1.1.1 Dati di targa bus

2.1.1.1.1 Capacità di trasporto

- | | |
|-----------------------------|-------|
| • Posti passeggero seduti | 44 |
| • Posti passeggero in piedi | 125 |
| • Posti Totali | 169+1 |

2.1.1.1.2 Pesì

Pesi veicolo:

- Tara con conducente 16000 kg
- Peso totale ammesso 29100 kg

Inoltre, si riportano alcune altre informazioni sul peso dei principali organi:

- Motore di trazione 660 kg
- Albero di trasmissione 50 kg
- Ponte posteriore 1065 kg
- Assale centrale 1065 kg
- Pneumatico 275x70 R22.5 192 kg
- Batterie e cestello batterie 160 kg
- Idroguida 45 kg
- Sistema di captazione corrente 295 kg
- Aste di presa corrente 320 kg
- Unità di potenza ausiliaria (generatore di corrente) 880 kg
- Motocompressore 100 kg
- Reostato di frenatura 70 kg
- Unità tetto dispositivi elettronici 680 kg
- Convertitore di tensione impianto aria condizionata 200 kg
- Compressore impianto aria condizionata 100 kg
- Pedana disabili 30 kg
- Gruppo elettrogeno pronto all'uso 875 kg
- SCRT convertitore catalitico (con tubo di scarico) 125 kg
- Scatola commutazione 40 kg
- Filtro aria 9 kg
- Modulo alimentazione AdBlue 9 kg

2.1.1.1.3 Misure del veicolo e sagoma

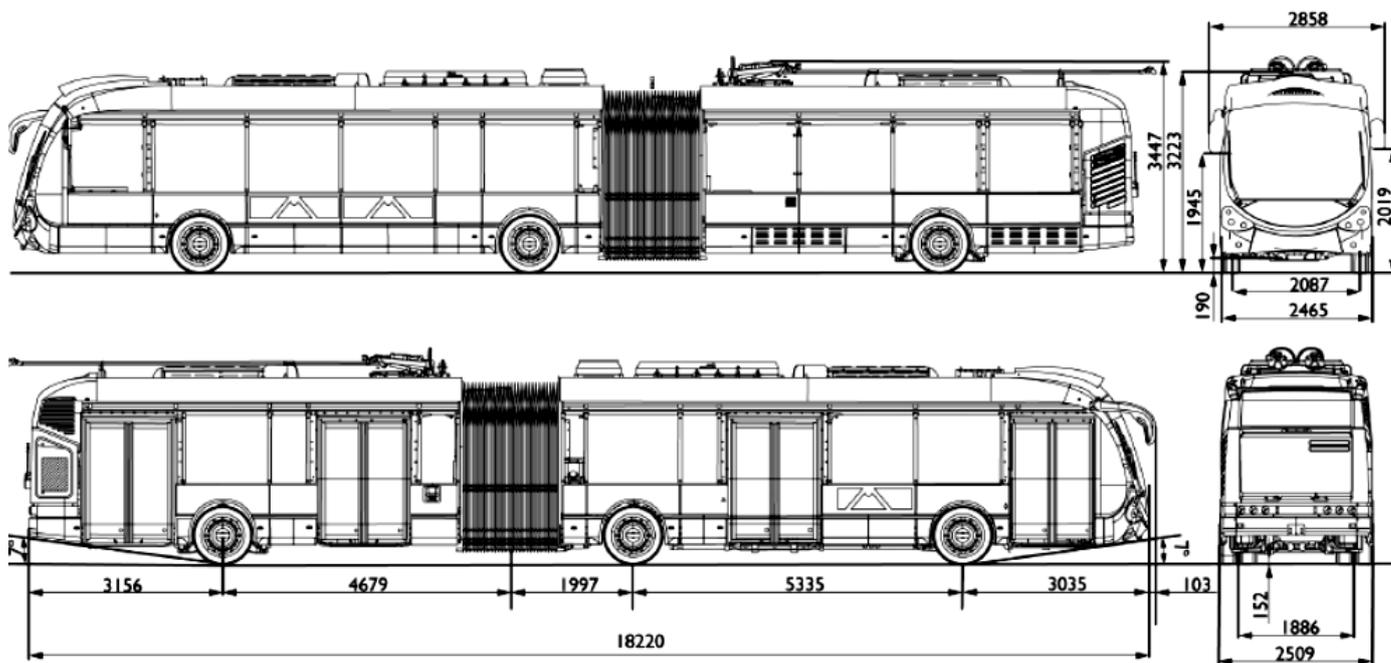


Figura 3 Sagoma e misure del veicolo

2.1.1.1.4 Pneumatici

- Anteriori: singoli di tipo tubeless 275/ 70 R 22,5
- Centrali e posteriori: gemellati di tipo tubeless 275/ 70 R 22,5

Raggio sotto carico: 0.446 m (fonte: <http://www.prometeon.com/asset/index.php?idelement=26664>)

2.1.1.1.5 Sistema di illuminazione

- | | |
|---|------|
| • Proiettori anabbaglianti | 70 W |
| • Proiettori abbaglianti | 75 W |
| • Proiettori fendinebbia | 70 W |
| • Luci di posizione anteriori | 5 W |
| • Luci di posizione posteriori | 5 W |
| • Luci di arresto | 21 W |
| • Luci di retromarcia | 21 W |
| • Luci retronebbia | 21 W |
| • Illuminazione targa di immatricolazione | 5 W |

2.1.1.2 Sistemi di accumulo, generazione e trazione

Si riporta in Figura 4 uno schema a blocchi dell'impianto elettrico di trazione del veicolo.

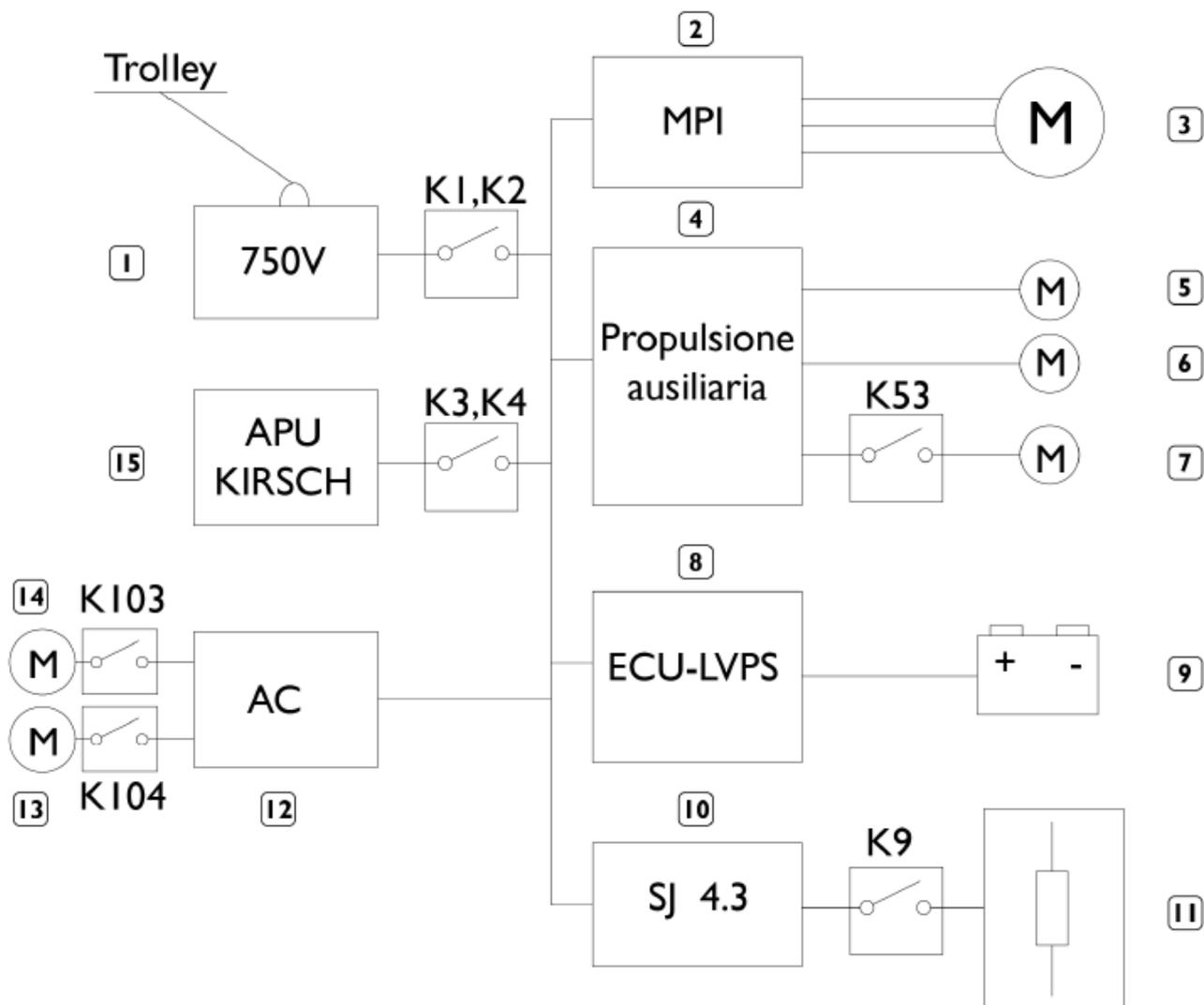


Figura 4 Schema a blocchi dell'impianto elettrico del veicolo

La legenda degli elementi riportati nel precedente schema a blocchi:

1. Alimentazione (750 V) da linea di rete esterna in corrente continua tramite le aste di presa corrente
2. MPI (Main Propulsion Inverter). Convertitore DC /AC trifase per alimentazione motore di trazione
3. Motore elettrico trifase da 240 kW per trazione veicolo. Il motore è del tipo 2ML 3844 K/6 alimentato da tre linee in corrente alternata da 420 V ciascuna e sfasate tra loro di 120°
4. Propulsione ausiliaria (da generatore diesel) costituita da una bobina di induttanza trifase del tipo TL500 che genera tre linee di tensione alternata a 400 V sfasate di 120° tra loro
5. Pompa ausiliaria per servosterzo, di potenza 2200 W
6. Motore (1100 W) di ventilazione motore elettrico di trazione e 2 motori (280 W ciascuno) di ventilazione unità a tetto
7. Motore trifase per compressore da 5500 W
8. Ricarica batterie veicolo 24V tramite ECU - LVPS (raddrizzatore costituito da trasformatore, ponte diodi, condensatore, stabilizzatore di tensione)
9. Batterie veicolo 12 V + 12 V collegate in serie
10. Regolazione e inserimento del riscaldamento nel gruppo su tetto SJ 4.3 (750 V in corrente continua)
11. Sensore di temperatura (PTC) del fluido per riscaldamento

12. Convertitore di tensione (inverter) da corrente continua (750 V) a corrente alternata (24 V) per impianto di climatizzazione
13. Compressore (motore trifase nel gruppo di climatizzazione AC136G3 AE su tetto vettura posteriore) numero 2 per condizionamento aria vettura posteriore (32 kW ognuno)
14. Compressore (motore trifase nel gruppo di climatizzazione AC136G3 AE su tetto vettura anteriore) numero 1 per condizionamento aria vettura anteriore
15. Generatore diesel APU 100 DIPME EURO6 da 100 kW per azionamento di riserva del filobus

2.1.1.2.1 Motore termico FTP F4AFE411A*C004

Il motore termico usato come generatore di potenza meccanica ha le caratteristiche nominali riportate in Figura 5 e Tabella 1.

Tabella 1 Dati nominali gruppo generazione termico

Dati motore termico	
Potenza massima	118 kW (161 CV) a 2500 rpm
Coppia massima	580 Nm (59 kgm) a 150 ÷ 1940 rpm
Ciclo	Diesel 4 Tempi
Alimentazione	Sovralimentato con Intercooler
Iniezione	Diretta
Numero di cilindri	4 in linea
Alesaggio	104 mm
Corsa	132
Cilindrata totale	4485 cm ³
Rapporto di compressione	17:1
Regime del motore al minimo	750 ± 50 rpm
Regime massimo del motore	2 800 rpm
Turbocompressore	Honeywell HTT 819158
Lubrificazione	Forzata mediante pompa ad ingranaggi, valvola limitatrice pressione, filtro olio, scambiatore di calore intercooler
Pressione olio a motore caldo	A 750 rpm: 0.7 bar A 2800 rpm: 3.5 bar
Impianto raffreddamento	Mediante pompa centrifuga, termostato per regolazione, radiatore, scambiatore di calore, intercooler
Comando pompa acqua	Mediante cinghia
Termostato	Inizio apertura 79 ± 2°C Apertura max a 96 °C

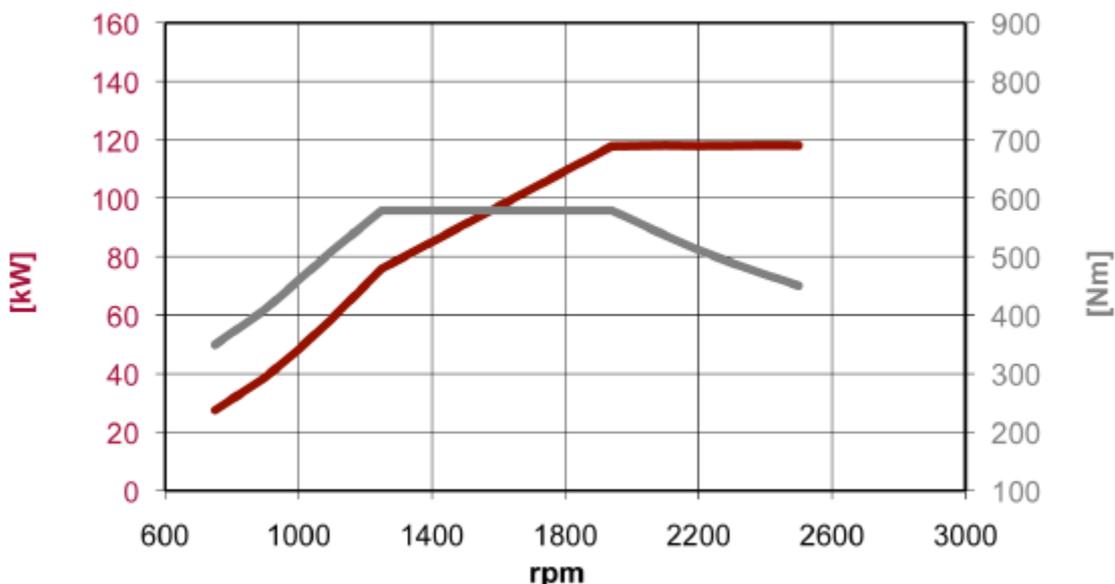


Figura 5 Curve di potenza e coppia del motore termico

In Tabella 2 sono riportati i dati nominali del gruppo di conversione dell’energia meccanica in elettrica.

Tabella 2 Dati nominali gruppo elettrogeno

Dati generatore di corrente (mod. KIRSCH APU 100 DIPME)	
Produttore	Kirsch GmbH
Tipo	APU100DIPME Euro 6
Potenza nominale	100 kW
Tensione nominale	670 V CC
Corrente nominale	150 A CC
Velocità nominale	2300 rpm
Temperatura di lavoro	-20 °C ÷ +40 °C
Umidità relativa	0 ÷ 99%
Pendenza massima ammissibile	20°

2.1.1.2 Motore elettrico di trazione SKODA 2ML 3844 K/6

In Tabella 3 sono riportati i dati nominali del gruppo di trazione elettrico.

Tabella 3 Dati nominali motore elettrico

Dati motore elettrico	
Produttore	SKODA
Modello	2MI 2844 K/6
Potenza nominale	250 kW
Tensione nominale	3 x 425 V
Corrente nominale	421 A
Velocità nominale	1 384 rpm
Velocità massima di marcia	2 600 rpm
Frequenza	70 Hz
Numero di poli	6
Numero di fasi	3
Classe di isolamento termico	200
Grado di protezione e raffreddamento	IP20 / IC 17
Classe di protezione	IP 44

compressore	
Peso	705 kg
Dimensioni	1061 mm x 779 mm x 581 mm
Conforme alle norme	IEc 349-2, CSN EN 50155

2.1.1.2.3 Sistema di accumulo energetico

La batteria di condensatori ha una capacità totale di 8280 μF . Essa consiste in 18 condensatori cilindrici con capacità singola per ogni condensatore di 460 μF , 900 V e 6 resistori di scarica.

Il circuito di potenza è composto di sei gruppi di potenza, che contengono i moduli di potenza SKiiPPACK della Semikron. Tre gruppi di potenza (A21, A22, A23) costituiscono l'Inverter collegato a ponte trifase. Il quarto gruppo di potenza (A24) è destinato alla frenatura dinamica.

Durante la frenatura, gli IGBT (transistor) dei gruppi di potenza (A26) e (A27) chiudono per restituire nella linea l'energia di recupero; i diodi in antiparallelo degli IGBT collegati come raddrizzatore monofase, mantengono la polarità uguale a quella dei circuiti continui d'ingresso dell'inverter anche se cambia la polarità della tensione dei fili di contatto.

I moduli di potenza SKiiPPACK consistono in due IGBT (transistor) con i diodi antiparalleli presenti su un radiatore comune. Un solo IGBT (transistor) chiude sui moduli di potenza (A24, A26 e A27) di frenatura dinamica e quella di recupero. I moduli di potenza SKiiPPACK includono i circuiti di controllo, retroazione e protezione. Gli impulsi di controllo dei transistor sono bloccati reciprocamente.

Oltre al segnale analogico di retroazione mandato dal sensore di corrente, è disponibile il segnale analogico della temperatura del modulo di potenza. Il superamento della temperatura massima è segnalato da un segnale binario. Il sensore di corrente interno è utilizzato, tra l'altro, per la protezione del modulo di potenza da sovracorrente e cortocircuito.

Oltre ad altre tre funzioni di protezione e sorveglianza, questo modulo di potenza impedisce il funzionamento in caso di condizioni avverse che potrebbero portare alla distruzione del modulo. I moduli di potenza sono raffreddati a ventilazione forzata dell'aria. La velocità della circolazione dell'aria di raffreddamento è comandata da rispettivi ventilatori radiali con motori in corrente alternata (E1 e E2).

2.1.2 MAN A 37 Lion's city hybrid (Ferrara)

In Figura 6 è raffigurato il veicolo usato per i test a Ferrara.



Figura 6 MAN A 37 Lion's city hybrid della flotta di Ferrara

2.1.2.1 Dati di targa bus

2.1.2.1.1 Capacità di trasporto

- | | |
|-----------------------------|---------|
| • Posti passeggero seduti | 28+1H |
| • Posti passeggero in piedi | 58 |
| • Posti Totali | 86+1H+1 |

2.1.2.1.2 Pesì

- | | |
|--|--------|
| • Massa a vuoto in ordine di marcia 1° asse kg | 4 980 |
| • Massa a vuoto in ordine di marcia 2° asse kg | 8 075 |
| • Massa a vuoto in ordine di marcia totale kg | 13 055 |
| • Portata 1° asse kg | 2 270 |
| • Portata 2° asse kg | 3 925 |
| • Portata totale kg | 5 945 |
| • Massa totale 1°asse kg | 7 100 |
| • Massa totale 2°asse kg | 11 900 |
| • Massa totale complessiva kg | 19 000 |
| • Massa limite ammessa 1°asse kg | 7 250 |
| • Massa limite ammessa 2°asse kg | 12.000 |
| • Massa limite ammessa totale kg | 19 000 |

2.1.2.1.3 Misure del veicolo e sagoma

- | | |
|--|------------------|
| • Lunghezza mm | 11 980 |
| • Larghezza mm | 2 500 |
| • Altezza Max mm | 3 300 |
| • Altezza Pavimento mm | 340 |
| • Altezza minima da terra (sotto sosp.) mm | 157 |
| • Passo mm | 5 875 |
| • Sbalzo Anteriore mm | 2 700 |
| • Sbalzo Posteriore mm | 3 405 |
| • Passo tra 1° asse e 2° asse mm | 5 875 |
| • Sbalzo anteriore mm | 2 700 |
| • Sbalzo posteriore mm | 3 405 |
| • Diametro minimo di volta tra due muri mm | 19 141 |
| • Diametro massimo di ingombro mm | 22 180 |
| • Angolo max sterzo | 52° |
| • Altezza minima interna vano passeggeri (su ponte post.) mm | 2 172 |
| • Altezza massima interna vano passeggeri mm | 2 318 |
| • Altezza piano di calpestio 1° porta mm | 340 (soglia 320) |
| • Altezza piano di calpestio 2° porta mm | 370 (soglia 320) |
| • Altezza piano di calpestio 3° porta mm | 370 (soglia 320) |
| • Larghezza corridoio interno passaruota 1°asse | 910 |

2.1.2.1.4 Pneumatici

- Anteriore 275/70 R22,5
- Posteriore (gemellato) 275/70 R22,5

2.1.2.1.5 Sistema di illuminazione

Impianto a Led sia anteriore che posteriore (tranne luci di posizione che sono a incandescenza). La potenza totale non è disponibile.

2.1.2.2 Sistemi di accumulo, generazione e trazione

Il sistema di trazione è collegato alle ruote tramite un differenziale con rapporto 5.77.
Si descrivono di seguito le due fonti energetiche.

2.1.2.2.1 Motore termico

Il motore termico usato come generatore di potenza meccanica ha le caratteristiche nominali riportate in Tabella 4.

Tabella 4 Dati nominali gruppo generazione termico

Dati motore termico MAN D0836	
Potenza massima	184 kW (250 CV) a 2300 rpm
Coppia massima	1000 Nm a 1200 ÷ 1750 rpm
Ciclo	Diesel 4 Tempi
Numero di cilindri	6
Cilindrata totale	6871 cm ³
Regime del motore al minimo	750 ± 50 rpm
Consumo su ciclo SORT 1	36.3 l/100 km

2.1.2.2.2 Motore elettrico

In Tabella 5 sono riportati i dati nominali del gruppo di trazione elettrico, il quale è costituito da 2 motori di questo tipo.

Tabella 5 Dati nominali motore elettrico

Dati motore elettrico	
Produttore	Siemens
Modello	1PV5135
Tipo	Asincrono
Potenza nominale	90 kW
Tensione nominale	650 V
Corrente nominale	300 A
Velocità nominale	6000 rpm
Velocità massima di marcia	10000 rpm
Classe di isolamento	H

2.1.2.2.3 Sistema di accumulo energetico

Il sistema di accumulo è basato su 5 moduli di supercondensatori con le seguenti caratteristiche:

- Marca e modello: Siemens ELFA2 ES063-125
- 48 celle K2R2 da 3000 F ognuna
- Tensione 380-648 V
- Capacità totale del sistema 12.5 F

2.1.3 TECNOBUS Gulliver ESP 520 (Roma)

In Figura 7 è raffigurato il veicolo usato per i test a Roma presso il centro di ricerca ENEA della Casaccia.



Figura 7 TECNOBUS Gulliver ESP 520

2.1.3.1 Dati di targa bus

2.1.3.1.1 Capacità di trasporto

• Posti passeggero seduti	8+1H
• Posti passeggero in piedi	17
• Posti Totali	25+1H+1

2.1.3.1.2 Pesì

• Massa a vuoto in ordine di marcia totale kg	2770
• Batterie al Pb-Acido (595 Ah)	1500
• Massa a vuoto in ordine di marcia totale kg	4270
• Massa totale complessiva kg	6045

2.1.3.1.3 Misure del veicolo e sagoma

Si riportano alcune informazioni di seguito (ulteriori dettagli in Figura 8 e Figura 9):

• Lunghezza mm	5 100
• Larghezza mm	2 500
• Altezza max mm	2 100

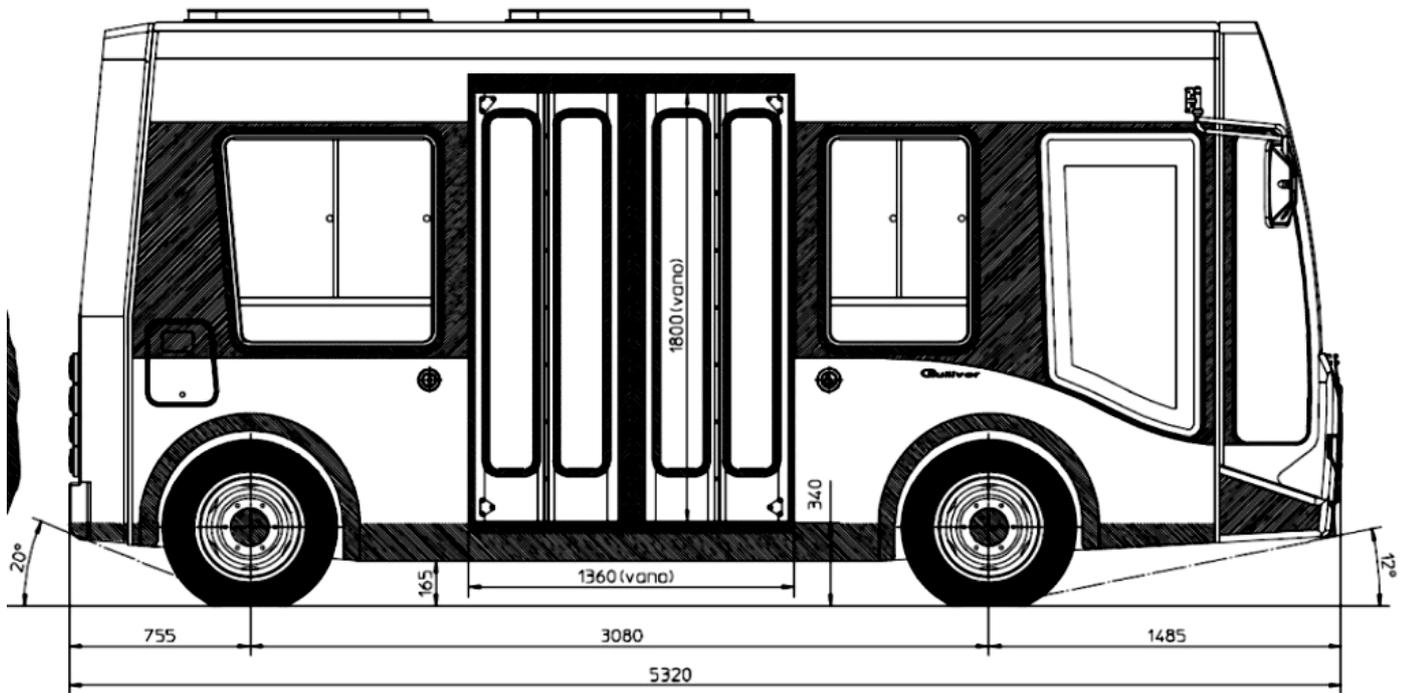


Figura 8 Ingombri del veicolo

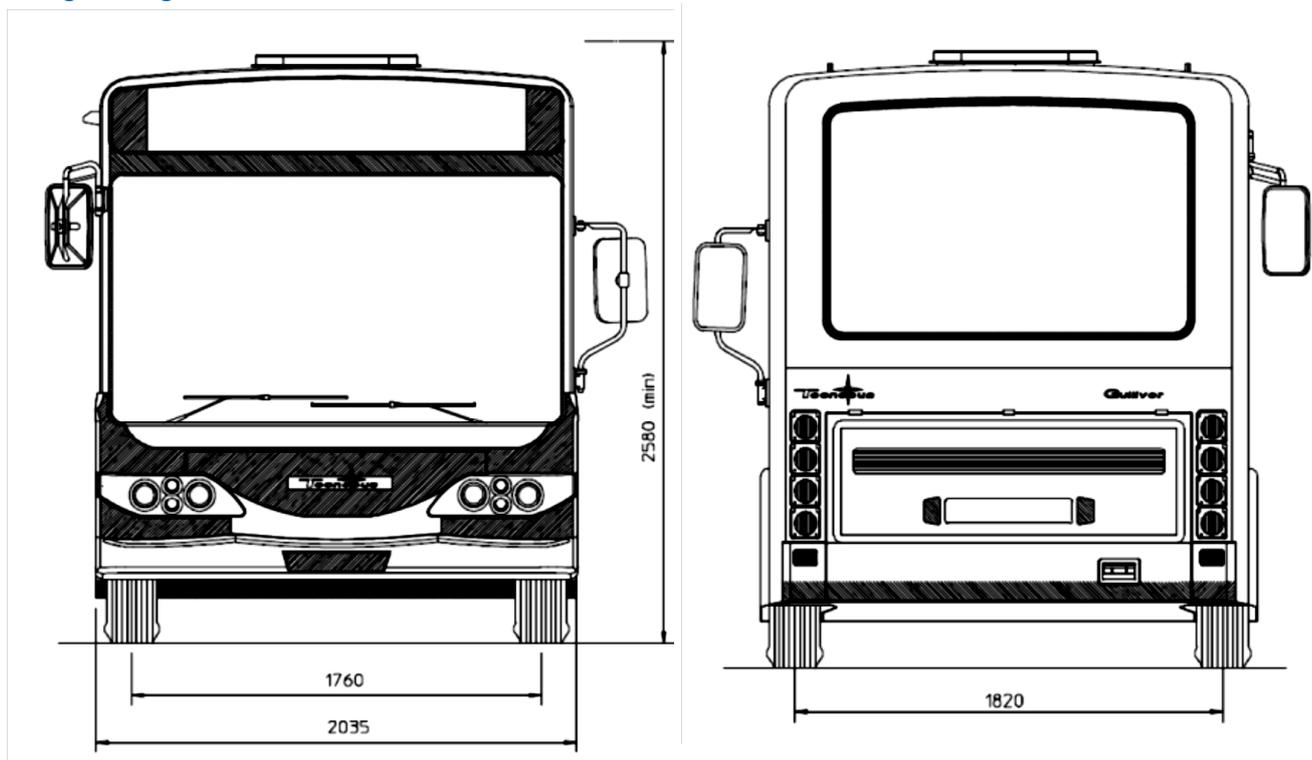


Figura 9 Sagoma limite

- | | |
|--|-------|
| • Altezza Pavimento mm | 340 |
| • Altezza minima da terra (sotto sosp.) mm | 157 |
| • Passo mm | 5 875 |
| • Sbalzo Anteriore mm | 2 700 |
| • Sbalzo Posteriore mm | 3 405 |

- Passo tra 1° asse e 2° asse mm 5 875
- Sbalzo anteriore mm 2 700
- Sbalzo posteriore mm 3 405
- Diametro minimo di volta tra due muri mm 19 141
- Diametro massimo di ingombro mm 22 180
- Angolo max sterzo 52°
- Altezza minima interna vano passeggeri (su ponte post.) mm 2 172
- Altezza massima interna vano passeggeri mm 2 318
- Altezza piano di calpestio 1° porta mm 340 (soglia 320)
- Larghezza corridoio interno passaruota 1°asse 910

2.1.3.1.4 Pneumatici

Anteriori e posteriori: 215/75 R16C.

2.1.3.1.5 Sistema di illuminazione

A incandescenza per le luci esterne, potenza 200 W complessiva.

A fluorescenza per le luci interne, potenza 200 W complessivi.

2.1.3.2 Sistemi di accumulo, generazione e trazione

Il motore elettrico è in corrente continua (72 V – 110 V) con eccitazione serie, raffreddato ad aria.

Potenza massima 24.8 kW (picco a 1039 rpm), 21 kW nominali.

La coppia nominale è 235 Nm a 950 Nm.

Non vi era un sistema di generazione in quanto il bus era puramente elettrico.

Il Sistema di accumulo è costituito da 2 cassoni batterie da 36 V, 585 Ah dal peso di 750 kg. Ogni cassone, è composto a sua volta da 9 moduli di batterie da 12 V – 65 Ah ciascuno.



Figura 10 Un dettaglio delle batterie installate sul veicolo TECNOBUS durante la ricarica

2.2 Set-up della catena di acquisizione e dati presenti attraverso la presa di diagnosi OBD

La strumentazione usata per l'acquisizione ed il salvataggio dei dati provenienti dalla linea CAN è la stessa usata sui sistemi di monitoraggio per il trasporto a chiamata, essa ha potenzialità ben superiori rispetto al semplice immagazzinamento di informazioni, come dimostrato ampiamente in progetti di ricerca realizzati in collaborazione con l'ENEA ([2] e [3]).

In Figura 11 è illustrata l'architettura del sistema di trasporto a chiamata, il quale è predisposto per interfacciare ed inviare i dati ed informazioni da un elemento all'altro del sistema, questi elementi sono:

- Il lato di bordo (vehicle) contenente le misure dinamiche del veicolo, la posizione GPS e la sensoristica;
- Il lato di terra (Application / DB server), che raccoglie, elabora e cataloga i dati ma soprattutto risponde alla richiesta di viaggio degli utenti con una pianificazione ottimizzata del servizio di trasporto;
- Gli utenti che potrebbero richiedere un viaggio (web-based GUI).

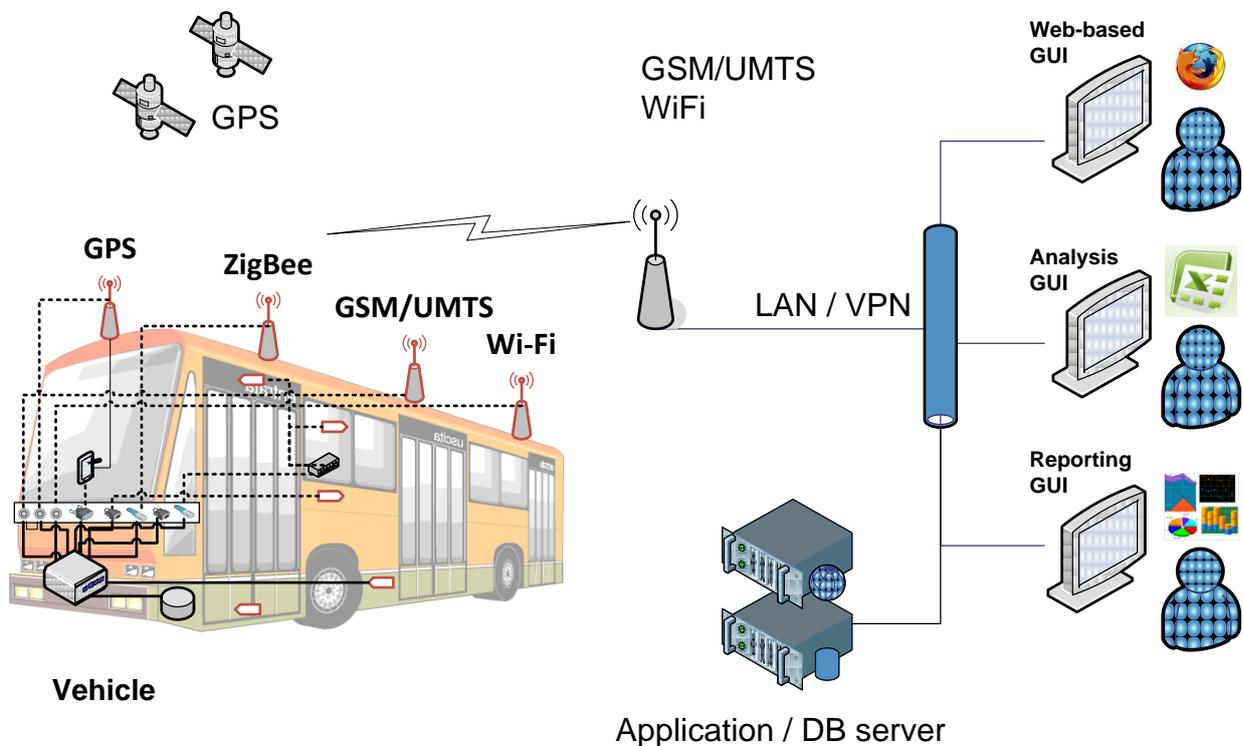


Figura 11 Sistema di monitoraggio usato in progetti di ricerca sui sistemi di trasporto a chiamata

Nella presente esperienza il sistema utilizzato è stato usato solo per la parte di raccolta dati, che poi sono stati esportati ed elaborati in un secondo momento senza passare per l'invio al server di terra.

L'elemento a bordo del veicolo è costituito da un computer embedded per impieghi industriali (Figura 12), il quale è stato collegato con un'interfaccia opportuna alla presa di diagnosi OBD per la raccolta dei dati CAN, un modulo per la rilevazione della posizione GPS integrato dava in ogni momento i riferimenti geografici e la velocità del veicolo, entrambe le informazioni venivano collezionate in un database interno.



Figura 12 Computer Embedded per impieghi industriali con varie antenne esterne collegate (Wi-Fi, GPS, GPRS/UMTS)

Tra i dati presenti dalla linea CAN dei due veicoli IVECO e MAN di seguito sono elencati quelli usati per le elaborazioni:

- Actual Engine - Percent Torque
- Engine Speed
- Tachograph vehicle speed
- Engine Coolant Temperature
- Longitudinal acceleration
- Accelerator pedal position
- Brake pedal position
- Wheel-Based Vehicle Speed
- Engine Fuel Rate

Attraverso la coppia ed il numero di giri è stata calcolata la potenza del motore termico. La temperatura del liquido di raffreddamento serviva per stabilire quando il motore funzionava a regime. La velocità del veicolo alle ruote (o al tachigrafo) è stata usata per i cicli di marcia e per la decelerazione, il consumo di combustibile misurato in litri orari è stato usato per quantificare il rendimento e il consumo specifico. L'accelerazione longitudinale, così come la posizione del pedale dell'acceleratore e del freno, erano presenti solo per il veicolo MAN.

I dati presenti sul veicolo elettrico TECNOBUS sono elencati di seguito:

- Battery Current
- Battery Voltage
- Tachimeter Speed
- Time

2.3 *Acquisizione dei dati, validazione e procedura di calcolo dei consumi*

La raccolta dati è stata eseguita in tre fasi:

- Caratterizzazione statica dei consumi dei servizi ausiliari in condizioni di regime (temperatura del liquido di raffreddamento di 90°C), i quali sono stati suddivisi in:
 - Servizi minimi (servosterzo, servofreno, compressore aria, pompe olio varie, centraline di controllo, telecontrollo, cronotachigrafo, obliteratrici, luci di posizione);
 - Luci interne ed esterne per le ore notturne (comprese le luci per i passeggeri);
 - Sistema di riscaldamento e di raffrescamento.
- Caratterizzazione dinamica dei consumi e delle resistenze al moto

- Consumo a velocità costante (variabile per step di 10 km/h tra un minimo di 5 km/h e un massimo di 60 km/h);
- Prove di coast down per la raccolta delle resistenze al moto.
- Raccolta del ciclo di marcia della linea per il trasporto passeggeri:
 - Linea urbana a vuoto, seguendo un veicolo in servizio e facendo le medesime fermate ma senza far salire e scendere i passeggeri;
 - Linea urbana in servizio ma solo con dati GPS, con i passeggeri a bordo.

2.3.1 Caratterizzazione statica dei consumi dei servizi ausiliari

Nei veicoli ibridi la raccolta dei dati poteva essere fatta solo negli istanti in cui il motore termico veniva usato per alimentare il motore di trazione, nel veicolo MAN ciò avveniva sempre, mentre nell'IVECO visto che questi per buona parte del percorso poteva collegarsi alla linea elettrica aerea, in tale situazione le informazioni di potenza non erano reperibili.

La misura dell'assorbimento dei servizi è stata fatta calcolando con la potenza generata dal motore termico, assumendo che a veicolo fermo, in condizioni di regime, questa era totalmente consumata su tutti i servizi attivi.

Un aspetto da notare è che al momento della prima accensione del mattino si attivano la maggior parte dei servizi, tra cui: il compressore pneumatico per le sospensioni (al mattino queste sono nella posizione di fine corsa inferiore e per portare il veicolo all'altezza di marcia il compressore impiega alcuni minuti) e riscaldatore per il liquido di raffreddamento del motore termico (detto Webasto, questo viene usato al fine di raggiungere più velocemente la temperatura di funzionamento a regime del motore e del catalizzatore), inoltre qualora i supercondensatori fossero scarichi parte della potenza viene usata per caricarli.

Nel veicolo elettrico la procedura era più semplice, attraverso la presa di diagnosi si potevano raccogliere sempre tutte le informazioni elettriche sulla corrente e tensione erogate dal sistema di accumulo, quindi non era necessario passare per il calcolo della potenza del motore, le misure fatte sono le medesime degli ibridi.

La validazione di questi consumi è stata fatta cercando informazioni sugli ausiliari di cui ogni veicolo è dotato, attraverso i dati e i manuali dei costruttori.

2.3.2 Caratterizzazione dinamica dei consumi e delle resistenze al moto

La caratterizzazione dinamica concerne tutte le prove fatte con veicolo in moto per quantificare il consumo al variare della velocità del veicolo e del carico applicato dal guidatore.

La raccolta dei dati è stata fatta al variare della velocità media, portando il veicolo ad una certa velocità variabile per step, e mantenendo ogni step di velocità per un tempo sufficiente alla stabilizzazione dei dati. Le resistenze al moto possono essere quantificate attraverso una prova di coast down, la quale consiste nel portare il veicolo ad una certa velocità (solitamente la massima possibile in base alla strada), quando ci si trova di fronte un percorso rettilineo privo di irregolarità disinserire la marcia innestata per scollegare il motore dalle ruote.

Applicando il 2° principio della dinamica quando il veicolo è in velocità ed il freno motore è scollegato dalle ruote (marcia in folle), le somme delle forze resistenti all'avanzamento sono le uniche responsabili della decelerazione del veicolo (quindi della forza d'inerzia).

Misurando la decelerazione e moltiplicandola per la massa del veicolo si può conoscere la forza d'inerzia e affinché si riduca il margine d'errore, la prova deve essere ripetuta più volte sullo stesso percorso, e soprattutto in direzioni di marcia opposte.

Quando la pendenza del percorso è evidente si possono suddividere i dati di una direzione con quelli nella direzione opposta, ottenendo due curve diverse, le quali poi dovranno essere mediate per coefficienti. In questo modo si tiene conto dell'effetto della pendenza che in una direzione agisce in senso positivo e

nell'altra in senso negativo, pertanto facendo la media si va ad elidere nel computo finale della potenza spesa per inerzia.

Quando la pendenza non è apprezzabile si possono usare tutti i dati insieme, purché ci siano entrambe le direzioni di marcia, anche qui l'effetto della pendenza viene eliso dalla tendenza media della curva.

L'equazione ottenuta con la curva di coast down può dar luogo, ricavandola a ritroso, ai coefficienti delle leggi fisiche di resistenza all'avanzamento ed, essere implementate in software di simulazione per calcolare i consumi dato il ciclo di marcia.

Allorquando non fosse possibile eseguire una prova di coast down, si può procedere ad un confronto iterativo in un determinato percorso tra: i consumi misurati attraverso la linea CAN e i consumi calcolati con una simulazione attraverso i dati GPS; variando ad ogni iterazione uno dei coefficienti incogniti delle leggi di resistenza all'avanzamento.

In realtà il confronto non viene fatto solo su un solo determinato percorso, ma su un certo numero di percorsi di lunghezza e velocità media diverse, suddividendo un percorso lungo in porzioni più piccole (come si vedrà nel paragrafo 2.3.3.2), ognuna con la propria velocità media.

Ogni porzione di percorso avrà un valore di scarto quadratico tra il consumo calcolato dalla linea CAN e quello simulato dalla linea GPS.

Il set di coefficienti che minimizza la somma degli scarti quadratici è quello da impostare per le successive simulazioni.

In particolare, i parametri che possono variare sono (dettagli al paragrafo 2.3.3.3):

- Il rendimento globale di conversione dell'energia meccanica in energia elettrica η ;
- I coefficienti f_0 e k dell'equazione di resistenza al rotolamento;
- Il coefficiente di penetrazione aerodinamica C_x

Il coefficiente C_x è stato impostato usando i dati di letteratura [4], l'eventuale errore commesso nell'usare un valore errato è trascurabile in quanto la componente di resistenza aerodinamica è sempre inferiore a quella del rotolamento per il campo di velocità spazzato dai veicoli in esame. La potenza spesa nella resistenza aerodinamica raggiunge valori di 15 kW a 50 km/h e 0.5 kW a 15 km/h, quindi anche una variazione elevata del C_x , ad esempio di un 10%, porta ad un errore di 1.5 kW a 50 km/h e 0.05 kW a 15 km/h.

I dati raccolti hanno permesso di calcolare:

- La potenza erogata dal motore termico ottenuta come prodotto della coppia erogata dal motore per la sua velocità angolare;
- L'integrale della potenza dà l'energia erogata da esso e consumata tra i servizi ausiliari e il motore di trazione elettrico;
- L'integrale del consumo di combustibile istantaneo (dato presente dalla linea CAN) dà il consumo totale di combustibile;
- Cambiando l'unità di misura del combustibile, dal/h a kJ/s (ovvero kW) la si può confrontare con la potenza istantanea per stimare quale sia il rendimento di trasformazione dell'energia chimica contenuta nel combustibile in energia meccanica. Tale conversione delle unità di misura è rappresentata dalla seguente equazione:

$$\text{Consumo} \left[\frac{kJ}{s} \right] = \text{Consumo} \left[\frac{l}{h} \right] \times \text{Peso specifico} \left[\frac{kg}{l} \right] \times \frac{1}{3600} \left[\frac{h}{s} \right] \times PCI \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Il potere calorifico inferiore (PCI) del Diesel per autotrazione impostato è 44 kJ/kg.

Una variabile che non è stata considerata nel sistema di acquisizione e nell'elaborazione delle curve di consumo medio è la pendenza del percorso stradale. Analizzando l'orografia del territorio, si può notare

come la pendenza è prossima allo zero per la maggior parte delle strade percorse, pertanto si è deciso di trascurare tale variabile.

L'errore che si commette porta ad una maggiore variabilità dei dati usati per calcolare le curve di consumo medio, in quanto il percorso che presenta una leggera pendenza porterà ad un consumo di poco maggiore rispetto all'andamento medio (o di poco minore a seconda della direzione di marcia rispetto a quella della pendenza). Per ovviare a questo problema sono stati raccolti molti dati, al fine di prendere l'andamento medio per interpolazione ai minimi quadrati e accettando un errore quadratico leggermente più basso.

Nel caso di pendenza nota (su un dato percorso) questa potrebbe essere simulata con i software di simulazione in commercio, conoscendo il valore dei coefficienti per le resistenze all'avanzamento determinati in questa sede.

2.3.3 Raccolta del ciclo di marcia della linea per il trasporto passeggeri

Il consumo specifico che costituisce la curva di consumo medio deve essere misurato al variare della velocità media e, trattandosi di autobus, può variare anche in base al carico a bordo (numero di passeggeri).

Il veicolo elettrico TECNOBUS aveva una strumentazione di monitoraggio completa, da cui sono state acquisite tutte le informazioni energetiche del sistema di trazione elettrico durante il trasporto passeggeri. Il consumo era calcolabile direttamente senza passare per i dati del GPS, e il consumo totale è stato ottenuto facendo l'integrale del prodotto tra corrente erogata e tensione del sistema di accumulo.

Nei veicoli ibridi, la strumentazione di monitoraggio delle flotte è stata usata durante il trasporto passeggeri solamente con il sensore di posizione GPS attivo (senza dati dalla linea CAN). In questo modo sono stati raccolti i cicli di marcia con la linea in esercizio.

I consumi sono stati calcolati sulla base della velocità raccolta dal GPS, avendo determinato per ogni veicolo i coefficienti delle resistenze al moto e seguendo la procedura descritta nel paragrafo 2.3.3.1 che segue. Inoltre, come nel caso del veicolo elettrico, per sapere la differenza di consumo al variare del carico trasportato le simulazioni sono state fatte due volte, cambiando la massa dal valore minimo al valore massimo ammesso.

Il calcolo del consumo di energia a partire dalla velocità del GPS può essere sintetizzato in questi tre passi:

- Filtro dei dati GPS;
- Divisione del percorso in porzioni di percorso;
- Calcolo dei risultati per ogni porzione di percorso.

Di seguito viene illustrata la procedura per ognuno dei passi appena citati.

2.3.3.1 Filtro dei dati GPS

I dati dei cicli di marcia raccolti attraverso il GPS sono stati filtrati, e per quanto riguarda:

- La posizione: sono validi i dati solo se raccolti con almeno quattro satelliti in vista;
- La velocità: solo se la misura è stata fatta con cinque satelliti in vista.

Si riporta in Figura 13 l'andamento della velocità del veicolo in un percorso di prova, la "Wheel-Based Vehicle Speed (CAN)" è quella acquisita dalla linea CAN (frequenza di campionamento 2 Hz), sul medesimo grafico è riportata anche la serie "GPS Raw Speed" acquisita tramite il GPS (1 Hz), così come esce dal sensore.

Si può notare che in alcuni momenti, soprattutto nei minimi relativi della velocità, nei quali vi è l'inversione dell'accelerazione longitudinale, il segnale del GPS tende ad essere impreciso e produce dei salti anomali, per questo motivo tale segnale deve essere trattato.

Nelle successive elaborazioni che usano la velocità del GPS è stato applicato un filtro a media mobile a 5 punti, affinché l'andamento del segnale GPS sia smussato dei salti di velocità, si può vedere una rappresentazione di una parte di percorso ristretta con i due segnali di velocità CAN e GPS, quest'ultimo con due varianti, una con i dati grezzi "GPS raw speed" e l'altra con i dati filtrati "GPS smooth speed".

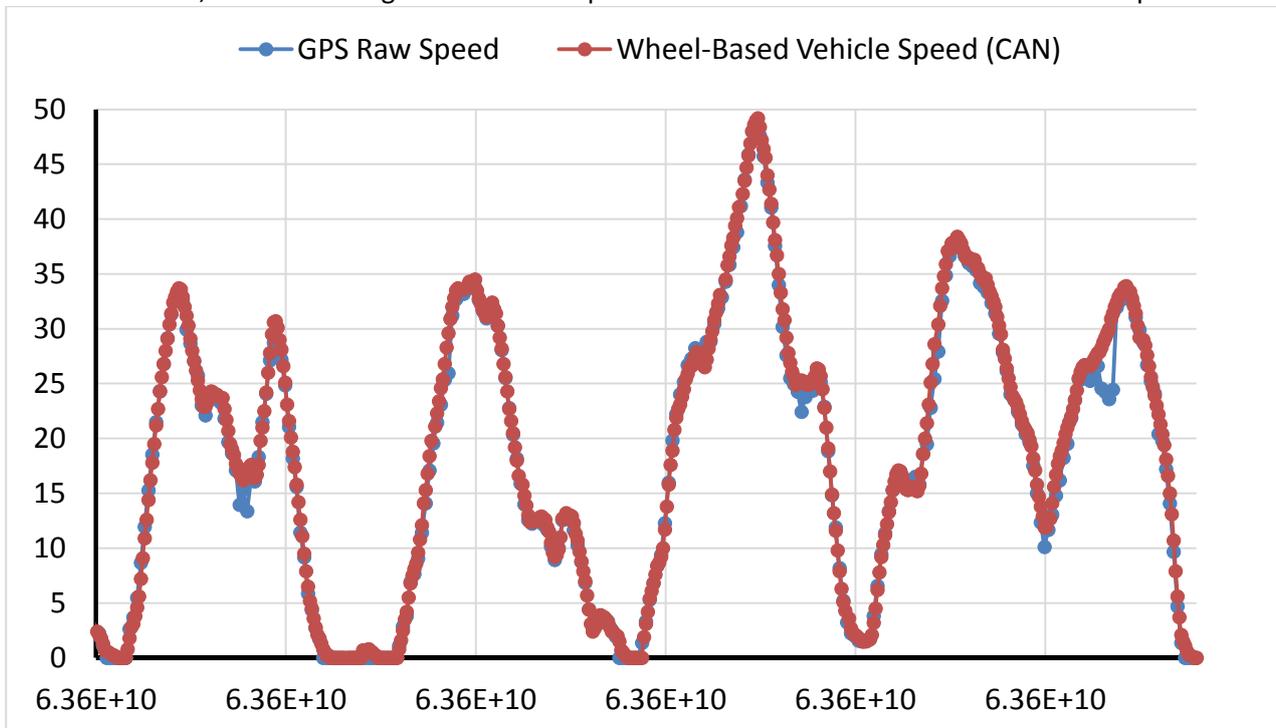


Figura 13 Andamento della velocità tra linea CAN e GPS sul percorso di prova

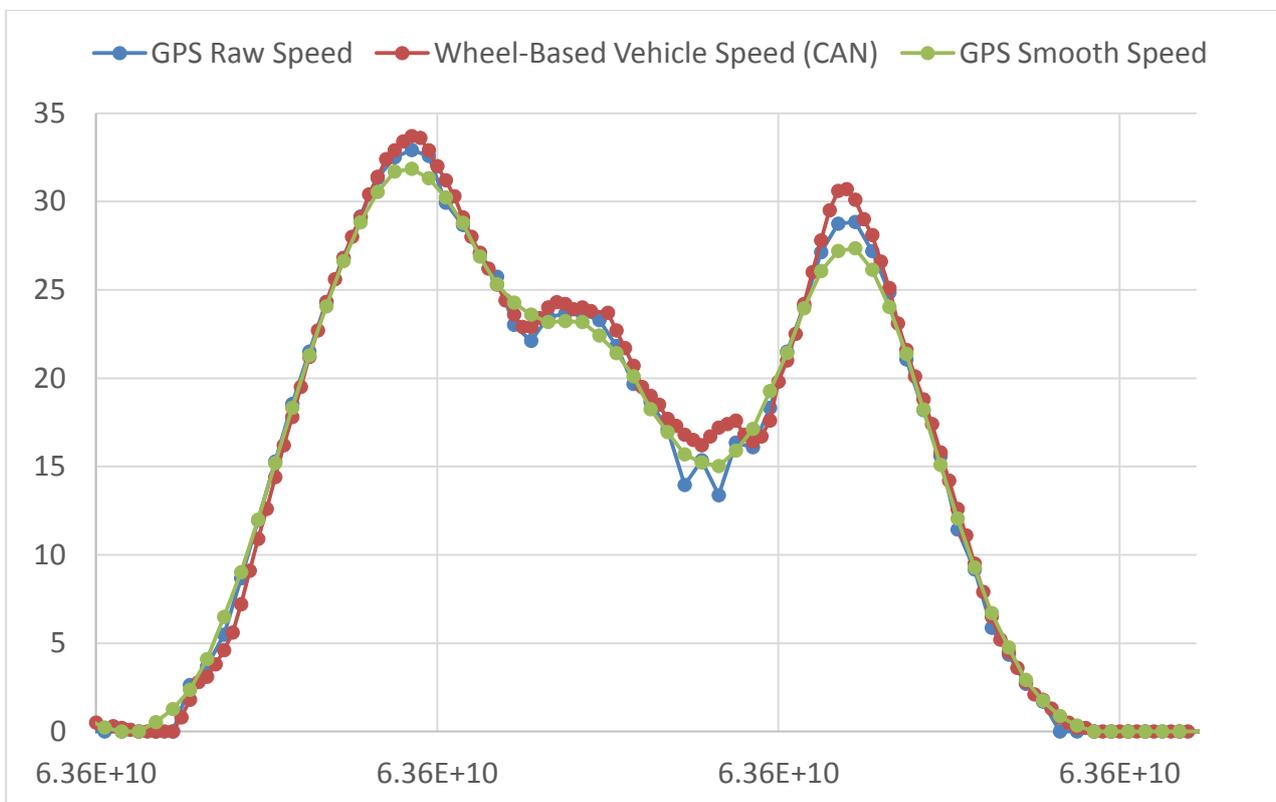


Figura 14 Andamento della velocità tra linea CAN e GPS filtrato

Per validare questo filtro è stato analizzato lo scarto quadratico istante per istante tra la velocità della linea CAN (sotto-campionata a 1 Hz per sincronizzarsi con il segnale del GPS) e la velocità del GPS nei due casi di: segnale grezzo (così come è stato acquisito) e nel caso di segnale GPS filtrato con la media mobile.

La Tabella 6 riporta l'analisi sotto forma di scarto quadratico medio e deviazione standard (dev. std.) per tutti i campioni di GPS relativi ad una linea urbana, si nota che l'operazione di filtraggio ha ridotto entrambi gli indicatori ma soprattutto la deviazione standard che indica la variabilità dello scarto istantaneo tra le due fonti di segnale.

Tabella 6 Analisi del segnale di velocità dal GPS

	CAN - Raw GPS	CAN – Smooth GPS
Scarto quadratico medio	3.51	3.37
Dev. std. degli scarti quadratici	9.34	7.45

2.3.3.2 Divisione del percorso in porzioni di percorso

Al fine determinare un valore di consumo verosimile, il percorso di prova è stato suddiviso in porzioni di percorso.

Ad esempio, in Figura 15 una parte del percorso di prova è stato suddiviso in 5 porzioni di percorso più piccole (delimitati da un riquadro celeste), ovvero in parti di percorso comprese tra due fermate di durata almeno 10 secondi (fermate o stop dovuti alla circolazione).

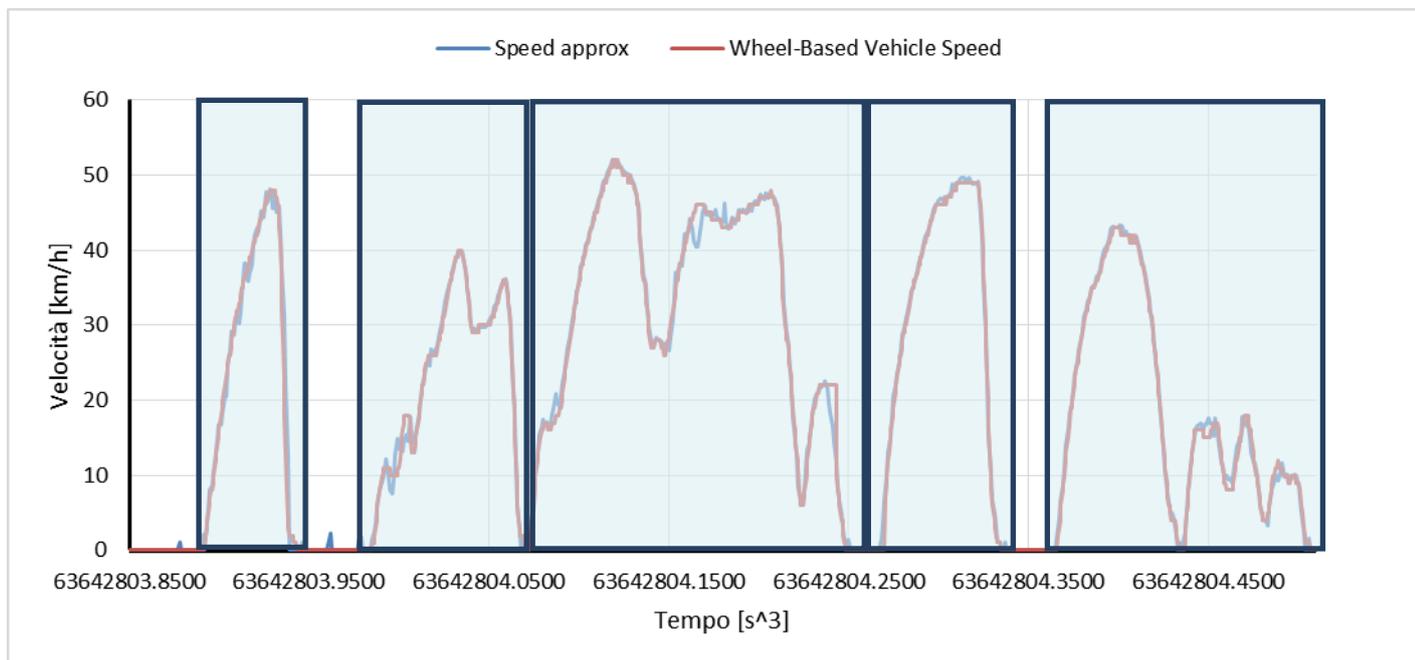


Figura 15 Percorso suddiviso in porzioni di percorso

Questa suddivisione in porzioni di percorso è servita nella fase di caratterizzazione dinamica per determinare i coefficienti per le resistenze al moto, attraverso il confronto tra il consumo ottenuto a partire dai dati CAN e le simulazioni a partire dai dati GPS.

Partendo dal presupposto che i veicoli ibridi erano entrambi dotati di supercondensatori e la potenza erogata dal motore termico non era collegata direttamente al consumo per la marcia.

Per tale motivo durante le prove di taratura, è stato stimato il tempo di attesa analizzando la potenza erogata dal motore termico subito dopo una marcia lunga, si è visto come la potenza cali ad un valore minimo e si mantenga tale, dopo un tempo variabile tra 10 e 20 secondi.

Tale tempo varia in funzione del tipo di guida, se aggressiva con poco uso della rigenerazione in frenata sarà più lungo, se al contrario la guida è più dolce potrebbe essere necessario meno tempo per ripristinare l'energia nei supercondensatori.

Usare un parametro di tempo superiore al valore medio, aumenta la precisione del confronto. Infatti, quando i supercondensatori sono carichi il motore termico alimenta solo i servizi ausiliari, e visto che questi sono stati misurati ed inclusi nelle simulazioni il loro conteggio nel computo energetico è identico.

Una volta fissati questi coefficienti la suddivisione in porzione di percorso è stata applicata a tutti i dati GPS per il calcolo del consumo specifico e per determinare la curva di consumo medio, così come descritto nel paragrafo 2.3.3.3 seguente.

2.3.3.3 Calcolo dei risultati per ogni porzione di percorso

Una volta individuati i coefficienti delle resistenze all'avanzamento al passo precedente, i dati raccolti tramite applicata la media mobile a 5 punti alla velocità acquisita tramite GPS, per ogni campione è stata calcolata:

- La potenza necessaria per il moto (calcolata per i valori di massa minima e massima in esercizio di marcia ottenuta come somma delle potenze resistenti all'avanzamento (si riportano di seguito le equazioni utilizzate, per maggiori dettagli vedere [5]):

- Inerzia;

$$P_{In} = m \cdot a \cdot V$$

- Rotolamento;

$$P_{Rot} = m \cdot g \cdot (f_0 + k \cdot V^2) \cdot V$$

- Aerodinamica.

$$P_{Aero} = \left(\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_x \cdot V^2 \right) \cdot V$$

- L'assorbimento dei servizi (costante e pari al valor medio misurato);

I simboli delle formule indicano:

- m=massa del veicolo
- a=accelerazione (negativa se in decelerazione)
- V=velocità del veicolo
- g=accelerazione gravitazionale
- f₀=coefficiente di resistenza al rotolamento degli pneumatici
- k=secondo coefficiente di resistenza al rotolamento degli pneumatici
- ρ=densità dell'aria (1.23 kg/m³)
- C_x=coefficiente di penetrazione aerodinamica

E per ogni porzione di percorso:

- Il consumo totale (per i due valori di massa), ottenuto come l'integrale della somma tra la potenza necessaria per il moto (marcia) più l'assorbimento dei servizi;
- Lo spazio percorso come l'integrale della velocità filtrata;
- La velocità media come rapporto tra lo spazio percorso ed il tempo impiegato;
- Il consumo specifico, ottenuto dal rapporto tra il consumo totale e lo spazio percorso.

Per ogni porzione di percorso si avrà il consumo specifico per unità di spazio percorso (kWh/km) corrispondente alla velocità media per la porzione di percorso esaminata, questi due dati rappresentati su un grafico rappresentano un punto della curva di consumo medio.

La nuvola di punti, deve essere interpolata per determinare una rappresentazione schematica con una semplice curva, per ogni veicolo è stata usata una curva di grado sufficiente ad approssimare la tendenza dei dati, non necessariamente la stessa.

3 Analisi risultati

In questo capitolo vengono illustrati i risultati ottenuti, suddivisi per ognuno dei tre veicoli testati secondo questi cinque elementi:

- Resistenze al moto
- Consumi e rendimenti del powertrain
- Assorbimento misurato dei servizi ausiliari
- Acquisizione dei cicli di marcia ed esame della linea urbana di riferimento
- Curva di consumo medio

3.1 IVECO Crealis Neo (Bologna)

3.1.1 Resistenze al moto

Per il veicolo in esame non è stato possibile eseguire la prova di coast down, pertanto le resistenze al moto sono state quantificate usando la simulazione iterativa, nelle quali sono stati fatti variare i tre parametri incogniti: il rendimento η e i due coefficienti della resistenza a rotolamento f_0 e k .

Tutti gli altri parametri sono stati imposti dalla teoria, o dai dati nominali del veicolo.

La simulazione è stata condotta partendo da valori noti in letteratura, ciascuno dei parametri da indagare è stato fatto variare per step discreti, ogni step corrisponde ad una variazione del 10% circa dal valore iniziale e la variazione è stata fatta nelle due direzioni (aumentando il valore di partenza o riducendolo).

In Tabella 7 è riportata la tabella Pivot con i risultati della somma degli scarti quadratici al variare dei coefficienti. Questa tabella è la sintesi di una versione più completa, essa riporta solo i valori di somma dello scarto quadratico medio al sotto di 0.01, tutte le altre combinazioni dei coefficienti che davano dei valori superiori sono state scartate dalla rappresentazione.

Il valore dello scarto quadratico è evidenziato a colori, la tonalità verde indica un basso valore e quindi errore piccolo, viceversa le tonalità di rosso evidenziano i valori di errore più alti.

La scelta definitiva dei coefficienti è attribuita al set che produce il minimo scarto (i parametri che lo contraddistinguono sono stati sottolineati).

Per il veicolo IVECO i coefficienti che minimizzano lo scarto quadratico (valore in tabella 0.004) sono:

- η 0.9
- f_0 0.015
- k 0.00006

Tabella 7 Scarto quadratico totale di tutti le porzioni di percorso al variare dei parametri

	η 0.8	η 0.825	η 0.85	η 0.875	<u>η 0.9</u>	η 0.925	η 0.95
f_0 0.009							
k 0.000055	0.0086						
k 0.00006	0.0071						
k 0.000065	0.0067						
k 0.00007	0.0074	0.0092					
k 0.000075	0.0090	0.0079					
k 0.00008		0.0076					
f_0 0.01							
k 0.00005	0.0066						
k 0.000055	0.0063	0.0099					
k 0.00006	0.0070	0.0075					
k 0.000065	0.0087	0.0062					
k 0.00007		0.0060					
k 0.000075		0.0068	0.0087				
k 0.00008		0.0082	0.0072				
f_0 0.015							

k 0.00002	0.0097				
k 0.0000225	0.0087				
k 0.000025	0.0080				
k 0.0000275	0.0075				
k 0.0000298	0.0073	0.0096			
k 0.000035	0.0075	0.0070			
k 0.00004	0.0088	0.0055			
k 0.00005		0.0053	0.0060		
k 0.000055		0.0064	0.0044		
<u>k 0.00006</u>		0.0085	0.0040	0.0081	
k 0.000065			0.0044	0.0062	
k 0.00007			0.0056	0.0048	
k 0.000075			0.0076	0.0045	0.0096
k 0.00008				0.0050	0.0078
fo 0.0175					
k 0.0000225		0.0092			
k 0.000025		0.0082			
k 0.0000275		0.0076			
k 0.0000298		0.0072			
k 0.000035		0.0069	0.0080		
k 0.00004		0.0074	0.0062		
k 0.00005			0.0051	0.0073	
k 0.000055			0.0058	0.0057	
k 0.00006			0.0072	0.0048	
k 0.000065			0.0093	0.0048	
k 0.00007				0.0055	
k 0.000075				0.0069	
k 0.00008					0.0089
fo 0.02					
k 0.000025					0.0097
k 0.0000275					0.0089
k 0.0000298					0.0083
k 0.000035					0.0076
k 0.00004					0.0077

In Figura 16 è riportato l'andamento delle forze resistenti al moto e l'equazione corrispondente, costituite dalla somma della forza resistente aerodinamica e della forza resistente al rotolamento degli pneumatici.

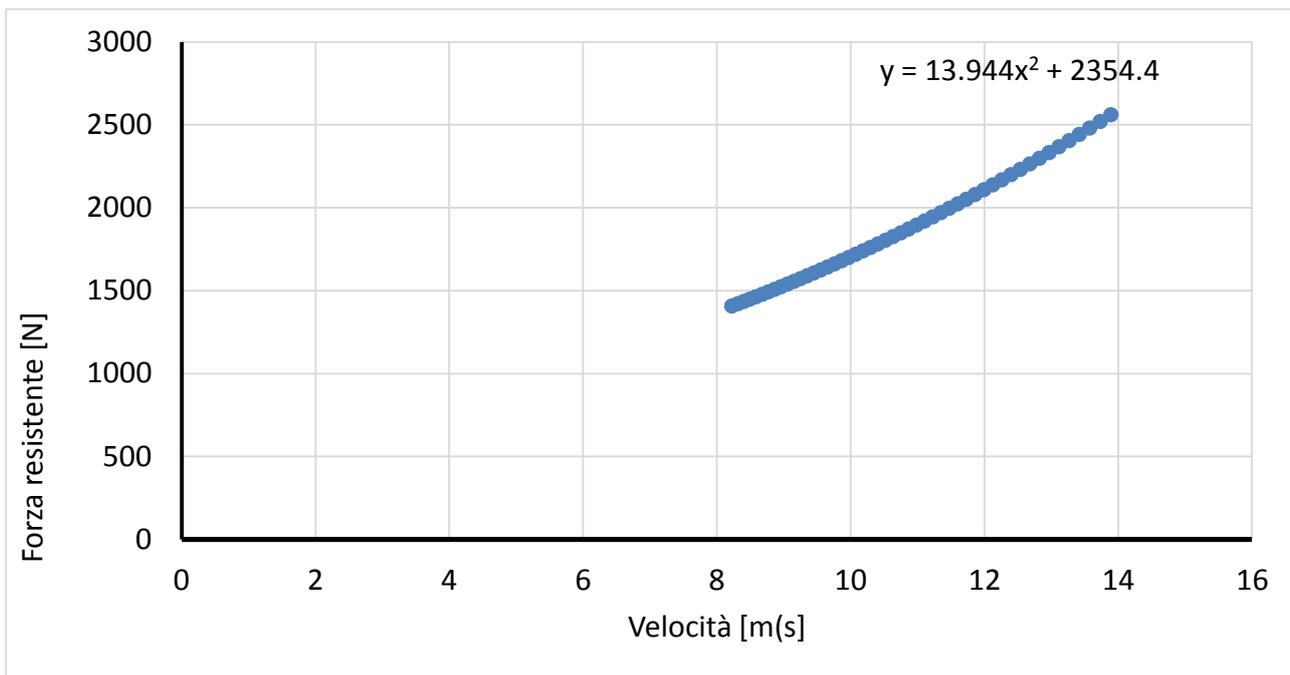


Figura 16 Curva della forza resistenza al moto

3.1.2 Consumi e rendimenti del powertrain

Come si evince dalla Figura 17, il consumo del motore termico tende ad aumentare con legge polinomiale al variare del regime di rotazione, però la parzializzazione variabile a seconda delle condizioni di marcia rende tale andamento molto variabile nei singoli punti di funzionamento.

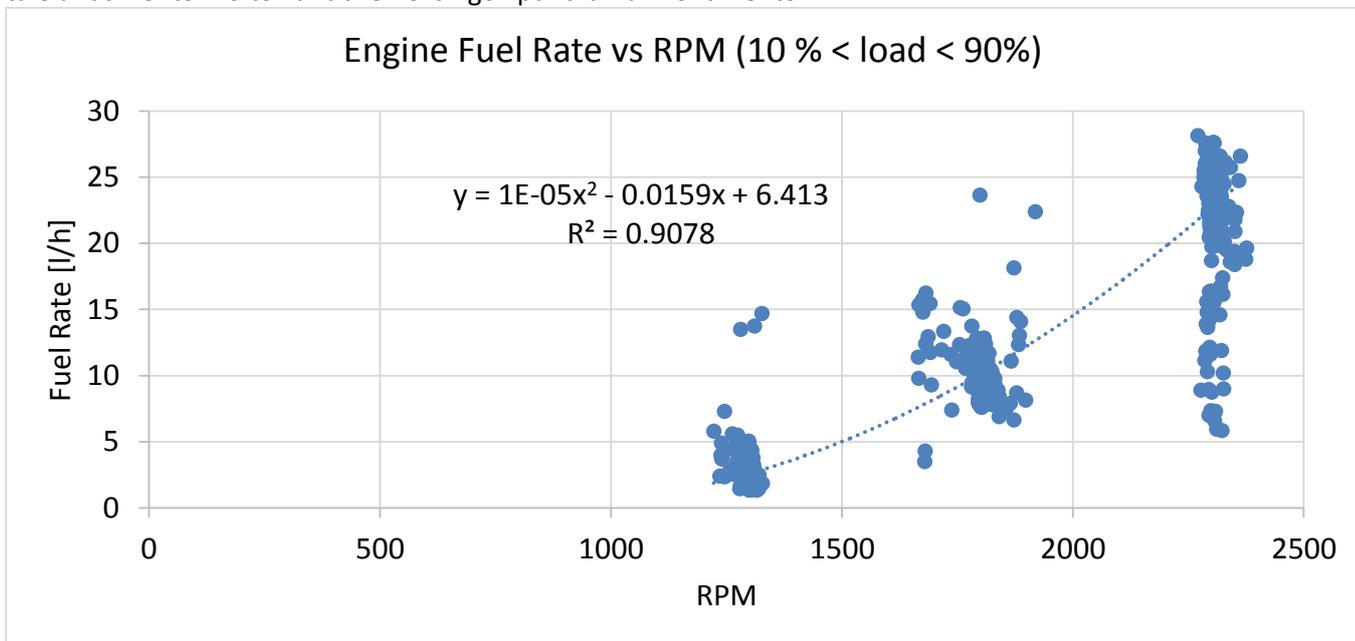


Figura 17 Consumo medio del motore termico al variare del numero di giri

Il motore termico in configurazione serie è stato regolato dal costruttore per funzionare a punto fisso su tre livelli di regime di rotazione prestabiliti:

- 1300 rpm
- 1800 rpm
- 2300 rpm

In Figura 18 è evidenziato il rendimento del motore termico, ottenuto mettendo in relazione la potenza fornita dal motore con la potenza immessa nello stesso sotto forma di combustibile liquido (44 MJ/kg di Diesel). Come si evince dalla medesima figura il rendimento medio è del 40,25% (pari al coefficiente angolare della retta interpolatrice).

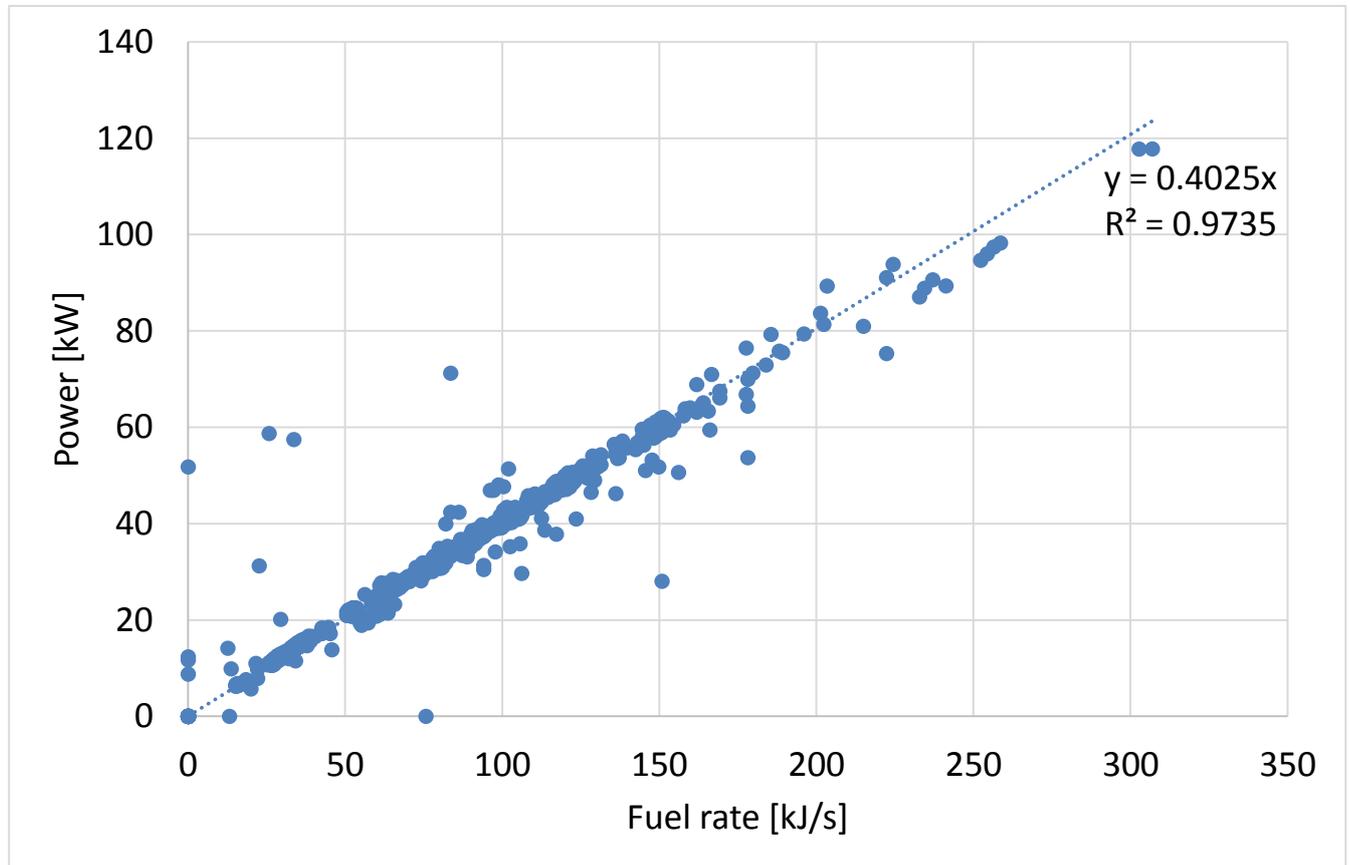


Figura 18 Rendimento del motore termico

3.1.3 Assorbimento misurato dei servizi ausiliari

Le misure effettuate danno un consumo medio di:

- I servizi di base a vuoto assorbono 12 kW (i convertitori, servofreno, servosterzo, centraline di controllo, obliterate, ecc.);
- Il compressore pneumatico 5.5 kW;
- Radiatori e ventilatori di raffreddamento 5 kW;
- Il climatizzatore e il riscaldatore fino a 60 kW;
- Tutte le luci, interne ed esterne 2 kW.

In base alla variabilità di tutti questi servizi sono stati analizzati più volte e in condizioni di funzionamento diverse (anche durante gli stop che avvenivano nella marcia). L'assorbimento medio dei servizi minimi e del compressore pneumatico collegati (riscaldamento e luci spente) era di 17 kW (Figura 19). Dato il rendimento medio del motore termico se questo fosse deputato a soddisfare tali servizi, il consumo di carburante sarebbe di poco inferiore a 5 l/h per generare i 17 kW necessari.

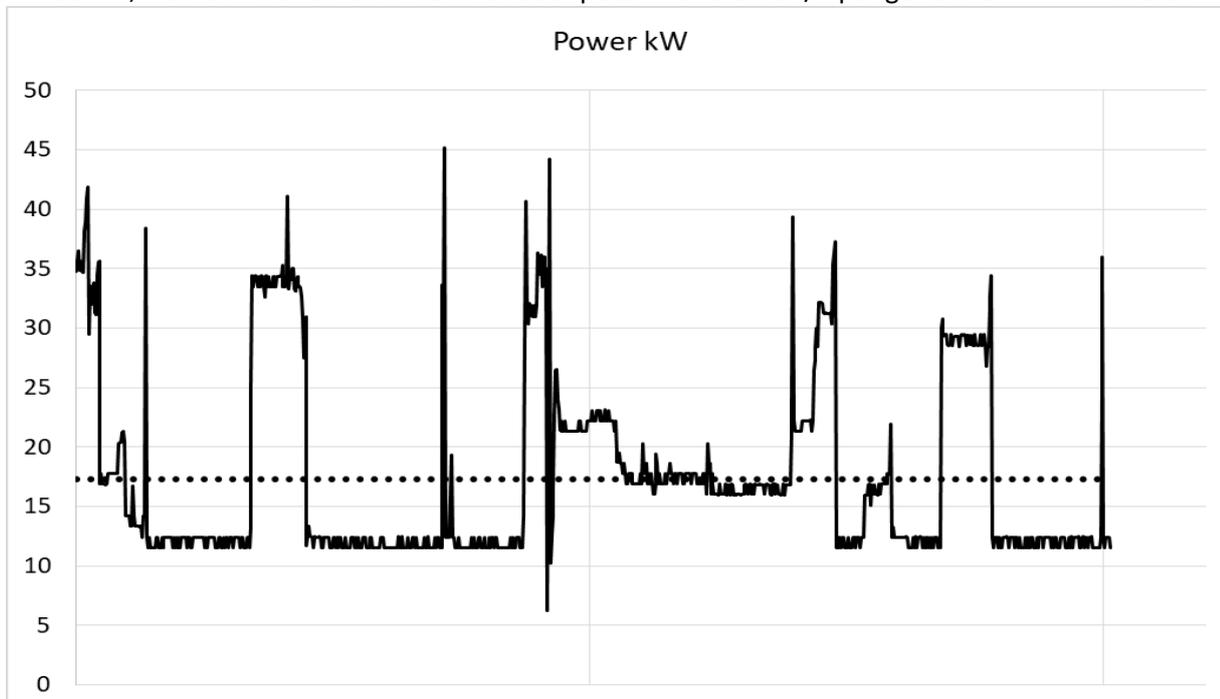


Figura 19 Assorbimento servizi medio

3.1.4 Acquisizione dei cicli di marcia ed esame della linea urbana di riferimento

La linea urbana 13 a Bologna collega Borgo Panigale (fermata Normandia) con la vicina frazione di Rastignano passando per il centro di Bologna, ed ha due varianti di percorso:

- Variante 1: è la più corta e fa capolinea da un lato in via Pavese e dall'altro a Borgo Panigale (Figura 20);
- Variante 2: detta linea 13 A, fa capolinea nella frazione di Rastignano e a Borgo Panigale.

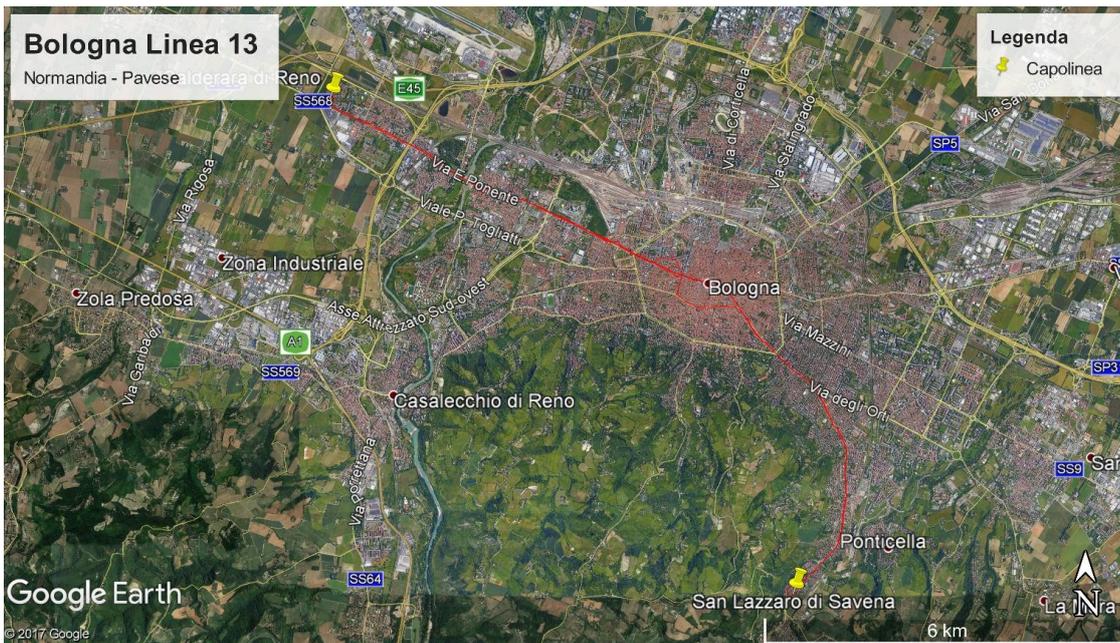


Figura 20 Percorso della linea 13

La lunghezza della linea è 30.8 km (andata più ritorno). Le fermate raggiunte dalla linea sono 38 nella direzione da Normandia a Pavese e 41 al ritorno. Nel caso si tratti della linea 13 A, si aggiungono altri 5 km alla linea e altre 8 fermate per direzione.

La velocità commerciale rilevata tra le 17:00 e le 19:00 è 12.8 km/h. La massima velocità raggiunta è 50 km/h. In Figura 21 si può trovare il profilo di velocità raccolto.

L'energia elettrica consumata per completare la linea nelle due direzioni, con veicolo scarico (solo il conducente e una persona) è di 67 kWh, ovvero un consumo medio di 2.3 kWh/km.

Il 30% del percorso è stata compiuto usando l'energia elettrica generata dal motore termico, il consumo di carburante misurato durante le prove a vuoto è circa 6.2 litri. Il motore termico viene utilizzato per muoversi nei punti non coperti dalla linea aerea, 9 dei 30.8 km percorsi nelle due direzioni, i 6.2 litri spesi servono per produrre 28 kWh.

Ipotizzando di dover produrre con il motore termico l'energia elettrica necessaria per marciare su tutta la linea, occorrerebbero dai 18 ai 21 litri di carburante (a seconda del carico trasportato) per tutto il percorso di andata e ritorno.

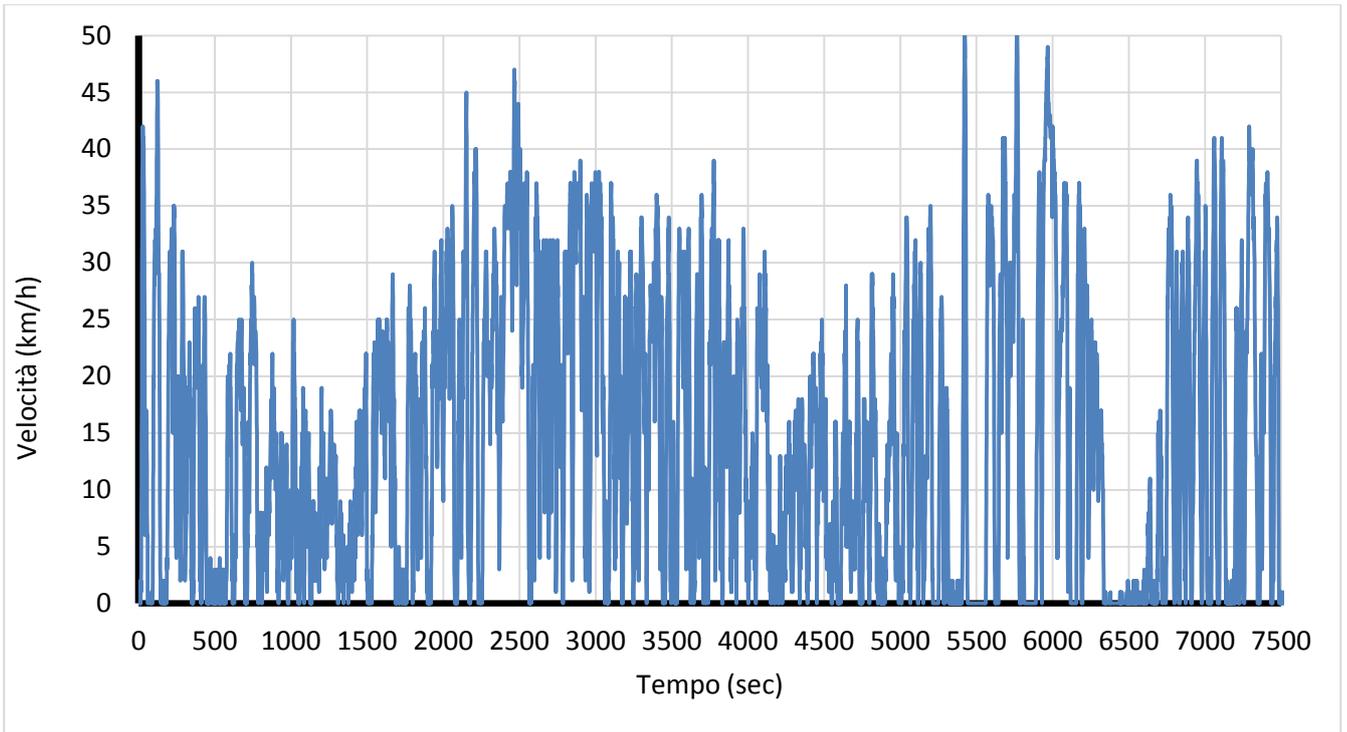


Figura 21 Profilo di velocità rilevato per la linea 13

3.1.5 Curva di consumo medio

Per calcolare i consumi si riportano qui di seguito tutti i parametri usati nelle simulazioni:

• Massa veicolo (a vuoto)	kg	16000
• Massa massima ammessa	kg	29000
• Coefficiente penetrazione aerodinamica (Cx)		0.80
• Sezione frontale	m ²	9.20
• Rendimento di conversione energia η		0.9
• Coefficiente f0 resistenza a rotolamento		0.0175
• Coefficiente k resistenza a rotolamento	m ² /s ²	0.00006
• Consumo medio degli ausiliari	W	17000

In Figura 22 è presente la curva di consumo medio per il veicolo in esame, in essa è rappresentato il consumo specifico del veicolo al variare della velocità media.

In particolare, nella medesima figura sono rappresentati due set di dati:

- Il primo rappresentato con simboli a rombo di colore blu, rappresenta il consumo calcolato con il veicolo scarico, ovvero alla massa minima di 16 tonnellate;
- Il secondo set rappresentato con i triangoli verdi rappresenta il consumo con la massa pari al valore massimo ammesso (19 tonnellate).

Per entrambi è stata ricavata e riportata sul grafico la curva interpolatrice (polinomio di secondo grado) con la rispettiva equazione e il coefficiente di correlazione R². L'andamento è da considerarsi valido solo nel range di velocità media 5-25 km/h.

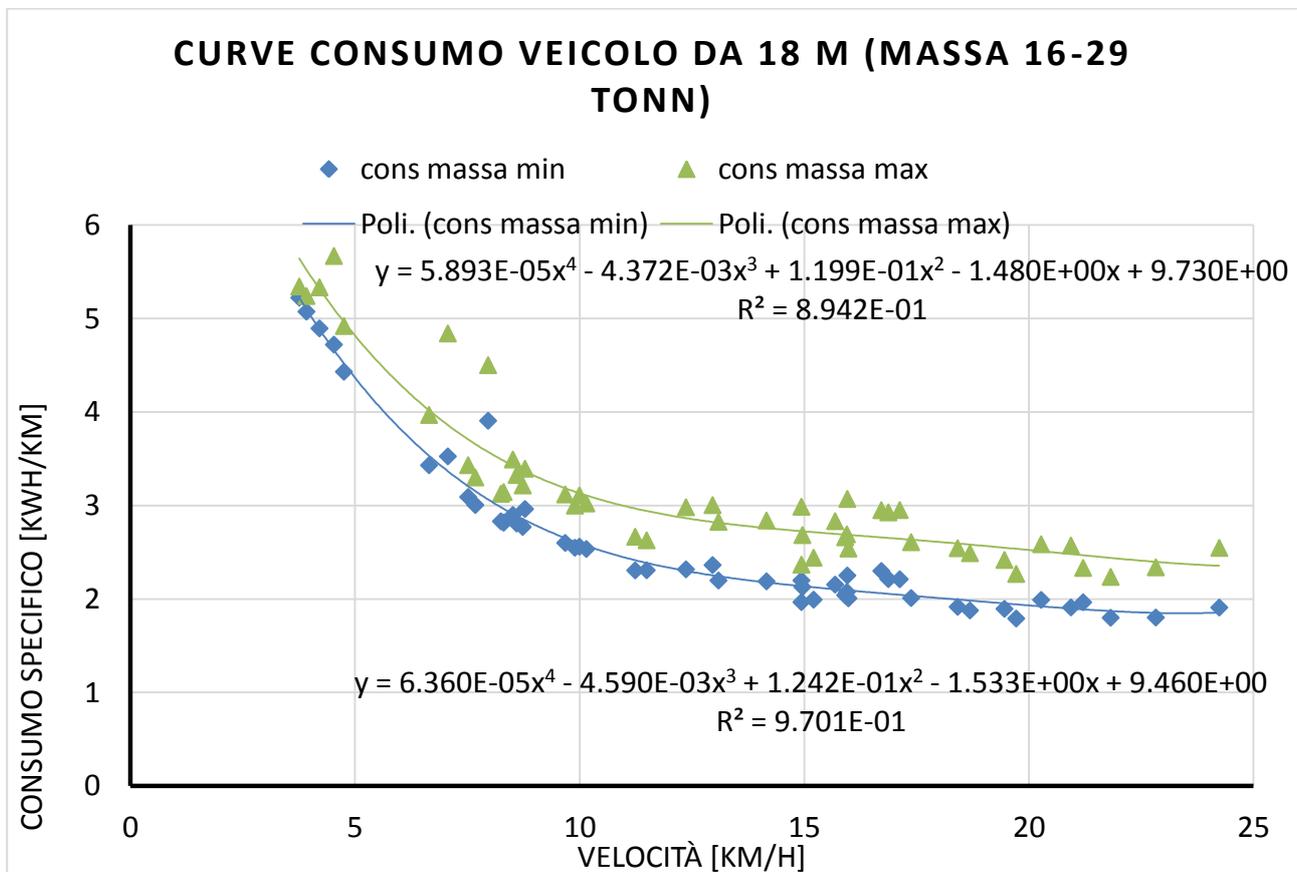


Figura 22 Curva di consumo medio per il veicolo IVECO

3.2 MAN A 37 Lion's city hybrid (Ferrara)

3.2.1 Resistenze al moto

Sono state eseguite delle prove di coast down, le quali hanno portato a definire la curva in Figura 23 a partire dal dato di velocità alle ruote acquisito attraverso la linea CAN. Visto che il percorso di prova non aveva una pendenza apprezzabile i dati sono stati usati tutti insieme in ambo le direzioni. L'equazione delle resistenze al moto viene ricavata interpolando i dati ai minimi quadrati.

Tale dato è stato filtrato con una media mobile a 5 punti e su di esso è stata calcolata l'accelerazione durante la curva di coast down.

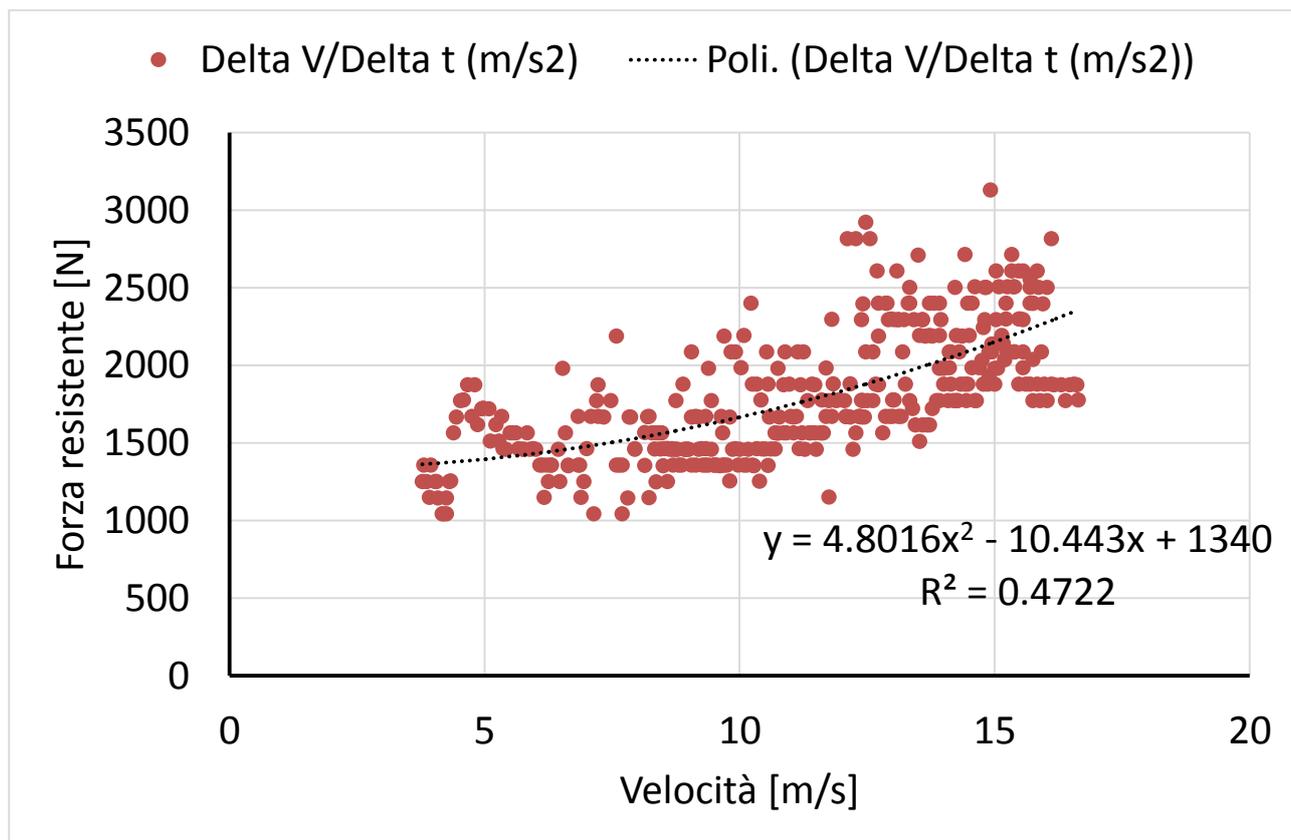


Figura 23 Curva di coast down misurata

Per ulteriore conferma, dato che il fattore di correlazione R^2 non è molto alto, è stata condotta una simulazione come fatto per il veicolo IVECO.

In Tabella 8 sono riportati i valori della somma dello scarto quadratico tra i il consumo ottenuto con la simulazione e quello ottenuto dalla misurazione con i dati della linea CAN.

La simulazione è stata condotta sui seguenti coefficienti: il rendimento η e i due coefficienti della resistenza a rotolamento f_0 e k .

Per il veicolo MAN i coefficienti che minimizzano lo scarto quadratico (valore in tabella 0.3327) sono:

- η 0.925
- f_0 0.015
- k 0.0000275

Tabella 8 Simulazione per la ricerca dei coefficienti di coast down

	η 0.8	η 0.825	η 0.85	η 0.875	η 0.9	<u>η 0.925</u>	η 0.95
f0 0.011							
k 0.0000275	0.3622						
k 0.0000298	0.3744						
k 0.00004		0.3868	0.3813				
k 0.00005				0.3831			
k 0.000055				0.3892			
f0 0.013							
k 0.0000125		0.3969					
k 0.0000175		0.3886					
k 0.00002			0.3758				
k 0.0000225			0.3556				
k 0.0000275			0.3751	0.3673			
k 0.0000298				0.3439			
k 0.00004					0.3396		
k 0.00005						0.3597	
k 0.000055							0.3796
k 0.00006							0.3969
f0 0.015							
k 0.000009				0.3900			
k 0.00001				0.3830			
k 0.0000125				0.3810			
k 0.0000175					0.3571		
k 0.00002					0.3471		
k 0.0000225					0.3567	0.3749	
<u>k 0.0000275</u>						<u>0.3327</u>	
k 0.0000298						0.3357	0.3834
k 0.00004							0.3493
f0 0.017							
k 0.000004						0.3980	
k 0.000005						0.3887	
k 0.000006						0.3809	
k 0.000007						0.3757	
k 0.000008						0.3722	
k 0.000009						0.3728	
k 0.00001						0.3778	0.3938
k 0.0000125						0.3977	0.3607
k 0.0000175							0.3456
k 0.00002							0.3612
k 0.0000225							0.3909

In Figura 24 è stata rappresentata la curva delle resistenze all'avanzamento avendo impostato i valori dei coefficienti appena individuati. Mettendo a confronto la curva di Figura 24 con quella calcolata in precedenza di Figura 23, si può notare lo stesso andamento (componente quadratica paragonabile), ma la curva di Figura 24 ha un termine noto più alto e soprattutto non contiene il termine lineare.

Rifacendosi alla teoria classica, nell'equazione delle resistenze al moto non esiste un termine che cresce linearmente con la velocità, ciò è indice d'errore.

Pertanto, le simulazioni successive sono state fatte usando i coefficienti ottenuti dalla simulazione, quindi quelli che generano la curva di Figura 24.

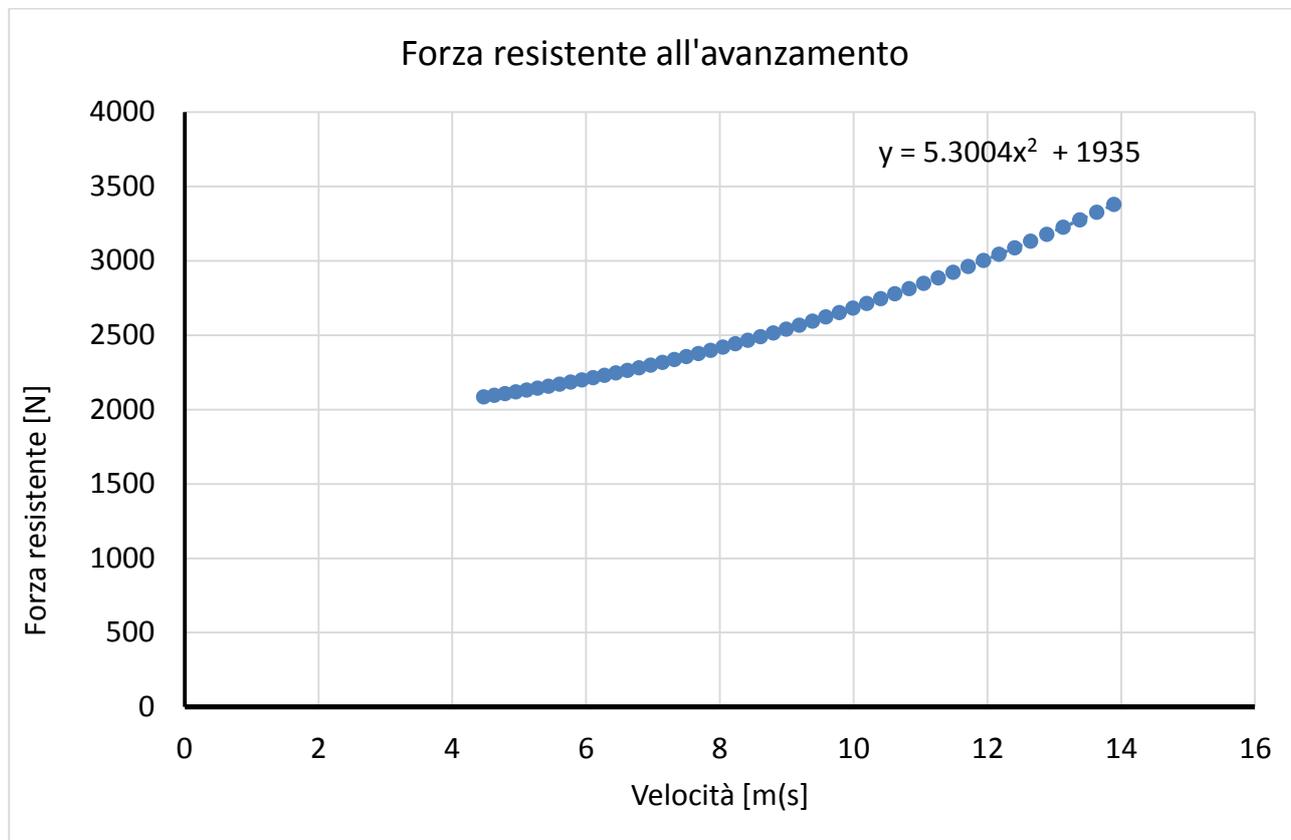


Figura 24 Forza resistenti all'avanzamento

3.2.2 Consumi e rendimenti del powertrain

In Figura 25 si può notare il valore del rendimento, calcolato così come descritto al paragrafo 2.3.3.3, sulla base delle prove di calibrazione, il valor medio del rendimento è pari al coefficiente angolare della retta interpolatrice in figura e vale 36.8%, ma analizzando più in dettaglio, il coefficiente di correlazione R^2 è pari a 0.46, ed è troppo basso per dire che vi è un rendimento costante di conversione dell'energia chimica contenuta nel combustibile in energia meccanica prodotta dal motore termico.

Questo fatto può essere attribuito all'uso che viene fatto dell'energia: il motore termico deve fornire l'energia per far funzionare tutti i servizi ausiliari e garantire la marcia in qualsiasi condizione, sebbene ci siano i supercondensatori a soddisfare le fasi dei transitori e i picchi di potenza, il motore termico non lavora a punto fisso (come nel caso dell'altro veicolo ibrido testato).

A dimostrazione del fatto che il motore non ha dei punti fissi di lavoro, si riporta in Figura 26 l'andamento della velocità del veicolo (curva blu, Tachograph vehicle speed) e i dei giri motore durante una prova (curva rossa, engine speed).

Si può notare che il regime di rotazione insegue il profilo di velocità con rapporto pressoché fisso (tranne quando ci si approssima a velocità zero dove il rapporto di trasmissione costringerebbe il motore termico a rallentare al di sotto del regime minimo, e in tal caso interviene la frizione automaticamente).

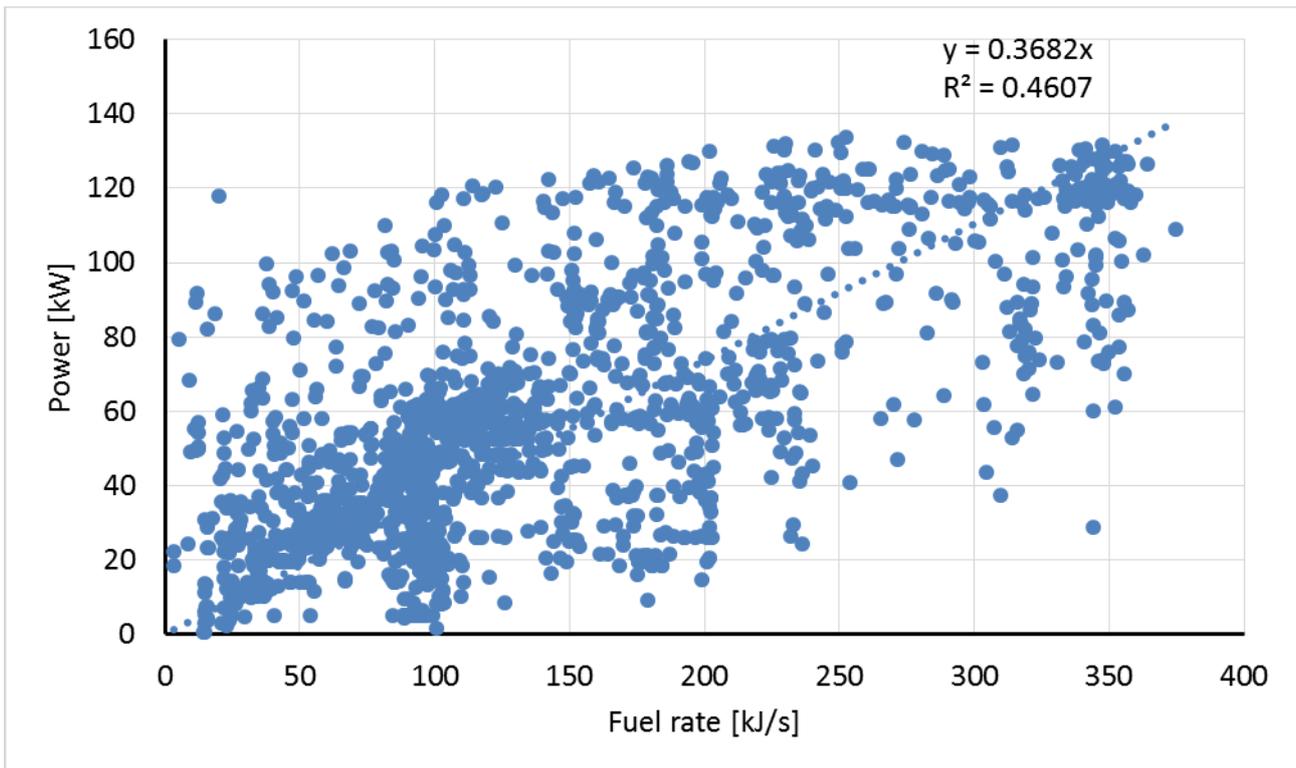


Figura 25 Rendimento

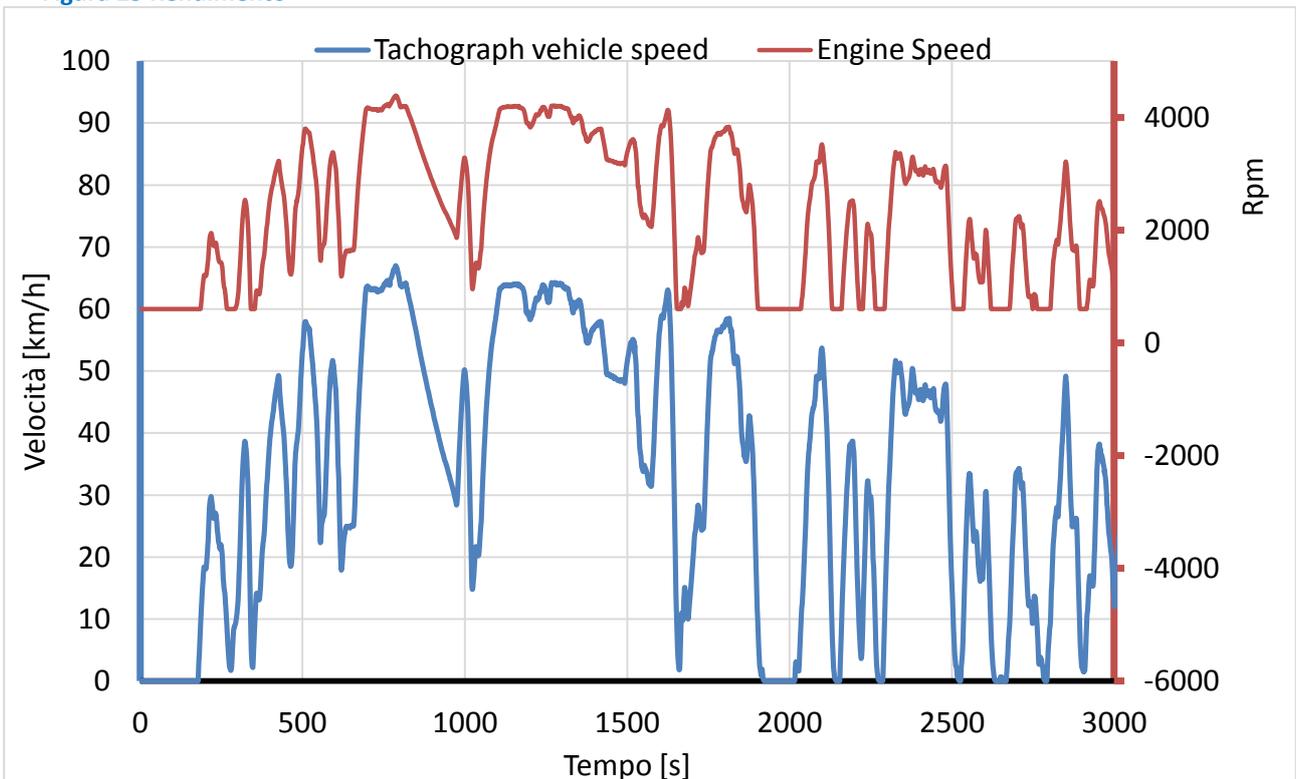


Figura 26 Andamento di velocità del veicolo e giri motore durante una prova

3.2.3 Assorbimento misurato dei servizi ausiliari

L'assorbimento dei servizi è stato misurato per via indiretta, dai dati CAN era disponibile il consumo di combustibile in litri all'ora. Usando il rendimento medio di conversione dell'energia nel motore a combustione, è stato ricalcolata la potenza prodotta dato un certo consumo.

Si riporta in Figura 27 l'andamento della potenza assorbita dai servizi ausiliari. Il picco corrisponde all'accensione del riscaldamento. Nelle altre fasi l'assorbimento era imputabile ai servizi minimi.

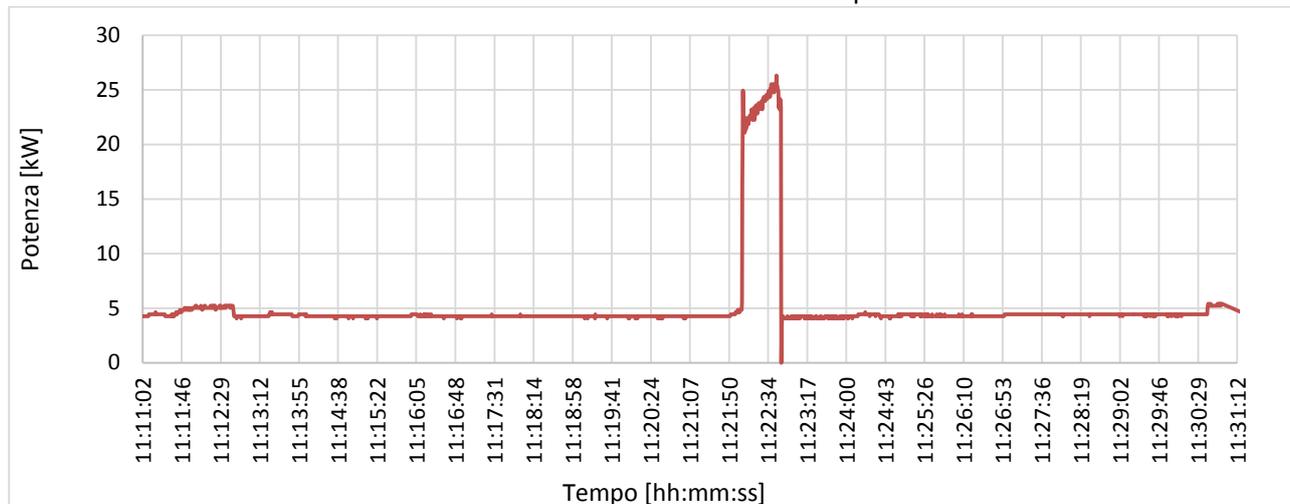


Figura 27 Consumo dei servizi ausiliari veicolo MAN

In sintesi, i consumi misurati sono:

- I servizi di base compreso il compressore pneumatico assorbono circa 5 kW
- Il climatizzatore e il riscaldatore con i relativi ventilatori fino a 20 kW;
- Tutte le luci, interne ed esterne il consumo non è apprezzabile in quanto inferiore ad 1 kW.

È stata fatta una media dell'assorbimento tra tutti gli istanti in cui il veicolo è fermo per stimare un consumo medio dei servizi ausiliari, il risultato è 6 kW.

3.2.4 Acquisizione dei cicli di marcia ed esame della linea urbana di riferimento

La linea 11 collega la frazione di Chiesuol del fosso con la frazione di S. M. Maddalena passando per il centro di Ferrara, ed ha due varianti di percorso:

- Variante A: i capolinea sono a Chiesuol del Fosso e a S.M. Maddalena;
- Variante B: è quella più corta e fa i capolinea all'ospedale San Giorgio e su via Vallelunga (Figura 28).

La linea è lunga 33 km nelle due direzioni, e richiede un tempo di un'ora e cinquanta minuti per compiere tutto il giro di andata e ritorno, una velocità media 17.7 km/h., la quale scende a 16.4 km/h se rilevata nell'ora di punta della sera.

Il consumo misurato per percorrere l'intera linea è di 39 kWh, che prodotti con il motore termico richiedono 8 litri di carburante.

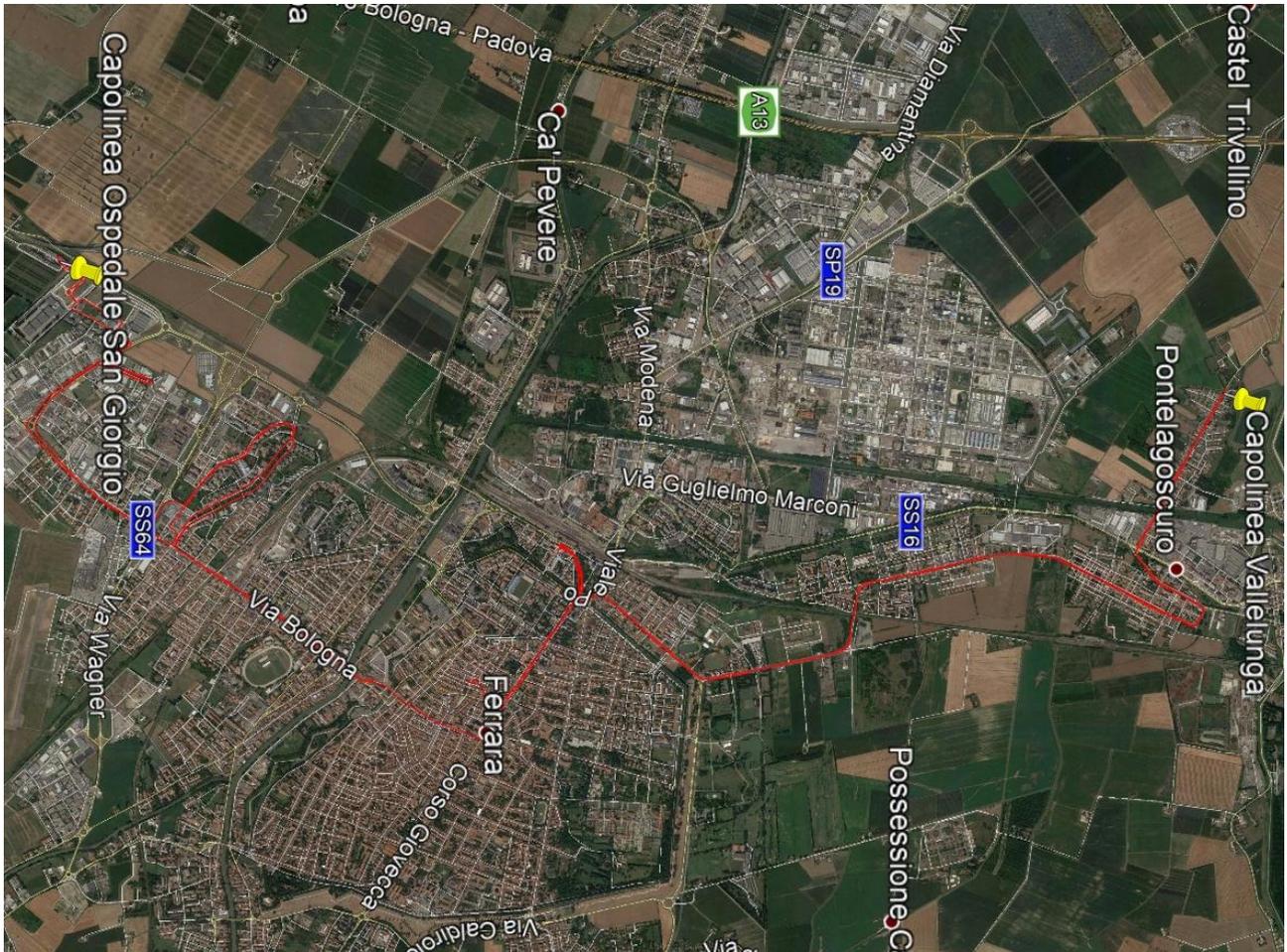


Figura 28 Linea 11B a Ferrara

Si riporta in Figura 29 uno dei profili di velocità rilevati per il percorso suddetto.

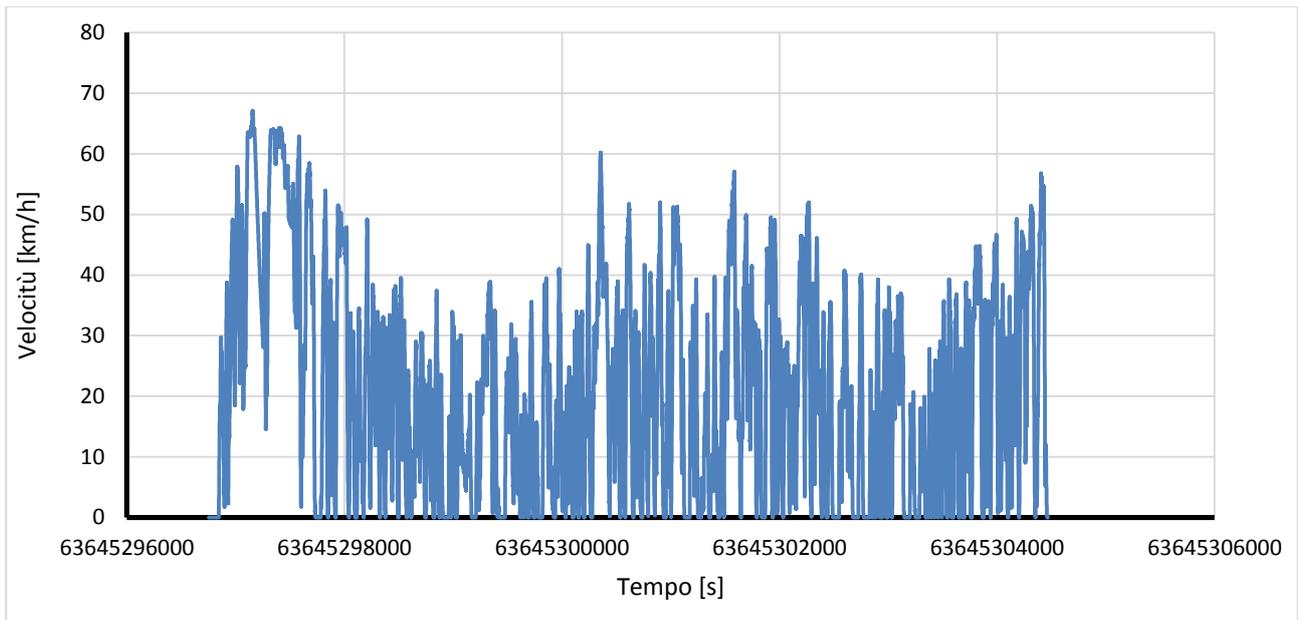


Figura 29 Profilo di velocità rilevato per la linea di Ferrara

3.2.5 Curva di consumo medio

Per calcolare i consumi si riportano qui di seguito tutti i parametri usati nelle simulazioni:

- Massa veicolo (a vuoto) kg 13150
- Coefficiente penetrazione aerodinamica (Cx) 0.80
- Sezione frontale m² 8.0
- Rendimento di conversione energia η 0.95
- Coefficiente f0 resistenza a rotolamento 0.015
- Coefficiente k resistenza a rotolamento m²/s² 0.000006

In Figura 30 è rappresentata la curva di consumo medio per il veicolo in esame per le due situazioni di carico con le rispettive equazioni interpolatrici. L'andamento è da considerarsi valido solo nel range di velocità media 5-35 km/h.

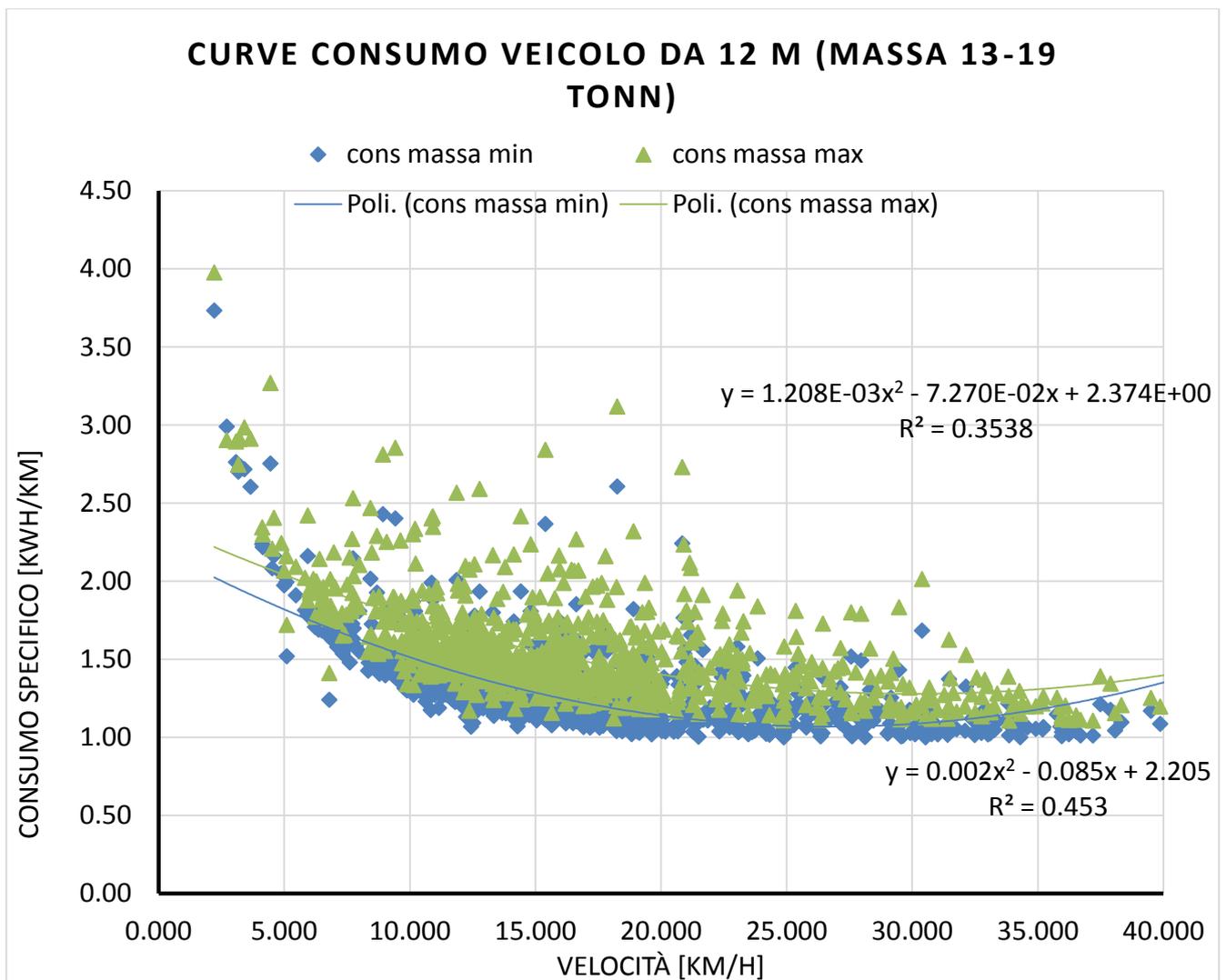


Figura 30 Curva di consumo medio per il veicolo MAN

3.3 TECNOBUS Gulliver ESP 520

3.3.1 Resistenze al moto

Sebbene in questo veicolo siano stati raccolti direttamente i dati energetici, e la curva di coast down non è servita per quantificare i consumi energetici, l'indagine delle forze resistenti al moto è stata condotta ugualmente.

Le curve di coast down sono riportate in Figura 31, sono due in quanto ognuna relativa al percorso in una direzione di marcia diversa, una curva rappresenta le forze resistenti in salita e l'altra quelle in discesa, poi facendo la media per coefficienti delle equazioni, si ottiene la curva di coast down in pianura (questa analisi è valida per qualsiasi pendenza della strada, purché le prove siano state separate nelle due direzioni).

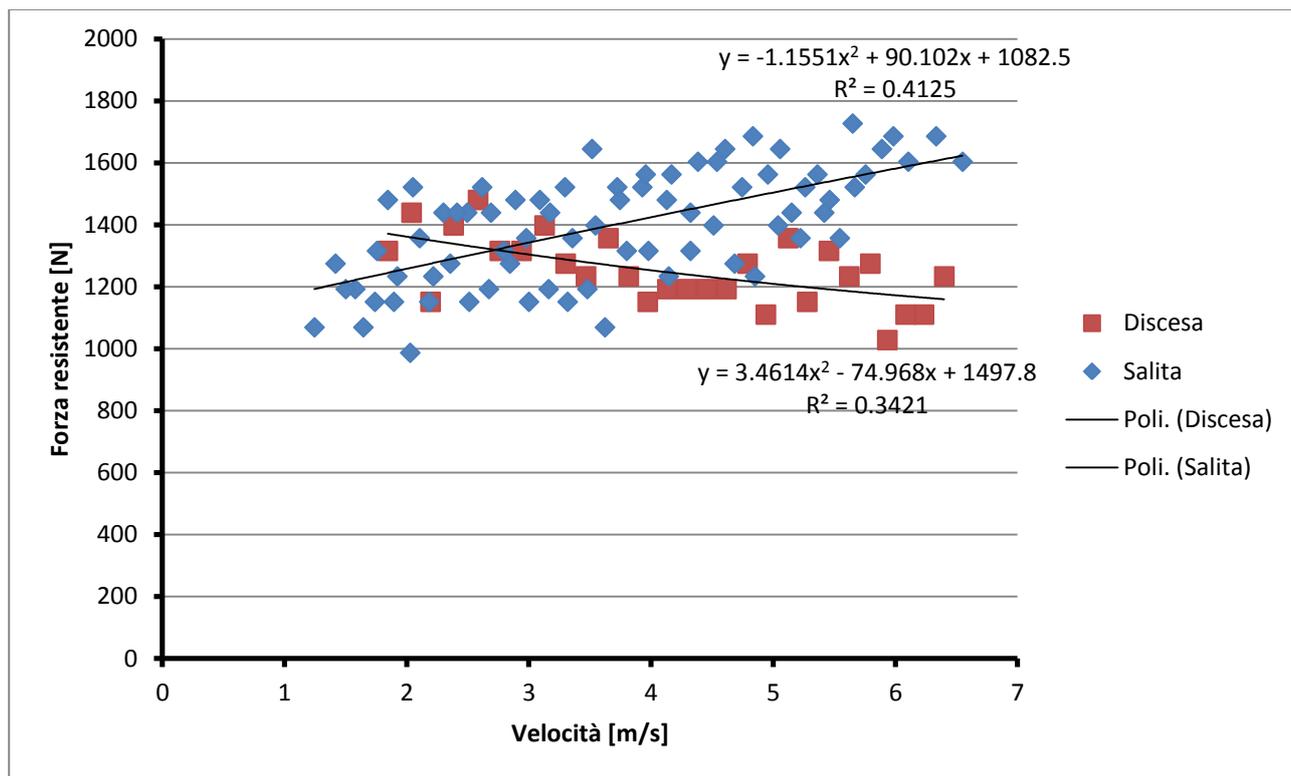


Figura 31 Prova di coast down

Per ulteriore precisazione queste curve sono state ottenute con veicolo in cui era stato installato un pacco batterie di nuova generazione e di peso inferiore a quello del veicolo usato per raccogliere gli altri dati, pertanto la curva definitiva è stata ricalcolata con la massa corretta, l'equazione e i coefficienti ottenuti sono:

$$F_R = 1.34 \cdot V^2 + 6.7 \cdot V + 1499$$

Dove F_R è misurato in Newton e V in m/s.

Anche in questo caso, compare nella legge delle forze resistenti la componente proporzionale alla velocità, ma questa non è coerente con la legge teorica delle resistenze al rotolamento. In virtù di questa informazione e del basso coefficiente che contraddistingue tale componente, se si approssima ulteriormente l'equazione sopprimendo, l'errore compiuto alla massima velocità del veicolo (35 km/h) è una riduzione di potenza resistente del 1%, quindi un errore trascurabile nel computo energetico.

3.3.2 Consumi e rendimenti del powertrain

Il consumo energetico è stato stimato direttamente facendo l'integrale discreto della corrente erogata per la tensione del sistema d'accumulo.

Il dato di consumo è stato riportato direttamente sulla curva di consumo medio.

Il rendimento del sistema di trazione non è stato possibile determinarlo in quanto non vi era un sensore di corrente e di tensione ai capi della batteria.

3.3.3 Assorbimento misurato dei servizi ausiliari

Il consumo dei servizi ausiliari è mostrato in Figura 32, si nota un assorbimento massimo di 1.5 kW, in corrispondenza dell'uso di tutti gli ausiliari.

Da notare il picco che si ripete a frequenza costante, esso rappresenta l'assorbimento del compressore pneumatico usato per le sospensioni, per via delle perdite nel circuito idraulico infatti si necessita di frequenti avvii per ripristinare la pressione minima, quindi mantenere l'autobus alla giusta altezza e con la corretta funzionalità.

Facendo la media dell'assorbimento in un'ora di funzionamento, si ottiene 1.2 kWh di energia, pertanto la potenza media assorbita è 1.2 kW.

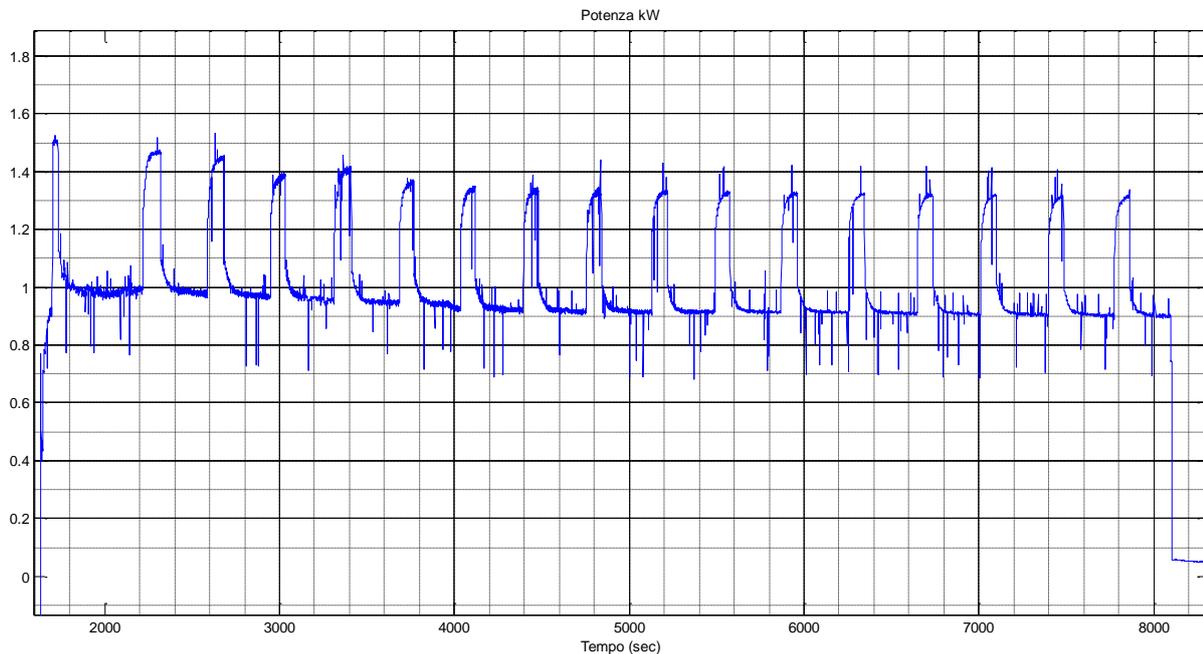


Figura 32 Assorbimento ausiliari

3.3.4 Acquisizione dei cicli di marcia ed esame della linea urbana di riferimento

Il progetto in cui è stato usato questo veicolo era di un servizio sperimentale a chiamata, per cui non vi era un percorso prestabilito, ma un set di percorsi che collegava un dato numero di possibili origini e destinazioni.

Sono stati rilevati vari cicli di marcia tra più percorsi e ai fini della comparazione oggetto di questo report non sono interessanti.

L'analisi dei consumi è stata fatta così come negli altri veicoli suddividendo i vari percorsi in porzioni più piccole.

3.3.5 Curva di consumo medio

L'elaborazione dei dati raccolti in tre mesi di sperimentazione ha portato alla curva di consumo medio di Figura 33 che riporta l'equazione della curva interpolante e il coefficiente di correlazione. L'andamento è da considerarsi valido solo nel range di velocità media 3-25 km/h.

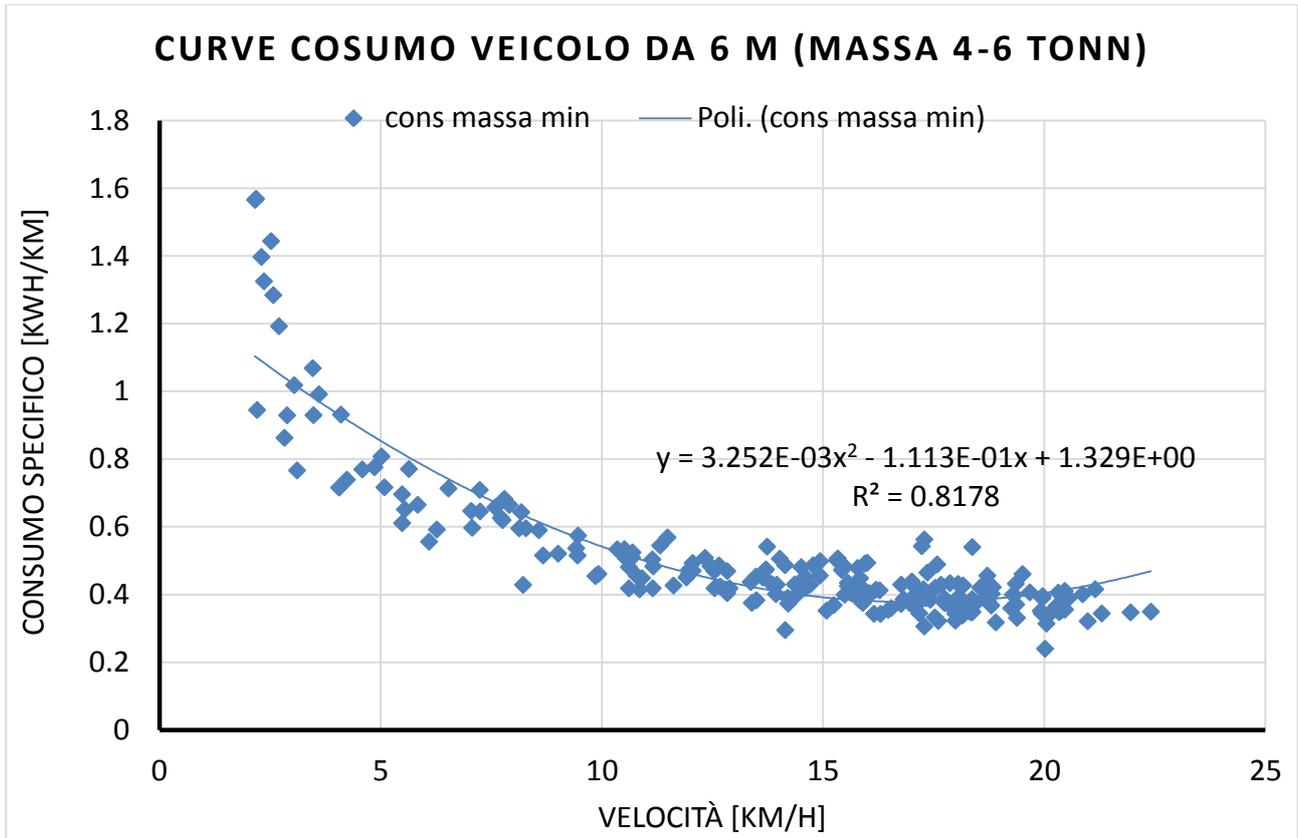


Figura 33 Curva di consumo medio per il veicolo da 6 metri

4 Conclusioni

In questo rapporto sono stati analizzati tre veicoli di dimensioni e peso diverso, ognuno dei quali aveva una tecnologia diversa, la metodologia di analisi per ricavare il consumo medio ha seguito percorsi diversi, ma in ogni caso è stata verificata l'attendibilità dei dati calcolati, tale verifica è stata compiuta confrontando le simulazioni con dati misurati durante dei giri di prova, inoltre sono stati reperiti i documenti tecnici dei costruttori per stimare le potenze dei dispositivi ed elementi di trazione installati.

In Figura 34 sono riportate le curve di consumo medio per le tre tipologie di veicoli analizzate, ognuna con una tolleranza di valori che dipendono dal carico a bordo, e rappresentata dallo spessore della linea.

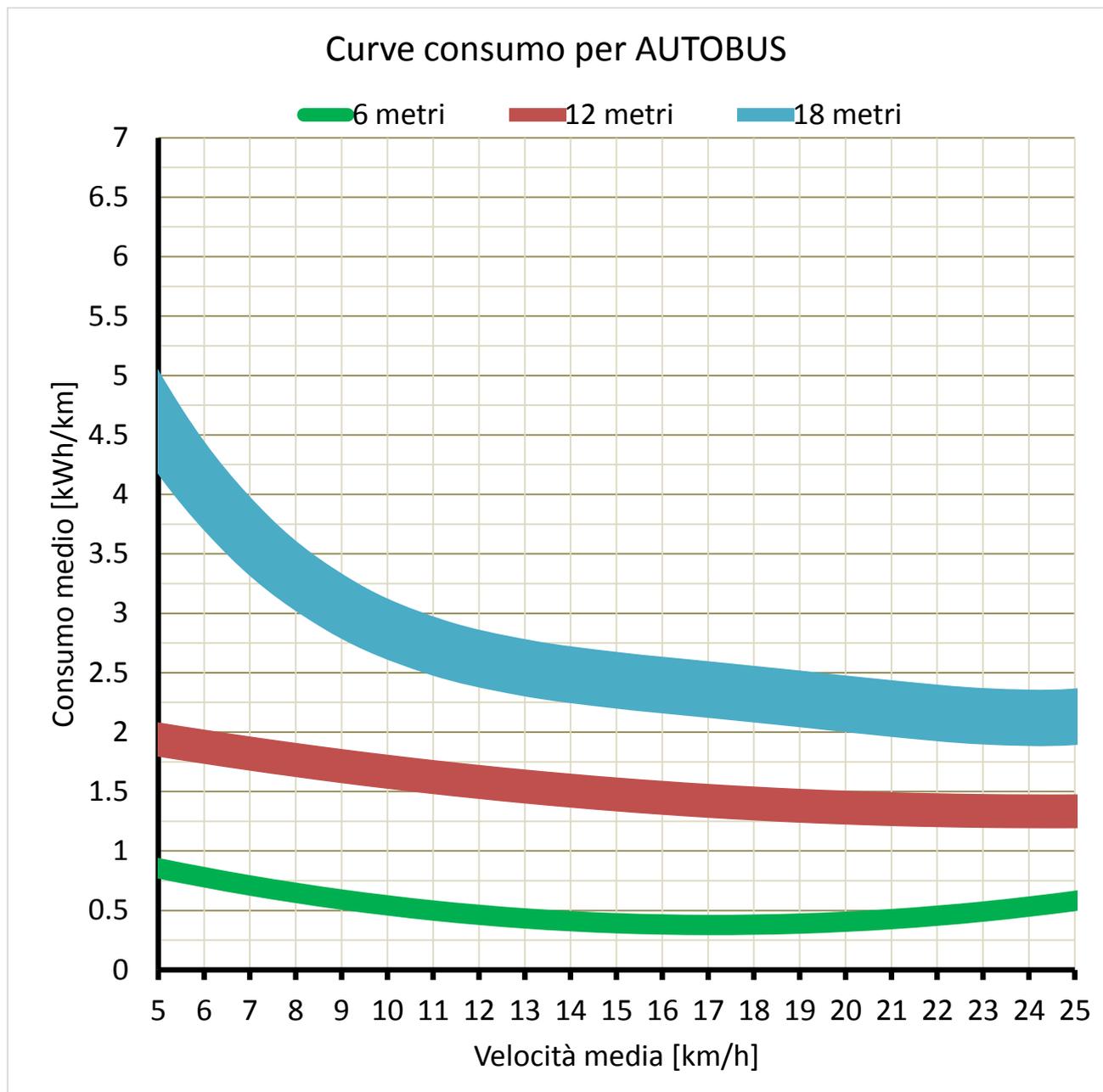


Figura 34 Curve di consumo medio per le tre tipologie di veicoli analizzate

In particolare, in Tabella 9 sono riportati i valori minimi di queste curve, in Tabella 10 i coefficienti delle equazioni delle curve (le quali rappresentano il valor consumo al peso medio del veicolo).

L'equazione tipo è la seguente:

$$y = C4 \cdot V^4 + C3 \cdot V^3 + C2 \cdot V^2 + C1 \cdot V + C0$$

Dove V è la velocità espressa in km orari e il risultato y è il consumo in kWh/km.

Tabella 9 Riepilogo del minimo dei consumi

Veicolo	Velocità media di minimo consumo Km/h	Consumo medio al carico minimo kWh/km	Consumo medio al carico massimo kWh/km	Tolleranza di consumo kWh/km
6 m (4-6 Tonn.)	18	0.32	0.40	± 0.10
12 m (13-19 Tonn.)	22	1.20	1.45	± 0.15
18 m (16-29 Tonn.)	23	1.90	2.35	± 0.25

Tabella 10 Coefficienti delle curve medie

	6 m	12 m	18 m
C4			6.13E-05
C3			-4.48E-03
C2	2.00E-03	1.60E-03	1.22E-01
C1	-8.40E-02	-7.84E-02	-1.51E+00
C0	2.205	2.29E+00	9.60E+00

L'indagine è stata condotta nei percorsi cittadini, la velocità media raggiunta nella maggior parte dei casi era inferiore a 25 km/h, solo il veicolo da 12 metri raggiungeva velocità medie superiori, ma su questi punti i dati disponibili sono pochi.

Le curve interpolanti ottenute sono da ritenersi valide nel range di velocità 5-25 km/h (la restrizione è corrispondente al range di velocità compreso in tutte e tre le curve).

5 Riferimenti bibliografici

- [1] SAE International, «The SAE J1939 Communications Network,» [Online]. Available: <http://www.sae.org/misc/pdfs/J1939.pdf>. [Consultato il giorno 2017].
- [2] A. Alessandrini, F. Filippi e F. Ortenzi, «Consumption calculation of vehicles using OBD data,» in *International Emission Inventory Conference*, 2012.
- [3] A. Cattivera, J. Ferrer, F. Ortenzi e L. Rambaldi, «Utilizzo dei dati provenienti dalla diagnostica dei veicoli per il calcolo dei consumi e della CO₂,» in *66° Congresso Nazionale ATI*, Cosenza, 2011.
- [4] A.Muthuvel, M.K.Murthi, Sachin.N.P, V. M. Koshy, S.Sakthi e E.Selvakumar, «Aerodynamic Exterior Body Design of Bus,» *International Journal of Scientific & Engineering Research*, vol. Volume 4, n. Issue 7, 2013.
- [5] M. L. Genta G., *The automotive chassis. Vol.1*, Torino: Springer, 2009.
- [6] S. Ricci, *Tecnica ed economia dei trasporti*, Hoepli, 2011.
- [7] Civitas Wiki project, «Smart choices for cities Clean buses for your city,» 2013.

Appendice: curriculum del gruppo di lavoro

Prof. Adriano Alessandrini

Professore associato presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Firenze e docente di Tecnica ed Economia dei Trasporti dal 2015.

È ingegnere meccanico e dottore di ricerca in Energia. È stato ricercatore al CTL fino al 2015 e attualmente ricopre la carica di professore associato all'Università di Firenze con il corso di Pianificazione dei sistemi di trasporto. La sua ricerca verte principalmente sull'impatto ambientale di veicoli e guidatori e sui sistemi di trasporto automatizzati. Adriano ha condotto e partecipato a più di 20 progetti di ricerca sin dalla sua laurea (1998) ed attualmente è il coordinatore del più grande progetto Europeo sui sistemi di trasporto stradali automatizzati: CityMobil2. Dal 2003 ha coordinato team di ricerca i quali hanno implementato numerosi sistemi ed applicazioni per il monitoraggio delle flotte con: Honda, Pigiaccielli, AVIS, Roma Car Sharing, Octo Telematics, ENEA, Comune de L'Aquila, ARVAL.

Ing. Fabio Cignini

Assegnista di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale dell'Università degli Studi di Firenze e docente di Tecnica ed Economia dei Trasporti dal 2017.

È ingegnere meccanico dal 2013. Dal 2014 al 2017 è stato assegnista di ricerca al Centro di ricerca per il Trasporto e la Logistica (CTL). Fabio ha lavorato ed è tutto impegnato principalmente sui sistemi di trasporto innovativi, tecnologie ICT, ed impatto ambientale dei veicoli ibridi. Recentemente lavora al progetto Life for Silver Coast, un progetto che ambisce a rivoluzionare la mobilità tradizionale nel comune del Monte Argentario, in passato ha collaborato in un progetto per le Smart-Cities, con lo sviluppo di un sistema di trasporto a chiamata nel comune de L'Aquila in collaborazione con l'ENEA, e in altri progetti di ricerca che utilizzavano sistemi di trazione elettrica dotati di ricarica rapida con l'ENEA.