



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



Ministero dello Sviluppo Economico

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Report sulle necessità energetiche di un quadriciclo e sui suoi
possibili schemi di trazione ibrida e full-electric

G. Pede, E. Rossi, C. Villante

REPORT SULLA NECESSITA' ENERGETICA DI UN QUADRICICLO E SUI SUOI POSSIBILI SCHEMI
DI TRAZIONE IBRIDA E FULL-ELECTRIC

E. Rossi, G.Pede, C. Villante (ENEA)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica)

Progetto: Studio per lo sviluppo di materiali innovativi per il risparmio di energia nel settore elettrico con particolare attenzione ai materiali per i mezzi di trasporto collettivi: *Nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto*

Responsabile Progetto: Giovanni Pede, ENEA

Indice

Indice	iii
Indice delle figure.....	v
Indice delle tabelle	vii
Inquadramento programmatico	1
Inquadramento tecnico-scientifico.....	2
Il prototipo ENEA e l'attività sperimentale	9
Descrizione del veicolo	10
Rolling chassis	10
Sistema di trazione	11
Motore termico primario – ICE.....	12
Generatore elettrico – GE	13
Gruppo motogeneratore – GU.....	13
Motore elettrico di trazione – TM.....	14
Supercondensatori – UC	14
Gruppi di conversione e loro elettronica di controllo	15
Sistemi di raffreddamento.....	15
Architettura del sistema di trazione	16
Controllore di alto livello: La centralina programmabile Prometheus	16
Sistema di comunicazione CAN: sensori ed attuatori	17
La gestione del sistema di propulsione ibrido	19
Controllo della trazione e dei supercondensatori – Blocco TM	20
Controllo del gruppo motogeneratore - Blocchi GU ed ICE	21
Il cruscotto virtuale.....	22
Assemblaggio e collaudo del prototipo	22
La carrozzeria	25
Le prove di caratterizzazione e ottimizzazione	26
Prove al banco a rulli	27
Caratterizzazione del moto-generatore	27
Resistenza al rotolamento	28
Prestazioni dinamiche.....	29
Caratteristiche di frenatura	30
Prove su ciclo urbano ECE15	30
Prove su strada	36
Sintesi dei risultati in termini di consumi	42

Comparazioni.....	42
Misura delle emissioni	42
L'attività modellistica: gli altri possibili schemi di trazione e la loro valutazione energetica	44
Conclusioni	54
Riferimenti Bibliografici	55

Indice delle figure

Fig. 1 - BLUE MAP Scenario – Quote mercato delle varie tecnologie nei trasporti	2
Fig. 2 - BLUE MAP Scenario – Tassi di vendita di veicoli elettrici ed ibridi	3
Fig. 3 - BLUE MAP Scenario – Tassi di vendita di veicoli elettrici ed ibridi per regione	3
Fig. 4 - Programmi nazionali di sviluppo del mercato di veicoli elettrici ed ibridi	5
Fig. 5 – Progr. di sviluppo dei maggiori produttori per il mercato di veicoli elettrici ed ibridi.....	5
Fig. 6 - Classificazione dei veicoli secondo il loro grado di elettrificazione.....	7
Fig. 7 - Classificazione dei veicoli secondo il loro grado di elettrificazione.....	8
Fig. 8 - La Urb-e al Motorshow 2008	9
Fig. 9 - Il telaio ed il rolling chassis.....	11
Fig. 10 - Il rolling chassis	11
Fig. 11 - Layout del sistema di trazione	11
Fig. 12 - Il motore termico utilizzato da cui è stata rimossa la trasmissione	12
Fig. 13 - Generatore elettrico	13
Fig. 14 - Alloggiamento del gruppo motogeneratore sulla piastra posteriore del veicolo	13
Fig. 15 – Foto dell’assale anteriore del veicolo: motore di trazione e i supercondensatori	14
Fig. 16 - Un modulo di supercondensatori	15
Fig. 17 - Elettronica dei convertitori e diodi dei convertitori	15
Fig. 18 - Principale componentistica e relativi flussi energetici.....	16
Fig. 19 - Componenti del sistema di controllo e logica di I/O.....	17
Fig. 20 - Schema delle comunicazioni CAN di bordo.....	18
Fig. 21 - Modello del software di gestione.	20
Fig. 22 - Blocco TM.....	21
Fig. 23 - Blocco GU.....	21
Fig. 24 - Blocco ICE.....	21
Fig. 25 - Cruscotto virtuale	22
Fig. 26 - Assemblaggio delle batterie per la versione puramente elettrica	23
Fig. 27 - L’assieme del gruppo motogeneratore	24
Fig. 28 - Assieme del gruppo motore differenziale semiassi	24
Fig. 29 - La Urbe durante la gara Formula Electric and Hybrid 2009.....	25
Fig. 30 - La conclusione del collaudo	26
Fig. 31 - Il veicolo in prova al banco a rulli.....	27
Fig. 32 - Consumo specifico del motogeneratore e scelta dei punti ottimi di funzionamento... ..	28
Fig. 33 - Resistenza al rotolamento.....	29
Fig. 34 - Caratteristiche di frenatura	30
Fig. 35 - Ciclo urbano ECE15 con strategia Load following: principali risultati	32

Fig. 36 - Ciclo urbano ECE15 con ON OFF + Load following: principali risultati.....	34
Fig. 37 - Ciclo "Marathon" con ON OFF: principali risultati	35
Fig. 38 - Il veicolo in prova su strada e la vista dall'alto del percorso di prova	36
Fig. 39 - Ciclo "Casaccia" con Load following: principali risultati	37
Fig. 40 - Ciclo "Casaccia" con ON OFF + Load following: principali risultati.....	38
Fig. 41 - Vista dall'alto dei percorsi di prova "Oval" e "Capanna"	39
Fig. 42 - Ciclo "Oval" con ON OFF + Load following: principali risultati	40
Fig. 43 - Ciclo "Capanna" con ON OFF + Load following: principali risultati.....	41
Fig. 44 - Modello del sistema propulsivo e del veicolo.....	44
Fig. 45 - Curve caratteristiche del generatore fuel cell.....	44
Fig. 46 - Ibrido serie con MCI; Ciclo ECE; Strat. load follower. Vs tempo.....	45
Fig. 47 - Ibr. serie con MCI; Ciclo ECE; Strat. load follower. Flussi energetici.....	45
Fig. 48 - Ibr. serie con MCI; Ciclo ECE; Strat. Start & Stop + load follower. Vs tempo.....	47
Fig. 49 - Ibr. serie con MCI; Ciclo ECE; Strat. Start & Stop + load follower. Flussi energ.	47
Fig. 50 - Ibr. serie con FC e UC; Ciclo ECE; Strat. Start & Stop. Vs tempo.....	49
Fig. 51 - Ibr. serie con FC ed UC ; Ciclo ECE; Strategia Start & Stop. Flussi energ.....	49
Fig. 52 - Ibr. serie con FC e batt. ThunderSky; Ciclo ECE; Strat. Start & Stop. Vs tempo.....	50
Fig. 53 - Ibr. serie con FC e batt. ThunderSky; Ciclo ECE; Strat. Start & Stop. Flussi en.....	50
Fig. 54 - Ibr. serie con FC e batt. Kokam; Ciclo ECE; Strat. Start & Stop. Vs tempo.....	51
Fig. 55 - Ibr. serie con FC e batt. Kokam; Ciclo ECE; Strat. Start & Stop. Flussi energetici....	51
Fig. 56 - Ibr. serie con FC e SC; Ciclo ECE; Strat. Start & Stop. Effetto della pot. della FC	52
Fig. 57 - Veicolo Puro elettrico; Ciclo ECE; Curve di scarica dei sistemi di accumulo.....	53

Indice delle tabelle

Tabella 1 – BLUE MAP Scenario – Tassi di vendita di veicoli elettrici ed ibridi	3
Tabella 2 – Obiettivi di vendita annunciati per veicoli elettrici ed ibridi	4
Tabella 3 – Principali spec. tecniche dei principali veicoli plug-in ed elettrici . in vendita.....	6
Tabella 4 – Principali azioni di breve periodo a carico dei costruttori di auto e componenti	6
Tabella 5 - Motore termico.....	12
Tabella 6 – Generatore Elettrico	13
Tabella 7 – Supercondensatori	15
Tabella 8 – Prestazioni del veicolo	29
Tabella 9 – Risultati in termini di consume	42
Tabella 10 – Emissioni limite delle normative europee per veicoli a benzina	43
Tabella 11 – Risultati in termini di emissioni su Urbe	43
Tabella 12 – Potenza media richiesta dal veicolo nei vari cicli affrontati	46
Tabella 13 – Principali dati di targa dei sistemi di accumulo al Litio utilizzati nelle simulazioni	48

Inquadramento Programmatico

Il Presente Report si inquadra nella Ricerca di Sistema Elettrico svolta dall'ENEA nell'ambito del relativo Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA.

La Ricerca di Sistema ha come obiettivo l'innovazione del Sistema Elettrico per migliorarne l'economicità, la sicurezza e la compatibilità ambientale, assicurando al Paese le condizioni per uno sviluppo sostenibile.

Per lo svolgimento delle attività di ricerca e sviluppo previste dal Piano Triennale della Ricerca di Sistema Elettrico il Ministero dello Sviluppo Economico ha stipulato Accordi di Programma con ENEA, CNR ed ERSE.

Le attività sono finanziate attraverso un fondo alimentato dalla componente A5 della tariffa di fornitura dell'energia elettrica, il cui ammontare viene stabilito dall'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas.

Nell'Accordo di Programma sono previsti temi di ricerca fondamentale e studi di carattere sistemico e prenormativo a totale beneficio dell'utente di sistema elettrico nazionale.

Le ricerche sono condotte dall'ENEA in collaborazione con le principali Istituzioni universitarie nazionali (oltre 28 Atenei e 65 diversi Dipartimenti coinvolti) e con le partecipate SOTACARBO e FN Nuove Tecnologie Avanzate. Nell'ambito dell'Accordo di Programma Triennale, l'ENEA ha terminato le attività terzo anno di attività.

L'accordo è meglio definito da un piano annuale di realizzazione, suddiviso in Attività. Ogni attività ha un contesto scientifico-programmatico di riferimento, suddiviso in aree e tematiche di ricerca, in ognuna delle quali sono definiti specifici progetti di ricerca, a loro volta suddivisi in obiettivi da perseguire.

Nel dettaglio, l'inquadramento programmatico completo del presente report è il seguente:

Accordo di Programma MSE-ENEA: Attività di ricerca e sviluppo di interesse generale per il sistema elettrico nazionale

Piano Triennale 2006-2008

Piano annuale di realizzazione Terza annualità (2008-2009): da realizzarsi tra l'ottobre 2010 ed il settembre 2011

Attività: Risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

Area di riferimento: razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Tematica di ricerca: risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto elettrici

Progetto 3.5: studio per lo sviluppo di materiali innovativi per il risparmio di energia nel settore elettrico con particolare attenzione ai materiali per i mezzi di trasporto collettivi: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

Obiettivo C: Adattamento di convertitori di piccola potenza ad alto rendimento all'uso nei veicoli elettrici leggeri, e sperimentazione di sistemi di ricarica rapida

Inquadramento Tecnico-Scientifico

La IEA (International Energy Agency) ha recentemente diffuso un documento di sintesi del panorama tecnologico nel settore dei veicoli elettrici ed ibridi plug-in.

In particolare, il lavoro fa uso di uno scenario di riferimento al 2050 ormai consolidato in ambito Europeo, chiamato ETP (Energy Technology Perspectives) BLUE Map Scenario, che descrive come le tecnologie energie possano essere sviluppate entro il 2050 per raggiungere il target emissivo di CO₂ dell'UE fissato al dimezzamento degli standard di emissione del 2005. Il target per il settore dei trasporti è fissato al 70% dei valori del 2005.

Per il settore dei trasporti, l'obiettivo è raggiungibile, in accordo con lo scenario, tramite la messa in produzione di 50 milioni di veicoli elettrici e 50 milioni di veicoli ibridi plug-in all'anno nel mercato light-duty. Ciò rappresenterebbe una quota di mercato di circa il 50% delle nuove immatricolazioni di veicoli leggeri.

Il raggiungimento degli obiettivi della BLUE Map richiede pertanto una evoluzione tecnologica che permetta l'introduzione sul mercato delle tecnologie ad un costo sostenibile per la collettività. E' auspicabile infatti che le tecnologie rendano possibile una politica di introduzione di veicoli elettrici ed ibridi particolarmente intensa, come rimarcato anche dell'evoluzione temporale dello scenario di riferimento del settore dei trasporti riportato nella figura seguente.

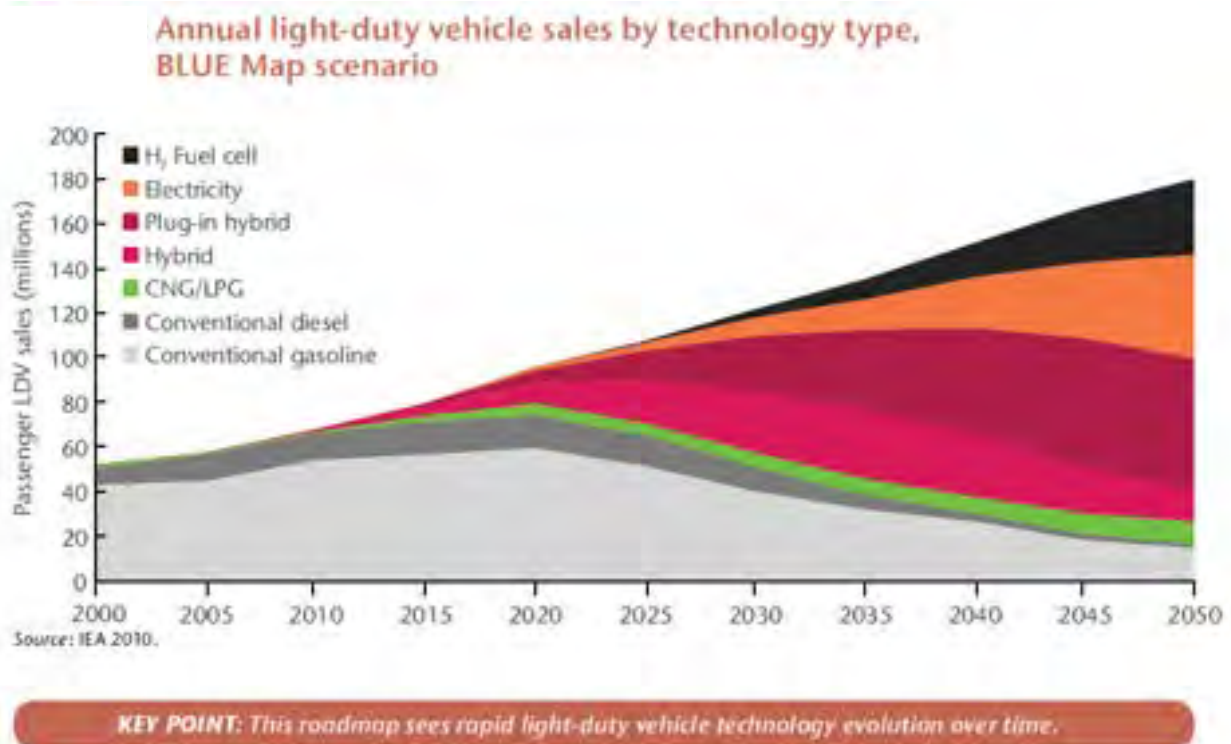


Figura 1 - BLUE MAP Scenario – Quote di mercato delle varie tecnologie nel settore dei trasporti.

In termini numerici, le quote di mercato riportate in figura si traducono nei trend di crescita del numero di veicoli elettrici e d ibridi di nuova generazione riportati nella tabella e nella figura seguenti. Tali numeri sono di estremo interesse perché permettono di definire l'ampiezza del mercato di riferimento e, corrispondentemente, la dimensione degli investimenti pubblici e privati richiesti per il raggiungimento dell'obiettivo di scenario.

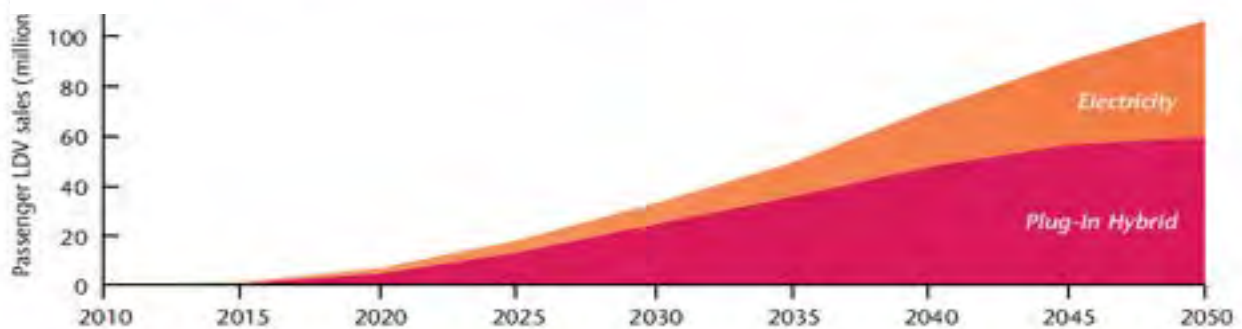
Global EV and PHEV sales in BLUE Map, 2010–2030 (millions per year)

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
PHEV	0.0	0.7	4.9	13.1	24.6	35.6	47.7	56.3	59.7
EV	0.0	0.3	2.0	4.5	8.7	13.9	23.2	33.9	46.6
Total	0.0	1.1	6.9	17.7	33.3	49.5	70.9	90.2	106.4

Source: IEA 2010.

Tabella 1 – BLUE MAP Scenario – Tassi di vendita di veicoli elettrici ed ibridi

Annual global EV and PHEV sales in BLUE Map scenario



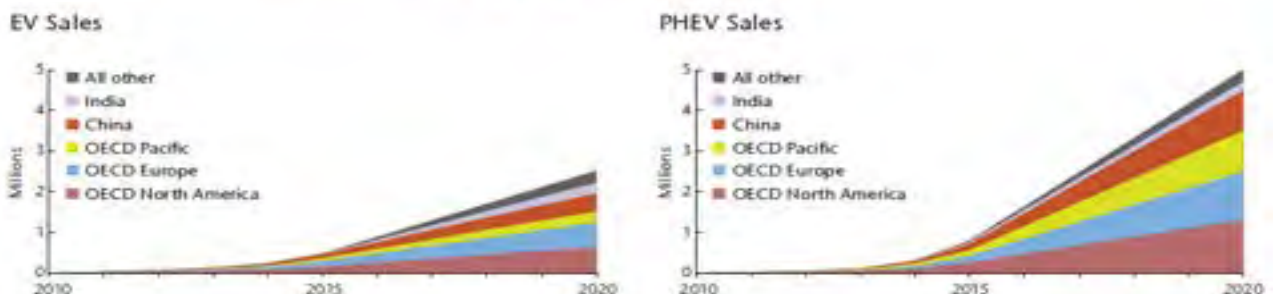
Source: IEA 2010.

KEY POINT: EV/PHEV sales must reach substantial levels by 2015 and rise rapidly thereafter.

Figura 2 - BLUE MAP Scenario – Tassi di vendita di veicoli elettrici ed ibridi

Lo scenario mostra anche come l'impegno Europeo e Nord-Americano debba essere quello maggiormente consistente, specie nelle fasi iniziali di introduzione sul mercato delle nuove tecnologie, gravate da maggiori costi di vendita sostenibili solo nei Paesi a maggiore tasso di sviluppo.

EV/PHEV total sales by region through 2020



Source: IEA projections

KEY POINT: In this roadmap, EV/PHEV sales increases are seen in all major regions.

Figura 3 - BLUE MAP Scenario – Tassi di vendita di veicoli elettrici ed ibridi per regione

In effetti, seppur apparentemente molto ambiziosi, gli obiettivi delineati sono in accordo con i tassi di vendita previsti dichiarati dai maggiori Paesi mondiali (vedi tabella seguente).

Table 4: Announced national EV and PHEV sales targets

Country	Target	Announcement / Report Date	Source
Australia	2012: first cars on road 2018: mass adoption 2050: up to 65% stock	04 Jun 2009	Project Better Place Energy White Paper (referencing Garnault Report)
Australia	2020: 20% production	10 Jun 2009	Mitsubishi Australia
Canada	2018: 500 000 2020: 18 000 (EV sales in Ontario)	Jun 2008 15 Jul 2009	Government of Canada's Canadian Electric Vehicle Technology Roadmap.
China	5 000 000 stock	March 2011	Electric Vehicle Initiative (EVI)
China	540 000 by 2015	8 Jul 2009	Pike Research
China	2008: 21 000 000 electric bike stock	27 Apr 2009	<i>The Economist</i>
China	2030: 20% to 30% market share	Oct 2008	McKinsey & Co.
Denmark	2020: 200 000 2020: 50 000		ENS Denmark EVI
France	2020: 2 000 000	March 2011	EVI
Germany	2020: 1 000 000	March 2011	EVI
Ireland	2020: 350 000	28 Apr 2009	Houses of the Oireachtas
Ireland	2020: 230 000 2030: 40% market share	1 Oct 2009	Electricity Supply Board (ESB)
Israel	2011: 40 000 EVs 2012: 40 000 to 100 000 EVs annually	9 Sep 2008	Project Better Place
Japan	2020: 20% market share (800 000 based on IEA estimate of 4 million)	March 2011	EVI
Netherlands	2015: 20 000 stock 2020: 200 000 stock	May 2011	Dutch Energy Agency
New Zealand	2020: 5% market share 2040: 60% market share	11 Oct 2007	Prime Minister Helen Clark
Spain	2020: 2 500 000	March 2011	EVI
Sweden	2020: 600 000	March 2011	EVI
Switzerland	2020: 145 000	Jul 2009	Alpiq Consulting
United Kingdom	2020: 1 200 000 stock EVs + 350 000 stock PHEVs 2030: 3 300 000 stock EVs + 7 900 000 stock PHEVs	Oct 2008	Department for Transport, "High Range" scenario
United States	2015: 1 000 000 PHEV stock	Jan 2009	President Barack Obama
Worldwide	2015: 1 700 000	8 Jul 2009	Pike Research
Worldwide	2030: 5% to 10% market share	Oct 2008	McKinsey & Co.
Worldwide	2020: 10% market share	26 Jun 2009	Carlos Ghosn, President, Renault
Europe	2015: 250 000 EVs	4 Jul 2008	Frost & Sullivan
Europe	2015: 480 000 EVs	8 May 2009	Frost & Sullivan
Nordic countries	2020: 1 300 000	May 2009	Nordic Energy Perspectives

Source: Individual Country Roadmaps and Announced Targets, as listed in the references.

Tabella 2 – Obiettivi di vendita annunciati per veicoli elettrici ed ibridi

I tassi di vendita annunciati, infatti, portano a previsioni di vendita che risultano in buon accordo con quanto delineato dallo BLUE Scenario (confronta Figura 4 con Figura 2)

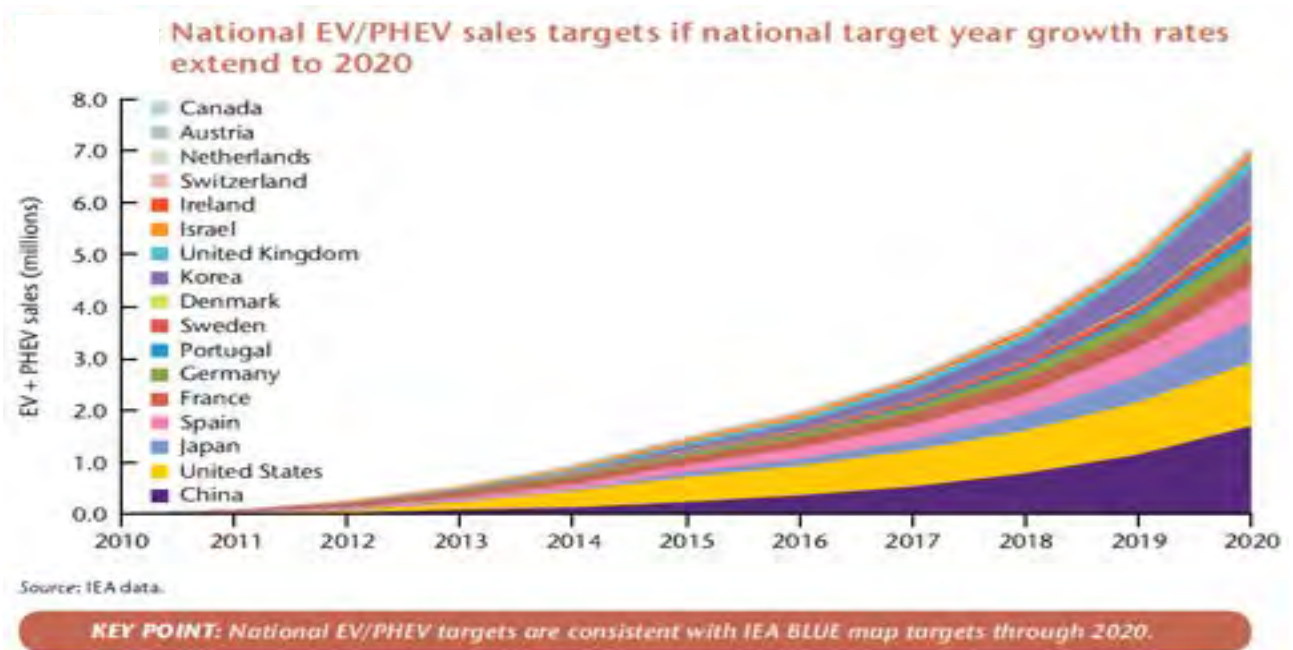


Figura 4 - Programmi nazionali di sviluppo del mercato di veicoli elettrici ed ibridi

Deve comunque essere sottolineato che i programmi di sviluppo dei maggiori produttori, anche a casa delle recenti crisi di settore e della conseguente carenza di fondi dedicati all'ampliamento di nuovi segmenti di mercato, portano a volumi di produzione che, sebbene considerevoli, risultano sensibilmente inferiori a quelli proposti dagli Stato sovrani.

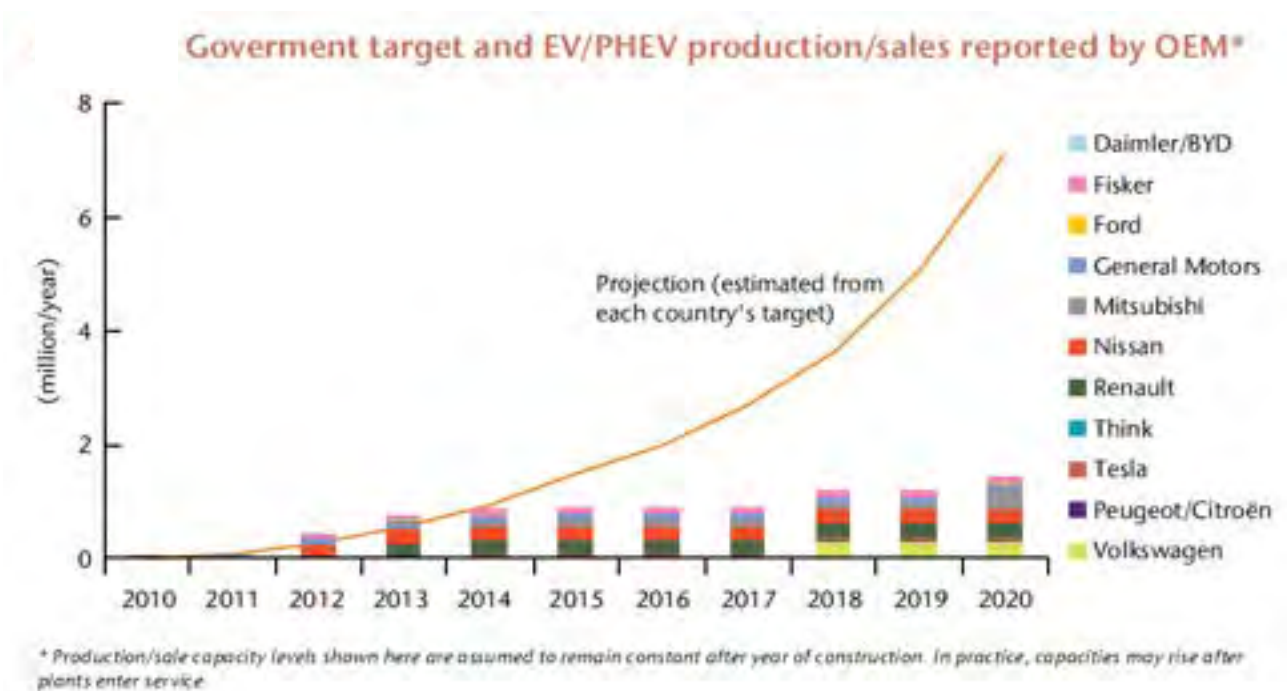


Figura 5 - Programmi di sviluppo dei maggiori produttori per il mercato di veicoli elettrici ed ibridi

L'offerta di veicoli risulta ancora limitata (vedi tabella seguente), ma molti produttori prevedono nei prossimi anni un ampliamento delle loro gamma di modelli di veicoli elettrici ed ibridi plug-in.

Specifications of several plug in vehicles sold or expected to be sold in 2011

OEM	Country	Model name	Type	Battery Capacity (kWh)	Mileage	Size (mm) L x W x H			Weight (kg)	Start of sales	Price
Hyundai	Japan	Leaf	EV	24	200km (JC08) 160km (LA4)	1445	1770	1545	1520	2010(JPN,US) 2011(EU)	3.76 mPT (incl.tax) 32,8k USD
Mitsubishi	Japan	iMiEV	EV	16	180km (JC08)	1395	1475	1610	1300	2009 (JPN) 2011(EU,US)	3.98m JPY 80k USD
BYD	China	E6	EV	60	300 to 400km	4554	1822	1630	2020	2011	35k USD
GM	US	Volt	PHEV	16	40 to 80km (EV mode)	4500	1788	1438	1715	2010 (US) 2011	41k USD
Tesla	United States	Roadster	EV	56	394km (LA4)	3940	1852	1326	1256	2008	128.5k USD, 112k Euro
Mahindra	India	NXC	EV	14	ca. 200km	2620	1640	1550	825	2011(EU)	23k Euro (excl.tax)

Tabella 3 – Principali specifiche tecniche dei principali veicoli plug-in ed elettrici attualmente in vendita

La IEA negli ultimi anni ha anche promosso una serie di incontri, workshop e Conferenze trans-nazionali per definire quali siano le principali azioni da intraprendere per il raggiungimento dell'obiettivo sopra delineato. In particolare, è particolarmente significativo a questo riguardo quanto riportato nel documento "Technology Roadmap" di recente diffusione, che individua una serie di azioni di breve periodo per i vari soggetti coinvolti ("stakeholders"). In particolare, riportiamo nella tabella seguente le raccomandazioni trasmesse ai principali costruttori di automobili e componenti (vedi tabella corrispondente).

Stakeholder	Action item
Automobile manufacturers and suppliers	<ul style="list-style-type: none"> • Improve and refine regional and national market potential estimates. • With governments, ensure that all national targets can be matched to auto company production planning, and vice versa. • Identify and implement policies to ensure adequate recharging infrastructure is in place at the time of, or slightly before, vehicles enter service that will need it. • Governments and industry must include consumers in the planning process and ensure that their needs and desires are met. • Develop good outreach and information programmes to help consumers understand the benefits of EVs and PHEVs, and increase their interest in adopting them. • Consider and set needs and desirable levels of attributes for EVs and PHEVs separately. • Develop innovative vehicle/battery cost and financial models for vehicle ownership. • Optimise the supply chain and ensure sufficient battery and hybrid electric system supply through incremental production capacity expansion aligned with EV/PHEV vehicle volume. • Help identify business/government fleets that can serve as early adopters.

Tabella 4 – Principali azioni di breve periodo a carico dei costruttori di auto e componenti

Anche da queste raccomandazioni è evidente che il prodotto necessita di un notevole sviluppo e sforzo di standardizzazione. E' però da sottolineare che, per raggiungere i livelli di

penetrazione individuati, tutti i segmenti di mercato devono essere aggrediti.

In particolare, in ENEA, nell'ambito del presente programma di ricerca si è voluta soffermare l'attenzione su un segmento di mercato che, in quanto non centrale nei piani di sviluppo delle principali Case costruttrici, sino ad oggi è stato piuttosto trascurato da programmi di introduzione di veicoli elettrici e ibridi, ovvero quello delle minicar (o "quadricicli", secondo la normativa italiana).

L'attenzione riservata dall'ENEA a questo ambito di applicazione è nata da due considerazioni: da un lato la richiesta di motorizzazione specializzata per città ad elevata richiesta di mobilità e quindi con problemi di traffico; dall'altro la maturità tecnologica di sistemi di trazione ibridi.

Si sta da circa un decennio assistendo nelle zone metropolitane alla nascita e affermazione di mezzi di mobilità individuale inconsueti e in sostanza inadeguati a soddisfare l'esigenza. I primi sono stati i veicoli a due ruote, che da mezzi di svago e mobilità spicciola sono divenuti, per molti, l'unico modo per muoversi in città, anche in inverno e sotto la pioggia. (Si può immaginare il disagio dovuto alla impossibilità di muoversi in modo più confortevole e il rilevante prezzo che si paga in termini di incidenti stradali).

Altro fenomeno che ha tentato di porre una parziale soluzione al problema è stato l'affermazione dei cosiddetti "quadri cicli". Questi mezzi sono veicoli minimi (prevalentemente alimentati a gasolio) nati in Francia per esigenze rurali e di ausilio per anziani e automobilisti privi o privati di patente. In Italia si sono diffusi a partire dal 2002 e con una vendita di circa 8000 unità annue hanno costituito un parco circolante di circa 80000 unità. La percentuale del mercato dell'auto è al momento intorno allo 0,5 per cento. I quadricicli in Italia sono diventati, a dispetto del prezzo elevato (intorno a € 10000) e della qualità tecnica insoddisfacente, status symbol per adolescenti e mezzo di accesso alle ZTL.

Le case automobilistiche (pur con vetture di taglia e caratteristiche leggermente superiori), stanno solo ora scoprendo il mercato potenziale delle minivetture e stanno programmando il lancio sul mercato di veicoli a 2 posti (Fiat, Toyota).

Dal punto di vista teorico esistono diversi possibili schemi di propulsione applicabili alla elettrificazione del veicolo, classificabili secondo vari approcci. Uno di questi definisce, seppure non in maniera formale, il "grado di elettrificazione" del veicolo secondo lo schema concettuale riportato nella figura seguente.

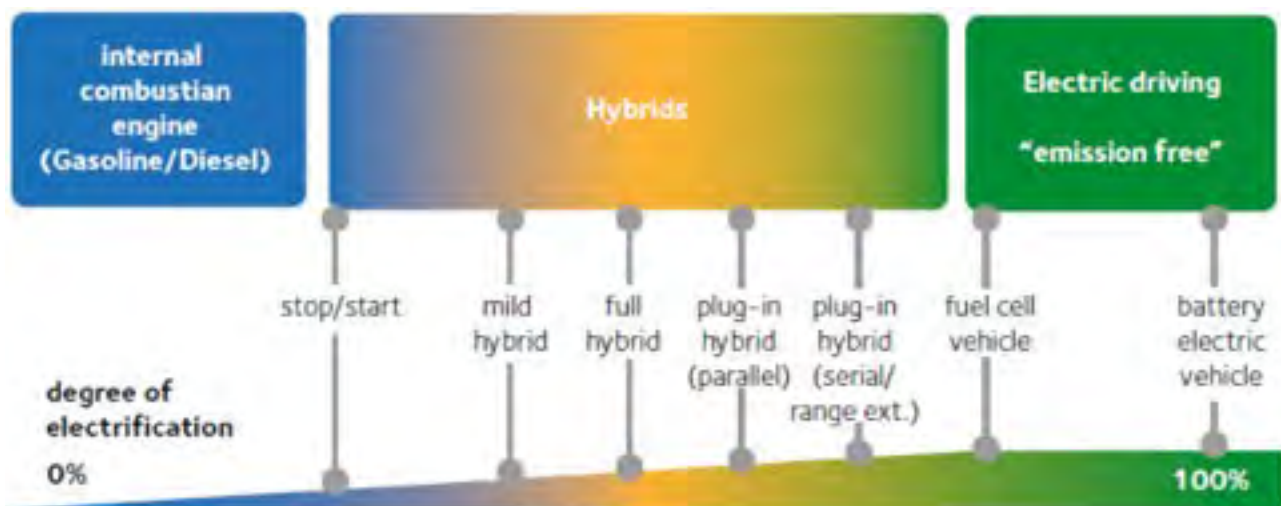


Figura 6 - Classificazione dei veicoli secondo il loro grado di elettrificazione

L'ENEA sta valutando da tempo diversi possibili schemi di propulsione per microvetture, la maggior parte dei quali, oggetto, di questa relazione, con la trazione puramente elettrica

sull'avantreno e classificabili come veicoli elettrici pure o come ibridi serie plug-in, secondo lo schema in figura.

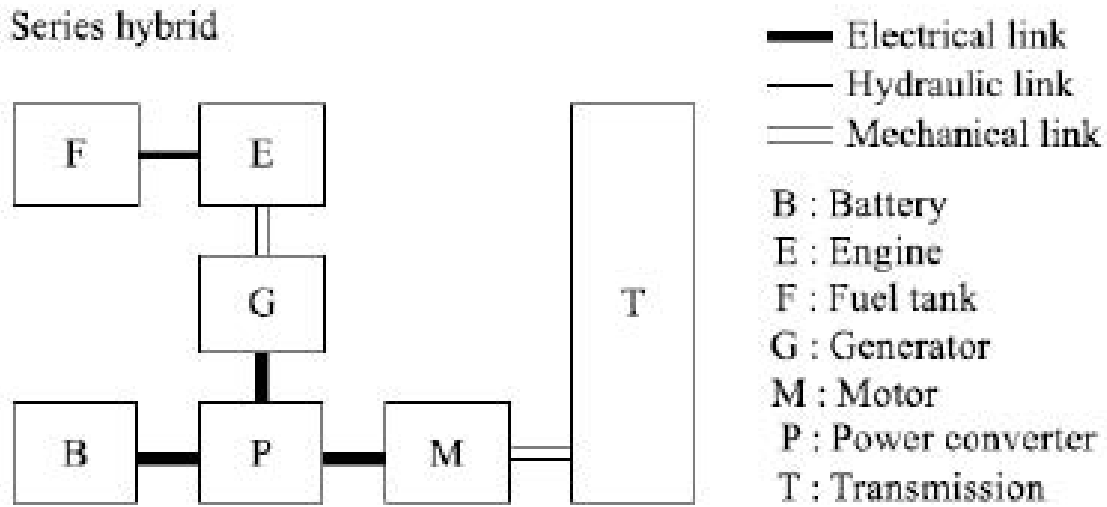


Figura 7 - Classificazione dei veicoli secondo il loro grado di elettrificazione

In particolare, le attività ENEA in tema di micro vetture sono di lunga data e sono partite tramite la realizzazione di un prototipo di microcar ibrida serie, denominata Urb-E. Sulla base delle attività sperimentale si sono potuti calibrare una serie di strumenti modellistici che hanno permesso la piena analisi energetica della soluzione applicata, ma anche di tutta una serie di soluzioni alternative, inclusa la trazione puramente elettrica con sistemi di accumulo tradizionale o innovativo, nonché soluzioni ibride equipaggiate da generatori elettrici di bordo non tradizionali a fuel cell.

In questa relazione si descrive sommariamente l'attività sperimentale relativa al prototipo realizzato, in servizio da più di un anno in diverse configurazioni, per poi procedere alla analisi più puramente energetica delle microvetture, attività sviluppata in questo ultimo anno di lavoro.

Il prototipo ENEA e l'attività sperimentale

Il nome scelto per il prototipo, Urb-E, deriva dalla contrazione della locuzione inglese: urban easy e vuole indicare la natura e la vocazione del mezzo.



Figura 8 - La Urb-e al Motorshow 2008

L'Enea ha proposto un suo contributo alla soluzione attingendo all'esperienza accumulata in anni di attività sui veicoli a basso impatto ambientale, ed individuando in una architettura ibrida serie la possibilità di conseguire alcuni risultati importanti, quali: bassi consumi ed emissioni, semplicità d'uso, ingombro ridotto, marcia anche in modalità solo elettrica.

La dimostrazione della fattibilità di tale concetto è stata affidata alla realizzazione di Urbe.

Le caratteristiche di progetto che si volevano conseguire con il prototipo sono state fissate in:

- ingombro in lunghezza inferiore a 3 m;
- peso 500 kg;
- consumi di carburante esigui, possibilmente vicini al target di 2 litri per 100 km;
- emissioni inquinanti paragonabili alle direttive Euro 4;
- possibilità di marcia in modalità elettrica per tragitti di circa 1 km;
- assenza di cambio di velocità e frizione;
- prestazioni di guida al livello delle attuali richieste di mercato, in particolare velocità

- massima 70 km/h, buona accelerazione, capacità di superamento di rampe del 12%;
- facilità di produzione e industrializzazione del veicolo, anche tramite l'impiego di componenti commerciali;
- aspetto esterno che desti curiosità anche tra il pubblico dei non addetti ai lavori.

Alcune scelte sono state operate fin dall'inizio e riguardano l'architettura generale del mezzo:

- o telaio tubolare saldato, in ferro: scelta che garantisce robustezza, semplicità di realizzazione e possibilità di effettuare modifiche all'occorrenza. Il peso sicuramente non basso è stata una conseguenza accettata;
- o accumulo elettrico in supercondensatori anziché in batterie. La scelta è dovuta all'elevato rendimento e alla lunga vita dei primi. Parte della motivazione è stata anche il desiderio pubblicizzare di far conoscere questi componenti;
- o macchine elettriche sincrone senza spazzole a magneti permanenti. Sono sicuramente le migliori per rendimento e controllabilità;
- o tensioni di lavoro dei componenti tra i 40 e i 70 V, per realizzare il miglior compromesso tra riduzione delle perdite e reperibilità di componenti commerciali;
- o motore termico primario a benzina di piccola cilindrata reperibile nell'ambito dei prodotti per scooter.

I risultati attesi dal programma di realizzazione di Urbe sono:

- dimostrare la possibilità di migliorare la tecnologia dei veicoli da città con l'impiego della trazione ibrida, di componenti innovativi, di una progettazione ad hoc;
- dimostrare la possibilità di sfruttare soluzioni e componenti di largo uso in modo da conseguire una certa facilità di industrializzazione del modello e una eventuale produzione a costi limitati;
- incentivare la ricerca e l'innovazione in un settore della motorizzazione leggera tecnologicamente piuttosto arretrato ma in forte espansione commerciale;
- infine dare uno stimolo all'industria nazionale affinché sperimenti soluzioni tecnologiche originali più aderenti alla richiesta di mercato e alle esigenze dell'ambiente, anche con riguardo ai mezzi leggeri di distribuzione merci in zone a circolazione limitata.

Descrizione del veicolo

Rolling chassis

E' costituito da tubi in ferro saldati, di diametro 30 mm, spessore 2 mm per la struttura principale; tubi da 20 mm per le triangolazioni di irrigidimento. Il telaio ha determinato le misure di ingombro della vettura, che sono 2,70 in lunghezza per 1,40 m in larghezza.

Le parti meccaniche necessarie per la marcia sono: sospensioni anteriori e posteriori a parallelogramma deformabile realizzate da un triangolo oscillante superiore e uno inferiore, con molla elicoidale e ammortizzatore coassiale.

Lo chassis è completato da mozzi ruota, cerchi e pneumatici, volante, cremagliera e tiranti dello sterzo, pompa freno e freni a disco, sedili, cinture di sicurezza.

La realizzazione del telaio è stata commissionata su nostra specifica ad una azienda specializzata in allestimenti di roll bar per vetture da rally.



Figura 9 - Il telaio ed il rolling chassis



Figura 10 - Il rolling chassis

Il telaio è stato poi compartimentato con lamiere in lega di alluminio: sul fondo dell'abitacolo (per l'appoggio dei piedi dei passeggeri) e in verticale (alle spalle dei passeggeri, per creare una separazione e una protezione dalla parte motrice posteriore).

Infine due robuste piastre sono state poste in orizzontale per appoggiarvi le parti meccaniche: una nell'avantreno e una nel retrotreno, nei vani realizzati dal telaio tra le ruote destre e sinistre.

Sistema di trazione

Il sistema scelto è un ibrido serie, composto da:

- un gruppo motogeneratore (GU, Generator Unit nel seguito), a sua volta composto da un motore termico primario (ICE, Internal Combustion Engine) e da un generatore elettrico (GE) connessi tramite una trasmissione a cinghia a rapporto costante;
- un sistema di accumulo a condensatori (UC, Ultra Capacitors);
- un azionamento elettrico per la trazione anteriore (TM, Traction Motor);
- un nodo di interconnessione elettrica dei sistemi (Link);
- vari convertitori elettrici;
- un sistema di gestione.

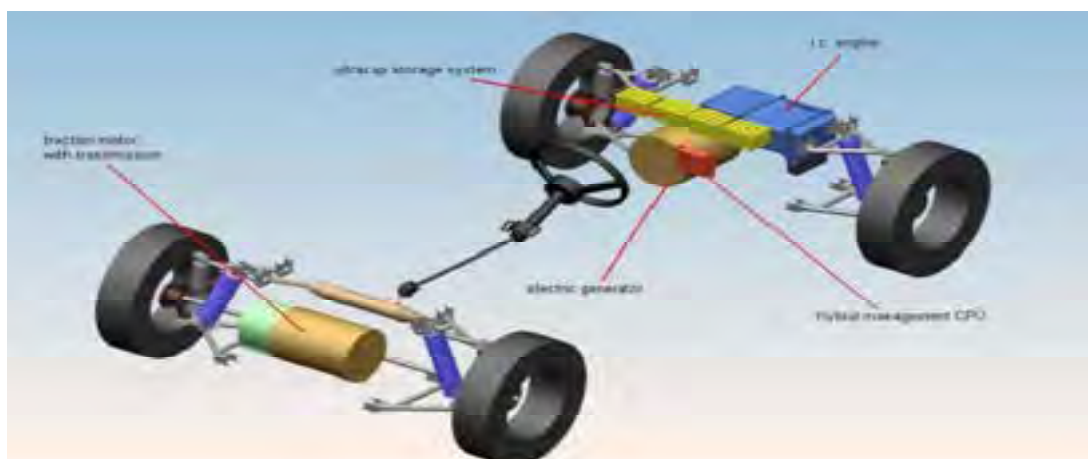


Figura 11 - Layout del sistema di trazione (i supercondensatori sono stati in seguito spostati in avanti)

Motore termico primario – ICE

E' stato utilizzato il noto e collaudato motore Piaggio monocilindrico Q.U.A.S.A.R. 250 cc che equipaggia i modelli Vespa GTV e GTS oltre che il Beverly, l'IMP3 e il modello X7.

E' un motore moderno, a 4 valvole, iniezione elettronica, omologato per motocicli secondo la normativa Euro 3.

I suoi principali dati tecnici sono riportati nella tabella seguente.

Motore a combustione interna	
Tipo	Accensione comandata – 4 tempi
Cilindrata	Monocilindrico 244.3 cc
Alesaggio	72 mm
Corsa	60 mm
Raffreddamento	A liquido
Distribuzione	4 valvole – monoalbero a camme in testa
Potenza Max	16.2 kW (22 CV) a 8250 giri/min
Coppia Max	20.2 Nm @ 6500 giri/min
Iniezione	Elettronica
Peso del motore	36 Kg
Omologazione	EURO 3 (motocicli)
Catalizzatore	Trivalente

Tabella 5 - Motore termico

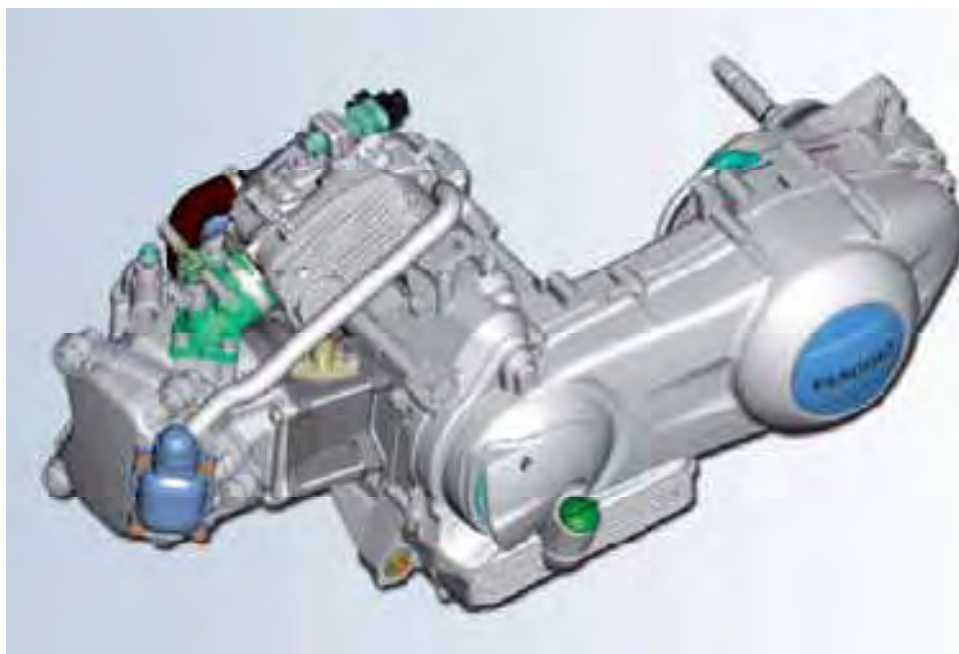


Figura 12 - Il motore termico utilizzato da cui è stata rimossa la trasmissione

Generatore elettrico – GE

Il generatore elettrico è una macchina brushless reversibile a magneti permanenti realizzata su nostre specifiche dalla ditta ACM di Varese. Le principali caratteristiche tecniche del GE sono riportate nella tabella seguente.

Generatore elettrico	
Tipo	Sincrono a magneti permanenti
Tensione RMS	55 V
Potenza	5 kW
Potenza	8 kW
Coppia nominale	20 Nm
Regime	5000 giri/min
N° coppie polari	3
Tipo di magneti	Nd Fe B
Raffreddamento	a liquido
Peso	30 kg



Tabella 6 – Generatore Elettrico

Figura 13 - Generatore elettrico

Gruppo motogeneratore – GU

Il generatore elettrico è mosso dal motore termico. Per l'accoppiamento tra le due macchine è stato scelto il sistema a cinghia e pulegge, con rapporto di trasmissione costante. Il rapporto 1:1 è stato scelto per ottimizzare il rendimento del gruppo motogeneratore.

La trasmissione a cinghia è stata preferita all'accoppiamento diretto tramite un giunto in quanto esso permette maggiore mobilità reciproca dei due gruppi, un ancoraggio più robusto dell'alternatore, una maggiore semplicità di manutenzione ed un minore costo.



Figura 14 - Alloggiamento del gruppo motogeneratore (GU) sulla piastra posteriore del veicolo

Motore elettrico di trazione - TM

Al pari dell'alternatore anche il motore elettrico di trazione è stato realizzato su nostre specifiche dalla ditta ACM. Adotta la stessa tecnologia costruttiva. Le principali caratteristiche tecniche del TM sono riportate nella tabella seguente.

Il motore elettrico di trazione è rigidamente assemblato ad un gruppo differenziale con riduzione finale pari a 7:1 da cui partono i semiassi per le ruote motrici.



Figura 15 - Foto dell'assale anteriore del veicolo: motore di trazione e i supercondensatori

Supercondensatori - UC

I supercondensatori sono stati scelti sul catalogo Maxwell: sono stati impiegati 4 moduli da 16 V e 550 F collegati in serie. Ogni modulo, pur essendo costituito al suo interno da 6 condensatori elementari, è rigidamente assemblato e scatolato in un contenitore in alluminio. Nel seguito si riporta l'immagine di un singolo modulo. Nella foto precedente è visibile l'alloggiamento a bordo del veicolo dei 4 moduli. Le principali caratteristiche tecniche dei supercondensatori utilizzati sono riportate nella tabella seguente.

Supercondensatori	
Specifiche singolo modulo.	
Costruttore	Maxwell
Modello	BMOD0500 E016
Tensione	16.2 V (6 celle da 2.7 V)
Capacità	500 F
Energia spec.	3.17 Wh/kg
Potenza spec.	5.4 kW/kg
Sistema completo (4 moduli in serie)	
Tensione	64.8 V
Capacità	125 F
Energia	73 Wh
Potenza	124 kW
Volume	18.8 litri
Peso	23 kg



Figura 16 - Un modulo di supercondensatori

Tabella 7 - Supercondensatori

Gruppi di conversione e loro elettronica di controllo

Ognuno dei tre componenti elettrici (alternatore, motore, supercondensatori) è corredato da un gruppo di conversione costituito da un elemento a diodi mosfet e una elettronica di controllo basata su processore DSP (Digital Signal Processing). Il gruppo è sostanzialmente lo stesso, ma impiega programmi diversi in modo da assolvere a funzioni diverse.

Nelle foto sono riportate l'elettronica di controllo e il componente a diodi (scelto dal catalogo Semikron).



Figura 17 - Elettronica dei convertitori e diodi dei convertitori

Sistemi di raffreddamento

Le esigenze di raffreddamento delle parti hanno richiesto due circuiti separati di raffreddamento. Il primo, con acqua a circa 90°C è quello di corredo del motore termico e utilizza la pompa di circolazione integrata al motore, la valvola di termostatazione ed un radiatore con elettroventola maggiorato rispetto a quello originale per far fronte ad una eventuale bassa ventilazione dal vento della marcia. Il secondo circuito, con acqua a 50 °C, raffredda le macchine elettriche ed i convertitori. Impiega una pompa elettrica di circolazione ed un radiatore con elettroventola sempre accesa.

Architettura del sistema di trazione

L'architettura elettrica del sistema è stata progettata per soddisfare parecchi requisiti, in particolare:

- possibilità di governare l'alternatore sia in corrente che in numero di giri;
- possibilità per i supercondensatori di effettuare escursioni di tensione tale da sfruttare quasi al completo la loro capacità di accumulo;
- realizzazione di una tensione stabile al nodo di convergenza dei sistemi (link);
- possibilità di governo in coppia del motore di trazione.

In aggiunta a ciò ci sono le ovvie richieste di prestazioni guida quali retromarcia, recupero in frenata, marcia in solo elettrico.

Lo schema adottato è stato quello della figura che segue.

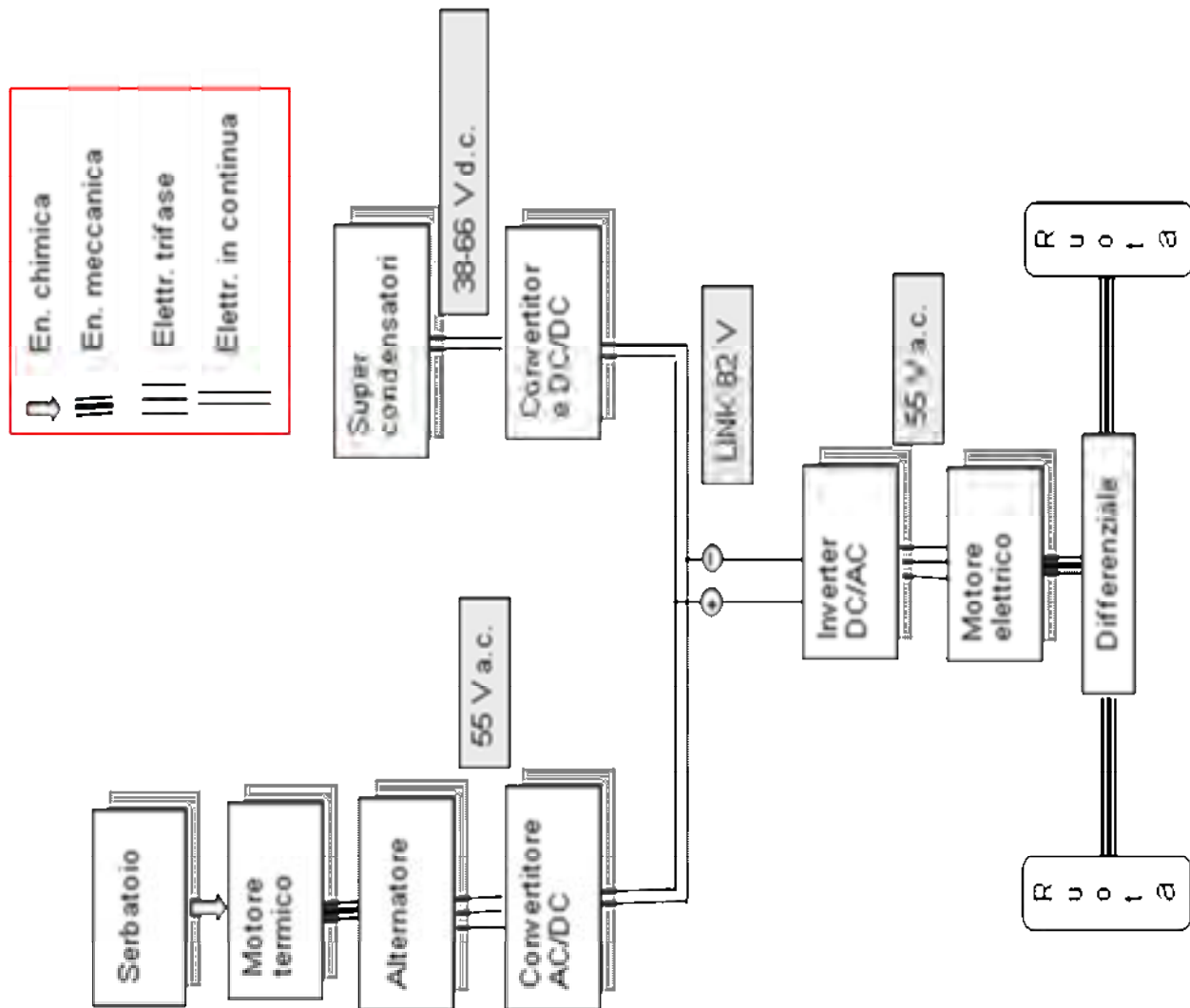


Figura 18 - Principale componentistica e relativi flussi energetici

Controllore di alto livello: La centralina programmabile Prometheus

Con questo termine viene indicato un componente logico multifunzionale prodotto dalla Diamond Systems Corporation, composto da una serie di schede elettroniche racchiuse in un contenitore metallico.

Le schede presenti sono:

- Modulo Prometheus PC/104: unità di controllo per processi industriali, strumentazione scientifica, apparati sperimentali e acquisizione di dati. Comprende un processore, il collegamento di rete ethernet, e gli apparati analogici di ingresso e uscita dati. Possiede una memoria flash di 2 Mbytes; di questa i primi 256 KB servono per allocare il BIOS, mentre la parte rimanente può essere gestita come una memoria esterna adatta ad accogliere il programma eseguibile.
- Modulo Ruby MM-1612: è un convertitore di segnale D/A per il controllo di processi, dotata di 16 uscite single-ended.
- Scheda di alimentazione Jupiter MM-SIO: provvede a fornire quattro livelli di tensione stabilizzata a disposizione di tutti i vari moduli, partendo dai 12 V della batteria di servizio.
- Scheda di comunicazione CAN AC2-104: rende la centralina nodo di interscambio dei dati CAN (Controller Area Network) e pertanto permette al programma di supervisione di leggere tutti i dati e di inviare ai componenti i segnali di comando.

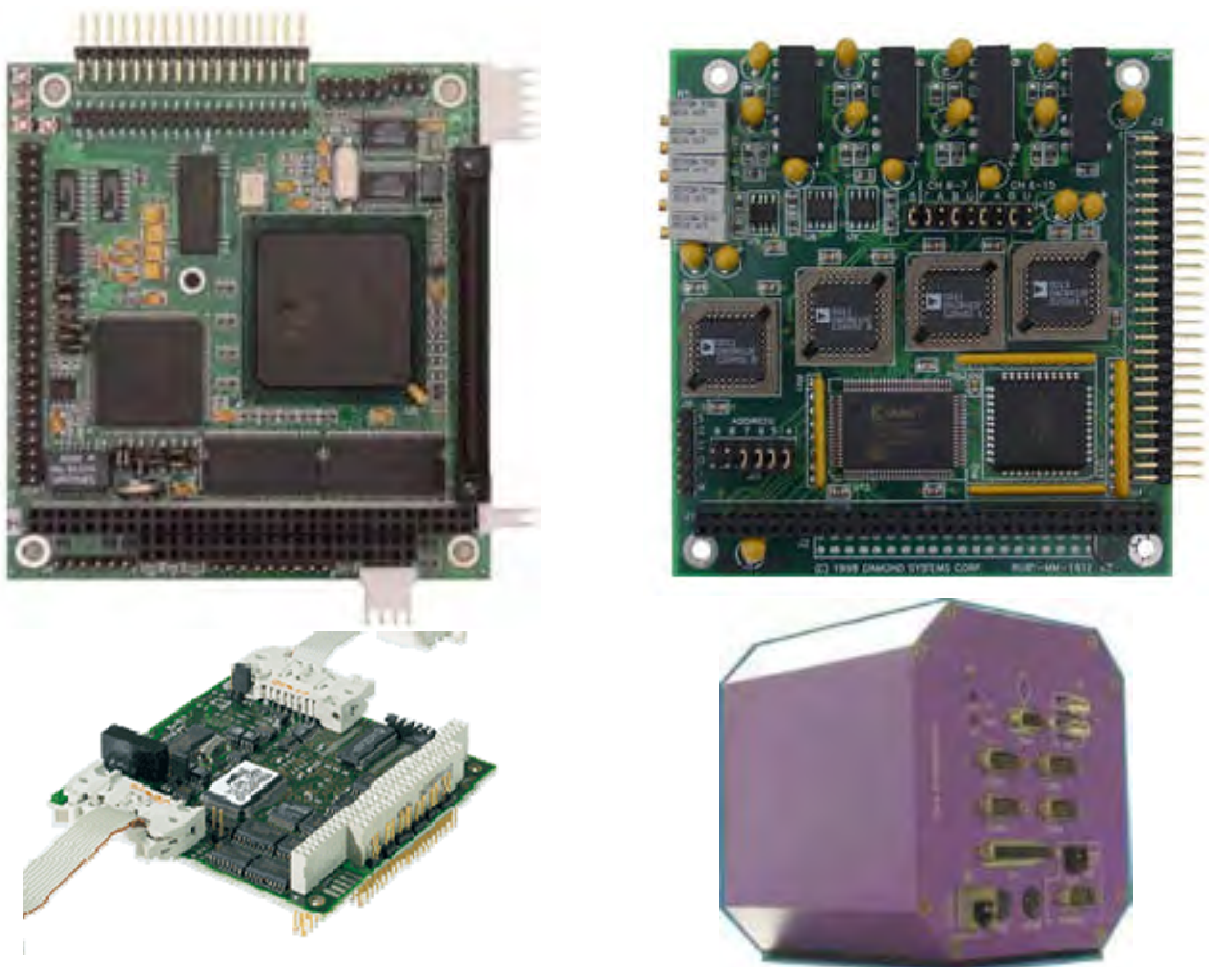


Figura 19 - Componenti del sistema di controllo e logica di I/O

Sistema di comunicazione CAN: sensori ed attuatori

La comunicazione delle informazioni tra i componenti e con l'unità di controllo è implementata utilizzando una rete CAN che utilizza il protocollo 2.0A ad una velocità di 1Mbit/s.

Il sistema di controllo dell'intero sistema di propulsione è progettato come un sistema a logica distribuita e un programma di supervisione.

E' composto da quattro sottosistemi principali che comunicano tramite la rete CAN. I sottosistemi sono: il gruppo GU, il gruppo UC, il gruppo TM, il gruppo Prometheus.

La figura che segue illustra le connessioni tra i gruppi.

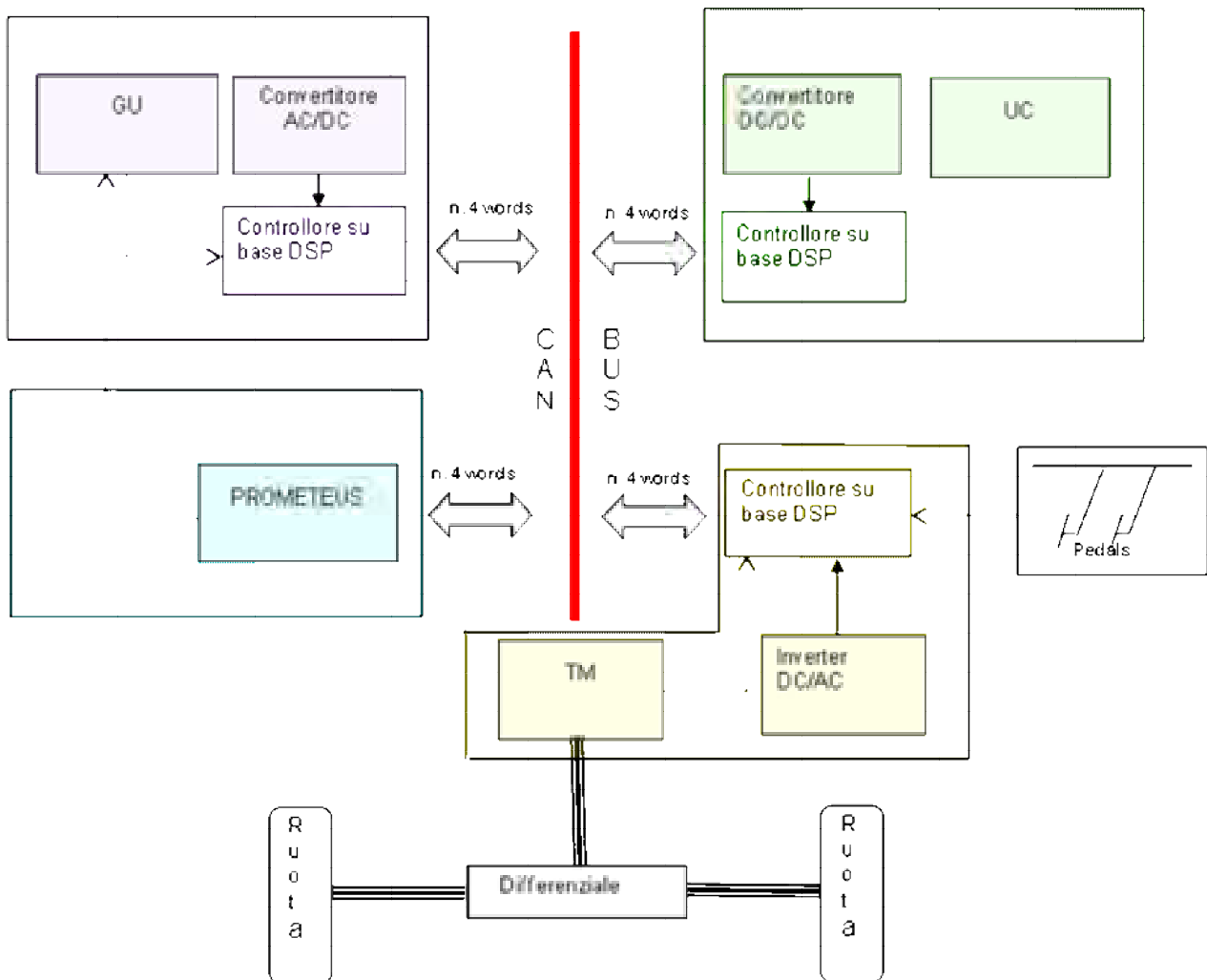


Figura 20 - Schema delle comunicazioni CAN di bordo

Le quattro informazioni che sono messe a disposizione della Can da ogni gruppo logico sono le seguenti:

- Dal gruppo GU: velocità di rotazione, corrente erogata, a disposizione, errori.
- Dal gruppo UC: tensioni UC e link, corrente di link, a disposizione, messaggi ok, protezione, errori.
- Dal gruppo TM: velocità di rotazione, segnale dai pedali dell'acceleratore, segnale dal pedale

del freno, retromarcia e protezione, errori.

- Da Prometheus: set corrente GU, set corrente TM, a disposizione, controlli di abilitazione e blocco dei DSP.

Al di fuori della Can esistono un output analogico per l'attuazione del gruppo sfarfallato, un output digitale per l'attuazione di un relais di consenso chiave per l'avviamento e lo spegnimento del motore termico di verso il controllore TM, un input digitale per la attuazione da parte del pilota del blocco di protezione dei DSP. I tre segnali vengono gestiti dalla Prometheus.

La gestione del motore termico, infatti, consiste in un controllo in coppia effettuato tramite la regolazione della corrente erogata dall'alternatore e da un controllo in velocità tramite il comando, fornito dal software di supervisione, agente sull'acceleratore del gruppo di iniezione. Di conseguenza questo leveraggio è stato remotizzato tramite un sistema costituito da un controllore, un attuatore, un cavo Bowden flessibile in guaina la cui estremità è connessa alla farfalla del gruppo di iniezione. Il dettaglio dei componenti è il seguente:

- Controllore B Vanos della Walbro: il movimento delle parti attive dell'attuatore avviene tramite questa apposita scheda di controllo che consente l'impostazione della posizione, la conoscenza della reale posizione raggiunta, della velocità di apertura, del ritorno in posizione off in assenza di segnale. La centralina è sovrabbondante rispetto alle funzioni richieste ma è stata comunque impiegata per motivi di semplicità ed opportunità.
- Attuatore ETC 5 della Siemens VDO (detto in seguito anche TPS): E' anche questo un componente sovrabbondante dato che comprende un intero corpo sfarfallato elettronico che viene utilizzato come attuatore per replicare il movimento della sua farfalla sulla farfalla meccanica del condotto di aspirazione del motore termico. L'impiego di un sistema di attuazione così fatto si è reso necessario per via del notevole tiro necessario per muovere completamente e con precisione la farfalla del motore termico.

I convertitori colloquiano con i rispettivi controllori tramite tre tipi di informazioni: gate, measures e fault; esistono inoltre due collegamenti diretti tra i misuratori di n. di giri delle due macchine elettriche (resolver) e i corrispondenti controllori DSP.

La gestione del sistema di propulsione ibrido

La gestione del sistema di propulsione ibrido è affidata al programma di supervisione installato sul processore della centralina Prometheus alla quale pervengono i dati di tutti i sensori, gli attuatori ed i dispositivi presenti sulla vettura. La centralina ha fundamentalmente i seguenti compiti:

- gestire il gruppo elettrogeno, determinando, in base alle condizioni di missione, la potenza da richiedere al gruppo elettrogeno. Il controllo del GU avviene contemporaneamente sul motore a combustione interna mediante la farfalla motorizzata e sul generatore elettrico mediante la scelta della coppia resistente;
- gestire il livello di stato di carica dei supercondensatori in modo che possano svolgere la loro funzione di filtro livellante delle richieste impulsive di potenza, abbiano costantemente una riserva di energia per sopperire a picchi di richiesta, abbiano all'occorrenza una capacità di accogliere surplus di energia provenienti dalla frenata rigenerativa;
- individuare per ogni richiesta di potenza al gruppo GU le migliori condizioni di funzionamento del motore termico, sulla base della mappa di funzionamento dello stesso;
- effettuare le opportune operazioni di filtraggio delle operazioni dinamiche, in particolare per quanto riguarda i gradienti di salita della potenza richiesta al motore di trazione e al gruppo motogeneratore;

- creare un cruscotto virtuale per la visualizzazione delle principali grandezze e per l'esecuzione di alcuni comandi tramite interruttori integrati nel software;
- effettuare i controlli di sicurezza contro il superamento dei valori limite delle grandezze elettriche e meccaniche;
- effettuare l'acquisizione delle grandezze misurate durante la missione.

Per la realizzazione del programma di controllo si è scelto l'ambiente di sviluppo Matlab-Simulink. Il software è stato realizzato nel sistema operativo Windows su di un PC (che nel seguito verrà identificato come host PC), sfruttando appunto gli strumenti offerti dal Matlab e dal Simulink. Nel corso delle prove di messa a punto, durante le quali le modifiche al software erano frequenti, è stato impiegato un computer portatile per effettuare le manovre sul programma. Nella versione definitiva invece al posto del computer portatile è stato installato sulla plancia della vettura un Car PC avente le funzioni del PC ed uno schermo touchscreen. Con lo strumento Real-Time Workshop di Simulink ed un compilatore C/C++ si crea dal software sorgente un codice eseguibile che viene scaricato dall'host PC nella memoria flash della centralina Prometheus utilizzando lo strumento xPC Target. In questo modo la Prometheus esegue il programma in real-time attraverso le schede di acquisizione e generazione dei segnali di I/O. Al Car PC viene lasciato il compito, tramite un opportuno programma, di cruscotto virtuale ed eventualmente di selettore delle modalità di risposta del sistema di trazione.

Con riferimento alla figura seguente, la schermata iniziale del software di gestione si compone fondamentalmente di due tipologie di blocchi: blocchi che gestiscono ed implementano le funzioni di I/O del controllore; blocchi che definiscono la logica di controllo. L'insieme dei blocchi in cui il software si articola è il seguente:

- Blocchi CAN Read e CAN Write e Ruby MM-1612, necessari a gestire le funzioni in input ed output del sistema;
- Blocco TM, che si occupa della trazione e dei supercondensatori;
- Blocchi GU e ICE che si occupano del controllo del motogeneratore.

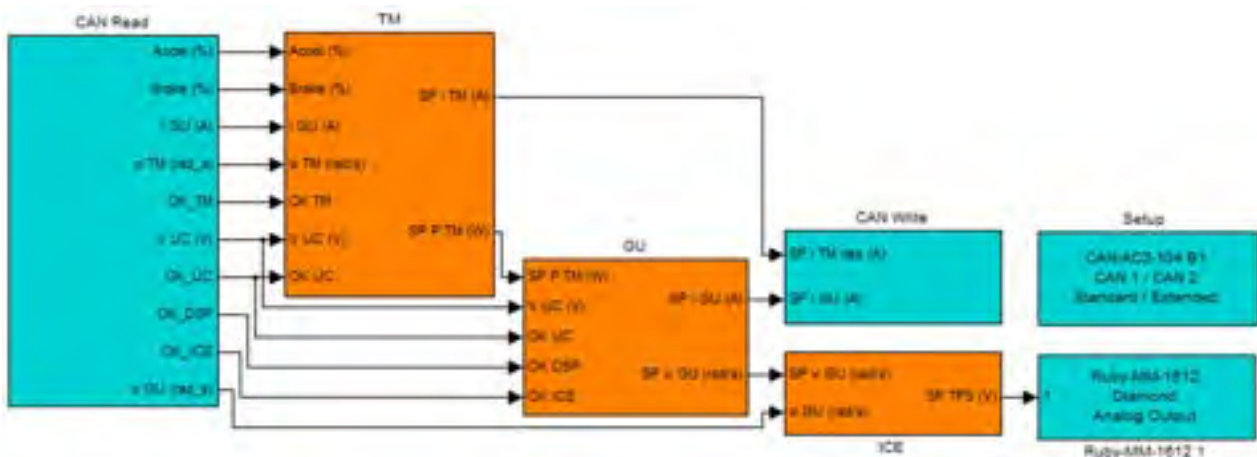


Figura 21 - Modello del software di gestione.

Controllo della trazione e dei supercondensatori – Blocco TM

Il Blocco TM si occupa, adottando le dovute limitazioni, delle richieste dell'acceleratore e del freno. In particolare il blocco controlla che per la frenata a recupero sia progressiva con una certa legge in funzione della posizione del pedale del freno; che venga abilitata solo se la velocità sia superiore a una soglia minima e che il pedale dell'acceleratore sia rilasciato; che la

corrente prodotta dal recupero sia inferiore ad un limite predefinito. Il blocco controlla anche la capacità di assorbire la carica da parte dei condensatori e ne definisce la necessaria potenza di ricarica.

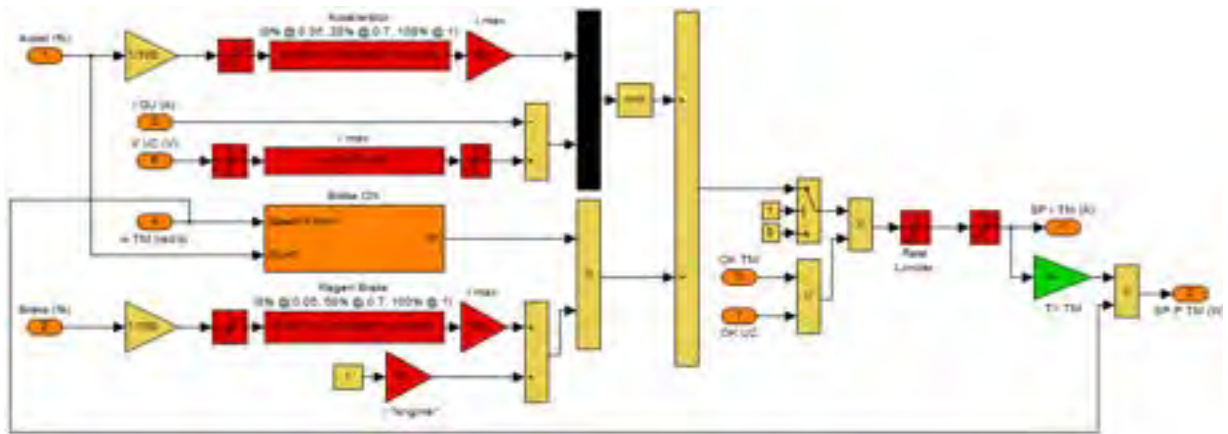


Figura 22 - Blocco TM

Controllo del gruppo motogeneratore - Blocchi GU ed ICE

Il blocco GU si occupa della gestione del gruppo di generazione e, in base ai limiti impostati sui gradienti di carica dei condensatori e dell'erogazione dell'alternatore, effettua il bilancio dell'energia nel link e calcola - per differenza tra la richiesta della trazione e la richiesta dei condensatori - la differenza a carico del gruppo GU. A valle di ciò sceglie sulla mappa di funzionamento del motore termico, la coppia ottimale di grandezze velocità di rotazione e coppia motrice.

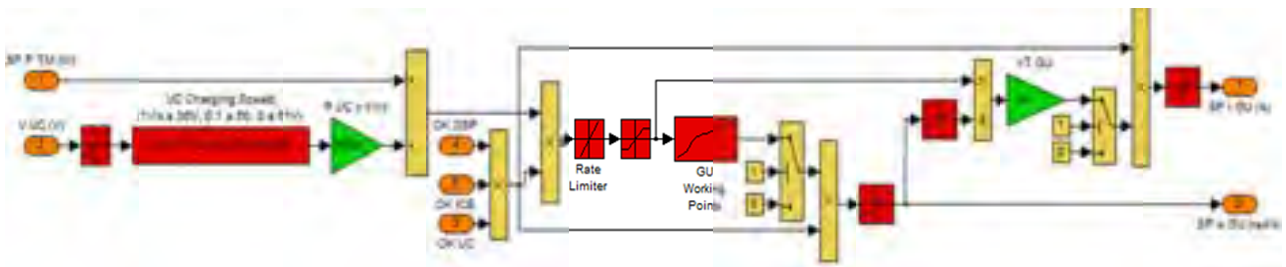


Figura 23 - Blocco GU

A valle, il blocco ICE riceve dal blocco GU il valore di set point sulla velocità di rotazione e ne controlla l'attuazione agendo in maniera proporzionale ed integrativa sul TPS dell'acceleratore del motore termico.

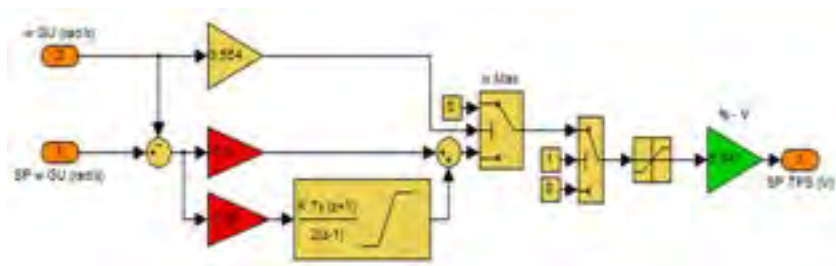


Figura 24 - Blocco ICE

Il cruscotto virtuale

Il cruscotto virtuale si occupa della visualizzazione sull'host PC delle principali grandezze.

Nel funzionamento normale della vettura non è necessario l'utilizzo del cruscotto virtuale come attuatore di scelte di controllo, ma, durante le attività sperimentali, è utile il suo utilizzo per la modifica manuale di tutti i set-point (corrente di trazione, corrente e velocità del GU, posizione della valvola a farfalla) e permette la realizzazione sul banco a rulli di prove stazionarie sia dell'azionamento di trazione che del motogeneratore.

La visualizzazione grafica permette anche di effettuare in maniera più efficace i controlli di sicurezza (pur impostati in automatico all'interno del software) per prevenire il superamento dei valori limite delle grandezze elettriche e meccaniche.

Il cruscotto virtuale gestisce anche l'acquisizione delle grandezze misurate durante la missione.

Se ne riporta una immagine.

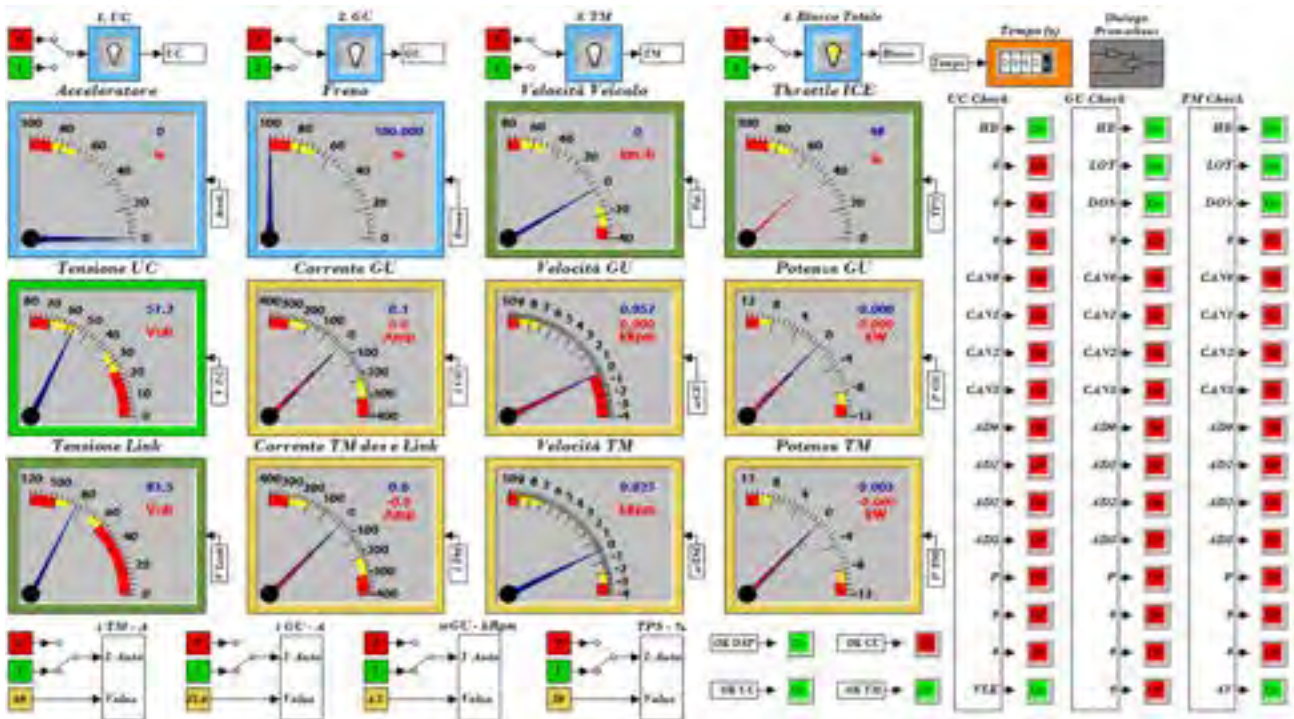


Figura 25 - Cruscotto virtuale

Assemblaggio e collaudo del prototipo

La realizzazione del veicolo è stata cadenzata secondo più fasi: la scelta e l'acquisto dei materiali e dei componenti, la realizzazione ex novo di quanto non disponibile sul mercato, il controllo e la caratterizzazione dei componenti, l'assemblaggio per la costituzione di un sistema di trazione semplificato prettamente elettrico, il completamento dell'assemblaggio con l'aggiunta della parte termica, infine la realizzazione di parti di carrozzeria.

Il primo traguardo di funzionalità della vettura è stato conseguito nell'ottobre 2007 in occasione della partecipazione alla gara Formula Electric and Hybrid organizzata dalla associazione ATA a Pollein (Aosta).



Figura 26 - Assemblaggio delle batterie per la versione puramente elettrica

In questa circostanza la vettura è stata allestita con un sistema di trazione puramente elettrico costituito da un pacco di sei batterie da 12V sistemate nel vano posteriore e collegate direttamente all'inverter del motore di trazione. La competizione è servita come collaudo, oltre che dell'azionamento elettrico di trazione, anche di alcune funzionalità e dimensionamenti, tra cui le parti meccaniche tradizionali (assetto su strada, freni, guidabilità).

A seguito di questa prima fase è stata completata l'acquisizione dei componenti. Le macchine elettriche sono state commissionate su specifica alla ditta ACM che ha provveduto ad effettuare le opportune modifiche su prodotti di serie ma nati per l'impiego a 220 V in c.a. Il motore termico è stato reperito nell'ambito del contratto con l'Università La Sapienza, i supercondensatori sono stati acquistati dalla Maxwell, gli inverter sono un prodotto Semikron, le schede di controllo con il relativo software sono state realizzate dall'Università Roma Tre.

Tutti i componenti del sistema di trazione sono stati sottoposti a test di verifica della congruità delle caratteristiche alle richieste e di rilevazione di alcuni dati non dichiarati, in particolare i rendimenti. Queste attività sono risultate una parte importante dell'intero programma, ed anche impegnative, tanto che hanno comportato la rottura e la sostituzione dell'albero a gomiti del motore termico e dell'albero dell'alternatore.

L'accoppiamento del motore termico all'alternatore è stato realizzato con un sistema di cinghie e pulegge. Si sono ottenuti in questo modo i seguenti vantaggi rispetto ad una soluzione ad alberi in linea e giunto elastico:

- il motore termico è libero di vibrare anche con forti escursioni senza interessare l'alternatore;
- i due alberi sono paralleli e viene quindi ridotto l'ingombro lungo questa direzione;
- le due pulegge, attualmente dello stesso diametro, possono essere sostituite per cambiare il rapporto di trasmissione;
- il sistema è semplice da realizzare, economico, facile da smontare e mantenere.

Il gruppo motogeneratore così costituito è stato montato su una piastra di base in lega di alluminio alloggiata nel vano posteriore del prototipo, costituendo così un insieme unico rigido e facilmente asportabile. A completamento del gruppo è stato predisposto il sistema di raffreddamento con un radiatore, il tubo di scarico con il silenziatore catalizzato, il filtro dell'aria comburente, la batteria per l'impianto a 12 V, il tirante del servocomando

dell'acceleratore del motore termico, un serbatoio - protetto da una scatola in alluminio - contenente 5 litri di benzina e la pompa di alimentazione.



Figura 27 - L'assieme del gruppo motogeneratore

Anche il gruppo anteriore è stato montato su una simile piastra costituente la base di appoggio del motore elettrico e del riduttore finale - differenziale. I semiassi con i giunti sono stati reperiti da un veicolo simile e ridotti alla lunghezza necessaria.

I quattro supercondensatori sono stati collegati elettricamente in serie ma sono stati montati affiancati l'uno all'altro su una lamiera di appoggio. L'intero pacco è stato fissato sulla parte anteriore del prototipo in una posizione volutamente in vista in modo da richiamare l'attenzione di chi osserva la vettura frontalmente.



Figura 28 - Assieme del gruppo motore differenziale semiassi

Come detto, le tre macchine elettriche (GU, UC e TM) sono corredate da altrettanti sistemi di conversioni, tutti dello stesso tipo, ognuno collocato nelle vicinanze della macchina alla quale è dedicato. I sistemi di conversioni sono costituiti da un elemento raddrizzante a semiconduttori Mosfet raffreddato ad acqua montato sul ripiano superiore di una scatola di alluminio che fa da protezione e schermo elettromagnetico per il sistema di controllo. Sul pianale della vettura,

dietro i sedili, hanno trovato posto in posizione simmetrica i convertitori dell'alternatore e dei supercondensatori (compreso l'induttore al servizio dell'innalzatore di tensione di questi ultimi). Invece il convertitore del motore di trazione è stato posto oltre i piedi del passeggero.

La carrozzeria

Lo chassis tubolare è stato rivestito con alcuni pannelli al fine di costituire una carrozzeria essenziale. I requisiti che sono stati posti alla base del disegno stilistico della carrozzeria sono stati:

- protezione, sia pur minima, di pilota e passeggero;
- ampie superfici trasparenti per soddisfare l'esigenza di divulgazione e pubblicizzazione di sistema e componenti;
- parti leggere, facilmente asportabili e sostituibili;
- basso costo complessivo;
- aspetto innovativo e colori attraenti.

Il disegno della carrozzeria è stato oggetto di una tesi di laurea. Il risultato è stato improntato a linee curve a guscio, impiego di lastre di materiale acrilico, colori vivaci sulla tonalità dell'arancio.

Dal punto di vista tecnico la realizzazione della carrozzeria ha richiesto una integrazione della struttura tubolare del telaio. Infatti per consentire il sostegno di un parabrezza e di un tettuccio sono stati saldati alla struttura due tubolari piegati ad arco di cerchio che attraversano longitudinalmente l'intero veicolo. Il parabrezza è stato sagomato da una lastra di plexiglass. Altre parti di carrozzeria sono state avvitate direttamente al telaio. I colori scelti sono state le sfumature tra il rosso e il giallo che sono le tonalità tipiche della municipalità romana. (Anche la scelta del nome del prototipo ha voluto riecheggiare assonanze con la romanità del progetto, oltre che indicare la vocazione cittadina del veicolo). L'unica conseguenza negativa di questa carrozzeria a cui non si è riusciti a dare soluzione è il fatto che il motore termico non è racchiuso in un alloggiamento per cui la sua rumorosità non è sufficientemente attenuata.



Figura 29 - La Urbe durante la gara Formula Electric and Hybrid 2009

Il collaudo del prototipo ha costituito un atto formale necessario per la conclusione dei contratti di consulenza con le università ed è stato eseguito allorquando tutte le parti sono risultate funzionanti e il veicolo ha percorso i primi metri in perfetta autonomia e sicurezza. La messa a punto del sistema di gestione ha invece richiesto molto lavoro aggiuntivo, specialmente per quanto riguarda l'affidabilità, la stabilità e l'economia del funzionamento.



Figura 30 - La conclusione del collaudo

Le prove di caratterizzazione e ottimizzazione

La piena padronanza e conoscenza del prototipo con l'utilizzo quotidiano seguito al collaudo ha evidenziato una instabilità di funzionamento dell'apparato di trazione che rendeva l'affidabilità del mezzo insoddisfacente. In pratica avvenivano malfunzionamenti di vario tipo e di gravità tale da mandare in blocco il sistema di controllo. Le prime operazioni di sistemazione del veicolo sono state pertanto la ricerca delle condizioni operative critiche, la comprensione dei fenomeni e del comportamento del sistema e la correzione dei difetti.

In questa fase i principali miglioramenti apportati sono stati:

- upgrading della versione dell'ambiente Simulink, che ha migliorato la stabilità dell'esecuzione del programma e della comunicazione tra le parti;
- miglioramento del raffreddamento delle parti elettriche attuando un accurato spurgo del circuito di raffreddamento delle parti elettriche rendendolo leggermente in sovrappressione rispetto all'atmosfera;
- imposizione di gradienti fissi di variazione di tutte le prestazioni richieste ai componenti.

Nel corso di questi lavori sono stati individuati difetti della versione del software in uso. Si è pertanto elaborato una nuova versione più modulare e più ordinata del programma. Anche questa operazione ha portato ad un miglioramento dell'affidabilità del sistema che alla fine è risultata ottima.

Prove al banco a rulli

L'utilizzo del banco a rulli dell'ENEA è stato determinante nel raggiungimento degli obiettivi di stabilità e ottimizzazione delle prestazioni del sistema di trazione. Con questo strumento di prova è stato possibile strumentare e quindi controllare in real time l'andamento delle principali grandezze elettriche, impostare le volute condizioni di marcia, alimentare dall'esterno alcune utenze.



Figura 31 - Il veicolo in prova al banco a rulli

Un allestimento importante che è stato approntato allo scopo è il sistema di misura del consumo di carburante. Prevedendo un consumo molto basso si è preferito tralasciare il sistema automatico di misura di cui è fornito il banco, piuttosto sovradimensionato e con notevole quantità di carburante in circolo, e realizzare una soluzione più semplice e pratica. La soluzione consiste nel pesare continuamente durante la prova l'intero serbatoio in plastica della vettura con il suo contenuto, usando una bilancia digitale poggiata stabilmente a terra e isolata dalle vibrazioni del motore. La sensibilità di 1 grammo è risultata adeguata; i valori di peso indicati durante lo svolgimento della prova sono stati registrati a mano. Tutti i dati di consumo sono risultati riferiti all'unità di peso del carburante. Una successiva pesata di un litro campione di carburante ha permesso, tramite la conoscenza della densità del liquido, di fornire i dati riferiti a un litro.

Caratterizzazione del moto-generatore

L'informazione di base, propedeutica ad ogni possibile ottimizzazione del sistema, è stata la mappa di funzionamento del gruppo motogeneratore. Si è perciò provveduto ad eseguire un certo numero di prove di consumo in condizioni stazionarie. In particolare sono state eseguite prove in 45 diversi punti della mappa motore nel campo di potenze tra 500 e 6000 W elettrici generati dal GU, e velocità di rotazione tra 1700 e 5000 RPM.

Il risultato di questo primo set di prove si riassume nei 4 grafici collinari che seguono, che costituiscono l'interpolazione dei dati discreti rilevati (indicati con pallino rosso).

Si è così potuta definire per ogni potenza desiderata la velocità di rotazione ottimale del gruppo (punti indicati dalle stelle in verde). Tale curva è stata imposta come riferimento

ottimale, in termini di copia e velocità di rotazione, per il software di controllo del GU.

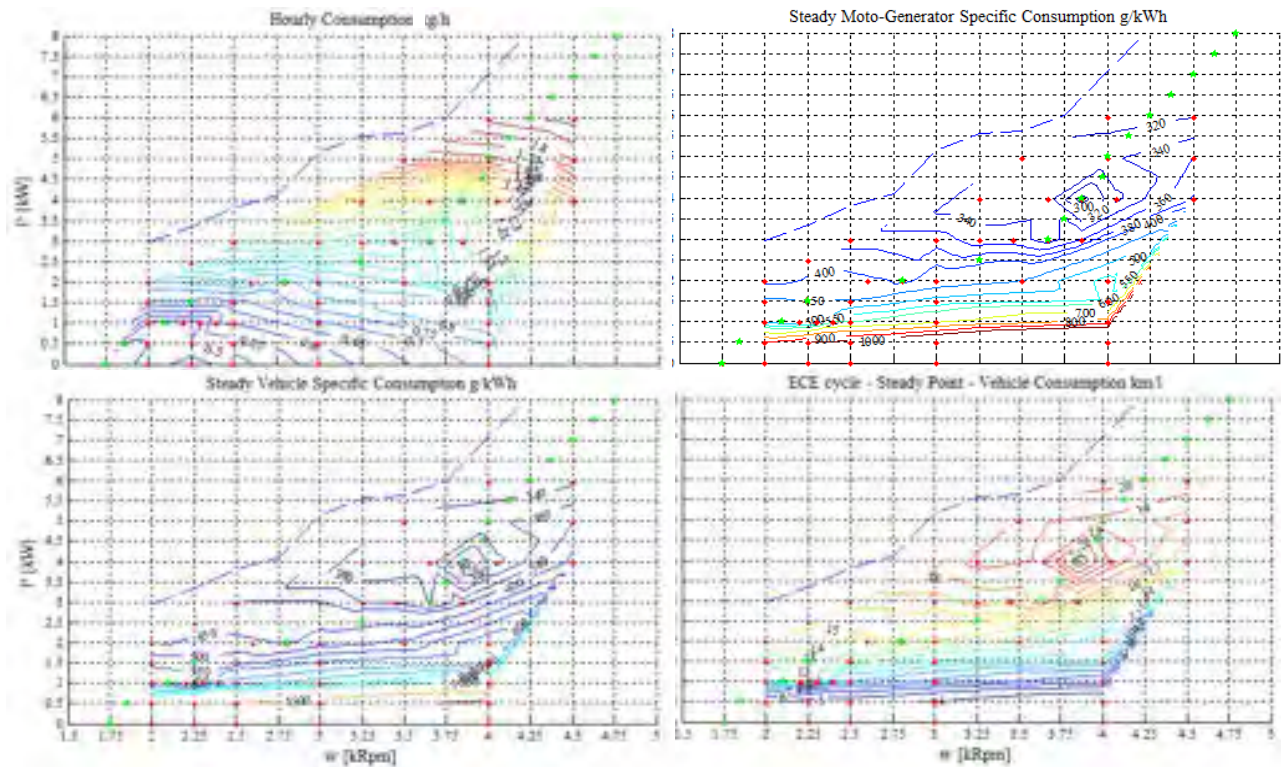


Figura 32 - Consumo specifico del motogeneratore e scelta dei punti ottimi di funzionamento

Nei grafici riportati:

- in alto a sinistra si evidenzia il consumo orario del GU, variabile tra un minimo di 420 (al minimo) e 1920 g/h (a 6 kW e 4500 RPM);
- il consumo specifico del GU misurato ha un minimo di 270 g/kWh a 4 kW e 3850 RPM, ove l'energia erogata in kWh è misurato all'uscita in corrente alternata del generatore elettrico;
- il consumo specifico del veicolo, misurato a velocità costante ed in condizioni di bilancio zero dei supercapacitori ha un minimo di circa 300 g/kWh a 4 kW e 3850 RPM, ove l'energia erogata in kWh è misurato all'ingresso in corrente continua del motore di trazione. Il consumo non tiene pertanto in conto le perdite nell'inverter di trazione e nel motore stesso;
- sulla base di un consumo elettrico medio misurato (nelle successive prove dinamiche) sul ciclo ECE di 110 Wh/km, si è potuto stimare il consumo del veicolo in km/l che si otterrebbe facendo lavorare il GU a punto fisso durante il ciclo ECE. Come evidenzia il grafico di destra in basso, in tal modo si può ottenere un obiettivo massimo di consumi per il sistema di gestione della propulsione di poco superiore ai 21 km/l sul ciclo ECE. E' evidente, come sarà mostrato in seguito, che il veicolo potrà ottenere consumi inferiori in condizioni di funzionamento mediamente meno onerose in termini di assorbimento elettrico al km richiesto alla trazione.

Resistenza al rotolamento

Dalla conoscenza delle caratteristiche del gruppo motogeneratore si è passati all'indagine sul comportamento dell'intero veicolo sfruttando la capacità del banco si simulare le condizioni di marcia su strada. E' stato provato il tipo di funzionamento più semplice, ossia a varie velocità costanti su strada piana. Ne è risultata una curva di resistenza approssimabile con la relazione:

$P = 8.37 \cdot 10^{-4} v^2 + 6.72 \cdot 10^{-2} v$ (dove P è espresso in kW elettrici, al lordo delle perdite nell'inverter di trazione e v è la velocità del veicolo in km/h).

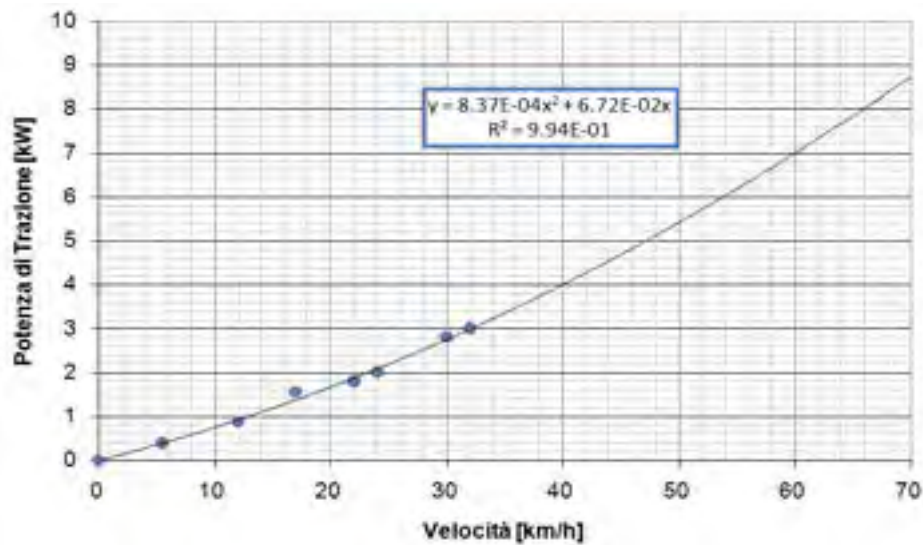


Figura 33 - Resistenza al rotolamento

Prestazioni dinamiche

Sono state condotte alcune prove per la verifica delle prestazioni:

- L'accelerazione media tra 0 e 50 km/h è risultata di 0.7 m/s².
- La velocità massima raggiunta è stata di 68 km/h.
- La percorrenza in solo elettrico è variabile da un massimo di 822 metri con partenza da fermo e marcia a bassa velocità (10 km/h) a un minimo di 400 metri con partenza da fermo e accelerazione massima fino alla velocità di 52 km/h.

I principali risultati delle analisi prestazionali sono riassunti nella tabella che segue.

<p>Prove percorrenza (da 65 a 38 V UC) in puro elettrico</p> <p>822 m con partenza da fermo e stabile a 10 km/h 776 m con partenza da fermo e stabile a 20 km/h 652 m con partenza da fermo e stabile a 30 km/h 505 m con partenza da fermo e stabile a 40 km/h 400 m durante la prova di accelerazione (con velocità di picco a 52 km/h)</p> <p>Prova accelerazione in puro elettrico</p> <p>Accelerazione costante tra 0 e 50 km/h: +10 km/h in 4 s, quindi 0.7 m/s² 0-30 m in 9 s 0-75 m in 14 s 0-100 m in 17 s</p> <p>Prova velocità massima</p> <p>Velocità massima di 68 km/h, con limitazione sulla Potenza GU impostata a 9 kW</p>
--

Tabella 8 - Prestazioni del veicolo

Caratteristiche di frenatura

La frenatura è stata impostata su tre stadi di funzionamento:

1. Rilascio del pedale dell'acceleratore. Il freno motore è impostato in modo da produrre una corrente in uscita da TM di circa 30 A. A questa corrisponde una coppia costante di frenata purché la velocità di avanzamento sia superiore a 10 km/h.

Il valore è stato scelto in base alla piacevolezza della sensazione di guida che deve riprodurre per quanto possibile l'effetto di freno motore di una vettura tradizionale con motore termico in presa sulle ruote.

2. Pedale del freno premuto solo fino ad esaurire i giochi e senza arrivare ad azionare l'effetto frenante del materiale di attrito. Un opportuno sensore di posizione della posizione del pedale informa la CAN della percentuale di frenata a recupero che si sta richiedendo.

Si ottiene così una modulazione continua della corrente richiesta al motore (che funziona da generatore) variabile da zero - ma rimane sempre il contributo del freno motore detto prima - fino a 180 A. Questa corrisponde a una capacità frenante proporzionale al grado di affondamento del pedale del freno nella prima fase della corsa.

3. Pedale del freno energicamente premuto. Si aggiunge all'azione precedente quella tipica di attrito dei freni a disco. Questa è l'unica frenata possibile a ruote ferme o in retromarcia.

Si riporta nel seguito un grafico relativo ai risultati di alcune prove di frenatura elettrica effettuate sul veicolo.

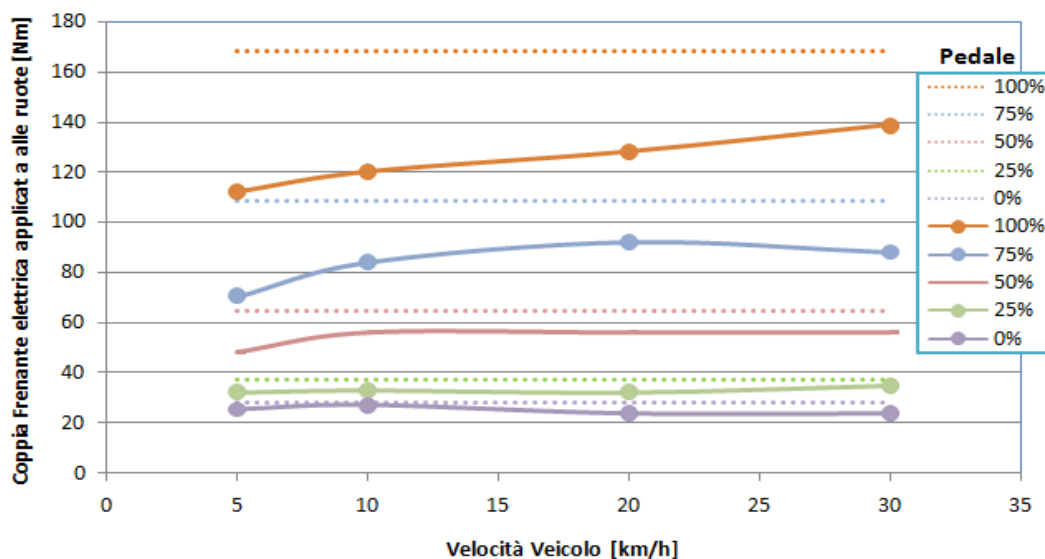


Figura 34 - Caratteristiche di frenatura

Prove su ciclo urbano ECE15

Le prove a velocità variabile sono state condotte seguendo la parte urbana del ciclo ECE15 che prevede una velocità massima di 50 km/h. In queste prime prove il sistema di controllo messo a punto prevede il funzionamento "sempre acceso" del gruppo GU che si posiziona automaticamente, e con dinamica prefissata, a un livello di potenza che garantisca la trazione e il mantenimento di uno stato di carica medio dei condensatori. Questa modalità sarà nel seguito indicata come "Load following".

Le prime prove di funzionalità hanno condotto alle seguenti due considerazioni:

- Le tracce delle grandezze elettriche e meccaniche registrate mostrano la perfetta funzionalità del sistema di accumulo temporaneo di energia nei supercondensatori.

Il gruppo motogeneratore infatti possiede una dinamica ridotta, e i surplus impulsivi di potenza, positivi e negativi, vengono assorbiti dai supercondensatori.

- Pur avendo imposto per via software il migliore regime di rotazione per ogni potenza richiesta al gruppo motogeneratore, risulta comunque che il punto di funzionamento di questo è per la maggior parte del tempo in zone ad elevato consumo specifico.

Ciò è dovuto alla preponderanza, nel ciclo ECE, di fasi di sosta e a potenza ridotta. Il motore termico utilizzato, come tutti i motori a ciclo Otto, è penalizzato nelle basse potenze per le perdite di laminazione dovute alla farfalla nel condotto di alimentazione dell'aria comburente.

Inoltre il minimo, nelle fasi di sosta, non può scendere sotto i 1800 RPM dal momento che deve essere garantita la stabilità di rotazione non solo del motore, ma anche dell'alternatore che si muove solidalmente con esso.

- Il controllo del motogeneratore è piuttosto efficace, sia in termini di corrente (e quindi di coppia), sia in termini di velocità di rotazione. Questo risultato è stato ottenuto tramite una elettronica di controllo ed un DSP che controllano in maniera molto precisa la corrente ed un controllo in catena chiusa della velocità di rotazione, con la attuazione in maniera proporzionale ed integrale (rispetto all'errore misurato) della valvola a farfalla del motore termico.

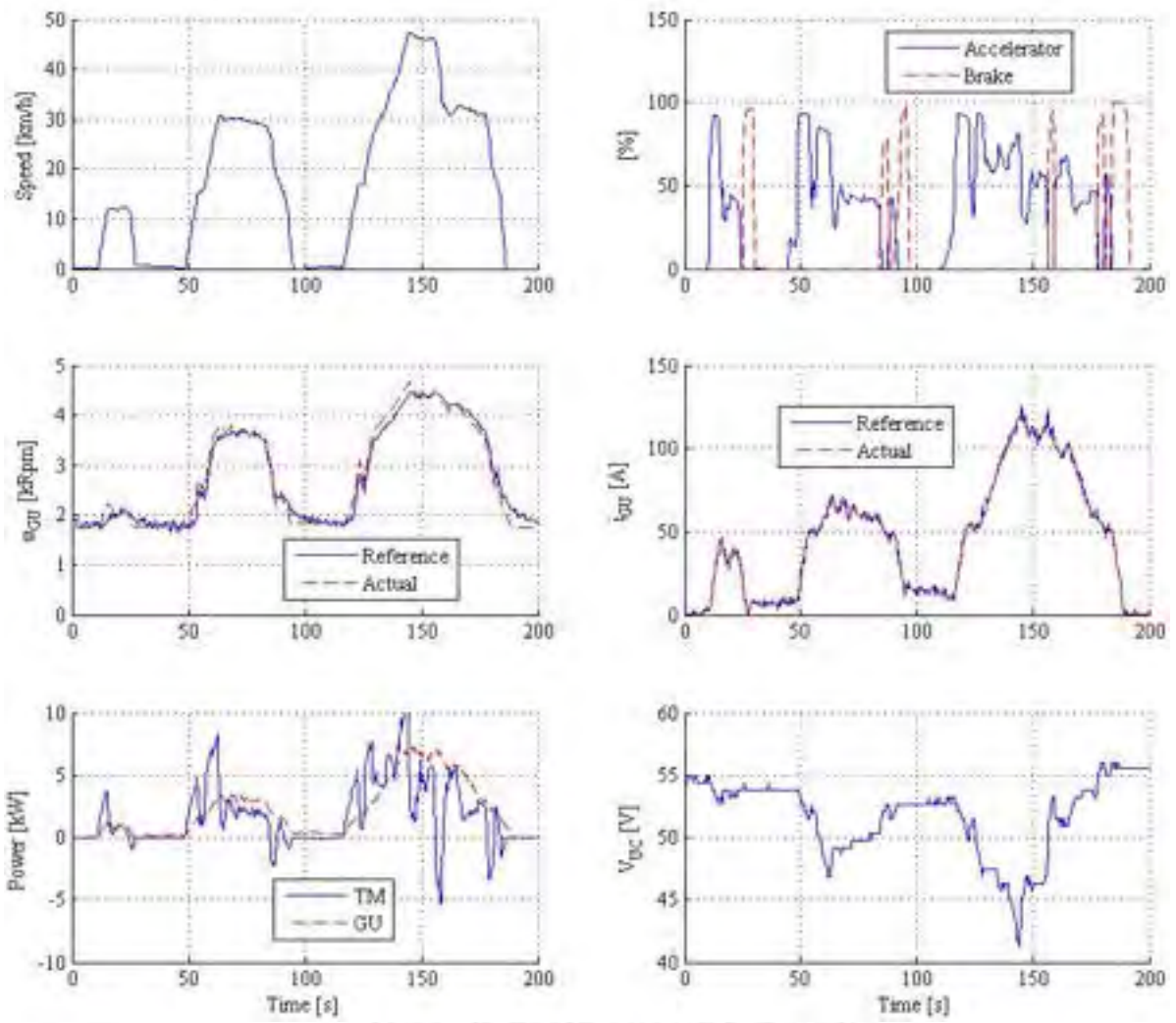
Il controllo della velocità è stato mantenuto volutamente meno preciso di quello in corrente, sia per evitare transitori troppo intensi al motore termico (ottenendo una sorta di effetto filtrante), sia perché si è verificato che la maggiore precisione imposta nel controllo della velocità può interagire negativamente con la precisione nel controllo della corrente, determinando anche (durante forti transitori di carico) possibili fenomeni di instabilità.

L'esame di questa situazione ha portato a concepire una seconda strategia di controllo per il gruppo motogeneratore che lo costringa a funzionare nell'intorno di una potenza di 4 kW oppure a restare spento. Questa strategia è stata chiamata "ON OFF + Load following" dal momento che il gruppo GU è spento o acceso, e quando è acceso viene controllato con lo stesso programma della strategia Load following.

E' evidente, in confronto al grafico precedente, lo spostamento dei punti di funzionamento nella zona di minor consumo. La percorrenza misurata passa infatti da 14.6 km/l con la strategia Load following a 18.5 km/l con la strategia ON OFF + Load following, con un decremento dei consumi del 21%.

Le prove sono state ripetute anche limitando (tramite la curva di potenza richiesta al GU, saturata in pendenza a 300 W/s) la severità dei transitori di accensione e spegnimento. L'effetto sui consumi si è rilevato lieve. Ulteriori campagne di misura attualmente in corso stanno cercando di valutare gli effetti di tali transitori sulle principali emissioni del veicolo.

Il consumo ottenuto non è molto distante dal valore massimo obiettivo di circa 21 km/l, che si otterrebbe accendendo il motore termico nel suo punto di funzionamento ottimo per il tempo strettamente necessario alla produzione dell'energia elettrica richiesta dalla missione del veicolo. Tale valore ottimo, però, non tiene conto dei vincoli imposti dal limitato contenuto energetico dei supercapacitori, la cui ricarica, come evidenziato dai risultati, può richiedere al gruppo motogeneratore l'erogazione di una potenza ben maggiore di quella ottima per mantenere lo stato di carica sufficientemente distante dai suoi limiti minimi.



ECE cycle - Steady Point - Vehicle Consumption km/l

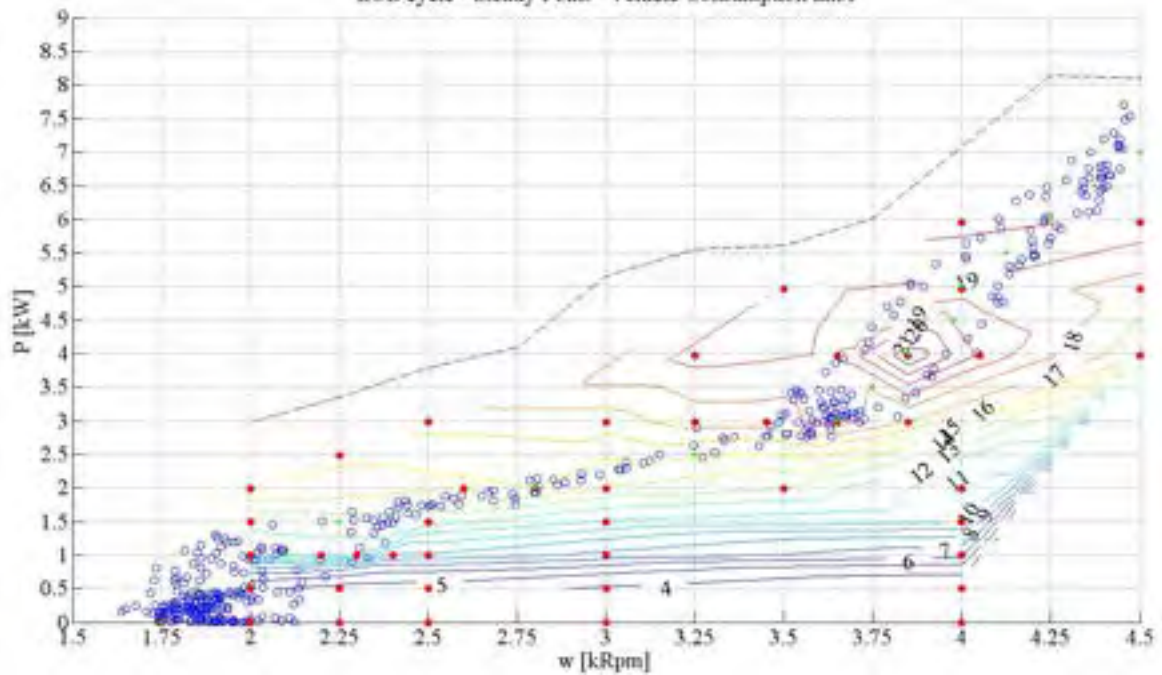


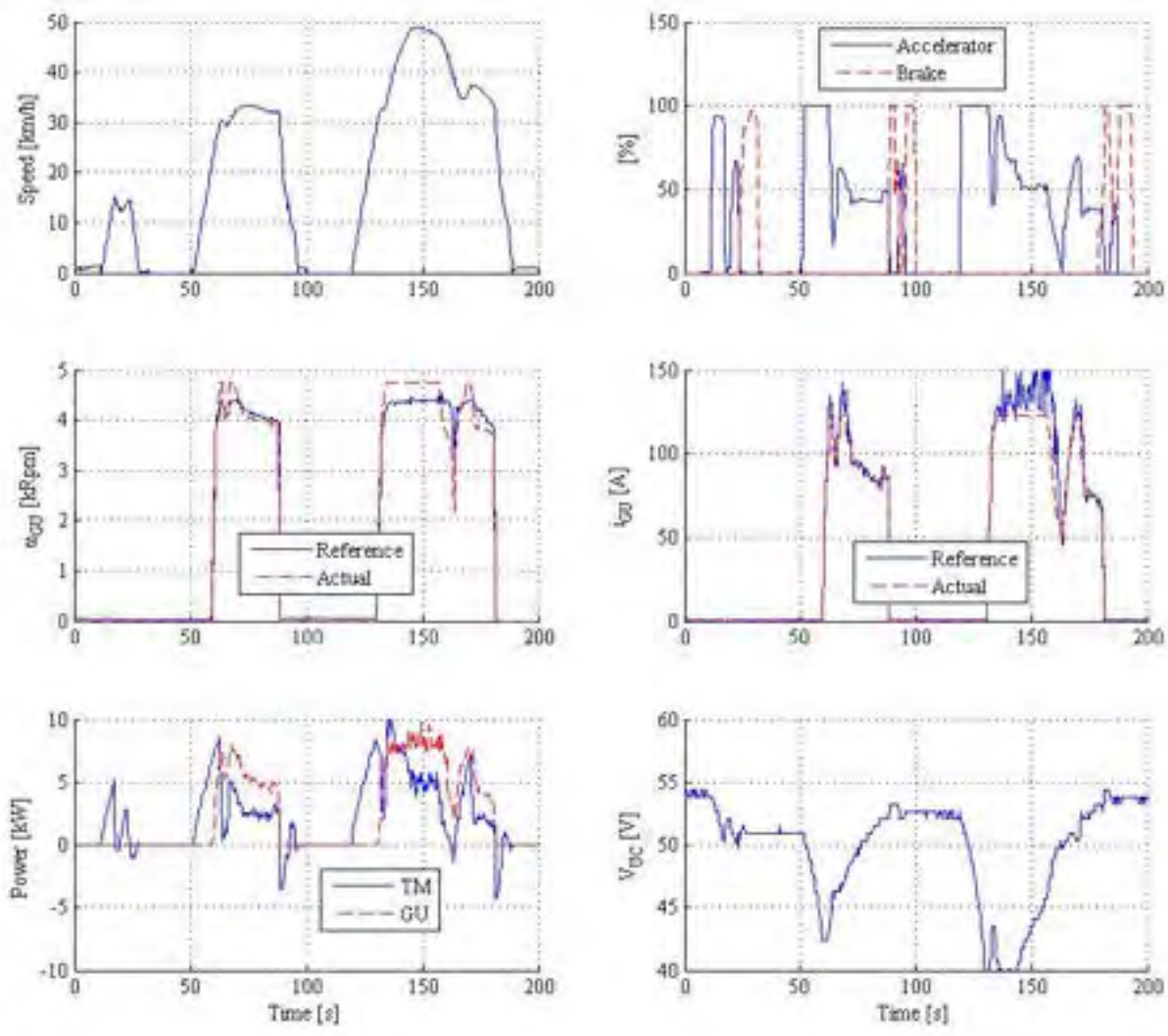
Figura 35 - Ciclo urbano ECE15 con strategia Load following: principali risultati

Nei test qui riportati, la realizzazione pratica di questa modalità di controllo è stata conseguita con operazioni manuali del pilota che effettuava lo spegnimento del motore termico con l'apertura del contatto chiave e la successiva riaccensione azionando il motorino di avviamento. In corrispondenza di punti definiti del ciclo ECE in cui si riscontravano le massime richieste di potenza (verso il termine delle rampe di accelerazione) si provvedeva alla accensione del motore termico che veniva spento durante le successive fasi di decelerazione. In questo modo l'energia prodotta dal motore termico nel ciclo è globalmente uguale a quella consumata dalla trazione e lo stato di carica degli UC ad inizio e fine prova è lo stesso.

Prove simili si sono condotte (con risultati simili, anche, come si vedrà in seguito, nelle prove su strada) cercando di ancorare l'accensione e lo spegnimento del motore termico al raggiungimento di limiti superiori ed inferiori per la tensione dei supercondensatori.

In tempi successivi, con l'upgrading del sistema di controllo fatto in occasione di una tesi di laurea, è stata realizzata l'automatizzazione di queste operazioni, nonché l'utilizzo dello stesso alternatore per il riavvio del motore termico, risparmiando i ripetuti stress al motorino e alla batteria di servizio. E' in corso una campagna di prove sperimentali su strada ed a banco a rulli per la definizione ottimale delle strategie di accensione e spegnimento automatico del motore termico.

La strategia ON OFF + Lf è stata testata anche per la marcia a velocità costante (prova denominata "Marathon"), ottenendo una maggiore precisione e stabilità del punto di funzionamento di GU che, essendo chiamato ad erogare una potenza costante, perde in effetti la caratteristica di Load following. Con questa modalità sono stati registrati i consumi chilometrici più bassi.



ECE cycle - Steady Point - Vehicle Consumption km/l

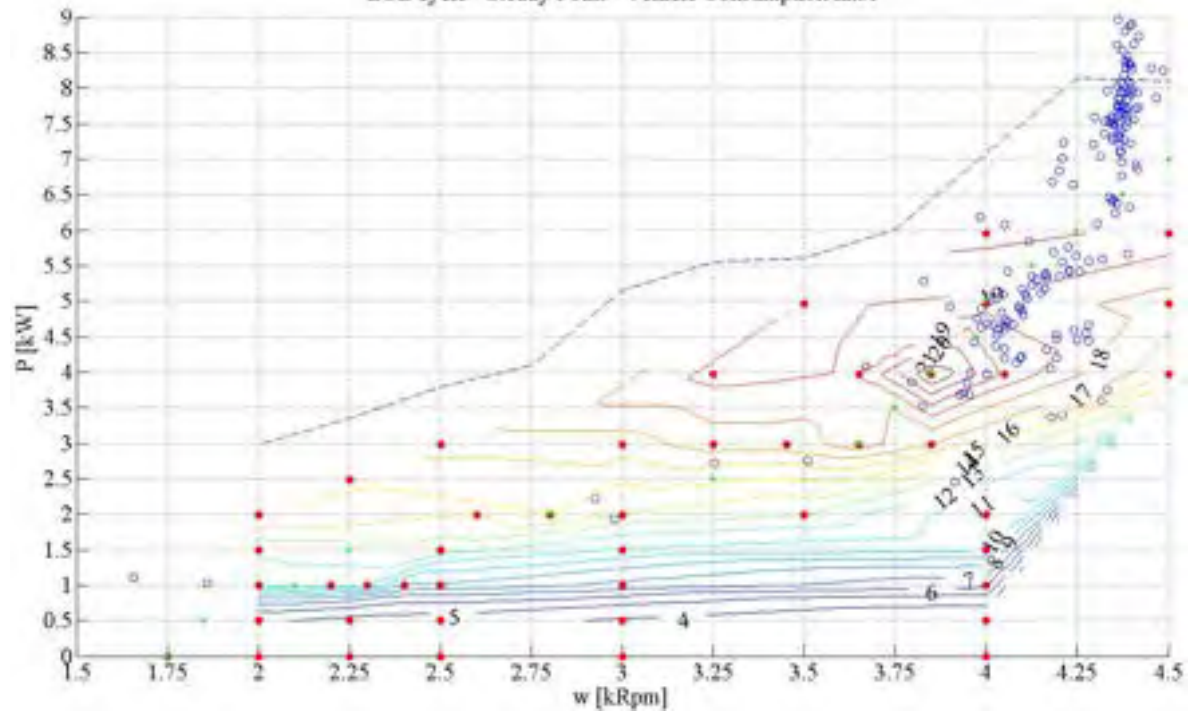


Figura 36 - Ciclo urbano ECE15 con ON OFF + Load following: principali risultati

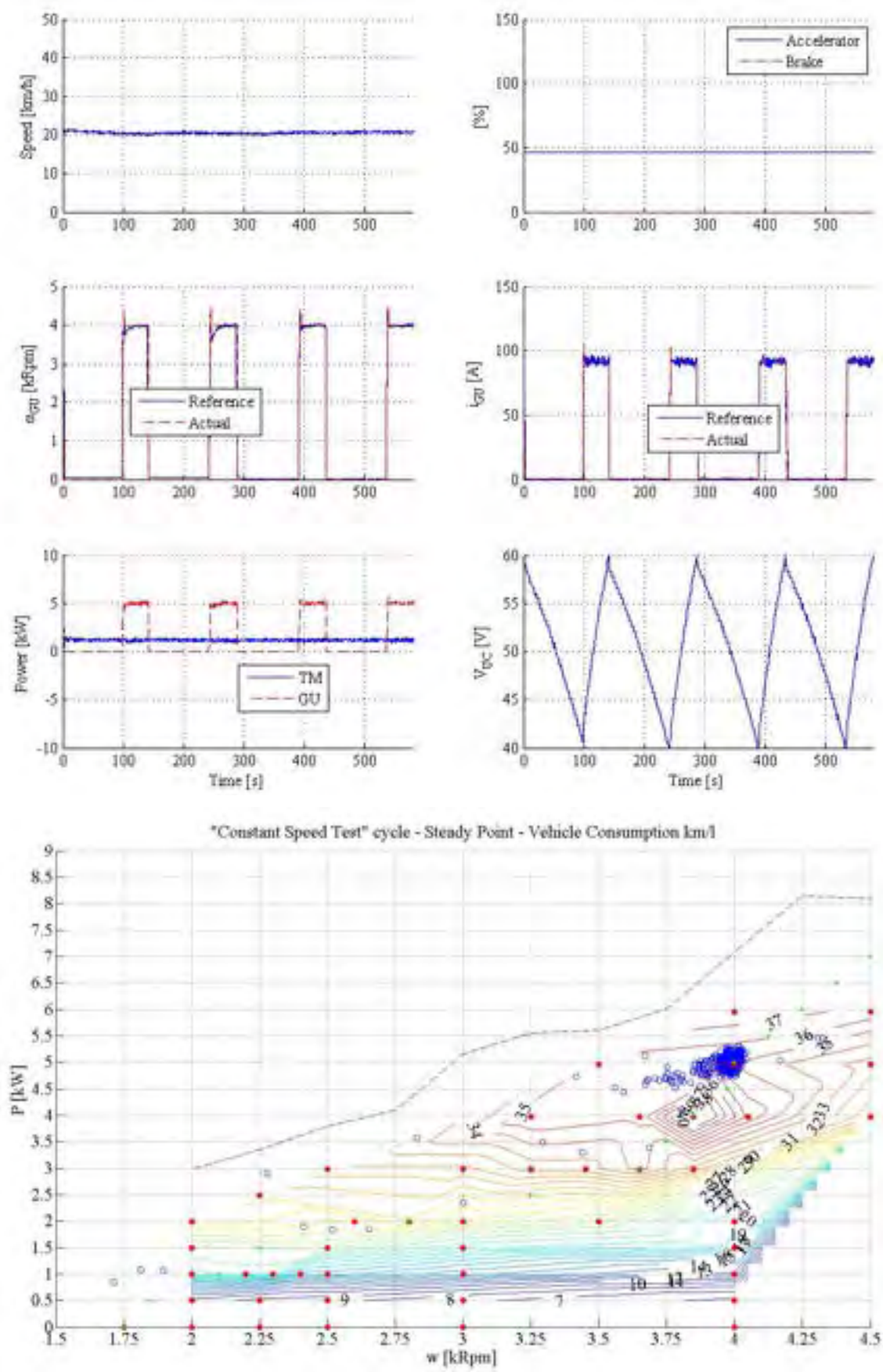


Figura 37 - Ciclo "Marathon" con ON OFF: principali risultati

Prove su strada

Per la conferma dei dati ottenuti al banco a rulli sono state eseguite una serie di prove utilizzando le strade interne del centro Casaccia nelle ore di minor frequentazione da parte del personale.

La zona prescelta è quella che costeggia il campo sportivo; è composta da tratti piani e in leggera pendenza, tratti rettilinei, curve a bassissima velocità, obblighi di arresto. La velocità media di percorrenza del tracciato è molto vicina ai 18 km/h. Tenendo una condotta di guida adeguata alla strada e al tracciato si realizza una condizione di guida molto simile a quella relativa al traffico urbano e assimilabile a una prova secondo il ciclo ECE.



Figura 38 - Il veicolo in prova su strada e la vista dall'alto del percorso di prova

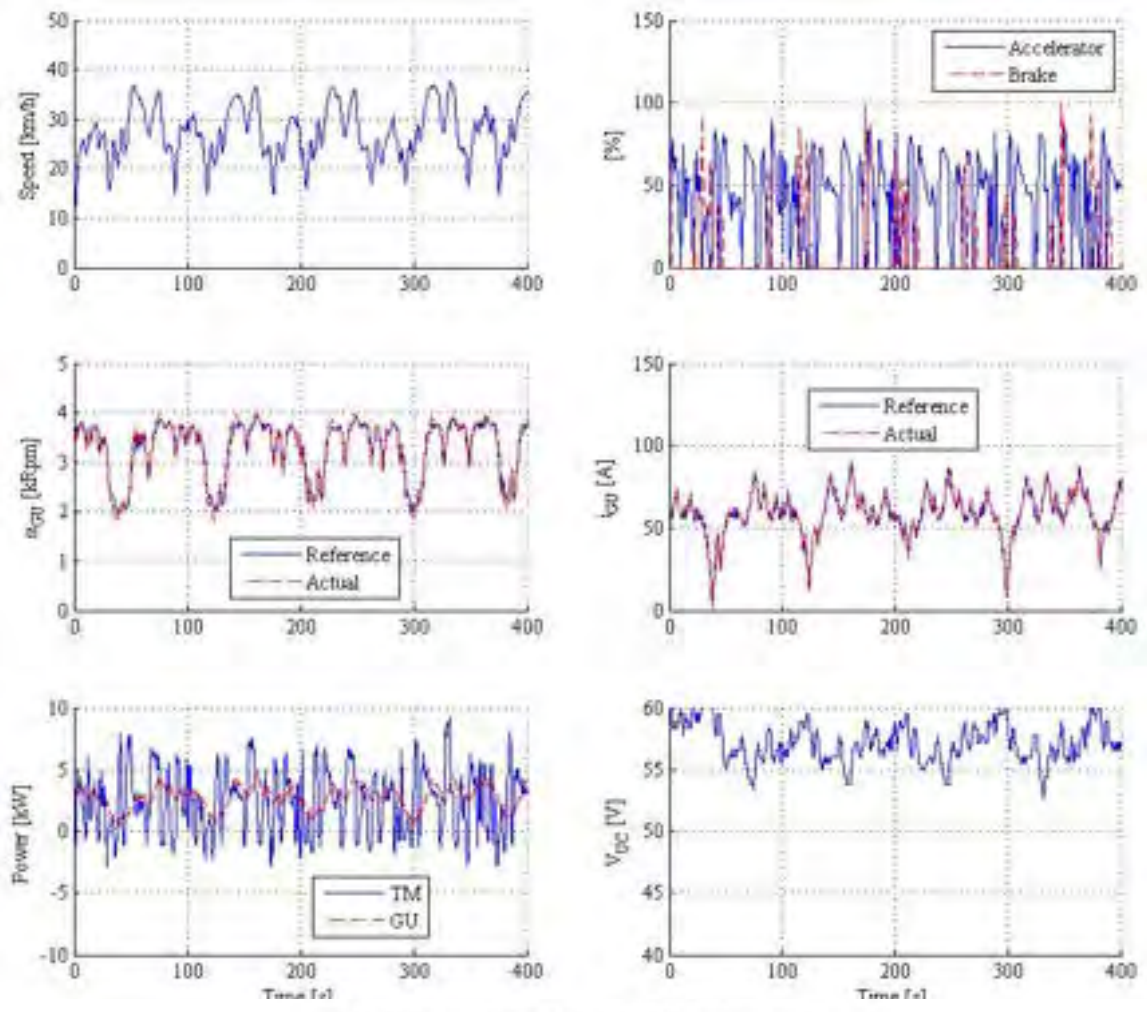
La lunghezza del tracciato è di 710 metri ed in genere è stato percorso più volte per ogni prova.

Sono state ripetute sul tracciato le prove precedentemente fatte al banco a rulli utilizzando entrambe le strategie di controllo e ottenendo sostanzialmente la conferma dei dati di consumo già noti.

Si riportano a titolo esemplificativo alcuni tracciati della prova con strategia Load following che dimostrano la rispondenza del sistema alle aspettative, in particolare la capacità dei supercondensatori di sostituirsi al gruppo motogeneratore nelle fasi ad alta dinamica, operando con potenze positive e negative fino a 6 – 7 kW. Al gruppo motogeneratore viene così permesso un funzionamento più stabile, con sicuri effetti benefici sulle emissioni inquinanti e sulla sua longevità.

Si noti inoltre la presenza di valori negativi di potenza del motore elettrico TM a conferma della esistenza del recupero di energia in frenata e nelle discese.

Anche le prove con strategia ON OFF confermano le aspettative di minor consumo. Anche in queste prove si è ottenuto il risultato di indurre il gruppo GU a funzionare in zone migliori. Si veda infatti il grafico che segue, in cui sono pressoché scomparsi i punti di funzionamento a bassa potenza.



CASACCIA cycle - Steady Point - Vehicle Consumption km/l

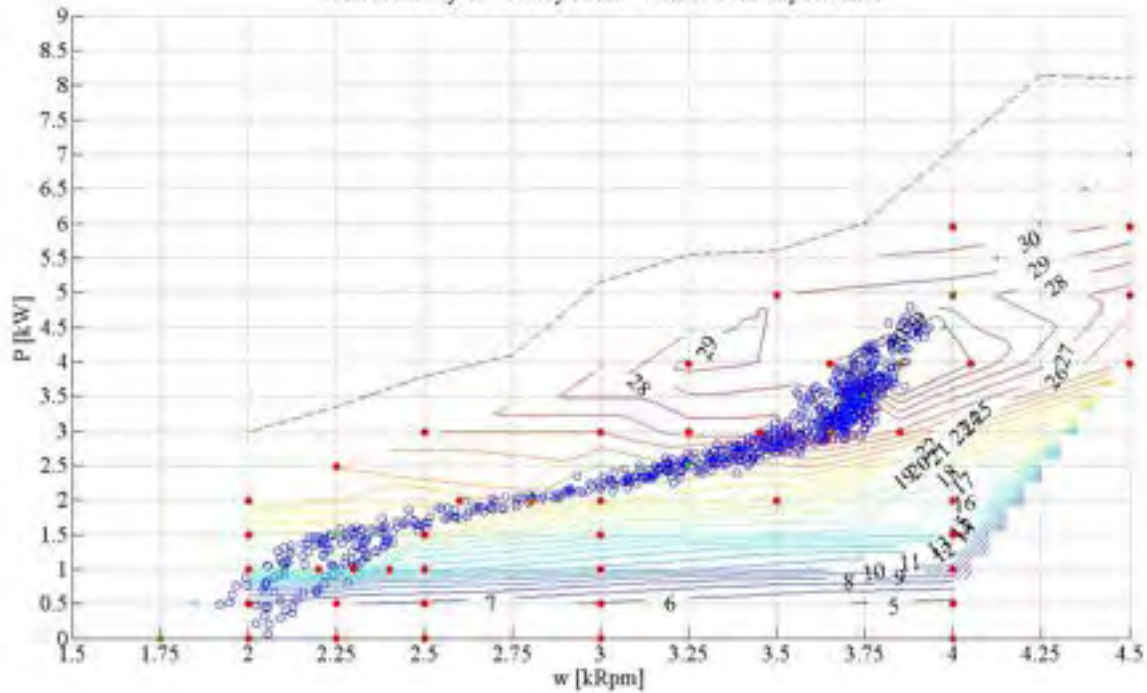
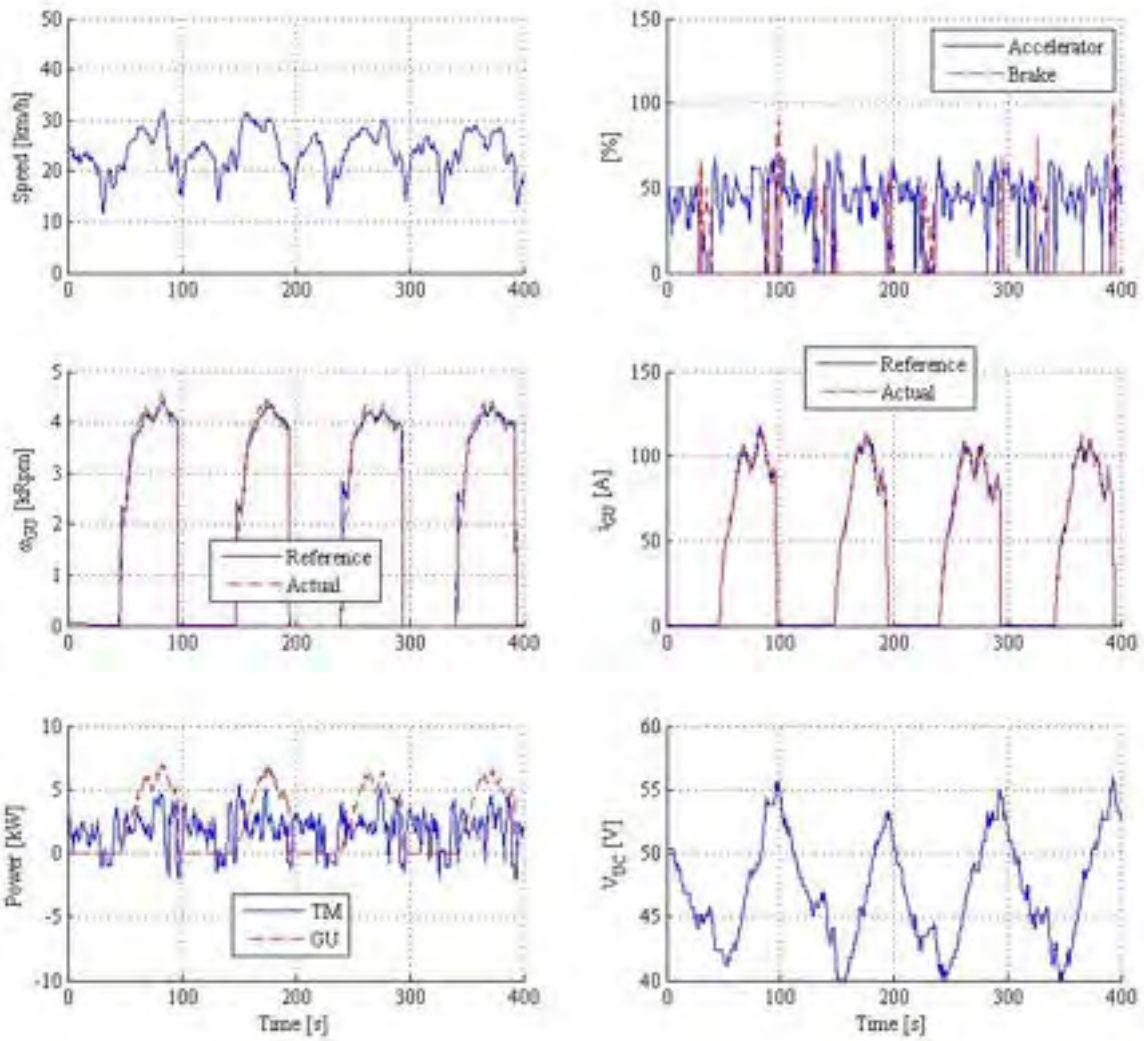


Figura 39 - Ciclo "Casaccia" con Load following: principali risultati



CASACCIA cycle - Steady Point - Vehicle Consumption km/l

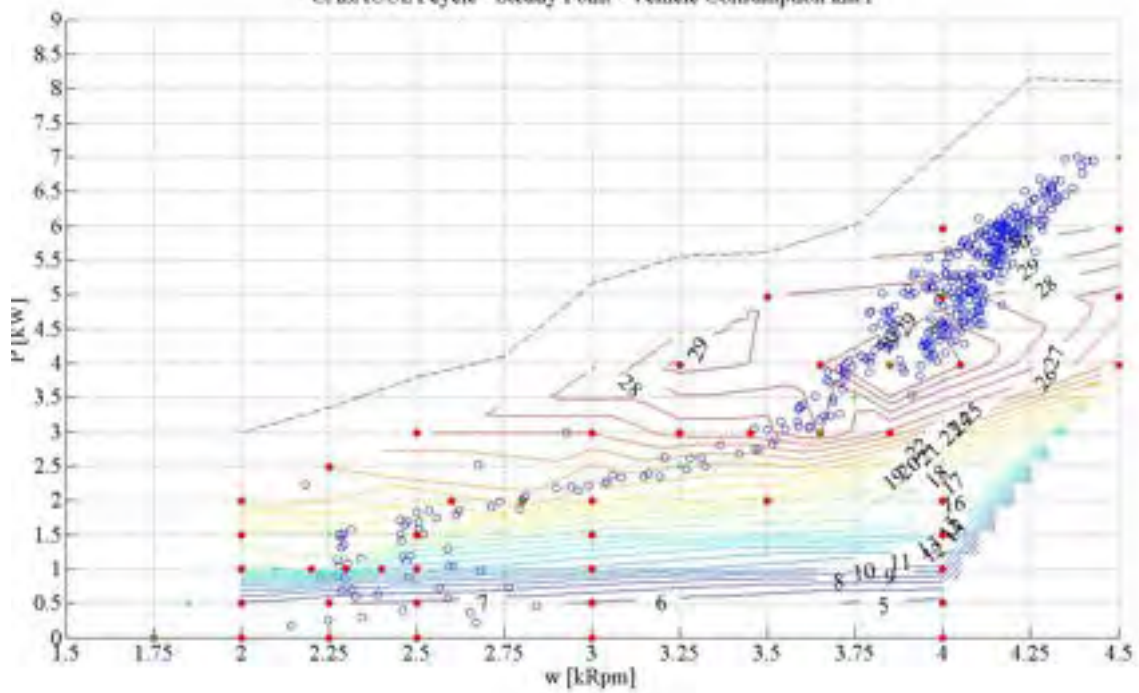


Figura 40 - Ciclo Casaccia con ON OFF + Load following: principali risultati

Altre prove su strada sono state condotte su un altro circuito individuato in un parcheggio secondario sempre del centro Casaccia. La caratteristica di questo secondo tracciato è di essere quasi perfettamente ovale, per cui si presta ad effettuare anche prove a velocità costante. E' stato condotto su questo circuito un tentativo di marcia a bassa velocità e con strategia ON OFF al fine di ripetere i buoni risultati ottenuti al banco a rulli. Purtroppo, sia a causa dei cambi di direzione - a largo raggio ma pur sempre presenti - sia a causa della presenza di salite e discese, i risultati sono stati inferiori alle aspettative. Si riporta un estratto dei dati che evidenziano che la velocità di avanzamento in realtà è stata tutt'altro che costante; si noti comunque la funzionalità della strategia ON OFF con le accensioni cadenzate del gruppo GU.

Le ultime prove su strada sono state eseguite sul tracciato della Casaccia già utilizzato per la gara ATA Formula Hybrid 2009. Il circuito ha un fondo stradale perfetto e parecchi tratti rettilinei; la velocità media alla quale viene percorso è superiore ai 18 km/h e di conseguenza anche i consumi risultano leggermente più alti.



Figura 41 - Vista dall'alto dei percorsi di prova "Oval" e "Capanna" (circuito della Formula Hybrid 2009)

Riassumendo, sono state sviluppate al momento le seguenti logiche di controllo del gruppo motogeneratore:

1. Load following. Il gruppo segue lentamente le richieste della strada rimanendo sempre sul profilo di cresta del diagramma collinare di efficienza del gruppo.
2. ON OFF + Load following. Accensioni e spegnimenti al raggiungimento dei limiti di tensione dei supercondensatori. Nei periodi di accensione il gruppo si comporta come per la strategia 1.
3. ON OFF a punto fisso (ovvero funzionamento a termostato). Accensioni e spegnimento al raggiungimento dei limiti di tensione dei supercondensatori. Durante l'accensione il gruppo funziona a giri e coppia prestabiliti.
4. Load following istantaneo (ovvero trasmissione elettrica). Come per la strategia 1 ma con la massima velocità di risposta del gruppo motogeneratore alle richieste della strada.

Ogni strategia è suscettibile di ottimizzazione a seconda della missione richiesta, ed ognuna è adatta ad un particolare impiego:

- la strategia 1 è universale e permette un uso qualsiasi del veicolo;
- la strategia 2 permette le maggiori economie di carburante ma assoggetta le parti meccanica ad uno stress maggiore;
- la strategia 3 è adatta a percorsi a velocità costante;
- la strategia 4 consente le prestazioni più brillanti.

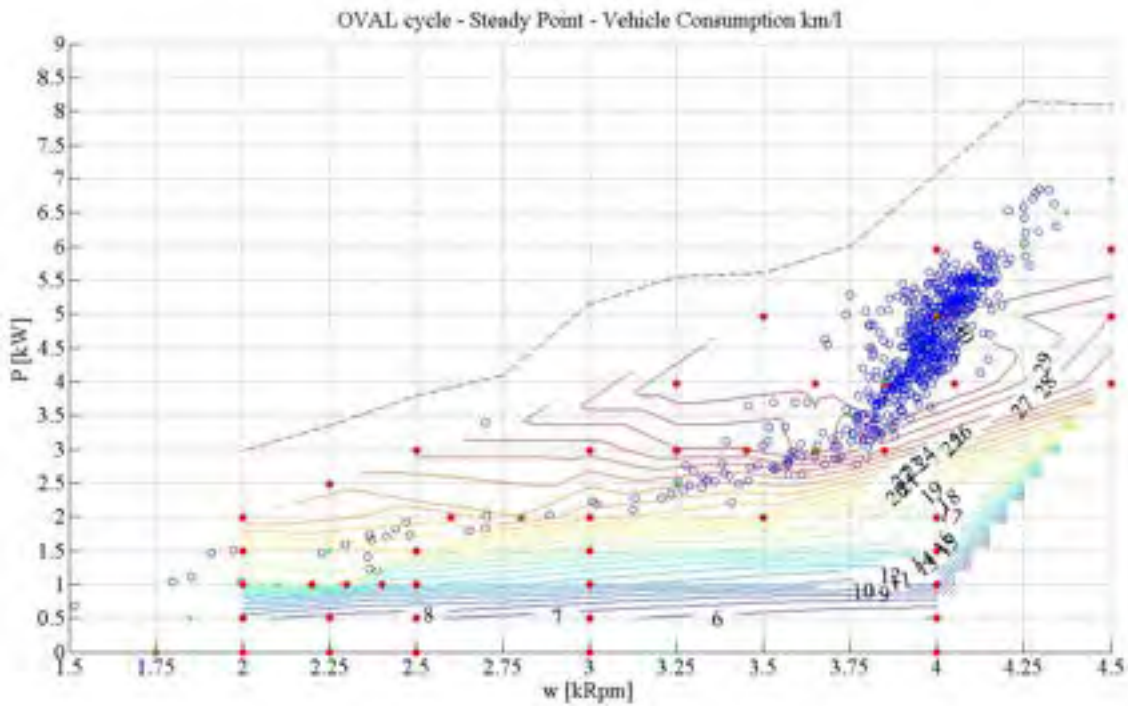
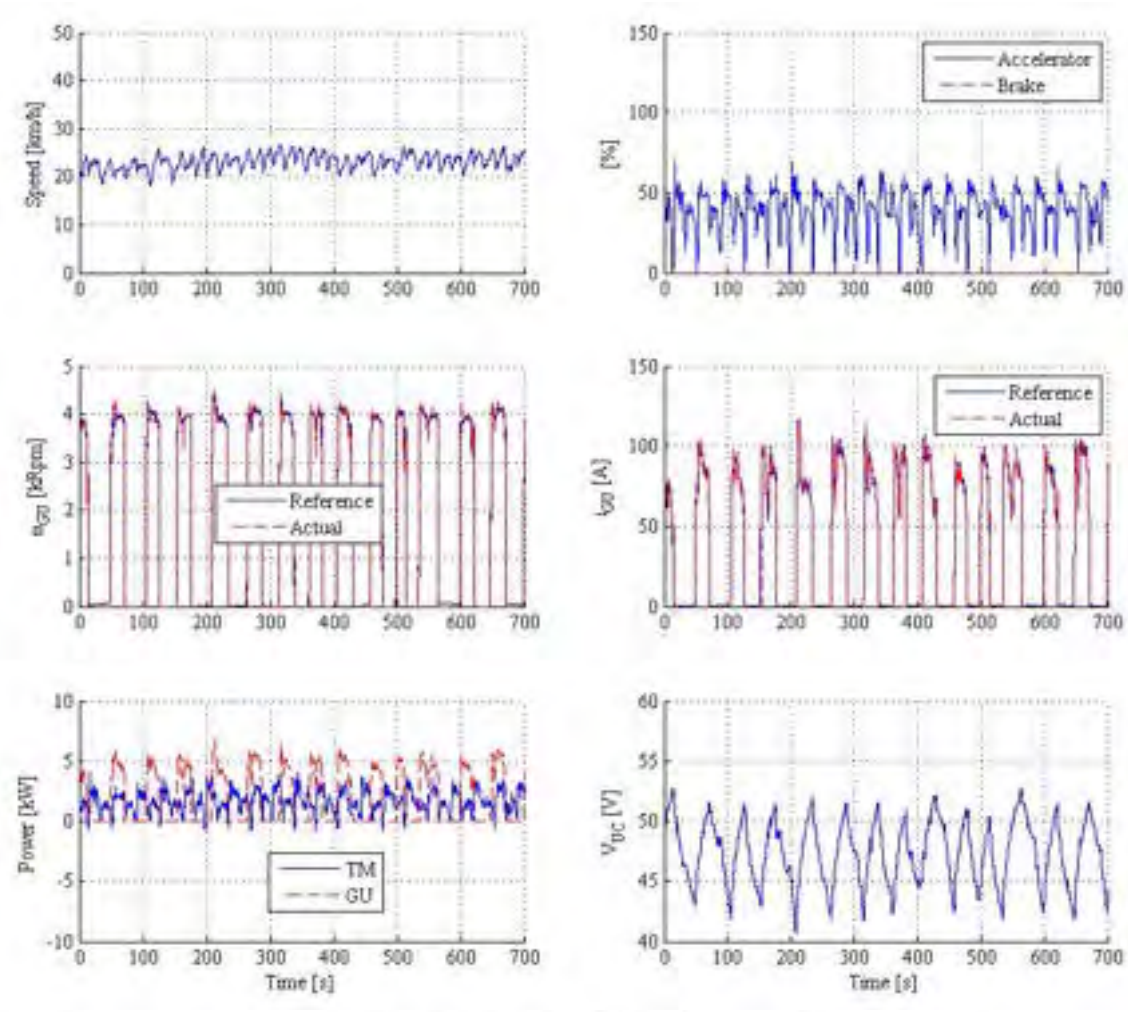
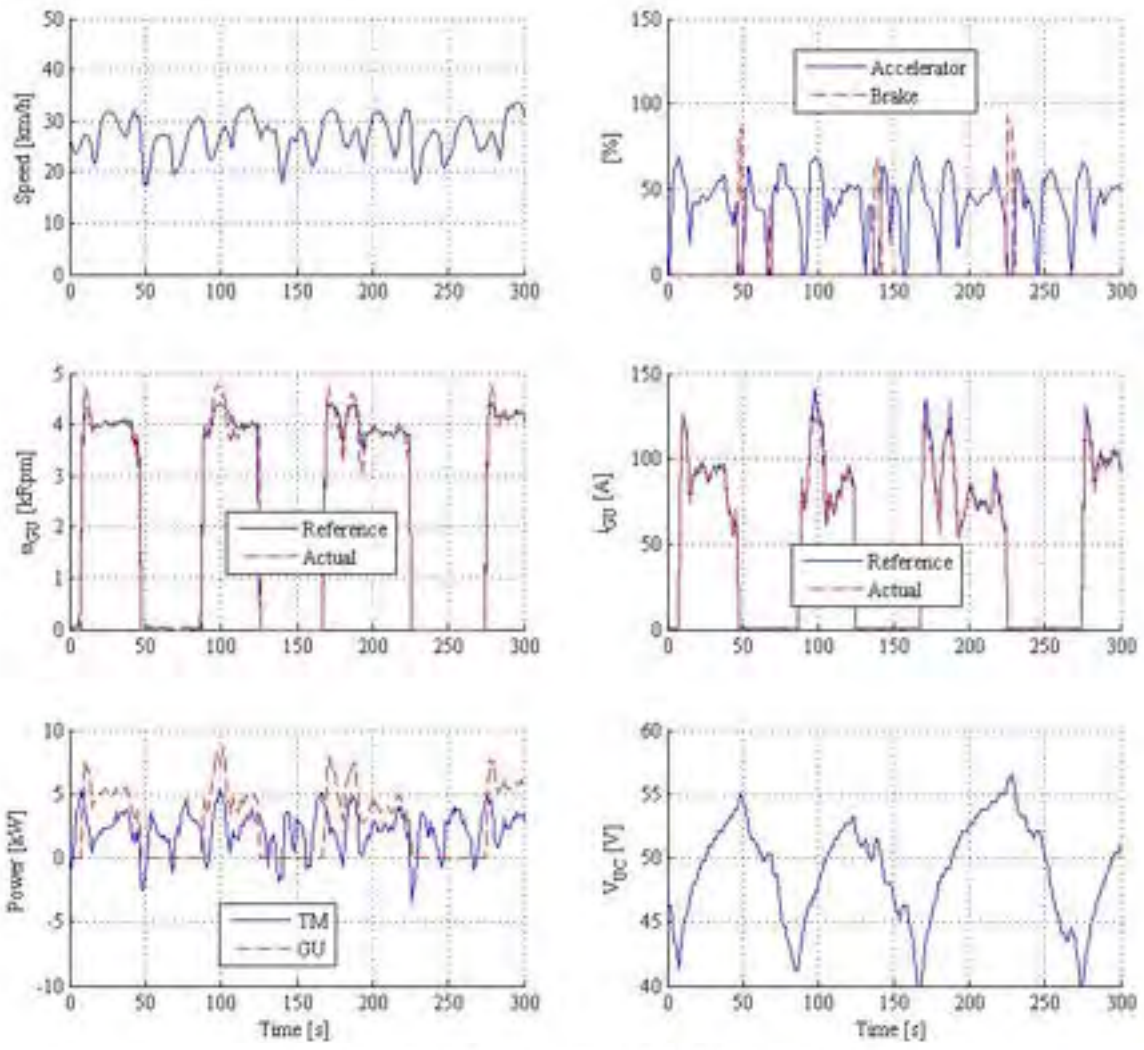


Figura 42 - Ciclo "Oval" con ON OFF + Load following: principali risultati



"Capanna" Test cycle - Steady Point - Vehicle Consumption km/l

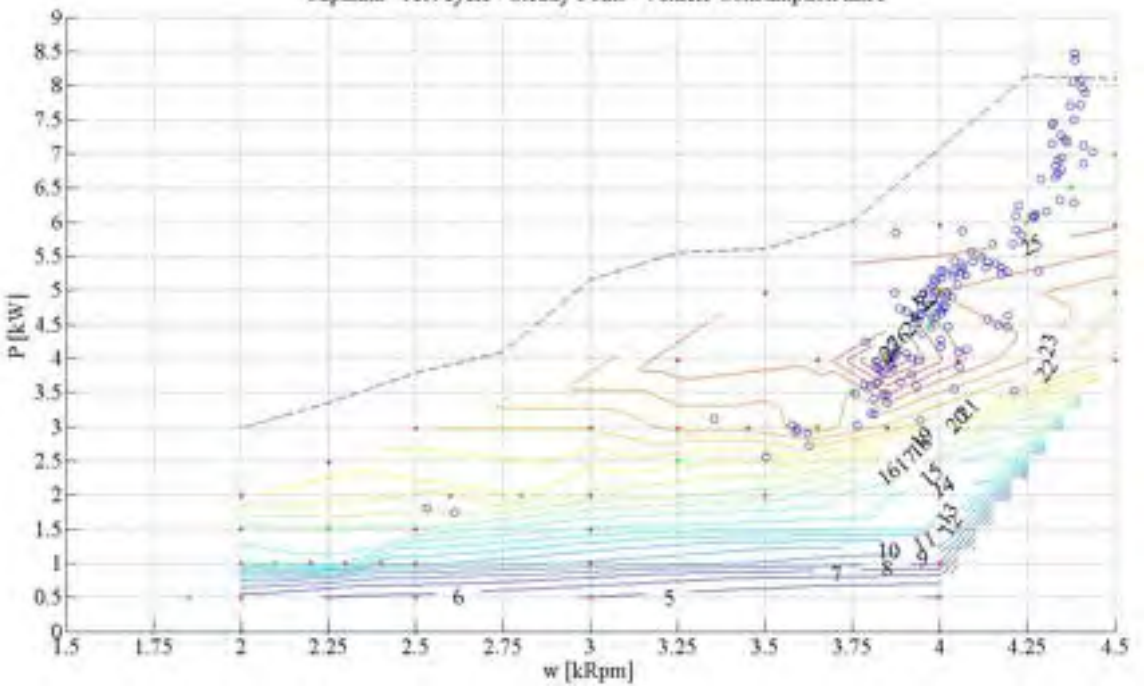


Figura 43 - Ciclo "Capanna" con ON OFF + Load following: principali risultati

Sintesi dei risultati in termini di consumi

Le varie prove e condizioni in cui è stato misurato il consumo si possono visualizzare nel seguente prospetto:

Tipo di percorso	Effettuato al:	Strategia di controllo	Percorrenza km/l
ECE 15	Banco a rulli	Load following	14,6
Guida libera	Strada	Load following	15,5
ECE 15	Banco a rulli	ON OFF + Load following	18,5
Guida libera	Strada	ON OFF + Load following	21,7
Vel. cost. 25.6 km/h	Circuito ATA	ON OFF + Load following	22,4
Vel. cost. 24 km/h	Circuito ovale	ON OFF a punto fisso	23,9
Vel. cost. 25 km/h	Banco a rulli	ON OFF a punto fisso	25,0
Vel. cost. 20 km/h	Banco a rulli	ON OFF a punto fisso	33,1
Vel. cost. 17 km/h	Banco a rulli	ON OFF a punto fisso	33,7

Tabella 9 – Risultati in termini di consumo

Comparazioni

Si riporta, per completezza di rendicontazione, alcuni termini di confronto di veicoli simili in condizioni di marcia nel ciclo urbano:

Volkswagen Fox con motore a benzina:	12.2 km/l - dichiarati
Nissan Micra con motore a benzina:	13.5 km/l - dichiarati
Fiat Panda con motore a benzina:	13.9 km/l - dichiarati
Mini con motore a benzina:	14.7 km/l - dichiarati
Ford Ka con motore a benzina:	15.9 km/l - dichiarati
Opel Agila con motore a benzina:	16.9 km/l - dichiarati
Fiat 500 con motore 1300 Diesel:	17.0 km/l - misurati in ENEA
Smart con motore a benzina:	18.2 km/l - dichiarati
Quadriciclo AIXAM con motore Diesel:	23.4 km/l - misurati in ENEA

Il consumo dichiarato dalla Piaggio per lo scooter Beverly che adotta lo stesso motore della Urbe è di 26 km/l. Lo scooter ha una massa di 157kg mentre la Urbe pesa 530 kg.

Misura delle emissioni

Nel corso delle prove al banco a rulli sono state effettuate anche alcune rilevazioni della quantità di inquinanti emessi allo scarico del motore termico. E' stata impiegata allo scopo un corredo di strumenti di misura prodotto dalla Horiba e già utilizzato per altre campagne di prova. E' il sistema HORIBA OBS-1000.

Tale sistema è in grado di misurare in modo continuo le emissioni di CO, CO₂, HC, NO_x prodotte da veicoli in movimento, sia nella concentrazione istantanea che nella massa istantanea, potendole rapportare alla distanza percorsa.

Il sistema integrato comprende:

- un analizzatore con tecnologia all'infrarosso che misura in tempo reale le concentrazioni di CO, CO₂ ed HC, senza bisogno di eliminazione dell'umidità dei gas;
- un sistema di misura con tecnologia all'ossido di zirconio, che misura la concentrazione istantanea dell'NO_x ed il rapporto aria-combustibile (AFR);
- un sensore di flusso opportunamente calibrato (del tipo Pitot) che misura il flusso totale dei gas emessi; con questo sensore si calcolano i valori degli inquinanti espressi in massa;
- un computer portatile per la registrazione dei dati.

L'attrezzatura è trasportabile e può essere alloggiata nel vano portabagagli della vettura sottoposta a test. Nel caso della Urbe non esistono spazi sufficienti a bordo, per cui l'attrezzatura è stata impiegata in postazione fissa nell'ambito delle prove al banco a rulli.

Si riportano nella prima tabella i limiti delle emissioni normate dal codice della strada per i veicoli, e in seconda tabella i rilievi effettuati con il prototipo. Le quantità sono espresse in g/km.

Norma	CO	CO ₂	HC	NO _x	FUEL
EURO 2	2.2		----- 0.5 -----		
EURO 3	2.3		0.2	0.15	
EURO 4	1.0		0.1	0.08	

Tabella 10 – Emissioni limite delle normative europee per veicoli a benzina

Strategia	CO	CO ₂	HC	NO _x	FUEL
Load following	1.90	148	0.11	0.68	47
Load following istantaneo	1.37	146	0.12	0.76	47
ON OFF + Load following	1.86	126	0.18	1.03	39

Tabella 11 – Risultati in termini di emissioni su Urbe

Ne risulta che il motore termico rispetta sostanzialmente le prescrizioni EURO 3.

E' anche lecito dedurre dai risultati delle prove che le ripetute accensioni del sistema ON OFF, considerando la scarsa capacità energetica dei supercondensatori, influenzano negativamente le emissioni, e che nel confronto tra strategia Load following contro Load following istantaneo è preferibile la prima, come era da immaginare considerando i transitori più lenti della prima delle due strategie.

L'attività modellistica: gli altri possibili schemi di trazione e la loro valutazione energetica

Come già accennato, parallelamente alla attività sperimentale sul prototipo si sono avviate e portate a termine delle attività modellistiche che permettessero di ampliare al portata delle misure effettuate, permettendo la stima delle prestazioni energetiche complete del veicolo e delle sue singole parti, nonché la stima del comportamento del veicolo stesso, qualora equipaggiato da un differente sistema di propulsione. Il modello utilizzato è del tipo a parametri concentrati, ed è pienamente non stazionario in molte sue parti. La logica di simulazione è simile ad altre utilizzate in letteratura, ad esempio all'interno del ben noto modello Advisor (Advanced Vehicle Simulator) (vedi Figura). La flessibilità dell'approccio utilizzato ha permesso di simulare molti schemi di propulsione, nonché diversi sistemi di accumulo.

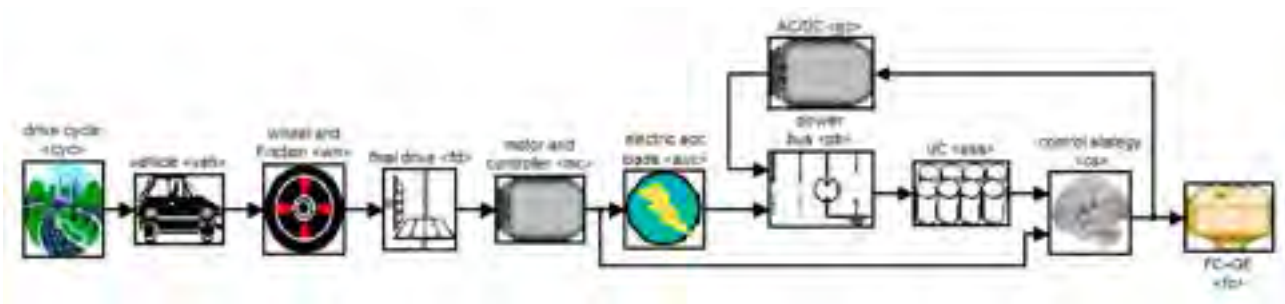


Figura 44 – Modello del sistema propulsivo e del veicolo

Come termine di comparazione, si sono simulate anche logiche di propulsione meno consolidate, come l'ibridizzazione serie con fuel cell. In questo ultimo caso si sono utilizzate, come fonti informative, le caratteristiche di funzionamento dichiarate dalla casa costruttrice per una cella della MesDEA da 3 kW (vedi figure seguenti).

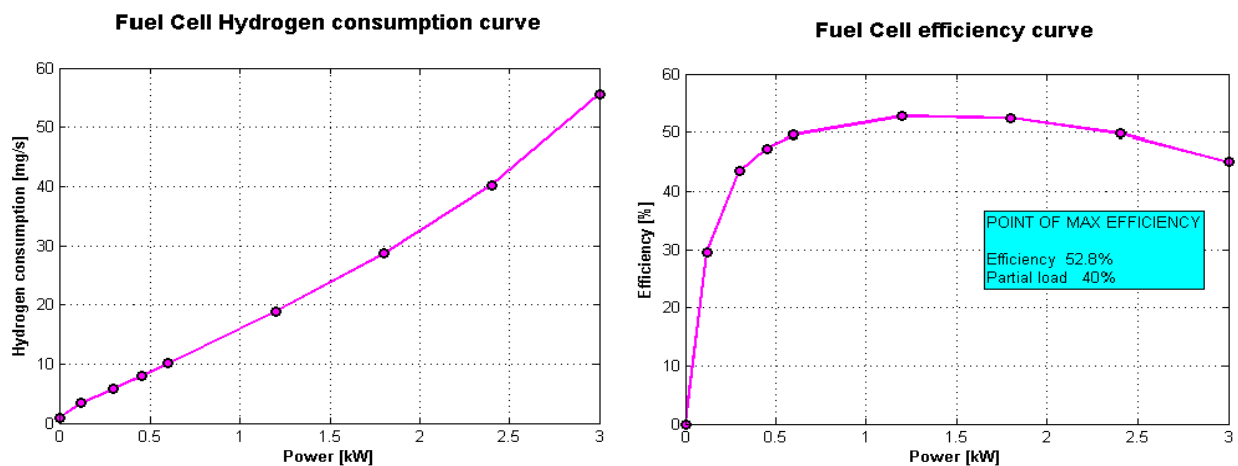


Figura 45 – Curve caratteristiche del generatore fuel cell

Nelle versioni puramente elettriche si sono utilizzati come accumulo elettrico i super capacitori Maxwell già descritti, perché utilizzati nel prototipo in esercizio, ovvero batterie agli ioni Litio della Kokam e della ThuderSky di opportuna Capacità, anche in configurazioni di accumulo misto. Gli stessi accumuli elettrici si sono utilizzati anche nelle versioni ibride, come elemento "polmone" di dimensione variabile a seconda della dimensione di kW del generatore di

servizio a bordo e della logico di gestione dello stesso.

Nel seguito sono dapprima riportati i dati relativi alla simulazione del prototipo in esercizio. Nella seconda parte sono invece trattate le simulazioni dei principali schemi di propulsione analizzati.

I primi risultati mostrati, in particolare, sono reattivi ad un ciclo di funzionamento di tipo ECE, con strategia load follower, così come già descritto nel paragrafo precedente.

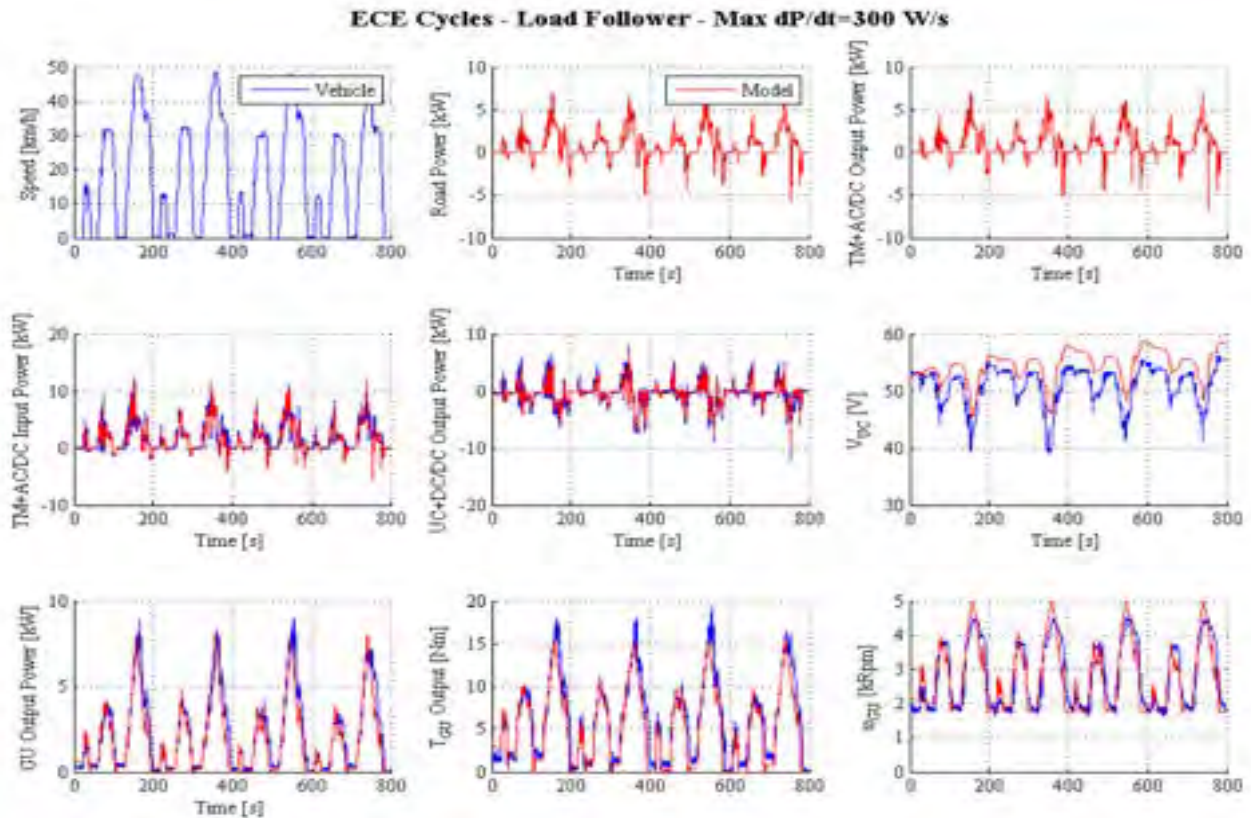


Figura 46 – Ibrido serie con MCI; Ciclo ECE; Strategia load follower. Andamenti temporali

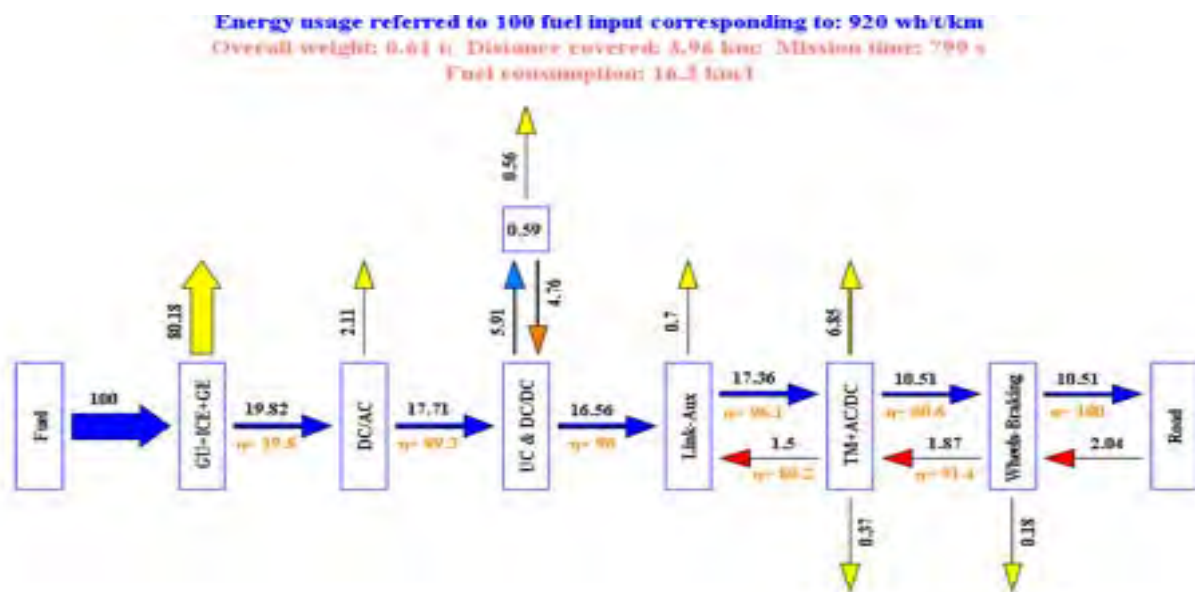


Figura 47 – Ibrido serie con MCI; Ciclo ECE; Strategia load follower. Flussi energetici

.La massima potenza di trazione è di circa 7 kW, mentre le frenature rigenerative si spingono fino a rendere disponibili oltre 5 kW di potenza meccanica al rotore del motore elettrico; tuttavia questi valori corrispondono a picchi isolati che non si mantengono per un periodo significativo di tempo, attestando il valor medio di potenza motrice e recuperabile in frenata a valori considerevolmente più bassi.

Il primo grafico visibile nella seconda riga è quello della potenza elettrica in input all'inverter del motore di trazione (TM+AC/DC Input Power [kW]); tale potenza desunta dal link di interconnessione elettrica segue un profilo qualitativamente analogo a quello della potenza richiesta per la trazione, che nel caso specifico è anche l'output del motore elettrico. Del resto ciò è ovvio, poiché fra l'input e l'output vi sono interposte le perdite della macchina elettrica e dell'inverter, che portano ad una maggiorazione della potenza in ingresso, la quale infatti arriva anche a picchi compresi tra 11 kW e 12 kW. Dal confronto, inoltre, tra la linea rossa (valore calcolato nel modello) e la linea blu (valore vero misurato) si evince una corrispondenza fra le due molto soddisfacente, a testimonianza dell'adeguatezza dei valori assegnati in sede di calibrazione dei parametri caratterizzanti l'efficienza del motore di trazione.

In maniera del tutto analoga si sono simulati tutti le altre strategie e gli altri percorsi su strada e su banco a rulli realizzati tramite il prototipo. Ciò al fine di validare efficacemente tutte le parti del modello di simulazione, ma anche per ottenere informazioni energetiche il più possibile dettagliate sul funzionamento del veicolo.

Ciò ha comunque permesso il calcolo dei diagrammi di potenza (in particolare della potenza media e di picco, vedi Tabella seguente) richiesta sui vari cicli dal veicolo ed ha permesso il dimensionamento di massima dei sistemi di accumulo e/o di generazione utilizzati nelle successive simulazioni. E' il caso di sottolineare che la modifica del sistema di propulsione, specie in un veicolo di questa taglia, influenza in maniera non trascurabile il peso del veicolo e, quindi le richieste energetiche a parità di ciclo da percorrere. Il modello, simulando in maniera dettagliata la dinamica del veicolo è in grado di tenere in conto tutti questi aspetti.

CICLO DI GUIDA	POTENZA MEDIA GU [kW]
ECE Nuovi Punti	2,17
ECE Nuovi Punti Start & Stop	2,01
CALCIO	2,24
CAPANNA	2,64
MARATHON	1,53
OVAL	1,93

Tabella 12 – Potenza media richiesta dal veicolo nei vari cicli affrontati

Per brevità nel seguito sono riportati solo alcuni dei risultati delle simulazioni effettuate, ossia quelli da cui si evincono i risultati di maggior interesse per il presente ambito progettuale.

E' in particolare di grande interesse valutare la differenza in termini energetici introdotto dal già citato cambiamento di strategia di controllo, da load follower a Start & Stop, secondo le indicazioni fornite in fase in fase di sperimentazione.

Notevole il miglioramento di rendimento del veicolo, prodotto in maniera quasi esclusiva dal miglioramento del rendimento del Generatore elettrico (che passa dal 20 al 25%). Ciò a fronte di una ottimizzazione dei punti di funzionamento del MCI, che lavora in zone della propria mappa molto più concentrate verso la zona di massimo rendimento.

ECE Cycles - Start & Stop + Load Follower - Max dP/dt=300 W/s

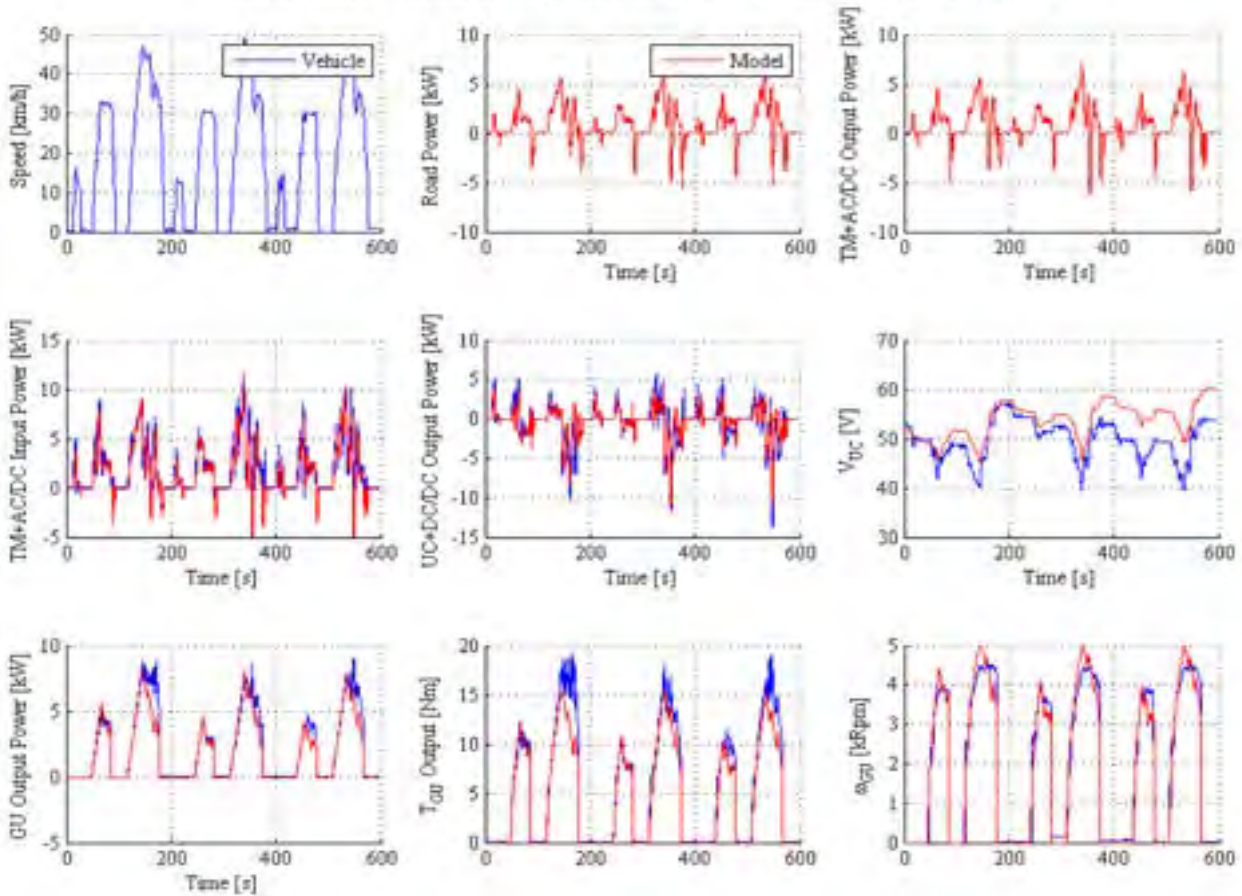


Figura 48 – Ibrido serie con MCI; Ciclo ECE; Strategia Start & Stop + load follower. Andamenti temporali

Energy usage referred to 100 fuel input corresponding to: 741 wh/km

Overall weight: 0.61 t; Distance covered: 2.86 km; Mission time: 594 s

Fuel consumption: 29.6 km/l

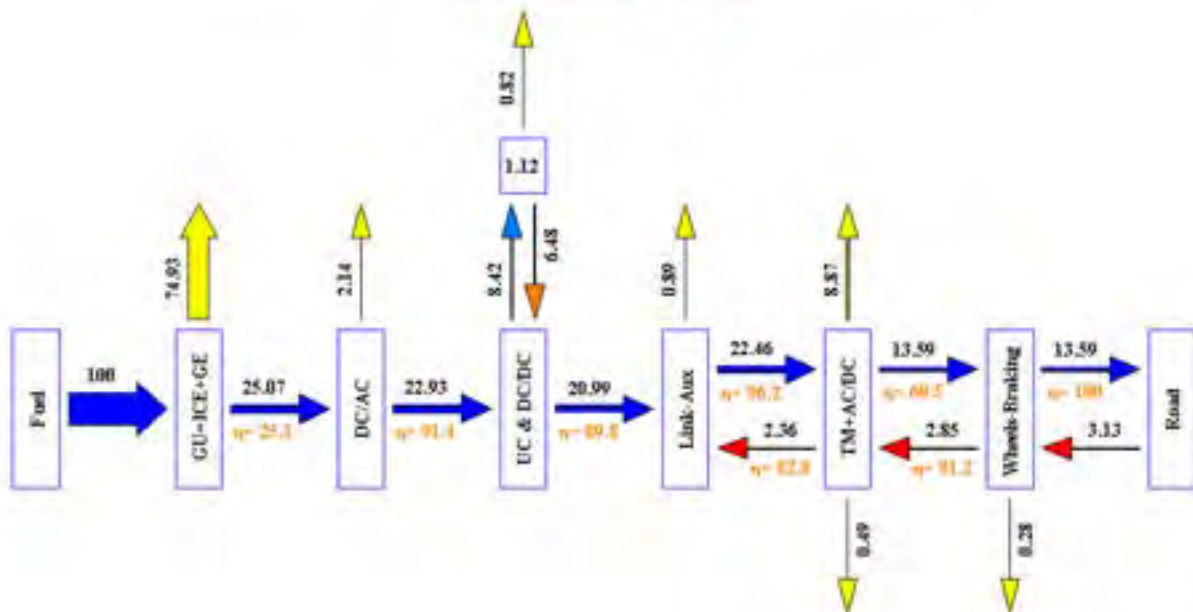


Figura 49 – Ibrido serie con MCI; Ciclo ECE; Strategia Start & Stop + load follower. Flussi energetici

Si può adesso passare all'analisi di alcuni dei risultati relativi alla configurazione ibrida con fuel cell e sistema di accumulo. Come detto si sono utilizzati per le simulazioni i dati di targa di un sistema di generazione reale da 3kW per applicazioni auto motive (compatto e di basso peso). I dati sono stati riscaldati per simulare anche celle di dimensione leggermente maggiore.

La logica di gestione della cella, grazie ad un corretto dimensionamento del sistema di accumulo, è di tipo start & stop, per limitarne i transitori e favorirne anche la regimazione termica.

Per quanto riguarda il sistema di accumulo, come accennato, oltre ad una batterie (eventualmente potenziata) dei super-capacitori già utilizzati sul prototipo, si sono in alternativa valutati i due sistemi di batterie Litio della Kokam e della Thundersky i cui dati di targa sono riportati nella seguente tabella.

	Thunder-Sky TS-LFP 60	Kokam SLPB 6046330H
Numero di celle	15	15
Tipologia	Li-ion	Li-ion Polimero
Capacità [Ah] - C	60	70
Voltaggio operativo [V]	2.5 - 4.25	2.7 - 4.2
Max Corrente di scarica [A]	3 C = 180	5 C = 350
Max Corrente di ricarica [A]	3 C = 180	2 C = 140
Peso Unitario [kg]	2.50	1.95
Peso Totale [kg]	37.5	29.2

Tabella 13 – Principali dati di targa dei sistemi di accumulo al Litio utilizzati nelle simulazioni.

Le figure seguenti sono relative all'accoppiamento della fuel cell da 3kW con la attuale batteria di supercapacitori che equipaggia il prototipo.

Il profilo di velocità e la potenza in input ed output dal motore elettrico sono analoghi a quanto già visto nei casi precedenti per il medesimo ciclo. La potenza erogata dai supercapacitori ovviamente varia in conseguenza della diversa gestione complessiva dei flussi energetici, ma comunque si attesta su valori confrontabili con il caso in cui c'era il GU tradizionale ad MCI. La tensione dei supercapacitori è impostata ad un valore iniziale di 52 V, mentre i limiti massimo e minimo del relais di controllo della fuel cell sono pari a 64 V (spegnimento al superamento della soglia) e 63 V (riaccensione se si scende sotto la soglia) rispettivamente, al fine di cercare di mantenere alto lo stato di carica in modo da avere sempre una scorta energetica per affrontare i momenti più dispendiosi del ciclo. Si nota che il recupero durante le frenature rigenerative non è inibito, e ciò giustifica gli alti valori impostati per la tensione, nonostante i quali però sussistono quei profondi picchi di scarica, legati al fatto che a cella spenta sono solo i capacitori a garantire l'alimentazione del motore elettrico assecondando il carico, e la scarsa densità energetica e di carica di questi ultimi ne determina la notevole scarica prima che l'accensione della fuel cell possa sensibilmente far tornare a crescere il SOC. Comunque vengono raggiunti valori di 45 V, che ancora sono compresi nel normale campo di funzionamento dei condensatori.

Il consumo di combustibile è calcolato come "gasoline equivalent" su base puramente veicolistica, assumendo un consumo di energia nullo per la produzione e lo stoccaggio dell'idrogeno al serbatoio. E la produzione a bordo al rendimento medio di tutta e sola l'energia necessaria per la realizzazione del ciclo.

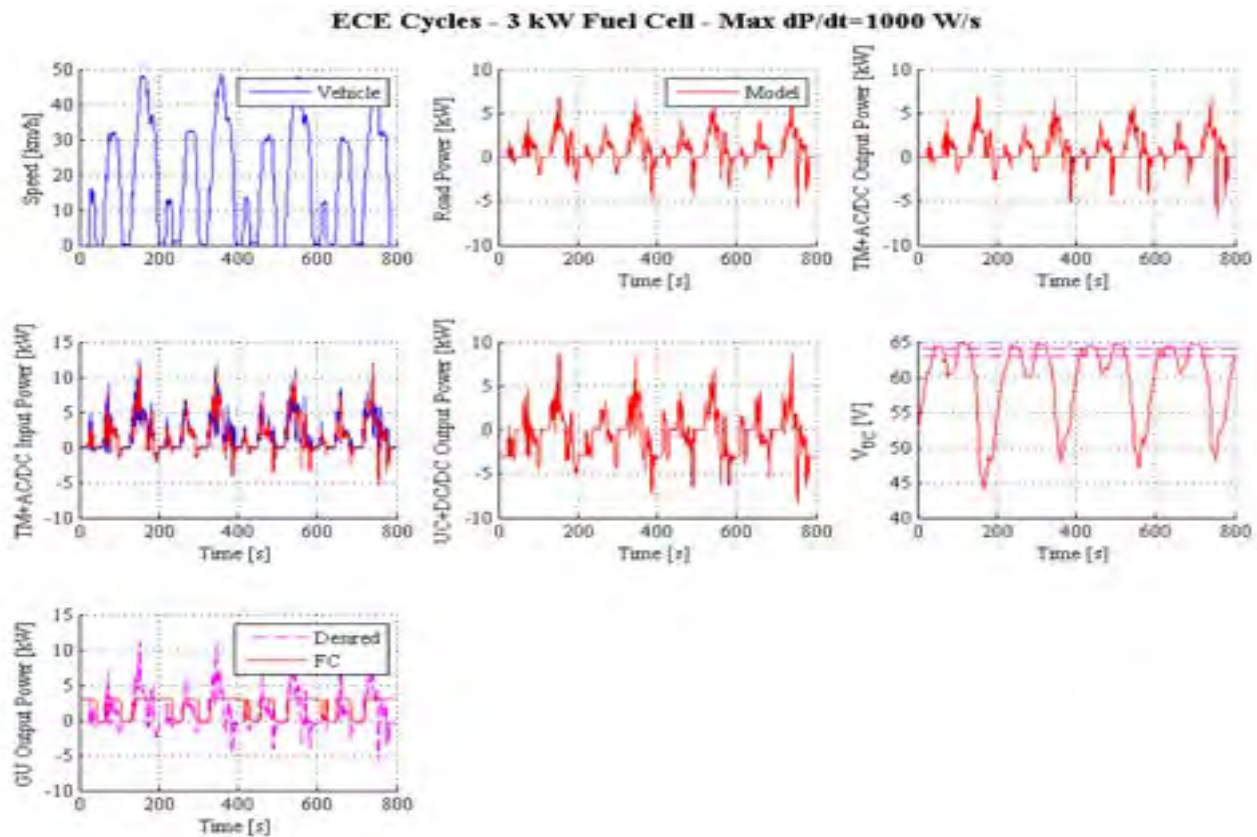


Figura 50 – Ibrido serie con FC e UC; Ciclo ECE; Strategia Start & Stop. Andamenti temporali

Energy usage referred to 100 fuel input corresponding to: 417 wh/km

Overall weight: 0.59 t; Distance covered: 3.96 km; Mission time: 799 s

Fuel consumption: 35.8 km/l

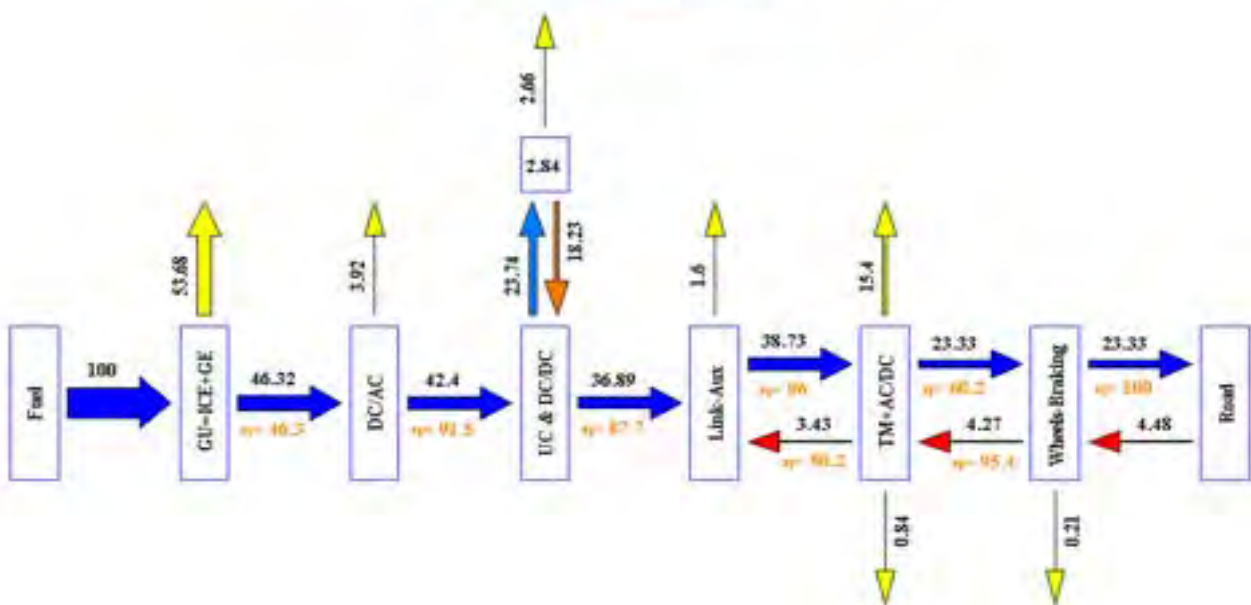


Figura 51 – Ibrido serie con FC ed UC ; Ciclo ECE; Strategia Start & Stop. Flussi energetici

I grafici seguenti, invece, riguardano l'accoppiamento della FC con i due pacchi batteria. Essendo entrambi i pacchi più che sufficienti per realizzare un intero ciclo in puro elettrico, la loro I grafici mostrano che, come prevedibile, i pacchi sono più che sufficienti per realizzare una intero ciclo in puro elettrico.

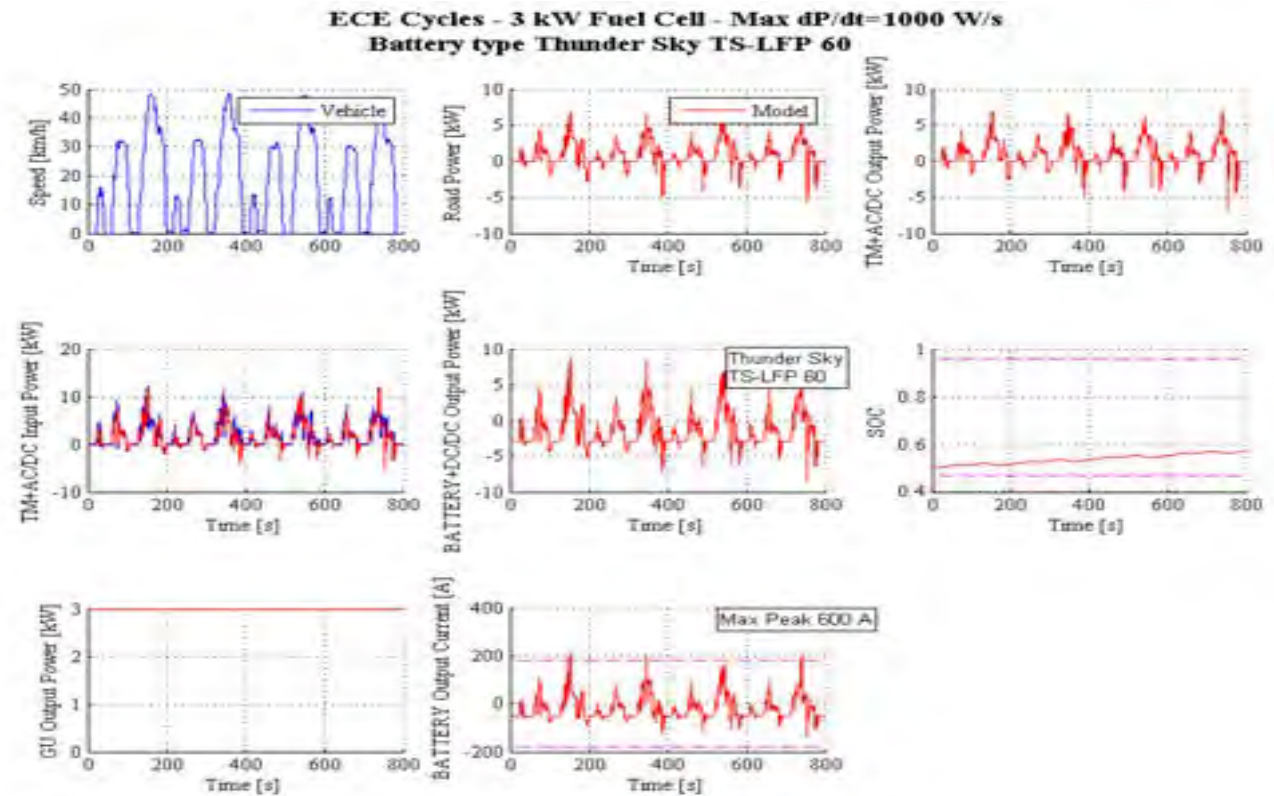


Figura 52 - Ibrido serie con FC e batt. ThunderSky; Ciclo ECE; Strat. Start & Stop. Andamenti temporali

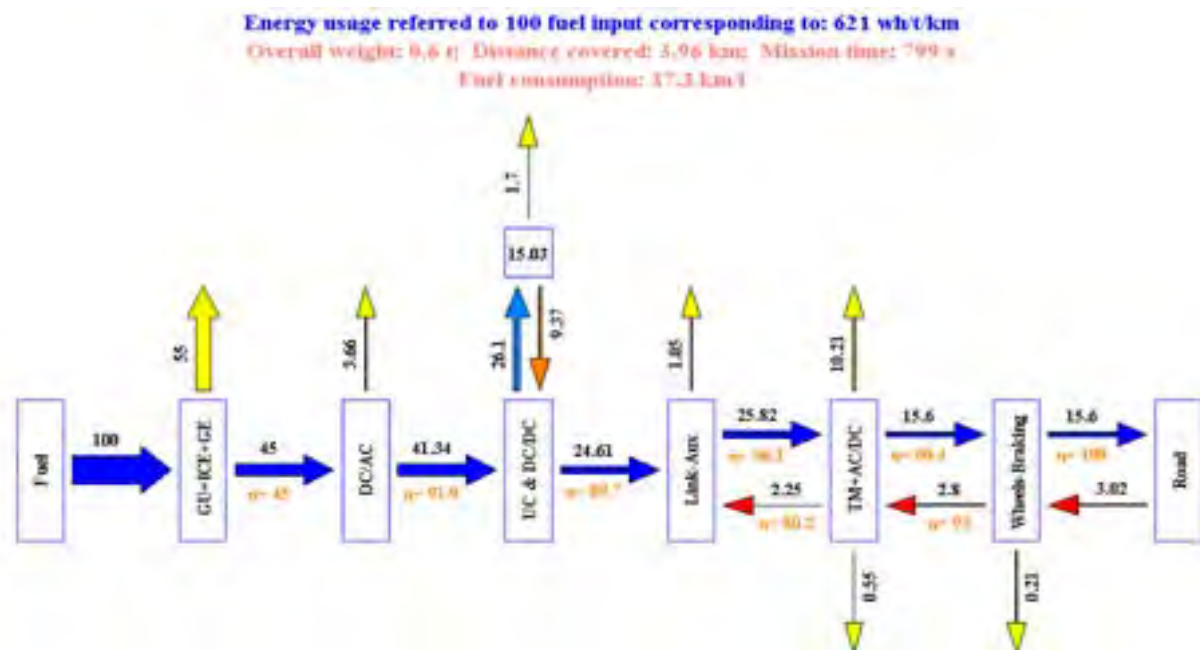


Figura 53 - Ibrido serie con FC e batt. ThunderSky; Ciclo ECE; Strat. Start & Stop. Flussi energetici

**ECE Cycles - 3 kW Fuel Cell - Max dP/dt=1000 W/s
Battery type Kokam SLPB 6046330**

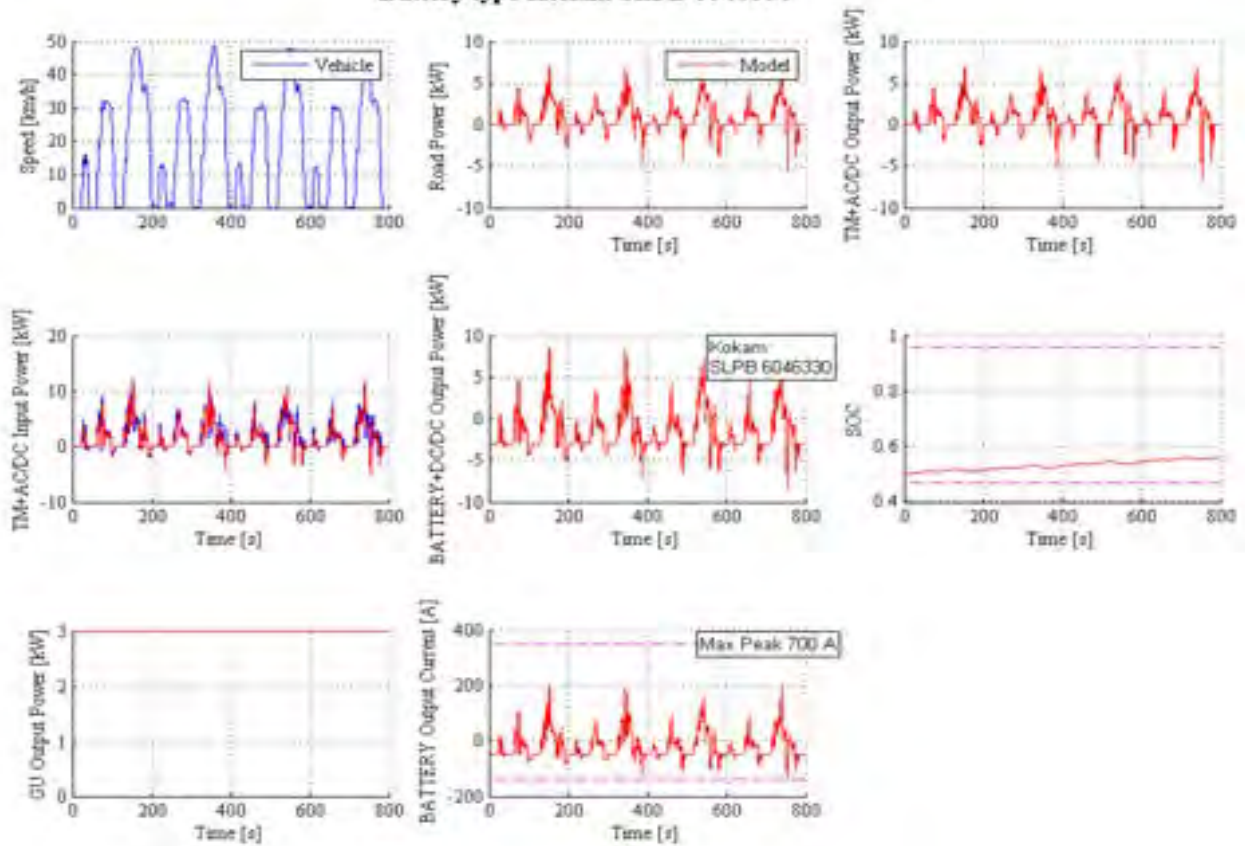


Figura 54 – Ibrido serie con FC e batt. Kokam; Ciclo ECE; Strat. Start & Stop. Andamenti temporali

Energy usage referred to 100 fuel input corresponding to: 629 wh/km

Overall weight: 0.59 t; Distance covered: 3.90 km; Mission time: 799 s

Fuel consumption: 37.6 km/l

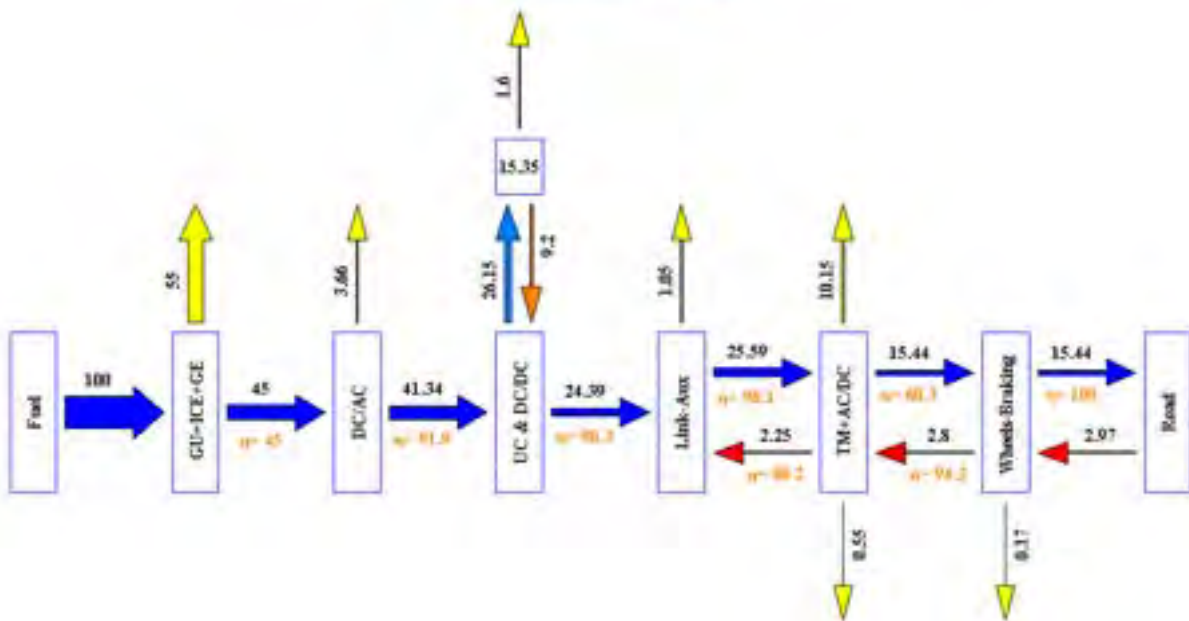


Figura 55 – Ibrido serie con FC e batt. Kokam; Ciclo ECE; Strat. Start & Stop. Flussi energetici

Simulazioni analogo si sono realizzate per diverse taglie della cella e per una diversa dimensione dell'accumulo a supercapacitori, ottenendo informazioni sulla sensitività dei principali parametri energetici al variare della dimensione dei componenti. In pratica la simulazione permette di valutare quanto l'aumento di autonomia in puro elettrico del veicolo (che nel caso di supercapacitori si traduce in poche centinaia di metri) sia penalizzante in termini di rendimento.

Analogamente è possibile dimostrare (vedi figura seguente) che è conveniente utilizzare una FC più potente da far lavorare a carico parziale (al quale ha il maggior rendimento). La dissipazione indotta dall'aggravio di peso, infatti, non si dimostra sufficiente a bilanciare i risparmi dovuti al maggior rendimento. E' chiaro, ad ogni modo, che su un veicolo di questa taglia siano da considerare in maniera molto rilevante i vincoli di ingombro e di costo connessi all'utilizzo di componenti sovradimensionati in quanto a potenza di picco.

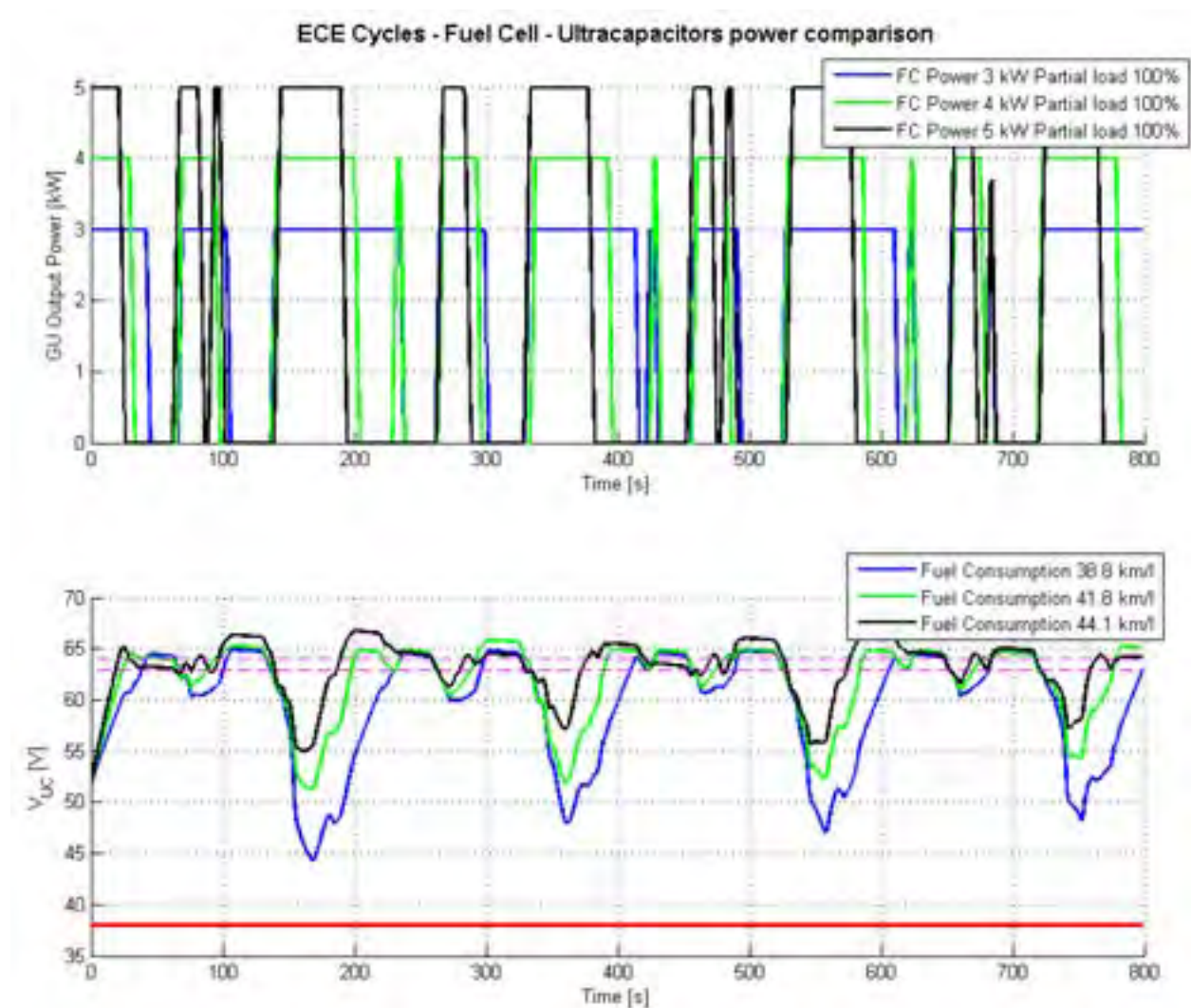


Figura 56 – Ibrido serie con FC e SC; Ciclo ECE; Strat. Start & Stop. Effetto della potenza della FC

In ultimo si sono analizzate gli schemi di propulsione in puro elettrico, con accumulo Litio della Kokam e della ThuderSky. Il grafico seguente mostra il comportamento dei due accumuli sui cicli ECE a partire dallo stato di piena carica (posto al 96.5 % del SOC).

Il veicolo equipaggiato con batterie Kokam mostra una maggiore autonomia, come prevedibile a fronte di una maggiore capacità, dovuto anche al peso leggermente minore, con un

comportamento in carico e scarico assolutamente confrontabile (sulla base dei dati dichiarati dal costruttore).

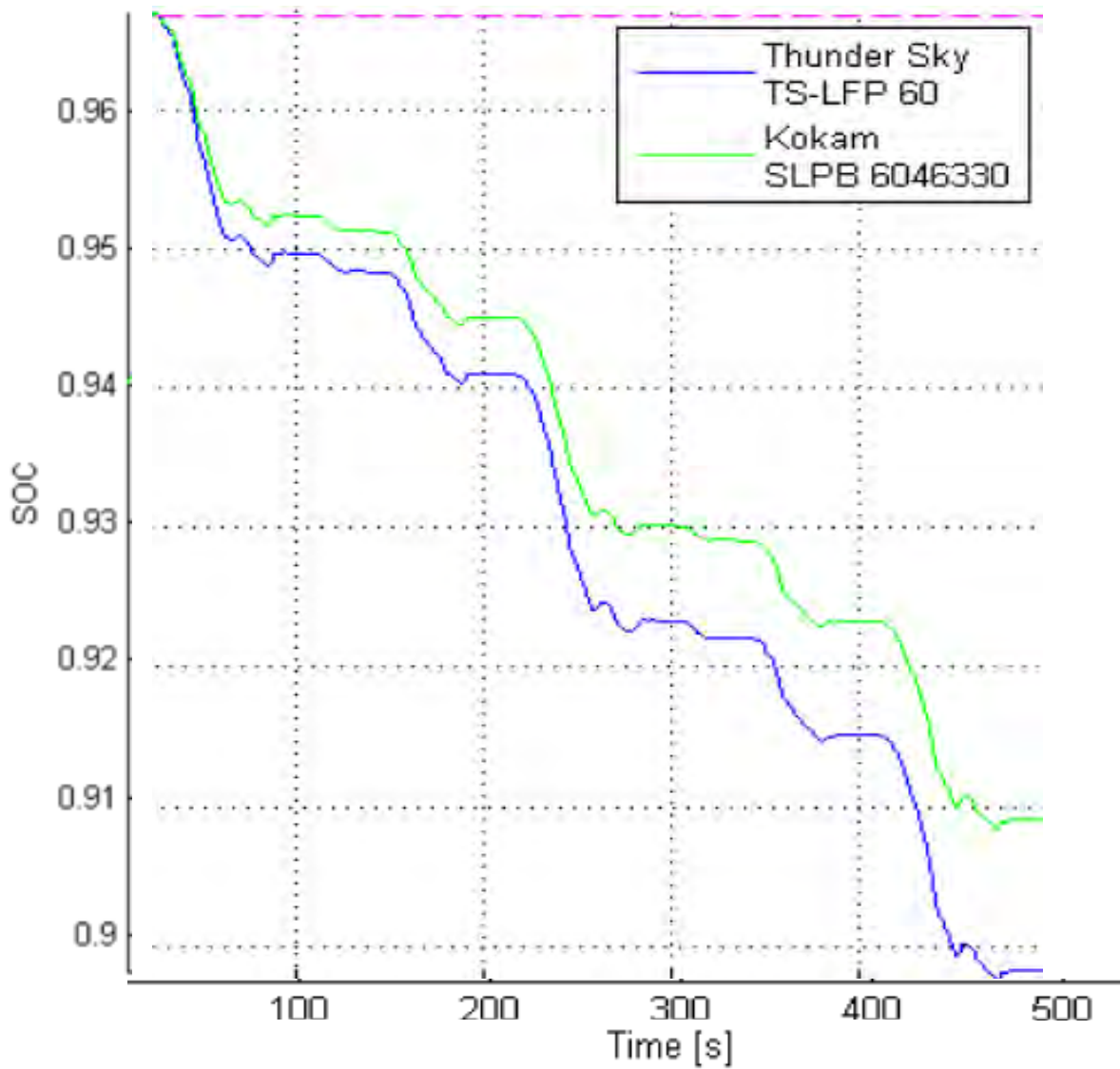


Figura 57 - Veicolo Puro elettrico; Ciclo ECE; Curve di scarica dei sistemi di accumulo

In particolare l'autonomia stimata sul ciclo ECE urbano per il veicolo puro elettrico è di 34 km con l'accumulo Thundersky da 60 Ah, contro i 38 km di autonomia con l'accumulo Kokam da 70 Ah.

Conclusioni

In questo report si sono riportati alcuni dei risultati del team di lavoro ENEA nell'ambito dell'Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA per quanto concerne la Ricerca di Sistema Elettrico.

In particolare, il rapporto fa riferimento all'Obiettivo C (Adattamento di convertitori di piccola potenza ad alto rendimento all'uso nei veicoli elettrici leggeri, e sperimentazione di sistemi di ricarica rapida) del Progetto 3.5 (Studio per lo sviluppo di materiali innovativi per il risparmio di energia nel settore elettrico con particolare attenzione ai materiali per i mezzi di trasporto collettivi: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto). In particolare il rapporto è relativo alle necessità energetiche di un quadriciclo ed ai suoi possibili schemi di trazione ibrida e full-electric.

Nell'ambito del presente programma di ricerca si è voluta soffermare l'attenzione su un segmento di mercato che, in quanto non centrale nei piani di sviluppo delle principali Case costruttrici, sino ad oggi è stato piuttosto trascurato da programmi di introduzione di veicoli elettrici e ibridi, ovvero quello delle minicar (o "quadricicli", secondo la normativa italiana). La leggerezza del mezzo e la tipologia d'uso prettamente urbano rende questi veicoli particolarmente adatto all'elettrificazione.

L'ENEA sta valutando da tempo diversi possibili schemi di propulsione per microvetture, la maggior parte dei quali oggetto di questa relazione, con la trazione puramente elettrica sull'avantreno e classificabili come veicoli elettrici pure o come ibridi serie plug-in.

Le attività ENEA in tema di micro vetture sono partite da tempo con la realizzazione di un prototipo di microcar ibrida serie, denominata Urb-E. Sulla base delle attività sperimentale si sono potuti calibrare una serie di strumenti modellistici che hanno permesso la piena analisi energetica non solo della soluzione applicata, ma anche di tutta una serie di soluzioni alternative, inclusa la trazione puramente elettrica con sistemi di accumulo tradizionale o innovativo, nonché soluzioni ibride equipaggiate da generatori elettrici di bordo non tradizionali a fuel cell.

I risultati oggetto di questo rapporto permettono la chiara definizione dei flussi energetici di bordo (potenze massime e minime, ciclicità, tempi caratteristici di variazione) al variare dello schema di propulsione scelto e della strategie di controllo del sistema di accumulo o di generazione elettrica di bordo e costituiscono la base per la progettazione di dettaglio dei singoli componenti del sistema.

I rendimenti calcolati, in particolare, permettono di evidenziare quanto influiscono sulle prestazioni complessive del mezzo anche componenti spesso non del tutto considerati, come i convertitori DC/DC per la gestione di flussi di potenza (che nell'uso reale hanno mostrato rendimenti sempre inferiori al 90%).

A partire dai dati mostrati in questo rapporto, il gruppo di ricerca dell'Università dell'Aquila su questo stesso obiettivo di programma si è concentrato sull'uso dei convertitori DC/DC nella trazione ed ha operato la scelta di un componente per microcar, considerandone efficienza, costo ed affidabilità.

Riferimenti Bibliografici

- IEA Technology Roadmap: Electric and plug-in hybrid electric vehicles – June 2011. International Energy Agency
- Brusaglino-Pede-Vitale, "Sistemi di propulsione elettrica ed ibrida. Dalla sorgente a bordo all'attuazione meccanica", 2009, edizione ENEA.
- Consiglio Nazionale delle Ricerche; Dipartimento di Energia e Trasporti, "Energia e trasporti. Stato attuale e prospettive future della ricerca scientifica", Claudio Bertoli editore, Aprile 2009
- Friedman, D., 2003, A New Road – The Technology and Potential of Hybrid Vehicles, Union of Concerned Scientists, UCS publications.
- Smokers, R.T.M. et al., 2000, Annex VI: Hybrid Vehicles Overview Report, Hybrid & electric vehicle implementing agreement, International Energy Agency.
- Atkins, M. and Koch, R., 2003, A Well-toWheels Comparison of Several Powertrain Technologies, SAE paper 2003-01-0081.
- Brahma, A., Guezennec, Y., Rizzoni, G., Optimal Energy Management in Series Hybrid Electric Vehicles, Proceedings of the American Control Conference, Chicago, Illinois, June 2000.
- Rizzoni, G., Guzzella, L., Baumann, B., Unified modeling of hybrid electric vehicles, IEEE Trans. Mechatronic Systems, September 1999.
- Sciarretta, A., and Guzzella, L., 2007, "Control of Hybrid Electric Vehicles," IEEE Control Syst. Mag., 27_2_, pp. 60–70.
- Paganelli, G., Ercole, G., Brahma, A., Guezennec, Y., and Rizzoni, G., 2001, "General Supervisory Control Policy for the Energy Optimization of Charge- Sustaining Hybrid Electric Vehicles," JSAE Rev., 22_4_, pp. 511–518.
- E. Rossi, C. Villante, "Urb-e, Prototipo di vettura ibrida da città", RT/2010/5/ENEA, edited by the Italian Agency on Energy and Environment (ENEA) on May 2010.
- E. Rossi, C. Villante, "Urb-e: A Proposal by ENEA for a Hybrid City Car", Global Powertrain Congress (GPC) 2010, Munich (Germany), September 2010.
- E. Rossi, C. Villante, "Ultracapacitors in a series hybrid drive train employed to realize a city car prototype", ESSCAP 2010 -4th European Symposium on Super Capacitors & Applications, Bordeaux, October 2010.
- E. Rossi, C. Villante, "A hybrid Car by ENEA for Urban Mobility", EVS25 2010 - The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Symp. and Exhib., Shenzhen (China) November 2010.
- M.V.Ciminelli, L. Martellucci, M.Feola, F.Martini, "ENEA URB-E: sistema di controllo e gestione di un veicolo ibrido serie", ATI 2009
- Martellucci, L., Feola, M., Ciminelli, M.V., Lungarini, L., Martini, F., 2009 "Modeling and experimental evaluation of control management in the series hybrid vehicle Enea Urb-e", SAENA
- UITP, International Association of Public Transport, SORT - Standardised on-road tests cycles, 2004. December 2005.
- Paganelli, G., Guerra, T., Delprat, S., Santin, J., Delhom, M., and Combes, E., 2000, "Simulation and Assessment of Power Control Strategies for a Parallel Hybrid Car," Proc. Inst. Mech. Eng., Part D _J. Automob. Eng., 2147, pp. 705–717.
- F. Badin, O. Briat, S. Olivier, B. Jeanneret, R. Trigui, B. Malaquin, The use of batteries in hybrid vehicles, IEEE VTSVPP, Paris-France, 2004.

- L. Martellucci, V. Di Giacomo, F. Tavani "Progetto microcar: quadriciclo con sistema di propulsione ibrido serie e sistema di accumulo a supercondensatori", ATI 2007
- M.V.Ciminelli, M.Feola, F.Martini, S.Ubertini, "Analisi numerica delle prestazioni di un veicolo Microcar di tipo Ibrido serie Termico-Elettrico" 63° Congresso ATI, Palermo, Settembre 2008
- M. Ceraolo, G. Lutzemberger, T. Huria, "Experimentally-Determined Models for High-Power Lithium Batteries", SAE World Congress 2011
- Di Napoli, G. Pede, Hybrid storage system: an optimization case, SAE paper 2002-01-1914, 2002.
- F. Caricchi, F. Crescimbinì, F. Giulii Capponi, L. Solero, Study of bidirectional buck-boost converter topologies for application in electrical vehicle motor drives, 13th IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, Anaheim (USA), february 1998.
- S. Bersali, M. Ceraolo, A. Possenti, Techniques to control the electricity generation in a series hybrid electrical vehicle, IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 17, n° 2, June 2002.
- G. Pede, E. Rossi, R. Vellone, R. Giglioli, M. Ceraolo, Esperienze di controllo e studi di ottimizzazione energetica per un veicolo ibrido serie, RT/2002/4/IDROCOMB ENEA.
- A. Lidozzi, V. Serrao, L. Solero, A. Di Napoli, Control Technique and Operation Strategy of PM Generators in Hybrid Vehicles, International Conference on Electrical Machines ICEM 2008.