

**Sorrenti Davide**

A.s. 2002/2003

# La trazione elettrica

## La trazione elettrica

### L'auto elettrica



## SOMMARIO

- ✍ [Le ragioni del rilancio](#)
- ✍ [Tecnica del veicolo elettrico](#)
- ✍ [Le batterie convenzionali](#)
- ✍ [Le nuove batterie leggere](#)
- ✍ [Configurazione dei propulsori elettrici convenzionali](#)
- ✍ [Propulsori di tipo avanzato](#)
- ✍ [Prospettive di diffusione del veicolo elettrico](#)
- ✍ [Il punto della situazione](#)

## *Prefazione*

Dalla costruzione dei primi automezzi elettrici a batteria sono passati cento anni. Il loro successo fu clamoroso quanto effimero: preferiti ai veicoli a combustione per la marcia silenziosa e pulita in contrapposizione a quella fracassona ed inaffidabile degli altri, perdettero in pochi decenni i favori di tecnici ed appassionati con il graduale perfezionamento del motore a scoppio. I veicoli a combustione hanno consentito una mobilità di persone e merci ormai irrinunciabile ma sono anche tra i maggiori responsabili della cappa di gas inquinanti che grava sulle nostre città ed i formidabili divoratori del 20% delle risorse energetiche mondiali. Tanto peggio se sottoforma di petrolio. È, tutto questo, un lusso che non potremo permetterci molto a lungo. L'esigenza di soluzioni alternative per i trasporti su strada si fa sempre più pressante e dovrà trovare soluzione entro il prossimo ventennio. Ecco allora in questo clima un ritorno alle origini. La vecchia auto elettrica è rispolverata, le ricerche sulle batterie s'intensificano dopo una stagnazione di decenni, le prospettive di superamento dei limiti tecnici si fanno sempre più realistiche.

### *Le ragioni del rilancio*

Nel 1860 si sviluppava l'accumulatore elettrochimico e tutto lasciava prevedere che questo avrebbe avuto un ruolo sostanziale nelle applicazioni pratiche dell'elettricità.

I primi prototipi di veicoli a trazione elettrica nacquero in Inghilterra intorno al 1888: una piccola vettura ideata da J. K. Starley ed un bus per il trasporto cittadino realizzato da Ratcliff Ward.

La fantastica idea di un trasporto su strada autonomo e senza cavalli, accarezzata per tanto tempo in tutto il mondo, era diventata una realtà concreta e le possibilità erano addirittura due: le autovetture a combustione interna e le vetture elettriche. Quale scegliere?

Le prime erano rumorose, avevano vibrazioni elevate a causa degli organi con moto alternativo, erano sporche per la fuoriuscita dell'olio e si guastavano facilmente per la complessità del motore.

Le seconde avevano invece una marcia silenziosa e dolce, erano facili da guidare e più pulite di qualsiasi altro mezzo di trasporto, compreso i cavalli.

Per molti anni, i favori dei tecnici, dei costruttori e dei finanziatori nel settore dei trasporti, oltre naturalmente a quelli del pubblico, sarebbero stati orientati verso lo sviluppo dei veicoli elettrici.

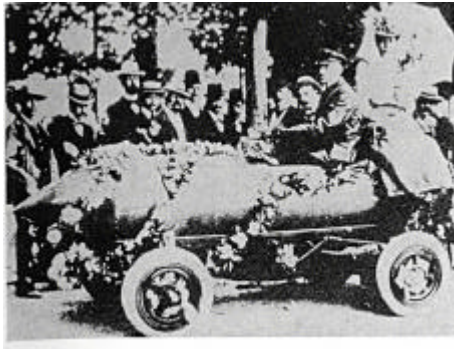
Nel 1890, ancora in Inghilterra, Ward progettò un secondo bus elettrico, che fu realizzato da W. Bensey. Alla guida del suo automezzo, lo stesso Ward faceva la spola tra Charing Cross e Victoria, a Londra. In continua emulazione con Ward, lo stesso Bensey progettò in seguito un furgone postale nel 1894 ed una «carrozzella elettrica» nel 1896.

Per l'intero decennio precedente il nuovo secolo, le attività di ricerca e costruttive sui veicoli elettrici e sui pezzi (motori, batterie, ecc.) si moltiplicarono via via coinvolgendo sia imprese organizzate sia, ancor più, schiere di giovani meccanici intraprendenti che con spirito pionieristico organizzarono officine dove sviluppare l'idea. In queste fucine furono sviluppate innovazioni tecniche di un certo rilievo e furono in definitiva create le condizioni per le successive produzioni di serie.

Nel 1897 la Pope Manufacturing Co., negli USA, cominciò la produzione su scala commerciale di diversi tipi di veicoli elettrici riuscendo a costruire in due anni ben 500 esemplari e negli anni immediatamente successivi l'Electric Vehicle Co. Costruiva circa 2'000 taxi elettrici. Nello stesso periodo venne anche realizzata una serie di furgoni per le poste americane, con batterie del peso di 1'000 kg che erano sostituite alla fine di ogni viaggio in apposite stazioni di ricarica.

L'Europa stava al passo: alla prima competizione per vetture motorizzate tenutasi a Parigi nel 1898, tredici delle quattordici contendenti presentate erano elettriche ed una sola con motore a combustione.

La stessa gara, ripetuta l'anno successivo, vide vincitrice la famosa «Jamais Content», che raggiunse la velocità record di 110 km/h.



La famosa auto elettrica «Le Jamais content» che nel 1899 a Parigi raggiunse il record di velocità di 110 km/h

L'automobile elettrica entrava ormai nella vita comune di tutti i Paesi sviluppati. Nel 1912 esistevano negli USA 20'000 vetture elettriche per passeggeri e 10'000 furgoni commerciali ed una diffusione delle stesse proporzioni si aveva in Europa: nella sola Berlino circolavano nel 1915 oltre 600 carrozze elettriche.

Le prestazioni erano considerevoli per l'epoca: la Baker Electric americana, ad esempio, viaggiava ad oltre 40 km/h ed aveva una linea di tutto rispetto. Il motore elettrico era reversibile ed in frenatura funzionava da generatore per consentire la frenatura dinamica.



L'American Baker del 1915 aveva una velocità massima di oltre 40 km/h ed un'autonomia di circa 65 km

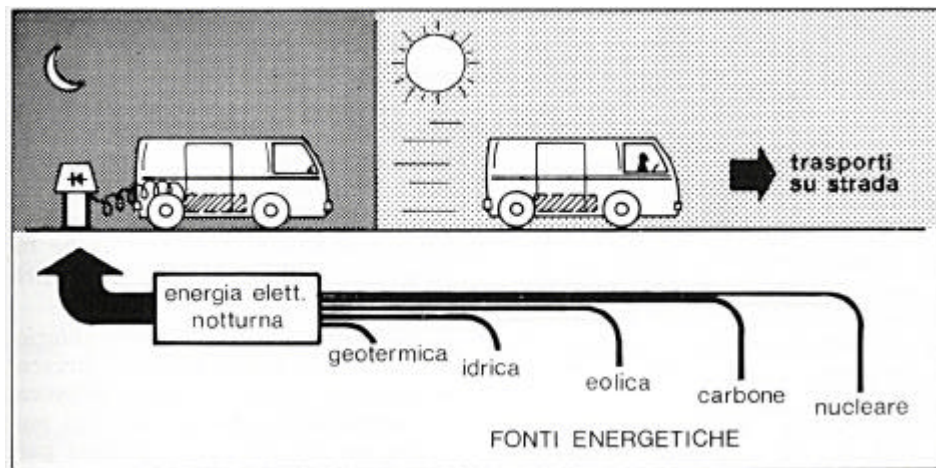
A partire dagli anni venti la trazione elettrica subì un graduale declino, dovuto ai sensibili perfezionamenti che erano stati apportati alle automobili a combustione: queste incalzavano prepotentemente per le doti di autonomia e velocità rese possibili dal loro serbatoio con contenuto energetico molto superiore alle batterie di accumulatori. Non si considerava certamente, all'epoca, il problema dell'esaurimento delle scorte petrolifere.

L'automezzo elettrico fu così gradualmente relegato al ruolo di riserva con uso marginale, anche a causa del pressoché completo abbandono degli studi su nuove soluzioni di accumulo elettrochimico.

La sua storia ricomincia nei nostri giorni. Lo stimolo verso la soluzione dei problemi dell'ambiente e quella ancora più prepotente della crisi energetica esigono ormai soluzioni alternative all'impiego del petrolio. Nel contempo, l'evoluzione della tecnica elettronica di potenza e le speranze nel campo degli accumulatori ad alta energia prospettano per questi automezzi soluzioni tecnologiche che dovrebbero attribuire loro un ruolo essenziale nel

futuro tessuto dei trasporti stradali.

L'energia elettrica utilizzata può essere prodotta da diverse fonti primarie: petrolio, carbone, energia nucleare, energia idraulica, energia solare.



La trazione elettrica è l'unica possibilità che permetterebbe l'impiego di qualunque fonte energetica primaria. Ricaricando le batterie di notte sarebbe inoltre possibile utilizzare meglio gli impianti di generazione elettrica

Inoltre, il rendimento energetico complessivo del sistema elettrico può essere di un buon 30% superiore rispetto a quello dei trasporti convenzionali.

Infine, vi sarebbe la separazione nel tempo tra i periodi di uso dei veicoli e quelli di ricarica delle batterie. Quest'ultima potrebbe essere fatta nottetempo, nelle ore di basso carico, contribuendo ad un migliore sfruttamento ed ammortamento degli impianti elettrici di generazione, che per ovvie esigenze economiche devono lavorare con carico quanto più possibile costante durante la giornata.

Sotto il profilo dell'ambiente, i veicoli elettrici costituirebbero un'efficace soluzione.

Nell'ambito della circolazione urbana i vantaggi deriverebbero soprattutto dall'assenza dei processi di combustione a livello respirabile e quindi nell'eliminazione delle emissioni tossiche e del consumo di ossigeno.

È stato obiettato che, almeno finché l'energia elettrica sarà prodotta in centrali termiche, i problemi ecologici non verranno che spostati dalla strada alla centrale.

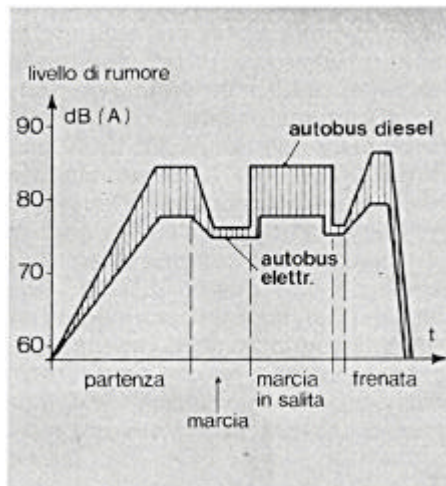
In realtà è incontestabile che in queste ultime, i processi di combustione sono effettuati in condizioni più controllate di quanto non sarebbe possibile per i milioni di piccoli motori degli automezzi. Inoltre i gas combusti di centrale sono immessi nell'atmosfera tramite camini di grande altezza che assicurano la diluizione delle emissioni entro aree più ampie, riducendo drasticamente (di circa cento volte) la concentrazione dei prodotti che precipitano al suolo. Il risultato è che tale concentrazione sarebbe molto inferiore a quella dovuta al traffico dei veicoli tradizionali.

Si può rilevare che l'anidride solforosa emessa nell'atmosfera sarebbe più elevata nel caso di motorizzazione elettrica. Questo perché nelle centrali termoelettriche sono bruciati prevalentemente oli combustibili pesanti ottenuti come residuo della produzione di carburante per il traffico stradale; durante la distillazione, il tenore di zolfo si concentra soprattutto in questi residui.

Almeno in parte, quindi, è la stessa motorizzazione convenzionale che è responsabile di queste ultime emissioni.

Sotto l'aspetto del rumore, i veicoli elettrici sarebbero preferibili a quelli a combustione: il propulsore elettrico, di per sé più silenzioso, sarebbe inattivo durante le fermate (semafori, code, ecc.) contribuendo a ristabilire una pace acustica di cui abbiamo ormai perso memoria.

Alcuni studi eseguiti in Germania su linee di autobus sperimentali a batteria, hanno indicato che l'emissione acustica di questi ultimi ai diversi regimi di funzionamento è inferiore a quella dei bus convenzionali di almeno 7 dB, cui corrisponde una potenza acustica circa cinque volte minore.



Emissione acustica di un autobus a batteria a confronto con un analogo veicolo diesel

### *Tecnica del veicolo elettrico*

L'ostacolo maggiore che si è sinora frapposto alla ricomparsa di questi automezzi, è notoriamente l'assenza di batterie con caratteristiche adeguate. In questi ultimi anni, tuttavia, l'attività internazionale nel settore dell'accumulo elettrochimico si è sensibilmente estesa in termini di investimenti e di mezzi, anche in previsione di altri sbocchi, quali le applicazioni spaziali.

Ne sono derivati sviluppi importanti che prospettano a medio termine la disponibilità commerciale di batterie adatte almeno ad applicazioni veicolari specifiche, mentre a più lungo termine vi sono fondate speranze per una nuova generazione di accumulatori ad alta densità che aprirebbero definitivamente le porte all'automobile elettrica. In ogni caso è onesto ammettere che anche il migliore accumulatore prospettabile per il futuro non potrà mai competere con la densità di energia dei serbatoi attuali. Lo sviluppo del veicolo elettrico deve quindi puntare non solo sull'impiego delle migliori batterie possibili, ma anche sul miglior uso dell'energia ivi immagazzinata. Ciò assegna all'efficienza del sistema di propulsione ed ad ogni altro fattore in grado di ridurre il dispendio di energia per l'avanzamento del veicolo (ad esempio, la riduzione dei pesi, la riduzione della resistenza aerodinamica, ecc.) un'importanza del tutto nuova o che per lo meno ci si poteva permettere di trascurare nella passata era dell'abbondanza energetica.

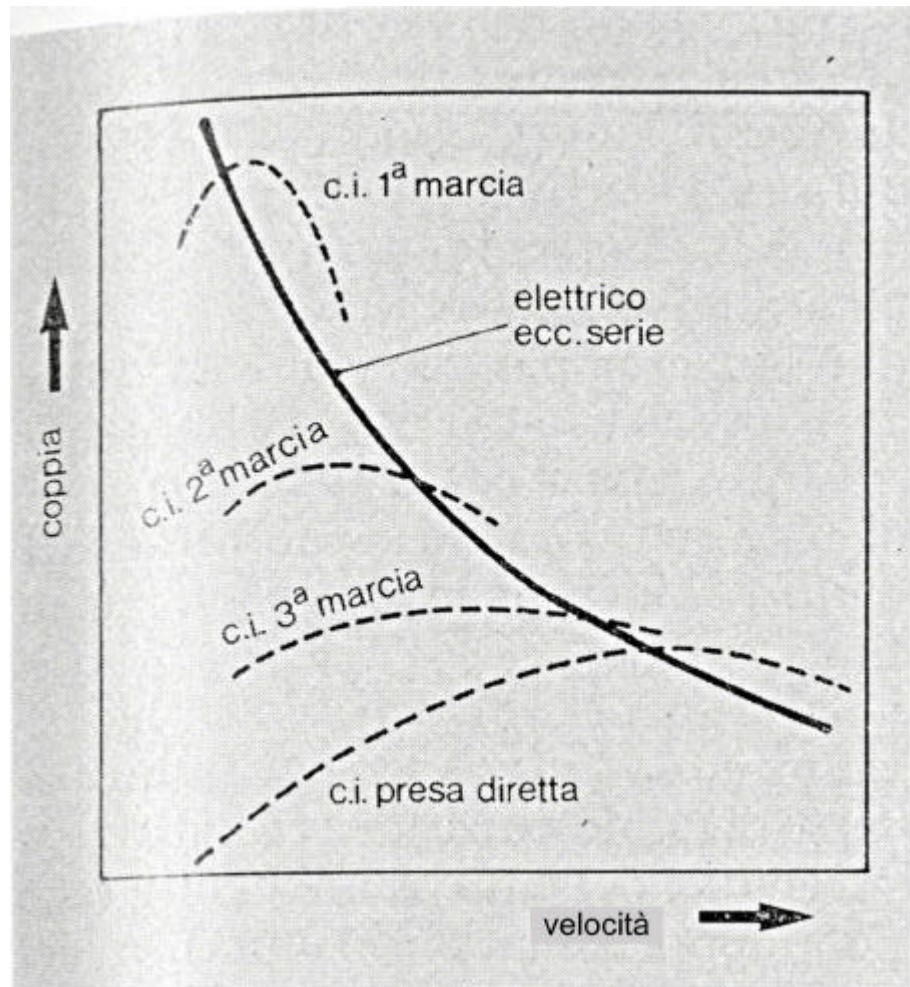
### **Il sistema propulsore**

L'elemento che differenzia il veicolo elettrico da quello convenzionale, è ovviamente la presenza di un propulsore elettrico alimentato da batterie.

Il modo più semplice di immaginare il sistema propulsore elettrico è di sostituire il motore a combustione interna di un automezzo convenzionale con un motore elettrico.

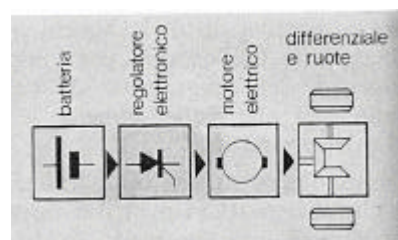


Nel caso del motore elettrico, che possiede una caratteristica coppia-velocità assai più estesa di un motore a combustione, pur mantenendo un rendimento elevato, è possibile ridurre il numero delle marce od addirittura eliminare il cambio meccanico e la relativa frizione (che comportano tra l'altro sensibili perdite meccaniche), e connettere direttamente il motore al differenziale.

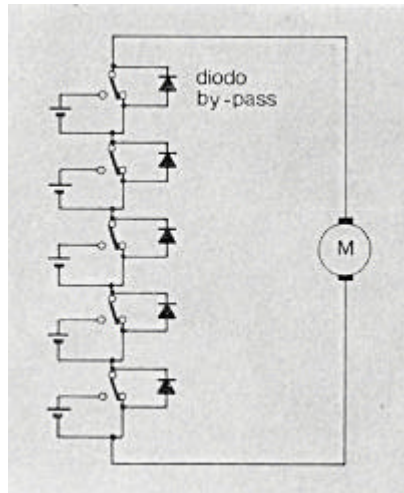


Caratteristiche coppia-velocità di un motore elettrico ad eccitazione serie e di un motore classico a c.i. con l'uso del cambio

È implicito che occorre in ogni caso un dispositivo, questa volta elettrico, che regoli il funzionamento del motore per adattarlo alle esigenze di percorso. Questo regolatore, che è forse più assimilabile al carburatore che al cambio di un veicolo classico, sarà inserito tra batteria e motore.



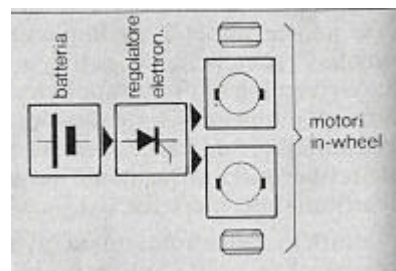
La soluzione più semplice di regolatore è un controller a contatti che inserisca le sezioni di batteria desiderate, in modo da variare la tensione ai morsetti del motore.



Regolatore a controller. Il numero di sezioni di batteria inserite è pari al numero di contatti chiusi. I diodi prevengono archi tra i contatti quando il controller cambia stato. I contatti sono azionati attraverso un relè sequenziale che altera la sequenza con cui le singole sezioni di batteria sono inserite, in modo che queste siano scaricate in modo relativamente uniforme

La regolazione è ovviamente a gradini, e comporta una guida discontinua che sembra però accettabile a giudicare dal successo di vendita di alcune auto elettriche da città che per evidenti ragioni di costo devono adottare soluzioni semplici e affidabili quale quella descritta.

Il solo pezzo propulsore che resta comune agli automezzi tradizionali è il differenziale. Non mancano però proposto per eliminare anche questo, utilizzando due distinti motori di trazione direttamente inseriti nelle ruote motrici.



### **La struttura meccanica**

L'impiego di organi elettrici consente in principio ampio grado di libertà nella disposizione dei pezzi propulsori a bordo del veicolo, in contrapposizione alla relativa rigidità di configurazione degli automezzi a combustione: ne deriva un uso più razionale dello spazio disponibile ed una semplificazione del raffreddamento dei pezzi.

L'elemento condizionante del progetto è naturalmente la batteria, il cui peso è solo in parte compensato dal minor peso degli altri organi elettrici rispetto ai propulsori convenzionali.

Il veicolo elettrico ha perciò bisogno di un vero e proprio telaio. La carrozzeria, a cui resta la funzione di semplice abito, può allora essere realizzata con materiali leggeri come la vetro-resina, in modo da ridurre i pesi.

Per sfruttare appieno la vita del propulsore elettrico, prevedibilmente molto maggiore di quella dei motore attuali, è stato anche proposto di realizzare carrozzerie facilmente separabili dai telai, da sostituire periodicamente nel corso della vita del veicolo.

L'ingombro della batteria, destinato a restare relativamente elevato anche per gli accumulatori futuri (che utilizzando materiali a basso peso specifico manterranno un volume rispettabile) pone a sua volta problemi di alloggiamento. Questi sono ulteriormente esaltati dalla necessità di un'agevole rimozione delle batterie, in relazione alla tendenza che si va sempre più delineando di rifornire i veicoli attraverso la sostituzione rapida delle stesse presso adeguate stazioni di servizio paragonabili ai distributori di benzina odierni. Queste stazioni provvederebbero poi alla ricarica e manutenzione, in condizioni indubbiamente più favorevoli di quelle adottabili dai singoli utilizzatori ed a tutto vantaggio della longevità delle batterie e della riduzione dei costi. Sono state anche proposte forme di «noleggio» delle batterie il cui costo iniziale non graverebbe così sulla spesa di primo acquisto dei veicoli.

Il giusto approccio al problema, ed in pratica la necessità di costruire attorno ad una sorgente di energia limitata come la batteria attuale, un «sistema veicolo» ottimizzato, in grado di utilizzare tale energia nel migliore dei modi, è

gradualmente emerso negli ultimi anni.

Le possibili aree d'intervento per migliorare le prestazioni del veicolo elettrico sono:

- il recupero dell'energia cinetica in decelerazione; in pratica tuttavia, una parte di quest'energia, stimabile in un 10%, è in ogni caso perduta nei freni meccanici per ottenere l'arresto completo del veicolo. Inoltre, la frazione effettivamente recuperabile dipende anche dallo stato di scarico della batteria: in condizioni di piena carica l'energia di ritorno verrà in gran parte dissipata in calore o spesa per la dissociazione elettrochimica dell'elettrolito, mentre a scarica sufficientemente avanzata l'energia non solo è recuperata ma sembra determinare un miglior rendimento della batteria. Si può ammettere in prima approssimazione che i due fattori si bilancino e che tutta l'energia restituita in batteria sia riutilizzata col rendimento medio di quest'ultima.
- il miglioramento del rendimento del propulsore;
- il livellamento dei picchi di potenza richiesti alla batteria;
- la riduzione delle resistenze all'avanzamento (di rotolamento e aerodinamiche);
- la riduzione del peso del veicolo.

### I sistemi ausiliari

Il consumo di energia da parte del motore per la propulsione del mezzo non è il solo del veicolo. Tra gli altri, quello molto più elevato è dovuto al riscaldamento dell'abitacolo nei periodi freddi. La quantità di energia necessaria a questo scopo dipende da diversi fattori, ma indicativamente ammonta al 30-50% di quella richiesta per la propulsione in condizioni di traffico urbano.

Per un motore elettrico con rendimento medio del 75-80%, le perdite sono insufficienti per il riscaldamento, anche nell'ipotesi di poterle utilizzare integralmente per tale scopo.

### Requisiti della batteria

I requisiti della batteria sono funzione di tre fattori:

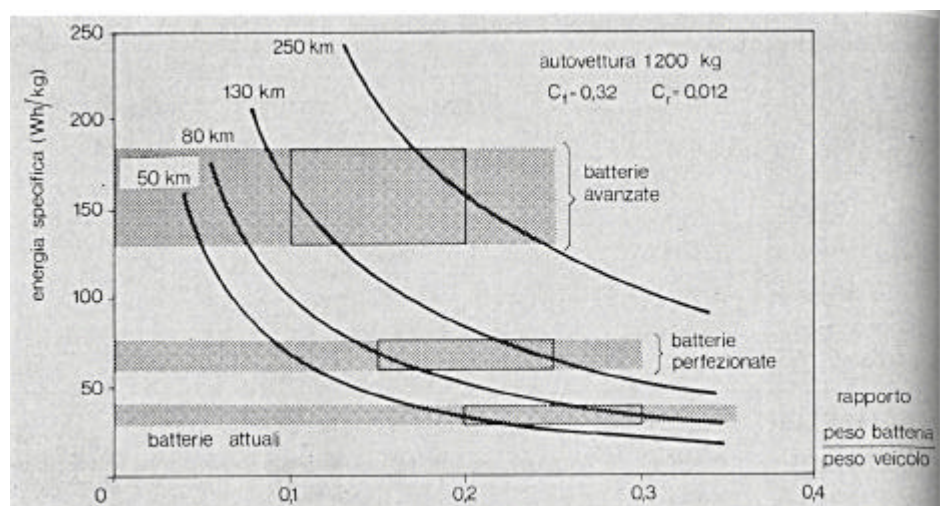
- i consumi assorbiti dall'uso considerato (ciclo urbano o percorso extraurbano);
- l'autonomia desiderata del veicolo;
- la quantità di batterie installate sull'automezzo.

Il metro di giudizio più utile ai fini delle prestazioni ottenibili è l'*energia specifica* della batteria ed in altre parole l'energia che essa può fornire per unità di peso [Wh/kg].

Il quadro che ne deriva è circa il seguente:

- un'autovettura basata sulle batterie al piombo odierne avrebbe un'autonomia urbana di 50-80 km per un rapporto batteria/peso veicolo di 0.2-0.3. A parità di carico utile, il soprappeso della vettura rispetto ad una a combustione potrebbe essere del 10-20%;

- le batterie perfezionate (ferro/nichel, zinco/nichel) estenderebbero l'autonomia a 80-130 km riducendo nel contempo la quantità



Energia specifica richiesta alla batteria per un'autovettura di 1200 kg in percorso urbano



di batterie al 15-25%  
del peso. Il  
soprappeso rispetto  
alla vettura a  
combustione si  
ridurrebbe al 5-15%;

- con le batterie  
avanzate si  
coprirebbero 130-250  
km con il 10-20% di  
peso in batterie e con  
un soprappeso  
inferiore al 10%.

Nell'impiego extraurbano l'energia specifica consumata per unità di percorso è di un 20% più alta (a 120 km/h) e nella stessa misura si ridurrebbe l'autonomia.

È implicito che l'energia specifica indicata è quella che la batteria deve possedere all'effettivo regime di funzionamento.

Per individuare completamente i requisiti della batteria è quindi necessario definire anche la potenza specifica cui essa opera sul veicolo elettrico. Per i percorsi extraurbani, il regime di funzionamento è ben individuato dalla potenza continua assorbita dal propulsore.

Nell'impiego urbano la potenza media è assai più bassa, ma la batteria deve essere in grado di fornire anche le elevate punte dell'accelerazione. Per veicoli polivalenti, da adibire ad entrambi gli usi, il regime di funzionamento più severo è in pratica quello extraurbano a velocità sostenuta.

Dal quadro delineato è evidente che le autonomie di 300-500 km degli automezzi a combustione cui siamo abituati non sono realisticamente ottenibili dai veicoli elettrici, a meno di non ipotizzare l'impiego di pile primarie ad altissima energia (come la Li/H<sub>2</sub>O che può fornire parecchie centinaia di Wh/kg) le quali presentano però seri problemi di costo.

Inoltre, le incognite ed i costi di ricerca di queste batterie sono certamente elevati e sembrerebbe quindi giustificato indirizzare piuttosto questi sforzi verso il miglioramento della vita e dell'efficienza di batterie più realistiche, fattori questi che influirebbero favorevolmente sui costi di esercizio del mezzo elettrico.

Si può di conseguenza non essere convinti della concreta diffusione di veicoli elettrici con potenzialità che si collocano per il futuro intorno ai 200 km.

In realtà la gran maggioranza dei veicoli percorre giornalmente poche decine di chilometri e solo eccezionalmente deve coprire centinaia di chilometri.

La soluzione per coprire percorrenze elevate sta piuttosto nel creare un'infrastruttura sufficientemente ramificata per il rifornimento di energia ai veicoli, attraverso la carica o la sostituzione rapida delle batterie. Di fatto, l'ossatura di tale infrastruttura esiste già, ed è la rete di distribuzione dell'energia elettrica. Ciò che rimane da sviluppare sono invece i terminali dell'infrastruttura.

### *Le batterie convenzionali*

L'impiego veicolare impone naturalmente requisiti di ordine tecnico: la batteria deve efficacemente accettare l'energia fornita dalla frenatura a recupero e deve presentare modesta autoscarica in modo da superare senza danni periodi occasionali di sosta prolungata.

Per impieghi di massa è poi necessario contenere quanto più possibile la necessità di operazioni di manutenzione. Già per le batterie d'avviamento delle vetture a combustione interna odierne si delinea la tendenza a realizzare un pezzo di tipo sigillato, di cui l'utente possa dimenticarsi. È certo che questo fattore avrà un ruolo ancora più rilevante sul gradimento del veicolo futuro e sulla sua penetrazione.

Sotto il profilo energetico, la batteria deve avere un alto rendimento di carica/scarica, poiché questo parametro costituisce una tra le maggiori strozzature energetiche nella catena fonte primaria - energia resa alle ruote.

Dal punto di vista economico, i fattori principali sono il costo iniziale e la durata di vita. Le batterie avanzate allo studio sono basate per lo più su materiali largamente disponibili in natura e quindi economici: il sodio, lo zolfo, il cloro, ecc. Sfortunatamente l'impiego di tali materiali impone spesso l'adozione di tecnologie complicate e costose. Le prospettive di costo finale sono tuttavia giudicate favorevolmente. In termini di vita, l'ottimizzazione delle

batterie punta su durate di 500-1'000 cicli di carica/scarica, corrispondenti ad un periodo di esercizio sui veicoli di qualche anno.

C'è infine il problema delle materie prime: l'industria dei generatori elettrochimici è un formidabile consumatore, che assorbe il 40% della produzione mondiale di piombo, il 15% della produzione di cadmio ed il 15% del nichel. In previsione di una diffusione su vasta scala un fattore da considerare è quindi la riciclabilità dei materiali costituenti le batterie esaurite, al duplice scopo di contenere la quantità di materie prime da estrarre ed utilizzare e la quantità di materiali residui da smaltire.

### I generatori elettrochimici

I generatori elettrochimici, o pile primarie, operano la conversione dell'energia chimica in energia elettrica. Ne deriva un flusso di elettricità che all'interno del generatore è costituito da ioni positivi e negativi migranti verso gli elettrodi ed all'esterno dagli elettroni liberati.

Negli accumulatori, o pile secondarie, il funzionamento è reversibile ed il generatore può essere ricaricato con l'apporto di energia elettrica.

Il valore della f.e.m. a circuito aperto  $E$ , è pari a:

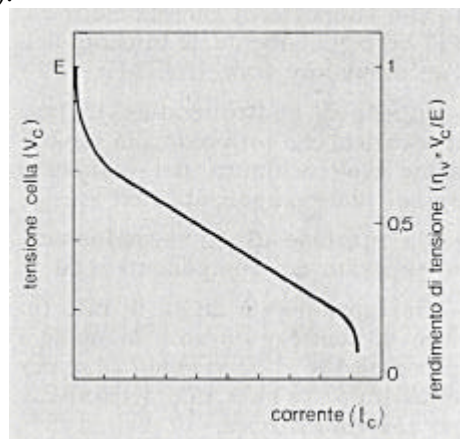
$$E = \frac{\Delta W}{Q}$$

in cui  $\Delta W$  è la variazione di energia e  $Q$  la carica liberata.

La tensione di scarica pratica, in presenza di corrente, è inferiore alla f.e.m.  $E$  a causa di diversi fattori:

- le cadute ohmiche dovute alla resistenza elettrica dei costituenti (polarizzazione ohmica);
- le cadute di potenziale corrispondenti all'energia necessaria per il trasferimento degli elettroni (polarizzazione di attivazione);
- le cadute connesse con il trasferimento dei materiali e con la concentrazione dei reagenti negli elettrodi e nell'elettrolito (polarizzazione di concentrazione).

Ai bassi valori di corrente la tensione decresce rapidamente, per poi assumere una pendenza pressoché costante sino ad una corrente limite dipendente dalla velocità di trasferimento dei reagenti e dei prodotti all'interno della cella.



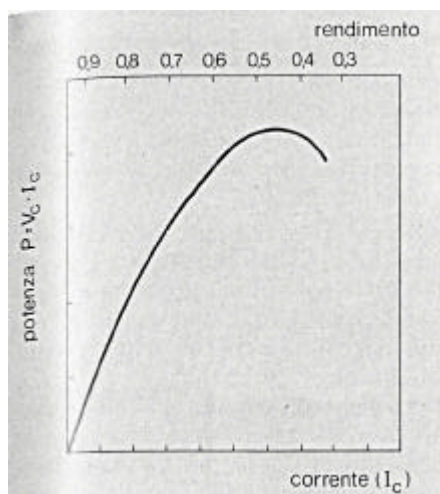
Andamento tipico della tensione di scarica

L'andamento in fase di carica è pressoché speculare.

Oltre alla caduta della f.e.m. dovuta alle diverse forme di polarizzazione citate, si verificano anche inefficienze in termini di corrente. Queste derivano dalla dispersione di cariche elettriche che, alla scarica o in ricarica, partecipano a reazioni parassite, talvolta irreversibili, formando composti indesiderati.

Per le batterie con elettrolito acquoso, le più comuni tra queste reazioni sono l'elettrolisi dell'acqua e la ricombinazione dei reagenti disciolti nell'elettrolito (autoscarica).

È evidente che la cella può operare sia alla carica che in ricarica, in un esteso campo di correnti o meglio di densità di corrente. Si avrà però un rendimento diverso, a causa dell'incidenza via via crescente delle polarizzazioni e delle reazioni parassite. Ciò equivale a dire che all'aumentare della potenza di lavoro decresce l'energia che la cella può globalmente cedere, poiché una frazione sempre più rilevante è spesa in effetti indesiderati.



Andamento tipico del rendimento di scarica

In altri termini ancora, l'energia specifica della cella (riferita in pratica al suo peso) decresce all'aumentare della potenza specifica.

### Fattori limitativi dei generatori pratici

Sfortunatamente, una serie di fattori economici opera una notevole selezione tra un centinaio di possibilità esistenti in natura di interesse pratico, caratterizzate da reazione con alta energia e cioè con alta f.e.m. E, restringendo il campo a poco più di una decina di soluzioni, che presentano per di più prestazioni pratiche sensibilmente inferiori a quelle teoriche.

Dal punto di vista economico, diverse valutazioni portano alla conclusione che le prospettive della trazione elettrica stradale sono legate alla disponibilità di batterie con costo specifico (riferito in pratica all'unità di energia resa nel corso della vita) dello stesso ordine di quello delle batterie convenzionali. Ciò forza ad escludere alcune soluzioni tecnicamente promettenti ma basate su materiali costosi, come pure quelle che richiedono tecnologie delicate non trasferibili su scala industriale.

**Confronto del costo chilometrico di batterie Pb-Acido, Fe-Ni e Zn-Ni, relativamente al caso di un automezzo di peso medio (1'360 kg equipaggiato con 450 kg di batterie), secondo ipotesi estreme sulla vita e sul costo iniziale delle batterie stesse:**

	Ipotesi più ottimistica			Ipotesi meno ottimistica		
	Pb-Acido	Fe-Ni	Zn-Ni	Pb-Acido	Fe-Ni	Zn-Ni
Ws batteria [Wh/kg] (scarica in 2 h)	37	60	80	37	60	80
Vita batteria [cicli]	1'000	4'000	750	500	2'000	500
Costo batteria [€]	670	1'900	2'180	550	1'770	1'820
Autonomia veicolo in percorso urbano secondo ciclo standardizzato SAE J 227 [km]	72	105	142	72	105	142
Costo specifico batteria [€/km]	0.93	0.47	1.85	1.55	0.83	2.48

La batteria al piombo migliorata sarebbe quella con il minor costo iniziale, mentre il minor costo chilometrico si avrebbe con la Fe-Ni. La batteria Zn-Ni sembrerebbe invece quella con più alto costo, compensato però da una maggiore autonomia.

*Le nuove batterie leggere*

### Le batterie di tipo avanzato

È chiaro che l'ingresso estensivo del veicolo elettrico nell'area delle autovetture private è subordinato alla disponibilità di batterie con prestazioni nettamente superiori a quelle derivanti dai perfezionamenti agli accumulatori convenzionali. Ciò richiede ancora un consistente impegno di ricerca e sviluppo.

Sino all'inizio degli anni '70 l'investimento mondiale per la ricerca sulle batterie non convenzionali superava di poco i 6.5 milioni di euro annui, incluse le attività sulle pile primarie e a combustibile. In tale periodo sono state tuttavia individuate diverse filiere suscettibili di sviluppi adeguati agli impieghi in oggetto.

All'investimento indotto o già avviato in molti Paesi è da aggiungere l'investimento privato. Sembra realistico che questo impegno dia frutti concreti in tempi ragionevoli.

La strada per incrementare le prestazioni delle batterie sta naturalmente nell'impiego di materiali attivi aventi nello stesso tempo elevatissima reattività e basso peso.

Le nuove batterie allo studio possono essere suddivise a grandi linee in due categorie:

- quelle con elettroliti acquosi operanti a temperatura ambiente;
- quelle operanti ad alta temperatura (tra i 150 °C ed i 450 °C) che utilizzano metalli alcalini allo stato fuso (od anche l'alluminio) i quali non sono compatibili con gli elettroliti acquosi.

### Principali caratteristiche delle batterie candidate agli impieghi veicolari

Sistema	Q di lavoro	E [V]	Ws <sub>t</sub> [Wh/kg]	Migliori prestazioni attuali			Prestazioni attese			
				Ws [Wh/kg]	Ps di punta [W/kg]	Vita [cicli]	Ws [Wh/kg]	Ps di punta [W/kg]	Vita [cicli]	h energetico
<b>Pb-Acido</b>	Ambiente	2.05	166	35	100	400	45	150	500	> 0.65
<b>Fe-Ni</b>	Ambiente	1.37	260	40	120	1'000	60	> 120	> 2'000	0.55
<b>Zn-Ni</b>	Ambiente	1.7	320	60	110	200	80	150	> 500	> 0.6
<b>Zn-Aria</b>	Ambiente	1.3	1'050	80	40	150	90	80	1'000	> 0.5
<b>Zn-Cloro (idrato)</b>	Ambiente con idrato raffreddato a 10 °C	2.1	422	65	60	100	140	150	500÷5'000	> 0.6
<b>Na-Solfuri</b>	300÷370 °C	1.8÷2.1	700	80	100	> 1'200	170	200	> 1'000	0.75
<b>Li-Solfuri metallici</b>	380÷450 °C	1.3÷1.8	460÷1'320 in funzione del tipo di solfuro	120	120	250	150	250	1'000	> 0.75

### Configurazione dei propulsori elettrici convenzionali

#### Funzioni del propulsore elettrico

Questo è, in effetti, uno degli elementi che maggiormente influiscono sul bilancio tecnico-economico del veicolo: le sue caratteristiche governano le prestazioni, il gradimento di guida, il costo del veicolo ed infine il rendimento di uso dell'energia accumulata nella batteria, che determina in ultima analisi l'autonomia.

In termini generali, il sistema di propulsione costituisce l'interfaccia che provvede all'adattamento tra l'energia elettrica disponibile ai morsetti della batteria e l'energia meccanica continuamente variabile richiesta all'asse delle ruote.

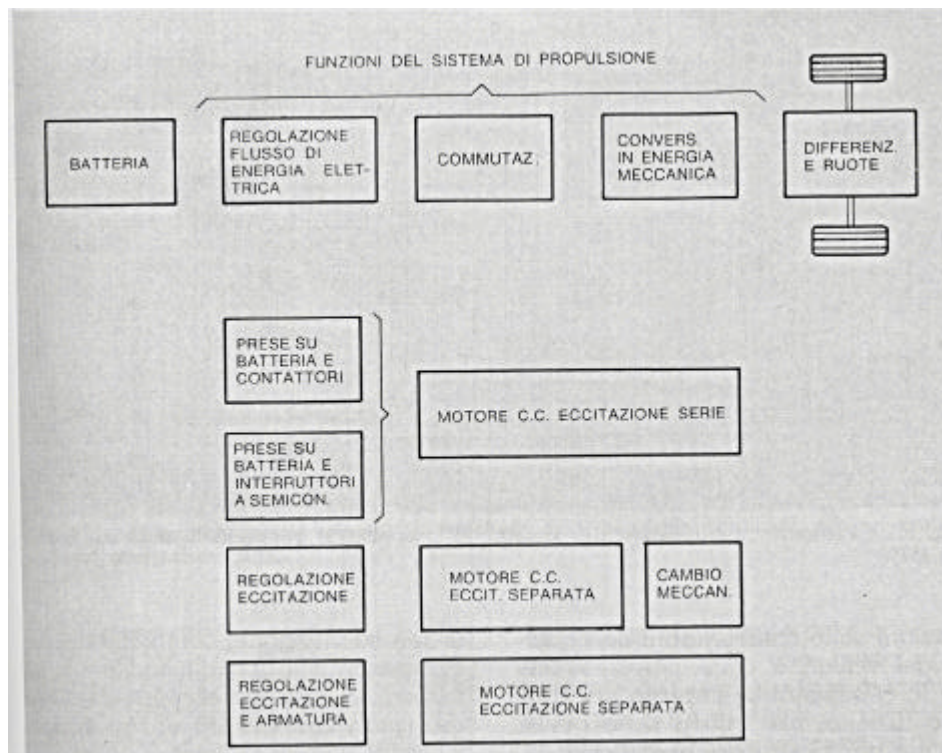
Più in dettaglio, esso ha tre funzioni distinte:

- la funzione di regolazione e in pratica l'adeguamento del flusso di potenza, in termini di coppia e di velocità, agli intendimenti di guida;
- la funzione di commutazione, per l'alimentazione ciclica degli elementi attivi del motore a partire dalla tensione continua di batteria;
- la funzione di conversione dell'energia elettrica in energia meccanica in forma rotante.

In pratica, la funzione di commutazione può essere assegnata allo stesso motore elettrico come nel caso dei motori a corrente continua a collettore.

**Funzioni della propulsione del veicolo elettrico e loro assolvimento in alcune delle più significative soluzioni, tra le numerose varianti possibili. Ciascuna ha pregi e difetti sia in termini tecnici e funzionali, sia in termini economici.**





Un recente studio comparativo su diverse soluzioni ha condotto ad una qualificazione tecnico-economica. I risultati di questo studio individuano due gruppi principali di sistemi:

- il primo, che s'identifica con lo stato della tecnica già ampiamente adottata su veicoli per impieghi specifici (carrelli per usi interni, golf-cart) è caratterizzato da basso costo e buon rendimento, ma presenta difetti o limitazioni sotto l'aspetto funzionale;

GRUPPO	SISTEMA	OSSERVAZIONI FUNZIONALI
1	MOTORE C.C. ECCITAZIONE SERIE CONTATTORI	DISCONTINUITÀ DI COPPIA IN ACCELERAZIONE DISCONTINUITÀ DI VELOCITÀ A REGIME MANCANZA DI FRENATURA A RICUPERO
1	MOTORE C.C. ECCITAZIONE SEPARATA CAMBIO MANUALE	NECESSITÀ CAMBIO MANUALE
1	MOTORE C.C. ECCITAZIONE SEPARATA CONTATTORI	MODERATE DISCONTINUITÀ DI COPPIA IN ACCELERAZIONE ALLE BASSE VELOCITÀ

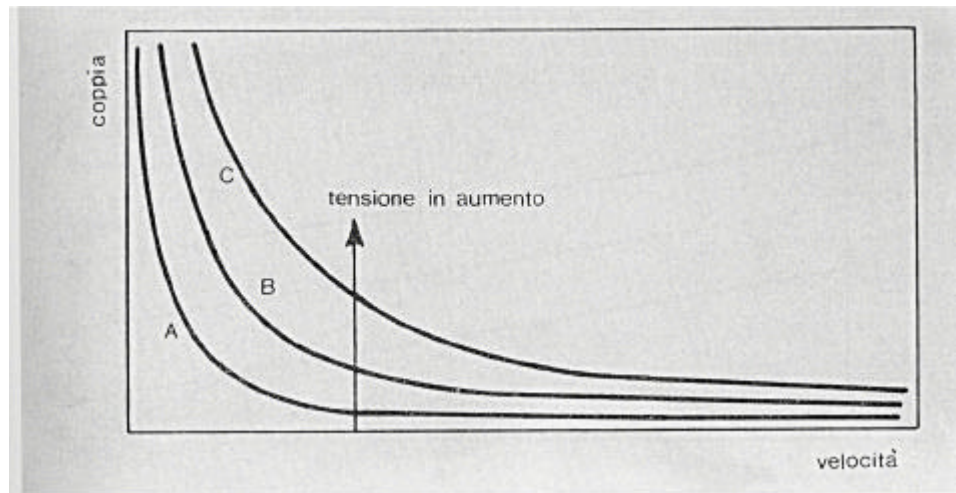
- il secondo riunisce i propulsori basati su di una tecnologia più avanzata ma già disponibili oggi. Le prestazioni sono confrontabili con quelle dei veicoli a combustione interna in condizioni di impiego nel traffico urbano, ma i costi sono ovviamente più elevati dei precedenti.

GRUPPO	SISTEMA	OSSERVAZIONI FUNZIONALI
2	MOTORE C.C. ECCITAZIONE SEPARATA TRASMISSIONE AUTOMATICA	

### I motori convenzionali in continua

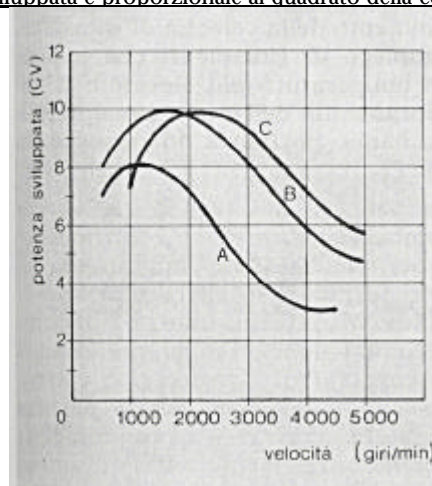
Il motore ad eccitazione serie è da sempre considerato una soluzione ideale per le applicazioni nel campo della trazione poiché, a tensione costante, sviluppa in condizioni di stallo una coppia assai maggiore di quella che fornisce all'aumentare della velocità.

La regolazione della coppia ad una certa velocità può essere ottenuta variando la tensione di alimentazione.



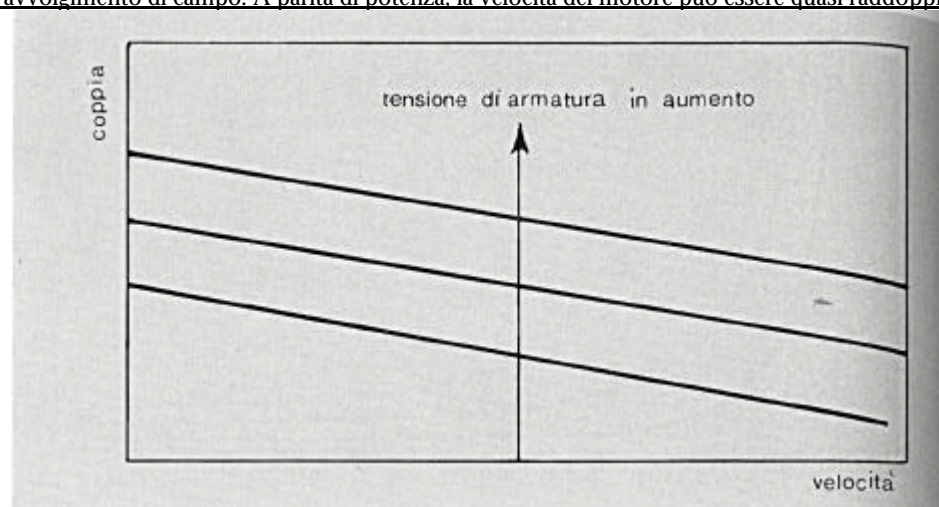
Relazione coppia-velocità per un motore c.c. con eccitazione serie in funzione della tensione di alimentazione applicata, nella quale le curve da A a C si riferiscono ad un graduale aumento di quest'ultima. L'andamento iniziale delle curve, lontano dalle condizioni di saturazione, deriva dal fatto che la coppia sviluppata è proporzionale al quadrato della corrente circolante.

L'indebolimento del campo, ottenuto shuntando una parte della corrente dell'avvolgimento, offre ulteriore margine di regolazione. Questo non può però essere adottato a bassa velocità, perché comporta instabilità di funzionamento che possono anche portare all'inversione della coppia.



Effetto dell'indebolimento del campo per un motore serie. La curva A rappresenta la caratteristica nominale, mentre nelle curve B e C una parte della corrente è shuntata da una resistenza in parallelo all'avvolgimento di campo. A parità di potenza, la velocità del motore può essere quasi raddoppiata.

Nel motore con eccitazione in derivazione ed in condizioni di eccitazione costante, la coppia sviluppata è solo direttamente proporzionale alla corrente d'indotto e l'andamento delle curve caratteristiche è lineare.

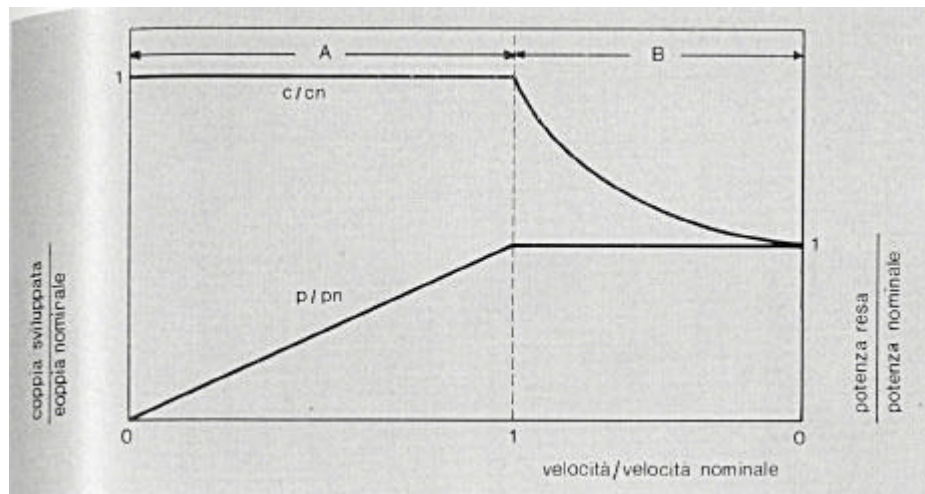


Relazione coppia-velocità in funzione della tensione di armatura ed ad eccitazione costante per un motore in c.c. con eccitazione separata

La potenza necessaria per l'eccitazione è essenzialmente uguale a quella per il motore serie, ma in questo caso la tensione di eccitazione è molto più alta ed è quindi sufficiente una debole corrente di campo, in pratica qualche per cento di quella di armatura, che può essere controllata con maggior facilità. In un intervallo di variazione della velocità da 1:3, per questo motore è in pratica sufficiente la regolazione di campo. In questo caso il controllo non è

pratico a velocità molto bassa. Inoltre, l'intervallo di velocità richiesto per le applicazioni veicolari su strada è alquanto maggiore di quello menzionato, e quindi anche per questo motore è necessario adottare la regolazione della tensione di armatura.

Nella pratica usuale l'eccitazione è mantenuta costante sino alla velocità nominale del motore, agendo sulla tensione di armatura per la regolazione della velocità, mentre per aumentare quest'ultima sopra di quella nominale la tensione di armatura è mantenuta costante ed il campo è indebolito.

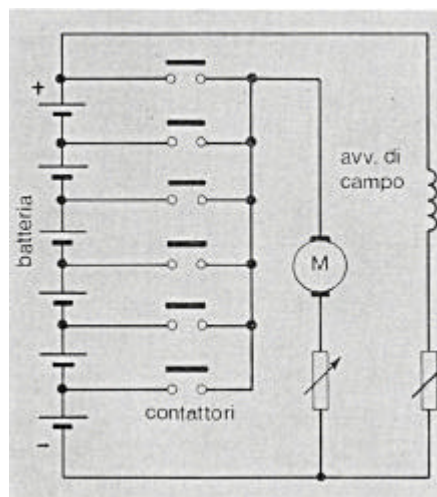


Caratteristiche coppia-velocità di un motore c.c. con eccitazione separata. L'intervallo A si riferisce al funzionamento con eccitazione costante e tensione di armatura crescente. Al raggiungimento della tensione massima la velocità è ulteriormente aumentata riducendo l'eccitazione e quindi la coppia (intervallo B) in modo da non superare la potenza nominale del motore

I perfezionamenti introdotti in questi ultimi anni nei motori in corrente continua, in particolare attraverso l'aumento della velocità di rotazione, l'impiego di isolamenti che tollerano temperature più elevate ed il miglioramento dell'evacuazione termica, hanno portato a potenze specifiche che raggiungono i 140-150 W/kg. In condizioni di regime ampiamente variabile, come nel traffico urbano, il motore elettrico, che è largamente sovraccaricabile, può essere dimensionato per una potenza media sensibilmente inferiore.

### **I regolatori elettromeccanici**

La grande maggioranza dei veicoli elettrici oggi circolanti, come i carrelli per usi interni, è equipaggiata con regolatori elettromeccanici. Nella configurazione essenziale la batteria è provvista di una serie di prese intermedie, che sono connesse al motore attraverso una serie di contatti. Dopo che la piena tensione è applicata all'avvolgimento di armatura, un ulteriore aumento della velocità può essere ottenuto riducendo la corrente di campo. Per rendere la regolazione meno discontinua è spesso presente anche un reostato nel circuito di armatura, che è



Regolatore elettromeccanico per un veicolo con motore ad eccitazione in derivazione

gradualmente escluso  
dopo la commutazione da  
un gradino all'altro.

Il circuito è in pratica più complesso di quello indicato per la presenza di ulteriori commutatori sequenziali intesi a scaricare uniformemente le diverse sezioni di batteria.

### **La frenatura a recupero**

La decelerazione o la frenatura di un automezzo richiedono la riduzione dell'energia cinetica accumulata nella sua massa e sono in pratica ottenute dissipando tale energia nei freni.

Nel caso degli automezzi elettrici una consistente azione frenante può essere ottenuta invertendo il senso di connessione dell'avvolgimento di armatura o di quello di campo, in modo da sviluppare una coppia meccanica di segno opposto a quella normale (plug braking). In queste condizioni l'energia cinetica del veicolo è dissipata negli avvolgimenti del motore stesso ed in presenza di frenate frequenti può provocare il surriscaldamento. Questa tecnica era già adottata su alcuni veicoli realizzati poco dopo il 1900.

Un'altra possibilità è di sconnettere il motore dalla sorgente di alimentazione, invertendo le connessioni di campo o di armatura in modo da utilizzarlo come un generatore e di dissipare l'energia elettrica generata, ottenute a spese dell'energia cinetica del mezzo, in un'opportuna resistenza di frenatura.

Per gli automezzi a batteria, una soluzione più razionale è di utilizzare l'energia cinetica per ricaricare parzialmente la batteria ad ogni frenata, invece di sciupare in calore tale energia.

Ciò richiede però di adattare istante per istante, durante la fase di decelerazione, la tensione continuamente decrescente ai morsetti del generatore a quella pressoché costante e di ampiezza maggiore della batteria. Occorre, in altri termini, un dispositivo che dalla duplice funzione di regolatore e di trasformatore elevatore in corrente continua.

In pratica, la logica di controllo del regolatore è impostata in modo che al rilascio del pedale acceleratore abbia origine una blanda azione di recupero che comporta sul veicolo una decelerazione assimilabile all'azione frenante del motore degli automezzi convenzionali a combustione. Il recupero e l'azione frenante sono intensificati agendo sul pedale del freno. Al termine della corsa del pedale interviene il freno idraulico convenzionale.

### **Situazione della tecnica**

Nel confronto tra motore serie e motore con eccitazione separata non si configura un chiaro sopravvento. Quello con eccitazione separata presenta un rendimento e prestazioni leggermente migliori, ma ha per contro un costo più elevato dovuto. Propulsori di questo tipo trovano già applicazione sugli automezzi elettrici più recenti adibiti ad impieghi specializzati nell'ambito urbano.

Per i veicoli elettrici della prossima generazione, alimentati dalle batterie al nichel che si profilano nel breve o medio termine, sembra realistico che il propulsore resti basato sulla tecnica in questione, ormai collaudata ed affidabile.

Le caratteristiche del propulsore ed in particolare il suo rendimento, il peso ed il costo, hanno d'altra parte per il veicolo elettrico, un peso molto maggiore che non per gli automezzi tradizionali. Oltre al perfezionamento ed all'ottimizzazione delle soluzioni convenzionali, negli ultimi anni si sono perciò innescati numerosi studi su propulsori con caratteristiche più avanzate, in grado di utilizzare meglio la modesta quantità di energia immagazzinata nella batteria e con costo e peso inferiori.

### ***Propulsori di tipo avanzato***

Per molto tempo l'opinione preminente sui veicoli elettrici è stata che il loro sviluppo fosse del tutto condizionato da quello di batterie radicalmente nuove. Le realizzazioni e le esperienze degli ultimi anni hanno dimostrato che il giusto approccio al problema è piuttosto di costruire attorno ad una sorgente di energia limitata come la batteria, un «sistema veicolo» ottimizzato, in grado di utilizzare tale energia nel migliore dei modi.

Le direzioni in cui si sviluppano l'attività e gli studi in questo campo possono essere classificate in base alla posizione nel tempo dei rispettivi obiettivi.

### **Motori di tipo avanzato**

In prospettiva, il miglioramento del sistema di propulsione per veicoli a batteria punta sull'aumento del rendimento, che contribuirebbe all'estensione dell'autonomia, sulla riduzione del peso e dell'ingombro del motore, che consentirebbe il suo incorporamento nelle ruote in modo da eliminare il differenziale meccanico e naturalmente sulla riduzione del costo del propulsore stesso che incide eccessivamente sul costo totale del veicolo. È da notare che almeno in prima approssimazione il costo ed il peso dei motori elettrici vanno di pari passo.



Studi recenti della General Electric indicano che per i motori di tipo convenzionale il margine di miglioramento nelle direzioni indicate è assai modesto. Prendendo come esempio il motore in corrente continua, l'effetto combinato di una riduzione delle perdite di armatura ottenuta aumentando il rame, di un dimezzamento delle perdite meccaniche nel ferro ottenuto utilizzando lamierini più sottili e di un dimezzamento delle perdite meccaniche e di ventilazione, porterebbe ad un aumento dell'autonomia del veicolo non superiore al 5%. Nello stesso tempo il motore diverrebbe più pesante e ingombrante e più costoso.

Per ottenere miglioramenti rilevanti, i maggiori orientamenti puntano piuttosto sull'adozione di motori di tipo non convenzionale.

### *Prospettive di diffusione del veicolo elettrico*

La conclusione è che il veicolo elettrico è non solo auspicabile ma anche tecnicamente fattibile.

### **Le alternative al veicolo elettrico**

Per affrontare il problema ed in altre parole le prospettive di diffusione del mezzo elettrico, una prima domanda che si può porre è se in fondo non vi siano, oltre a quella elettrica, altre alternative in grado di risolvere i problemi energetici ed ambientali.

### **L'urgenza**

Un'altra ottica dalla quale guardare il problema è quella temporale: è poi così necessario intraprendere sin d'ora azioni per promuovere la diffusione del mezzo elettrico?

Nel periodo 1985-2000 i consumi italiani di petrolio assorbiti dal settore dei trasporti stradali si sono mantenuti costanti. Tenendo conto dello sviluppo demografico e del corrispondente incremento di veicoli ed anche di una progressiva riduzione delle percorrenze annue in ragione del 15% tra il 1985 ed il 2000 a seguito di una diversa politica dei trasporti pubblici e della saturazione della circolazione, la conclusione è che una frazione pari al 5% ed al 10% dei veicoli circolanti rispettivamente negli anni 1990 e 2000 è alternativo al tipo a benzina. Tali frazioni corrispondono a 1.1 e 2.5 milioni di veicoli.

Ovviamente, questi veicoli alternativi non sono per forza elettrici. Tuttavia, la posizione di vantaggio di quest'ultimi per quanto riguarda energia ed ambiente ne fa dei candidati favoriti se non preferenziali per il futuro.

L'evento veicolo elettrico è perciò forse ineluttabile. I tempi tecnici disponibili per la ricerca, lo sviluppo, le esperienze sperimentali su base estesa e l'avvio di una produzione su scala industriale di questi veicoli, sono limitati a solo 10-15 anni. Sufficienti solo se l'argomento è affrontato sin d'ora su una base adeguata.

Oltre che vantaggioso per l'energia e l'ambiente, e oltre che fattibile, esso sembra anche urgente e forse inevitabile. Certo, le possibilità di concreta introduzione di questo veicolo sono strettamente connesse con le prestazioni che esso può rendere ed una diffusione estesa è inevitabilmente legata al perfezionamento delle batterie.

D'altra parte ed in tale attesa, le prestazioni ottenibili dalla tecnologia attuale ed addirittura da quella dello scorso decennio, sono certamente adeguate quanto meno ad applicazioni di tipo specializzato, come il trasporto di merci e persone nell'ambito urbano. Proposte in questo senso sono all'ordine del giorno da parecchi anni.

La diffusione del veicolo elettrico non si è, di fatto, verificata neppure per questi impieghi specializzati. Il decollo del mezzo elettrico non c'è stato: segno che vi sono altri aspetti di cui tenere conto.

### **I costi**

Il veicolo elettrico è intrinsecamente più semplice di quello a benzina. Il motore elettrico si compone di poche decine di parti ed il motore a scoppio di parecchie centinaia. Inoltre, nel motore elettrico c'è un solo pezzo – l'albero – che richiede una tolleranza di lavorazione di 1/100 mm, mentre tolleranze di quest'ordine, o anche più severe (fino a pochi millesimi di millimetro) sono necessarie su circa quaranta parti del motore a scoppio. Ne deriva che in una produzione su scala industriale il motore elettrico dovrebbe per lo meno essere competitivo con quello tradizionale.

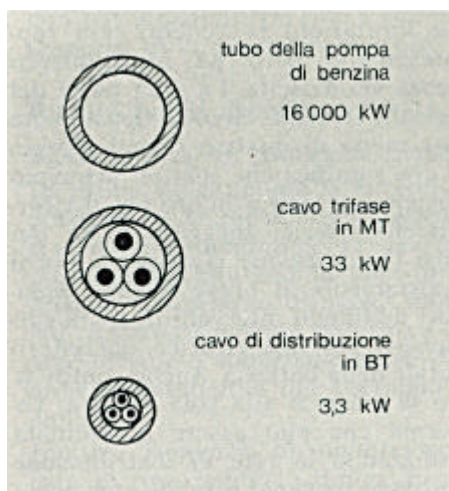
Allo stato attuale, tuttavia, il costo di un veicolo elettrico è un multiplo (da 1.5 a 4 volte) di quello dell'equivalente mezzo tecnico. Ciò dipende dal fatto che la scala di produzione del primo è oggi veramente limitata: i motori in continua con potenza unitaria di 10-30 kW, adatti agli automezzi elettrici, sono prodotti in Italia in poche migliaia di pezzi l'anno, contro i milioni di motori termici della stessa taglia.

Agli alti costi degli organi di base, si deve aggiungere l'alto costo del lavoro per l'assemblaggio, che è oggi fatto su scala pressoché artigianale soprattutto se il veicolo deriva dalla conversione di uno termico non concepito specificatamente per tale scopo. La soluzione a tale situazione sarebbe l'espansione del mercato, che innescherebbe economie di scala in grado di ridurre i costi. L'alto prezzo attuale scoraggia tale espansione, perciò si determina un circolo vizioso che ha impedito e che impedisce tuttora il decollo del nuovo mezzo.

## L'infrastruttura

L'altro fattore condizionante per la diffusione del mezzo elettrico riguarda il rifornimento di energia al veicolo.

Il rifornimento completo di una vettura tradizionale con un serbatoio da 30 l (corrispondenti ad un contenuto energetico di 270 kWh) è effettuato in un solo minuto, perciò la potenza trasmessa dalla pompa di benzina è di oltre 16 MW. Al confronto, un cavo elettrico trifase in media tensione con la stessa sezione del tubo della pompa ha una potenzialità di soli 33 kW ed il cavo in bassa tensione di un normale allacciamento domestico è limitato a soli 3.3 kW.



Potenza dei condotti per il rifornimento di energia ai veicoli

Ne deriva che il tempo di rifornimento di energia al veicolo elettrico è molto maggiore, anche se la quantità di energia da immagazzinare è 4÷5 v inferiore in virtù del miglior rendimento del propulsore elettrico rispetto a quello termico.

D'altra parte le stesse batterie richiedono tempi di ricarica relativamente lunghi (dell'ordine di alcune ore) perché i processi elettrochimici abbiano luogo in modo efficiente e senza effetti deleteri per le parti attive. Le limitazioni precedenti non rappresentano però un impedimento senza via d'uscita. La gran parte dei veicoli stradali circola tipicamente meno di 4 h al giorno, il che significa che sono in principio disponibili sino a 20 h per il rifornimento. Nella maggior parte dei casi l'uso si riduce a pochi spostamenti di breve durata, separati da lunghi intervalli di sosta sufficienti per una ricarica parziale o totale della batteria. Confinando la ricarica alla sola nottata, l'energia che può essere accumulata utilizzando la rete di distribuzione in bassa tensione, sarebbe sufficiente per coprire circa 150 km, più che abbastanza per la grande maggioranza delle percorrenze giornaliere.

È però evidente che per assicurare questa possibilità di ricarica occorre avere adeguati punti di rifornimento presso il maggior numero possibile di aree di stazionamento (nei parcheggi pubblici e privati, lungo i marciapiedi, nelle autorimesse, nei box privati, ecc.). È anche possibile la rapida sostituzione meccanica della batteria scarica con una già carica, presso stazioni automatizzate, anche se i mezzi tecnici da mettere in opera sono più consistenti. Le stesse stazioni provvederebbero anche alla manutenzione ed all'assistenza delle batterie in condizioni più controllate di quanto potrebbe fare il singolo utente.

L'ossatura di un'infrastruttura di questo tipo esiste già ed è la rete elettrica di distribuzione, che è anche più fittamente ramificata della tradizionale rete di rifornimento. Ciò che resta da realizzare sono i «terminali» dell'infrastruttura. Per questi, i problemi da risolvere consistono nel rendere la connessione tra rete pubblica e veicolo altrettanto sicura e semplice che per gli altri usi dell'energia elettrica e nell'eliminare le perturbazioni introdotte in rete dalle armoniche generate dai caricabatteria.

Da notare che anche una larga diffusione dei veicoli elettrici avrebbe modeste ripercussioni

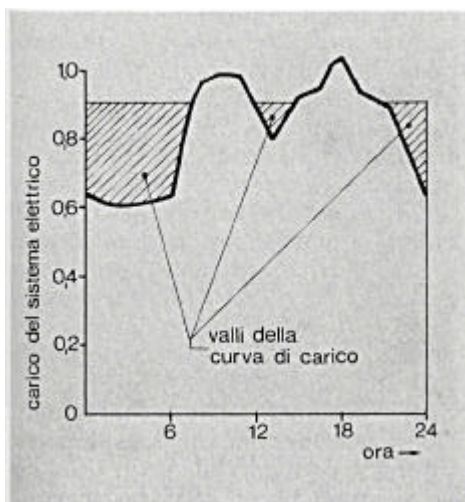
sull'incremento dei consumi totali di energia elettrica. Stime in proposito indicano ad esempio che se il parco circolante in Italia fosse il 30% elettrico, la corrispondente domanda di energia elettrica si aggirerebbe solo sul 4% di quella totale che si prevede sarà globalmente prodotta. Se la ricarica fosse fatta prevalentemente di notte ed in pratica nelle ore di basso carico, l'effetto dell'auto elettrica sarebbe di appiattire i diagrammi di carico degli impianti di generazione, favorendo così un più razionale ed economico uso degli stessi. In queste condizioni il costo dell'energia elettrica prodotta sarebbe solo quello marginale (ed in altre parole quello del solo combustibile fossile bruciato in centrale) e sarebbe pertanto economicamente vantaggioso per l'utente.

Una condizione essenziale per l'economia dell'infrastruttura è una qualità tecnica che permetta periodi di ammortamento di alcune decine d'anni, come per la gran parte delle installazioni pubbliche. Ciò presuppone che la tecnica non vari sensibilmente in tale intervallo e non può ottenersi che attraverso una standardizzazione oculata, fatta al momento giusto ed orientata verso il lungo termine.

Un aspetto nuovo da affrontare riguarda infine la fatturazione dell'energia: non essendo la fornitura destinata ad un cliente determinato, dovranno essere concepiti metodi nuovi di conteggio e fatturazione. Tra le alternative all'esame vi è anche il noleggio dell'intera batteria con il suo contenuto energetico, che permetterebbe anche di non gravare l'utente del costo di primo acquisto della batteria stessa. È chiaro tuttavia che gli elevati investimenti necessari per creare un sistema del tipo descritto si giustificano solo se la densità di utenza è sufficientemente elevata da portare ad un basso costo di esercizio. Di nuovo, quindi, affiora un problema di decollo: l'auto elettrica non potrà pagarsi le spese finché non sarà sufficientemente diffusa e peraltro non potrà diffondersi fino a che non avrà solide infrastrutture.

### **Ricetta per il decollo**

In primo luogo, le potenzialità tecniche degli automezzi elettrici disponibili nel breve e medio termine limitano la



Tipico diagramma di carico del sistema elettrico di generazione. Con un'opportuna allocazione dei periodi di ricarica, il veicolo elettrico contribuirebbe a colmare le valli del diagramma favorendo un miglior uso degli impianti

loro introduzione nell'ambito di quegli impieghi sistematicamente confinati in aree urbane o suburbane entro il limite di autonomia del centinaio di chilometri.

Inoltre, l'assenza di un'infrastruttura di tipo pubblico limita le possibilità d'inserimento ai soli casi in cui sia possibile la ricarica in aree riservate come autorimesse o box privati, od in cui sia possibile realizzare infrastrutture locali a servizio di parchi specializzati di automezzi. Infine, per contenere il costo di produzione è necessario configurare dei mercati di sufficienti dimensioni.

Questi dunque gli ostacoli. Quale strategia può essere adottata per superarli ed innescare la diffusione dei veicoli elettrici?

Le possibilità di concreta introduzione sono legate all'effettiva esistenza, nell'attuale tessuto dei trasporti, di settori con requisiti compatibili con i vincoli precedenti. Tali settori esistono ed includono un rispettabile numero di automezzi. In quest'ambito, il mercato più esteso è certamente quello dei veicoli per impieghi commerciali ed industriali appartenenti ai parchi di grandi aziende od enti che confinano alcune loro attività nell'ambito urbano, e che possono realizzare infrastrutture di ricarica localizzate a servizio dei propri parchi concentrati.

In pratica, i campi di applicazione possono essere:

- a) quelli che richiedono percorrenze giornaliere contenute nell'autonomia del mezzo elettrico, come parecchi impieghi delle aziende a carattere pubblico (elettricità, telefoni, gas) relativi a lavori su impianti od a collegamenti con le utenze; usi analoghi si ritrovano anche presso molte aziende municipalizzate (raccolta dei rifiuti urbani, pulizia delle strade, illuminazione pubblica) o nell'ambito di servizi in aree riservate come aeroporti o fiere;
- b) quelli caratterizzati da percorsi ripetitivi lungo i quali allestire punti di appoggio per estendere l'autonomia attraverso il ricambio rapido delle batterie (trasporti pubblici, servizi postali);
- c) quelli che consentono la ricarica parziale della batteria durante le soste, come i sistemi di taxi pubblici a noleggio autorizzati a circolare in aree precluse ad altri automezzi quali le isole pedonali.

In Italia, tali settori potrebbero assorbire sin d'ora parecchie decine di migliaia di veicoli elettrici. È chiaro che sebbene la percorrenza media giornaliera delle autovetture private rientri nei limiti di autonomia del mezzo elettrico, la necessità occasionale di far fronte a lunghi percorsi ne preclude l'impiego salvo quale seconda vettura familiare.

Per l'avviamento di una produzione economica degli automezzi elettrici adatti agli impieghi menzionati, si tratta di individuare un numero limitato di categorie di veicoli in grado di soddisfare il maggior numero possibile di esigenze, configurando così per ciascuna categoria il mercato più ampio possibile. Interventi di coordinamento, promozione e sostegno in questo senso sono ovviamente essenziali in questa fase ed i favorevoli riflessi collettivi che ne deriverebbero in prospettiva giustificano che tali interventi siano assunti da organismi pubblici.

È chiaro che l'introduzione del veicolo elettrico nei settori indicati avrebbe riflessi trainanti e promozionali che stimolerebbero la sua progressiva adozione anche da parte della miriade di piccole e medie aziende che utilizzano automezzi di servizio nell'ambito cittadino. Ciò sarebbe favorito anche dal graduale perfezionamento dei veicoli soprattutto in conseguenza del miglioramento delle batterie. La riduzione dei costi conseguente all'espansione del mercato ed il contemporaneo accrescimento della densità di utenza nell'ambito urbano, giustificherebbero allora la graduale creazione di un'infrastruttura urbana di rifornimento, assistenza e manutenzione per il mezzo elettrico. Con il più lontano avvento delle batterie leggere, e dopo che si fosse lentamente instaurato nel grosso pubblico un nuovo abito mentale favorevole al mezzo elettrico, il terreno sarebbe infine pronto anche per l'ingresso dell'autovettura.

### *Il punto della situazione*

Da quanto sinora detto sembra realistico che con oculati interventi l'attività nel campo della trazione elettrica su strada possa essere orientata in modo da superare le difficoltà del suo periodo infantile, per passare gradualmente da una possibilità astratta ad una realtà tangibile.

Le nazioni con più limitate risorse energetiche sono naturalmente interessate in misura particolare all'argomento. La filosofia adottata è lo studio e l'introduzione di tecnologie complicate in grado di fornire prestazioni avanzate: da qui l'adozione di carrozzerie in resina, lo sviluppo di pezzi specifici e quello di batterie assai spinte sia di tipo convenzionale (piombo/acido, ferro/nichel) che di nuovo tipo (zinco/aria, ferro/aria).

<b>Veicolo</b>	<b>Daihatsu EV1</b>	<b>Toyota EV2</b>
Portata	4 persone	4 persone



Batterie	ferro/nichel	Batteria ibrida zinco/aria + piombo/acido
Peso batterie [kg]	500	530
Velocità [km/h]	101	83
Accelerazione da 0 a 40 km/h [s]	6	4
Autonomia su percorso misto [km]	200	250

In Italia l'impegno verso il veicolo elettrico è stato consistente. L'attività è stata in prevalenza intrapresa dall'iniziativa privata, soprattutto da parte dell'industria veicolistica. Tra le realizzazioni più interessanti sono da ricordare la riuscitissima vetturessa urbana X1/23 della FIAT, rimasta però a livello di prototipo e la vetturessa ZELE con carrozzeria in vetroresina realizzata da Zagato, che è invece stata commercializzata sia in Italia che all'estero e che ha trovato un'ottima accoglienza soprattutto negli USA con il nome *Elcar*.

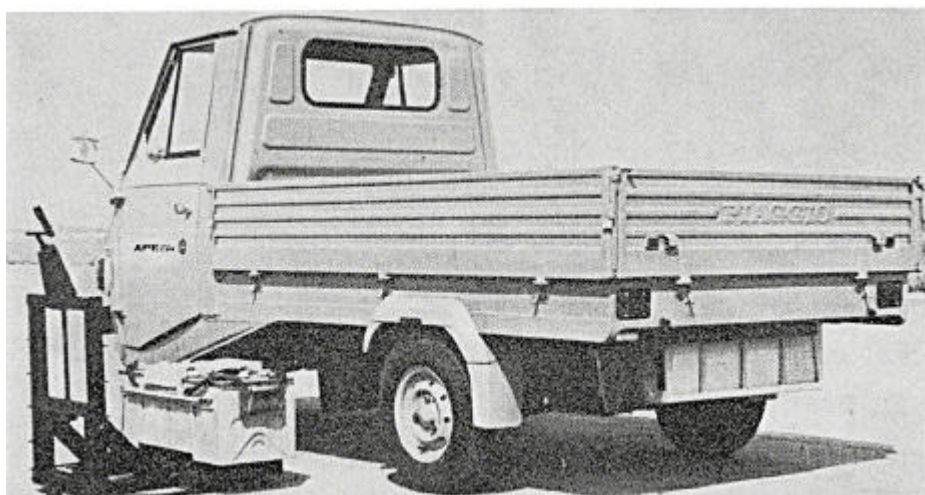


Prototipo della vettura elettrica cittadina Z1/23 della FIAT (2 posti, 80 km/h, autonomia 60 km). La vettura non è stata commercializzata ma ha denotato l'interesse dell'industria verso la trazione elettrica. La FIAT ha poi lavorato ad un'altra vettura elettrica, la ECOS, assieme al carrozziere Pininfarina.



La vetturessa a due posti ZELE, della Zagato, è stata commercializzata anche negli Stati Uniti con il nome di Elcar ed ha riportato un certo successo di vendita come seconda vettura familiare

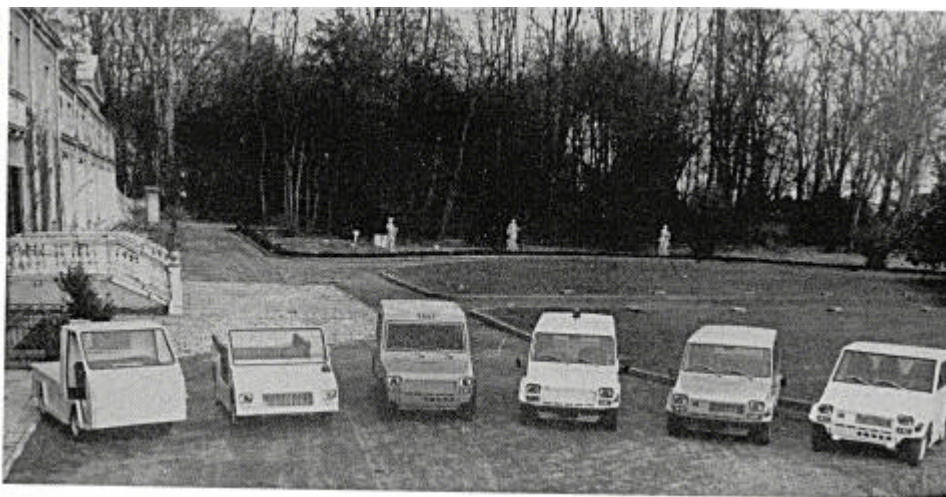
La PIAGGIO ha realizzato il motofurgone *Vespa Elettrocar*, convertito dalla versione termica. Tra i veicoli a due ruote, la Garelli propone il suo ciclomotore elettrico *Katia*. All'iniziativa di questi nomi già affermati in campo veicolistica si affianca quello di aziende nuove che operano esclusivamente in questo settore. Rimarchevole a questo proposito l'impegno della PGE (Progetti Gestioni Ecologiche), che ha studiato e messo a punto tutta una gamma di veicoli, che vanno dalle vetture urbane a tre e cinque posti di concezione originale e con interessanti caratteristiche, sino a piccoli scuolabus e furgoncini, anch'essi per impiego urbano. In quest'epoca che segna forse l'inizio del declino, quanto meno ideologico, del gigantismo industriale, quest'azienda propone, accanto al mezzo elettrico visto quale comoda alternativa per risolvere i problemi del traffico, anche una nuova concezione produttiva che vede nel ritorno a piccole unità produttive, decentrate ed autonome, la soluzione per la produzione economica dei beni salvaguardando la dimensione del lavoro. È in unità di questo tipo che nascono i veicoli della PGE.



Il VESPA-Elettrocar della PIAGGIO. È visibile il carrello per l'estrazione delle batterie, che sono distribuite in tre pacchi separati. Con 380 kg di portata, 45 km/h e 50 km di autonomia è stato adatto sia ad usi stradali che ad usi interni



Il ciclomotore elettrico KATIA della Garelli è tra i pochi veicoli elettrici che sono stati disponibili a livello commerciale. Aveva una velocità di circa 35 km/h ed un'autonomia di una quarantina di chilometri



La gamma dei veicoli elettrici sviluppati dalla PGE, con lo sfondo della splendida villa settecentesca che



ospitava l'unità di produzione pilota degli automezzi. Da sinistra a destra un furgone da 300 kg, una vettura scoperta da 6 posti, il taxi a 5 posti, l'autoambulanza, il nini scuolabus, la vettura 3 a tre posti anteriori. Le prestazioni di base sono una velocità di 60 km/h ed un'autonomia di 70 km, ma alcuni automezzi hanno una doppia motorizzazione, elettrica e termica, per consentire l'uso extraurbano

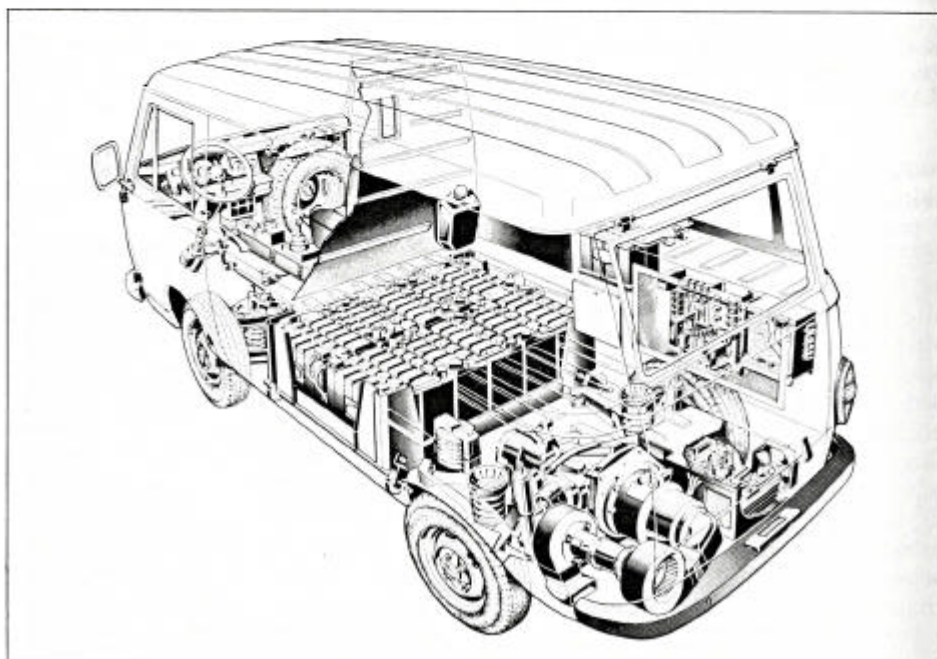
Quest'azienda ha anche ripreso su base più sofisticata l'idea del veicolo urbano a noleggio. Nel sistema PGE le stazioni di noleggio sono dislocate sia in prossimità di stazioni terminali dei mezzi pubblici ed aree di parcheggio esterne alla zona storica della città, sia in una fitta rete all'interno di questa zona alla distanza di 250-300 m l'una dall'altra.

Uno studio condotto su Firenze ha portato alla conclusione che un sistema di questo tipo basato su 1'500 veicoli elettrici permetterebbe di ridurre a 1/10 il numero totale di automezzi circolanti nel territorio urbano della città.

Nel sistema PGE un calcolatore centrale supervisiona tutte le operazioni che l'utente deve fare per l'accesso al veicolo, la prenotazione della stazione d'arrivo e la riconsegna del mezzo e provvede inoltre alla fatturazione dell'importo su conto corrente bancario ed al controllo della ricarica delle batterie durante le soste. Per l'accesso ai veicoli, l'utente deve essere provvisto di un'apposita scheda magnetica di riconoscimento, controllata automaticamente dal terminale di prelievo dei mezzi.

È evidente che anche in Italia l'applicazione su scala significativa dei veicoli elettrici non può verificarsi senza interventi di promozione e sostegno. Un ruolo assai attivo in questo senso è stato assunto negli ultimi anni dall'Ente Nazionale per l'Energia Elettrica, interessato sia per le implicazioni energetiche che per i citati vantaggi che deriverebbero al sistema elettrico di generazione.

Oltre che stimolare l'industria nazionale promuovendo lo sviluppo di veicoli, come il furgone FIAT-Enel X2/20 derivato dall'850 od il furgone di concezione originale PGE-Enel VAN 8, che sono stati adottati a scopi sperimentali dalle stesse unità operative dell'ente attraverso un parco dimostrativo che raggiunge la cinquantina di veicoli, l'Enel si è assunto compiti di coordinamento per coagulare l'interesse di quanti in Italia potrebbero nel breve o medio termine utilizzare veicoli elettrici. L'obiettivo finale è di configurare dei mercati di avviamento sufficienti a favorire economie di scala ed in definitiva il decollo del mezzo elettrico.



Dodici esemplari del furgone FIAT-Enel modello X2/20, derivato dall'850 a combustione, facevano

parte della flotta sperimentale dell'Enel. Altri dieci esemplari sono stati sperimentati dall'allora SIP. La velocità massima del veicolo è di 55 km/h e l'autonomia di 50 km



Il furgone VAN 8, realizzato dalla PGE con la cooperazione dell'Enel, aveva una struttura meccanica concepita specificatamente per la motorizzazione elettrica. Faceva parte del parco dell'Enel. Aveva una velocità di 60 km/h ed un'autonomia di 70 km

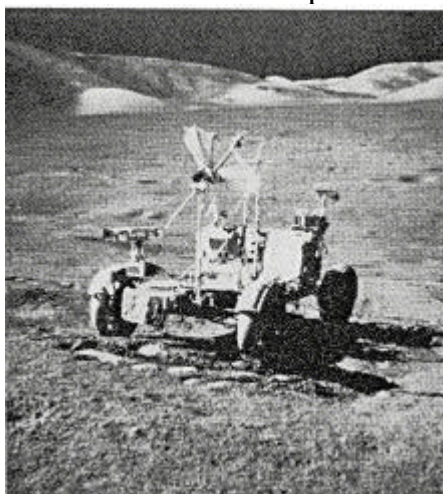
In tutti i Paesi industrializzati, le nuove realizzazioni e le iniziative di carattere organizzativo e promozionale si susseguono di giorno in giorno. Merita forse concludere con una tra le più ampie a livello europeo e cioè la recente costituzione dell'Association des Véhicules Electriques Routiers Européenne (AVERE), patrocinata dalla Commissione della CEE e cui l'Italia ha aderito.

Scopo dell'Associazione è di coordinare le azioni di sviluppo e di promozione in questo campo, in modo da rafforzare la posizione europea nei confronti di altre potenze industriali – in particolare quella statunitense e quella giapponese – che in un futuro non molto lontano potrebbero inserirsi pesantemente in questo nuovo segmento di mercato.

### **Conclusioni**

Quali dunque le prospettive del veicolo elettrico? La penetrazione in misura del 30% del parco veicolistica sarebbe sufficiente a coprire la maggior parte delle esigenze di trasporto nell'ambito urbano, ristabilendo condizioni di vita più umane nelle nostre città e lasciando ampio spazio agli altri tipi di veicoli necessari per soddisfare gli spostamenti a lungo raggio d'azione. Il veicolo elettrico non spodesterebbe nessuno, ma semplicemente s'integrerebbe in un tessuto dei trasporti forse più articolato ed ottimizzato di quello attuale.

Quale sarà la realtà? Chi è un sostenitore di questa causa fa proprie le parole di ottimismo pronunciate da J. Port, dell'Electric Vehicle Council: «siamo riusciti a mandare il veicolo elettrico sulla Luna. Perché non dovremmo riuscire a utilizzarlo su questo nostro pianeta?».



Il veicolo usato dagli astronauti americani sulla Luna nel 1971 era elettrico. Era mosso da quattro motori, uno per ruota, alimentati allo zinco-argento

### **Bibliografia**

TITOLO	AUTORE
L'AUTO ELETTRICA – LA TECNICA E LE PROSPETTIVE	MENGA
GENERATORI ELETTROCHIMICI PER VEICOLI ELETTRICI STRADALI	CLERICI - MARCHETTO



LA PILA A COMBUSTIONE NELLA TRAZIONE ELETTRICA	GRANDE
STATO DELL'ARTE E POSSIBILI SVILUPPI DEL VEICOLO ELETTRICO	BRUSAGLINO
PROSPETTIVE DI DIFFUSIONE DEL VEICOLO ELETTRICO	BOSSI – MENGA
LA PRODUZIONE DI VEICOLI PER I CENTRI ABITATI	DALLE MOLLE
LE PROSPETTIVE DI RILANCIO DEL VEICOLO ELETTRICO STRADALE DOPO CINQUE ANNI DI RICERCHE	MENGA