

Ao8



Vai al contenuto multimediale

Mario Olivari
Alessandro Olivo

La rivoluzione elettrica





Aracne editrice

www.aracneeditrice.it
info@aracneeditrice.it

Copyright © MMXVIII
Giacchino Onorati editore S.r.l. – unipersonale

www.giacchinoonoratieditore.it
info@giacchinoonoratieditore.it

via Vittorio Veneto, 20
00020 Canterano (RM)
(06) 45551463

ISBN 978-88-255-1844-3

*I diritti di traduzione, di memorizzazione elettronica,
di riproduzione e di adattamento anche parziale,
con qualsiasi mezzo, sono riservati per tutti i Paesi.*

*Non sono assolutamente consentite le fotocopie
senza il permesso scritto dell'Editore.*

I edizione: ottobre 2018

Indice

7 Capitolo I

La mobilità elettrica

1.1. La rivoluzione elettrica nella mobilità, 7 – 1.2. Le problematiche dell'attuale mobilità urbana, 11 – 1.3. L'autovettura elettrica, 17 – 1.4. L'appetibilità dell'auto elettrica, 24 – 1.5. La risposta del mercato all'autovettura elettrica, 30 – 1.6. Le previsioni dei mercati e l'opinione degli esperti, 34 – 1.7. I mezzi elettrici collettivi, 39 – 1.7.1. *I bus elettrici a batteria, Beb*, 41 – 1.7.2. *Il mercato dei Beb*, 42 – 1.7.3. *I bus a fuel cell, Fceb*, 44 – 1.7.4. *Il mercato europeo dei Fceb*, 45 – 1.7.5. *Il mercato extraeuropeo dei Fceb*, 46 – Bibliografia, 48.

51 Capitolo II

Le tipologie di veicoli elettrici

2.1. I sistemi di alimentazione, 51 – 2.2. I veicoli stradali a batterie, *Bev*, 51 – 2.3. I veicoli stradali a idrogeno e cella a combustibile, 53 – 2.3.1. *Applicazioni delle FC*, 54 – 2.4. Altri sistemi di alimentazione, 56 – 2.4.1. *Le tipologie di ibridi*, 57 – Bibliografia, 62.

63 Capitolo III

Le batterie e i Bev

3.1. I veicoli a batteria, 63 – 3.2. Evoluzione delle batterie, 63 – 3.3. Batterie innovative sperimentali, 73 – 3.4. Scelta della batteria, 77 – 3.5. Dismissione e riciclo delle batterie, 80 – 3.6. I supercondensatori, 81 – 3.7. Gli autoveicoli elettrici a batterie, individuali e collettivi, 85 – 3.7.1. *I veicoli elettrici stradali*, 85 – 3.7.2. *I mezzi individuali a batteria, Bev*,

86 – 3.7.3. *I Bev in commercio*, 87 – 3.7.4. *I cicli di guida*, 89 – 3.7.5. *Autonomia delle auto a batteria*, 92 – 3.7.6. *Il mercato attuale delle auto elettriche*, 94 – 3.7.7. *I mezzi elettrici collettivi*, 95 – 3.7.8. *I bus elettrici a batteria*, *Beb*, 97 – 3.8. *La ricarica delle batterie*, 101 – 3.8.1. *Le modalità di ricarica*, 103 – 3.8.2. *La ricarica induttiva*, 104 – 3.8.3. *Mezzi elettrici e reti intelligenti*, 106 – 3.8.4. *I servizi di rete offerti dal veicolo*, 107 – 3.8.5. *Le smart grid e l'evoluzione della rete elettrica*, 111 – 3.9. *L'inquinamento culla-tomba dei Bev*, 112 – *Bibliografia*, 120.

123 Capitolo IV *L'autotrazione a idrogeno*

4.1. *L'idrogeno come combustibile*, 123 – 4.2. *La produzione di H₂ per autoveicoli*, 124 – 4.2.1. *La fornitura di H₂ alle stazioni*, 128 – 4.2.2. *I costi delle stazioni di rifornimento*, 130 – 4.3. *La cella a combustibile*, 131 – 4.3.1. *Efficienza della fuel cell*, 134 – 4.4. *I veicoli a fuel cell e idrogeno*, *Fcev*, 136 – 4.4.1. *L'auto a fuel cell*, *Fcev*, 136 – 4.4.2. *Il bus a fuel cell*, *Fceb*, 141 – *Bibliografia*, 148.

151 Capitolo V *Confronti Bev vs Fcev*

5.1. *Efficienza di batterie e celle a idrogeno*, 151 – 5.2. *Confronti Bev vs Fcev*, 153 – 5.2.1. *Un confronto alternativo tra auto Bev e Fcev*, 155 – 5.3. *Considerazioni*, 165 – 5.3.1. *L'autonomia dei mezzi*, 165 – 5.3.2. *L'efficienza energetica WTW*, 167 – 5.3.3. *L'alimentazione da fonti rinnovabili*, 167 – 5.3.4. *Il rifornimento*, 168 – 5.3.5. *La rete di rifornimento*, 170 – 5.3.6. *Il costo operativo*, 171 – 5.3.7. *Il costo delle auto*, 171 – 5.3.8. *L'impatto ambientale*, 172 – 5.4. *Conclusioni*, 173 – *Bibliografia*, 175.

177 Capitolo VI *I motori elettrici*

6.1. *I motori elettrici per autoveicoli*, 177 – 6.1.1. *La caratteristica meccanica*, 177 – 6.2. *Gli azionamenti elettrici*, 183 – 6.2.1. *Motore in corrente continua c/spazzole (BDC)*, 183 – 6.2.2. *Motore in corrente continua s/spazzole (BLDC)*, 188 – 6.2.3. *Motore a corrente alternata sincro*, 192 – 6.2.4. *Motore asincrono o a induzione*, 193 – 6.3. *Confronto tra motori elettrici e Ice*, 197 – 6.4. *La trasmissione*, 200 – 6.5. *Conclusioni*, 201 – *Bibliografia*, 203.

La mobilità elettrica

1.1. La rivoluzione elettrica nella mobilità

La rivoluzione nell'attuale assetto del trasporto verso una mobilità stradale su gomma, a guida libera, non impattante sul piano ambientale e ad alta efficienza energetica, appare oramai partita e nulla sembra possa fermarla. Si assiste, infatti, ormai da qualche decennio, a una ricerca affannosa di un'alternativa ai veicoli tradizionali a propulsione termica in virtù dei problemi di inquinamento, chimico-atmosferico e acustico, sempre più inquietanti specie in ambito urbano, e di consumo energetico, non più accettabili.

Non solo, i presupposti perché la rivoluzione si affermi ci sono tutti, ma nessuno può negare come questa abbia fatto i suoi primi passi nella ricerca, nella messa a punto di prototipi e nella conquista stessa di incoraggianti spazi nel mercato veicolare.

Per il momento, però, non è lecito sapere quando avverrà la presa della Bastiglia, ovvero quando la mobilità innovativa penetrerà, in modo generalizzato, nel mercato. Non vi è nemmeno una certezza assoluta su quali, tra le tecnologie alternative, a rivolta avvenuta, sostituirà quella oggi dominante: l'elettrico, l'idrogeno, l'ibrido o magari la combinazione batterie più metano. Tutto appare ancora, per alcuni versi, incerto; per dirla con Ratan Tata, un guru dell'auto mondiale: «Il futuro dell'auto sta cambiando velocissimamente e non è facile capire in quale direzione». L'unico dato che appare incontrovertibile è che sarà una rivoluzione radicale e violenta. Una rivoluzione vera, cioè, alla fine della quale cadranno le teste di chi oggi monopolizza il mercato: il veicolo diesel, probabilmente prima, quello a benzina poi.

La gran parte degli operatori del settore veicolare vede la mobilità elettrica come la propulsione del domani. Solo per una ristretta minoranza, invece, il giudizio è ancora sospeso. A questi ultimi, però, non si può dare certo tutti i torti considerata la variabilità delle scelte degli scorsi decenni: se è vero che oggi l'elettrico alimentato da batterie è avvantaggiato rispetto all'idrogeno e che il metano "non sia in partita", non si può dimenticare che, solo qualche tempo fa, l'idrogeno sembrava dovesse sbaragliare la concorrenza, per poi ritirarsi in buon ordine e, solo di recente, riprendere vigore, anche se con una tecnologia legata alla trazione elettrica.

In verità l'innovazione rappresentata dall'uso dell'idrogeno nei motori a combustione interna è apparsa, in un recente passato, la soluzione vincente sulla propulsione basata sugli idrocarburi, per via del fatto che questo, per trasferire l'energia non ha bisogno di legarsi alle molecole di carbonio, assicura un impatto ambientale nullo e raggiunge un'efficienza energetica del 43%. Problemi legati al costo di produzione elettrolitica dell'idrogeno, al suo alto consumo se usato nei motori Ice (*internal combustion engine*), alle difficoltà produttive e ai problemi di sicurezza nell'uso, tendono, tuttavia, a scoraggiarne l'impiego, come carburante sostitutivo dei tradizionali, nei motori Ice, e a indirizzarne l'utilizzo verso la trazione elettrica nella veste di vettore energetico nelle pile a combustibile (*fuel cell, FC*), che assicurano prestazioni ad alta efficienza, con un rendimento pari a circa il 60%.

Il veicolo ibrido, quello, cioè, dotato di un sistema di propulsione a due o più componenti, in genere motore elettrico e termico che lavorano in sinergia fra loro, è invece da tempo sul mercato e la sua presenza cresce con incrementi addizionali sempre maggiori di anno in anno. Già da oggi, infatti, rappresenta una reale alternativa al veicolo tradizionale: le sue caratteristiche, un'elevata autonomia e costi d'acquisto e d'esercizio assolutamente competitivi, sono, infatti, appetibili per l'utente, mentre il suo minor impatto, rispetto a quello tradizionale, lo rende più compatibile con l'ambiente, specie quello urbano. In altre parole, il suo futuro più prossimo è, già per il momento, assicurato; resta l'interrogativo su quale ruolo potrà svolgere, l'ibrido, il giorno in cui l'uso del veicolo tutto elettrico dovesse essere generalizzato.

Per quanto riguarda il veicolo a batteria più metano, questa sembra essere un'alternativa tutta Fiat Chrysler, in stretta alleanza con Eni. Ciò in quanto, è nota, da una parte, la convinzione di Marchionne (Ad di Fca): «Le auto elettriche possono sembrare una meraviglia tecnolo-

gica, ma si tratta di un'arma a doppio taglio», dall'altra, la posizione leader in Europa del gruppo Fca nei motori a metano e il patto di ferro stretto con Eni. Da qui una possibile scelta strategica verso questo carburante per i veicoli industriali e verso una sua combinazione ibrida con le batterie nelle autovetture.

In breve, per rispondere alla domanda: «Quale sarà la propulsione del futuro», può essere utile citare Anat Lea Bonshtien (*Chairman & director of the fuel choices and smart mobility initiative at Israel*): «Oggi la risposta non c'è; non resta che cercarla», e in questo clima, pur ancora contrassegnato da ampi margini di incertezza, il trend generale della ricerca e della produzione si muove, con decisione, nell'elettrico.

E così, tra le nazioni e le case automobilistiche è iniziata una competizione senza esclusione di colpi, in questa direzione. Vale la pena citare due esempi: Norvegia e Israele. La prima, pur essendo tra i maggiori produttori di petrolio al mondo e pur confermando la sua intenzione di non ridurre la produzione di greggio, è il Paese a più alto tasso di auto elettriche e il suo governo sostiene la loro vendita al pubblico con incentivi importanti. Israele, nonostante abbia il metano in casa, e storicamente incoraggi la ricerca sull'idrogeno, a fine 2017, in occasione della quinta edizione del *Fuel choices and smart mobility summit*, riunendo costruttori, ricercatori e scienziati di ogni parte del mondo, ha tracciato la propria *road map* verso l'elettrico, con l'ambizione di essere per la mobilità elettrica mondiale ciò che la Silicon Valley è stata ed è per la tecnologia avanzata.

La scommessa sulla propulsione elettrica come tecnologia vincente, soprattutto nel trasporto urbano, appare ogni giorno più netta. Essa è, peraltro, accompagnata da annunci, da parte delle case produttrici, di continue e sorprendenti innovazioni tecnologiche che migliorano le performance del mezzo e da dichiarazioni, spesso clamorose, delle stesse istituzioni di una rivoluzione non solo a portata di mano ma già data per compiuta, almeno nelle intenzioni e nei progetti. Si vive, cioè in un clima di convinta fiducia nella scelta "elettrica" nel quale si smorza la voce di chi manifesta scetticismo e sottolinea i nodi, complessi, e ancora irrisolti, per giungere a una generalizzata penetrazione di quest'auto nel mercato.

La prospettiva è, dunque, quella di dotare la totalità della mobilità locale di mezzi con tecnologia esclusivamente elettrica.

Una rivoluzione che coinvolge il trasporto individuale e collettivo a guida libera su gomma che si innesterà in un assetto del sistema pub-

blico già in parte a trazione elettrica. Il motore elettrico è, infatti, già presente, da una parte, sui mezzi collettivi su gomma a guida semi-vincolata, in sede promiscua o riservata, collegati a un sistema di alimentazione esterno tramite reti aeree con fili sospesi, tra i quali i più noti sono i filobus e, dall'altra, sui mezzi su ferro o su gomma a guida vincolata, in sede propria, alimentati da rete aerea, da binari o da fasce conduttrici tramite contatti striscianti, come i tram e i *people mover*.

Se questo è il futuro non si può non sottolineare come l'elettificazione della mobilità su strada a guida libera abbia di fronte a sé un lungo percorso per completare un'innovazione iniziata solo pochi decenni fa. Ciò per una molteplicità di problemi, sia tecnologici ed economici, strettamente legati al mezzo e alla sua alimentazione, sia di carattere più generale, considerato il fatto che la rivoluzione elettrica è destinata a mutare l'intera società e l'economia globale.

A questo riguardo è sufficiente immaginare quali cambiamenti comporterà la mobilità elettrica nelle abitudini quotidiane dei cittadini che dovranno comprendere, almeno in una prima fase e fino a che la tecnologia non concederà possibilità di un maggiore accumulo di energia nelle batterie e minori tempi di ricarica, l'impegno di un lungo rifornimento del veicolo, una o più volte al giorno.

Ma, ancora più complesse e travolgenti saranno le conseguenze sul piano planetario di una destrutturazione di una economia basata sul petrolio che alimenta nel mondo più di un miliardo di veicoli. La domanda di combustibili fossili sarà, già nei prossimi vent'anni, fortemente indebolita dalla crescente flotta dei veicoli elettrici.

Non solo: con la rivoluzione elettrica dovranno fare i conti anche la riconversione industriale delle case produttrici di auto, con conseguenti problemi occupazionali, la realizzazione di fonti energetiche, presumibilmente rinnovabili, nuove e innovative reti di trasporto della stessa energia, diffuse infrastrutture di rifornimento ecc.

La scelta, tuttavia, appare oramai fatta anche se i risultati attesi non sono semplici da quantificare. Secondo studi condotti dal prof. Sandro Furlan della scuola superiore dell'Eni e dal prof. Giuliano Noci del Politecnico di Milano, i costi dell'auto elettrica nelle città (che comprendono quelli di estrazione e lavorazione delle fonti energetiche, di produzione e demolizione delle autovetture e dei loro componenti, come le batterie, l'esercizio dell'autovettura, le emissioni e le dispersioni nell'aria delle sostanze tossiche e il loro impatto sulla salute), sono almeno tre volte inferiori di quelli delle auto a combustibili tradi-

zionali. Le conclusioni di queste ricerche, corroborate da altri studi di settore condotti da differenti ricercatori, sembrerebbero porre una pietra tombale sull'argomento, se non fosse per il fatto che sono presenti in letteratura ancora altri studi che non concordano sui risultati, lasciando ancora qualche margine di incertezza.

1.2. Le problematiche dell'attuale mobilità urbana

La qualità ambientale delle aree urbane ha assunto un ruolo primario nelle politiche di sviluppo dell'intero pianeta. Per questo motivo, l'introduzione di mezzi dotati di un motore non impattante sull'ambiente, qual è, appunto, quello elettrico, assume una particolare rilevanza nel trasporto nelle città, dove peraltro i fattori di inquinamento, per via degli spazi ristretti che le caratterizzano, sono maggiormente incidenti a causa della loro alta concentrazione.

La centralità del rapporto città/sviluppo è, d'altra parte, un fatto acquisito. Non potrebbe essere diversamente visto che le statistiche e le analisi previsionali, sebbene riportate con una certa dose di approssimazione e di incertezza dalla stampa generalista, concordano sul fatto che, attualmente, 4,3 Mrd di persone, il 58% della popolazione mondiale di 7,5 Mrd, vive nelle aree urbane e che, entro il 2020, all'attuale ritmo di crescita, tale valore supererà il 60%.

La concentrazione della popolazione nelle aree urbane è ancora più marcata in Europa: essa, infatti, aveva raggiunto nel 2015 valori ancora più elevati se è vero che il 75% degli europei viveva in città o nelle zone circostanti e che tale percentuale è destinata a crescere sino a raggiungere l'80% nel 2020.

L'espansione urbana è stata, inoltre, accompagnata da un crescente protagonismo delle città nella vita sociale, economica e produttiva che ha fatto sì che queste siano anche "vissute" da una popolazione non residente all'interno dei loro confini, accrescendo, in tal modo, il numero delle persone che le vivono. Il fatto che in Europa l'86% del Pil sia prodotto al loro interno, e che tale dato sia caratterizzato da un trend in crescita, ne è una testimonianza.

In conclusione, il livello di vivibilità delle città è un obiettivo prioritario nelle politiche planetarie, e al loro interno risultano centrali gli interventi volti alla soluzione dei problemi relativi all'insalubrità dell'aria e all'impatto acustico.

Va tuttavia chiarito come l'attribuire questi unicamente al tipo di motorizzazione può non chiarire sufficientemente le dimensioni e la complessità del fenomeno. È necessario, contestualmente, fare riferimento alle dinamiche che hanno determinato l'attuale assetto della mobilità urbana, vero moltiplicatore delle diseconomie provocate dai motori a combustione interna: tra queste, la mancata pianificazione integrata territorio-trasporti e la squilibrata ripartizione modale della mobilità, a tutto vantaggio del mezzo individuale.

È noto, infatti, come la "centralità" delle città sia stata accompagnata da una loro impetuosa crescita territoriale e demografica spesso incontrollata e disarticolata, che ha determinato la parcellizzazione di una domanda, sempre più ampia ed erratica, che ha compromesso, il più delle volte, la possibilità di organizzare, secondo economie di scala, le infrastrutture di trasporto e i servizi di mobilità. Nel contempo, la mobilità ha assunto il ruolo di variabile indipendente e la sua crescita, garantita dal mezzo individuale, è stata vissuta come segno di libertà e di sviluppo mentre le sue esternalità negative sono state minimizzate e trascurate.

È risaputo, per contro, che il veicolo privato, grazie alla sua straordinaria diffusione, ha creato le premesse per tale sviluppo e, a sua volta, nella generalità dei casi, è diventato l'unica modalità di trasporto in grado di ricucire aree tanto frazionate. A titolo d'esempio varrebbe la pena citare le numerose indagini effettuate per testimoniare la prevalenza dell'autovettura; in sintesi queste, mediamente, indicano una percentuale di spostamenti casa-lavoro, nei paesi industrializzati, tra il 48 e il 60% su veicolo individuale, tra il 22 e il 28% su quello collettivo, tra l'1,5 e il 3% su motocicli, e tra il 22 e il 28% in bici o a piedi.

Il veicolo privato, nella quasi totalità a propulsione termica, oltre a essere caratterizzato da un rapporto capacità di trasporto/spazio urbano occupato di gran lunga inferiore a quello del mezzo collettivo ed essere causa di forte incidentalità, produce maggiori emissioni inquinanti per passeggero trasportato, è fonte di gravi disturbi acustici ed è un mezzo altamente energivoro. La sua assoluta prevalenza nella ripartizione modale moltiplica, quindi, le diseconomie provocate dal singolo mezzo. Ingigantisce, cioè, non solo i problemi legati alle condizioni di circolazione nella rete stradale (per via dei costi di congestione, di accessibilità alle zone più centrali e del loro degrado a seguito dello spazio occupato dagli autoveicoli, d'inquinamento dato dai rifiuti autoveicolari ecc.) ma, anche e soprattutto, incide fortemente su

quelli legati all'azione climalterante, cui concorrono gli altri mezzi di trasporto e la generalità delle attività umane, alle condizioni di salute fisica dei cittadini e ai bilanci energetici delle singole comunità. La drastica contrazione della mobilità privata, anche sotto quest'ultimo aspetto, è, dunque, un obiettivo centrale nelle politiche trasportistiche.

C'è addirittura chi sostiene, come Frank Kelly direttore del gruppo di ricerche ambientali del King's College di Londra, che: «Le auto elettriche non sono una soluzione al problema dell'inquinamento» e che «ridurre il numero dei veicoli in circolazione è l'unica soluzione».

Le azioni messe in campo in questa direzione, innanzitutto dagli enti locali, sono numerose e di diverso tipo: l'introduzione di servizi di trasporto innovativi di tipo totalmente automatico laddove le condizioni demografiche, territoriali e insediative li rendano competitivi, come l'Agt (*automated guideway transit*), l'Apm (*automated people mover*), le cosiddette metropolitane leggere come, ad esempio, quelle a tecnologia Val, il Prt (*personal rapid transit*), ne sono un esempio.

Ancora, il miglioramento, sia sul piano tecnologico sia organizzativo, del livello di servizio offerto dal mezzo collettivo su strada, in modo tale che sia più appetibile per l'utenza e maggiormente concorrenziale con l'individuale; il sostegno alla mobilità dolce, specialmente quella ciclabile e quella connessa all'uso condiviso dell'autovettura; l'informazione dell'utente tramite l'Its (*intelligent transportation system*), affinché la sua scelta sia consapevole; l'introduzione di limiti alla mobilità nelle aree centrali attraverso misure economico-finanziarie e amministrative, come le zone Lez (*low emissions zone*) e Ztl (*zone a traffico limitato*), il *road pricing*, la limitazione degli stalli per la sosta e la sua regolamentazione a pagamento ecc.

Le iniziative intraprese dalle amministrazioni cittadine volte a ridurre la mobilità individuale si sono, tuttavia, scontrate con le conseguenze di quella logica programmatica di cui si è detto e che ha determinato la cosiddetta *car happy city*, che rappresenta un modo di intendere e di vivere la città assai difficile da modificare. In altre parole, le città che si trovano, ancor oggi, di fronte a una continua espansione della mobilità, non possono contare su un sistema di trasporto in grado di tenerle il passo e, per di più, debbono farle fronte con una ormai cronica limitatezza di risorse per nuovi investimenti e con una mancanza di spazi fisici per poterli realizzare.

Per questi motivi la dipendenza delle città dall'auto individuale appare un fatto tanto deprecato e contrastato quanto, almeno nel breve

medio termine, incontrovertibile. Il dover convivere con un sistema di trasporto basato in larga misura sull'autovettura privata ha determinato, quindi, un impegno convinto, da parte delle istituzioni a più alto livello e dell'industria automobilistica, nel tentare di limitarne l'impatto ambientale, innanzitutto attraverso la riduzione dell'uso di carburanti di origine fossile. Un obiettivo, questo, che riguarda sia il veicolo individuale sia quello collettivo, non semplice da realizzare per via delle dimensioni del parco veicolare mondiale e del fatto che, su un totale di circa 1,3 Mrd di veicoli circolanti (Oica, 2015), circa il 97% fa uso di tali combustibili.

I motori Ice, infatti, trasformando tramite combustione, l'energia chimica contenuta nei carburanti in energia meccanica, emettono, nel contempo, H_2O sotto forma di vapore, e CO_2 . L'anidride carbonica, prodotta in quantità differente dai diversi combustibili in relazione alla proporzione del carbonio presente nella loro molecola, è un prodotto climalterante, responsabile, insieme ad altri gas, del cosiddetto effetto serra, per una percentuale ascrivibile al 22% del totale. Non solo: poiché la combustione non è mai completa e poiché i combustibili contengono impurità, attraverso l'impianto di scarico del motore fuoriescono anche altri inquinanti, i primari, quali il monossido di carbonio CO , gli ossidi d'azoto NO_x , il particolato PM_{10} , il benzene C_6H_6 , il benzopirene $C_{20}H_{12}$ ecc., causa di avvelenamento del sangue, insorgenze tumorali, effetti nocivi sull'apparato respiratorio ecc.

L'impatto chimico negativo sull'atmosfera è, inoltre, ascrivibile anche ai cosiddetti inquinanti secondari, i *Voc (volatile organic compounds)*, che si formano nell'aria attraverso complesse reazioni chimiche e sono emessi in relazione al ciclo di produzione, distribuzione, rifornimento e utilizzo dei carburanti. In particolare, benzina e gasolio, combustibili largamente i più diffusi nei motori endotermici ad accensione comandata e spontanea, a causa della complessità della loro molecola, sono particolarmente attivi nella produzione del CO_2 e degli altri inquinanti. Nei decenni passati si sono moltiplicati gli interventi mirati a mitigarne tali effetti inserendo dispositivi anti inquinamento come il convertitore catalitico, mutandone la composizione, attraverso l'imposizione di rigide normative sulla revisione dei motori, disincentivando la circolazione delle auto maggiormente inquinanti ecc.

Si è anche seguita la strada della sostituzione della benzina e del gasolio con combustibili alternativi: oltre al Gpl (propano+butano, $C_3H_8+C_4H_{10}$) o gas di petrolio liquefatto che, per quanto meno inqui-

nante, è anch'esso un sottoprodotto della trasformazione petrolifera, sono stati introdotti il gas naturale compresso Gnc (metano, CH₄), i biocombustibili, come il biodiesel, che producono minori emissioni. In particolare, per quanto concerne i bus urbani, è stato introdotto l'uso di additivi al gasolio come il *Gecam*, microemulsione di gasolio e acqua finalizzata a ridurre il particolato, gli NO_x e le emissioni di CO₂.

Senza voler banalizzare i risultati ottenuti, tuttavia, l'insieme degli interventi adottati non ha radicalmente mutato l'impatto negativo prodotto dalle emissioni: ad esempio, i carburanti alternativi sono rimasti un prodotto di nicchia, intorno al 2% dei consumi e l'uso stesso delle biomasse, pur crescendo apprezzabilmente negli ultimi anni, si è attestato non oltre il 3% del totale.

Una nota a parte merita l'inquinamento acustico che, specialmente nelle città europee più popolate, per via della loro conformazione urbanistica, si somma a quello prodotto da una molteplicità di sorgenti, dalle fabbriche ai cantieri, agli aeroporti, alle strade ferrate ecc. Quello prodotto dal traffico veicolare è, a tutti gli effetti, una delle forme di rumore più impattanti: in un'area urbana, risulta, mediamente, la principale fonte di inquinamento acustico, per il 75%, seguita da quella ferroviaria, per l'8%, da quella industriale, per il 5%, mentre quella dovuta a fonti diverse contribuisce per il restante 12%.

Per quanto riguarda la salute dei cittadini l'inquinamento acustico è carico di conseguenze di diverso ordine e, nel caso l'esposizione sia ripetuta e a lungo termine, essa è tale da poter provocare, oltre a danni all'apparato uditivo, effetti negativi di *annoyance* e di disturbo, e altri su quello cardiovascolare, digerente, neuropsichico ecc.

Le sorgenti di rumore in un veicolo in movimento sulla rete stradale possono essere ricondotte a due: una, di livello superiore, riconducibile alle parti meccaniche necessarie per la realizzazione del moto, ossia il motore, soprattutto tramite il ventilatore-radiatore, le prese d'aria per la combustione, gli impianti di scarico dei gas, gli organi di trasmissione, e la seconda, di livello inferiore, dovuta al contatto tra il veicolo in moto, la pavimentazione e il mezzo nel quale si muove, ossia il rumore da rotolamento e quello aerodinamico.

Mentre quest'ultima sorgente di rumore è indipendente dal tipo di propulsione, la prima è direttamente riconducibile alle auto a motore endotermico. Per questo motivo sono state introdotte diverse tipologie di interventi di mitigazione, spesso complesse e non sempre attuabili: dalle barriere fonoassorbenti, artificiali o vegetali, demandate all'atte-

nuazione del rumore una volta prodotto, a quelle legate alle condizioni del deflusso, come l'abbattimento dei volumi di traffico veicolare, la riduzione della velocità, la diminuzione della percentuale di veicoli pesanti ecc., che hanno ridotto, in diversi casi, i problemi acustici senza, però, annullare le conseguenze impattanti dovute allo specifico tipo di motorizzazione.

Vi è, inoltre, il tema della modesta efficienza energetica dei motori a combustione interna che riguarda, complessivamente, seppure in termini diversi, tutta la mobilità tradizionale, indipendentemente dal tipo di combustibile.

Il rapporto tra l'energia del combustibile trasformata dal motore e l'energia cinetica resa all'asse, in condizioni ottimali, raggiunge circa il 25% per l'alimentazione a benzina, ossia un 5% di energia chimica si perde in attriti vari, un 30% è dissipato dall'impianto di raffreddamento, e un 40% fuoriesce nei gas di scarico, Fig.1. Facendo riferimento all'alimentazione a gasolio, il rendimento energetico è un po' più alto, si aggira attorno al 35-40%.

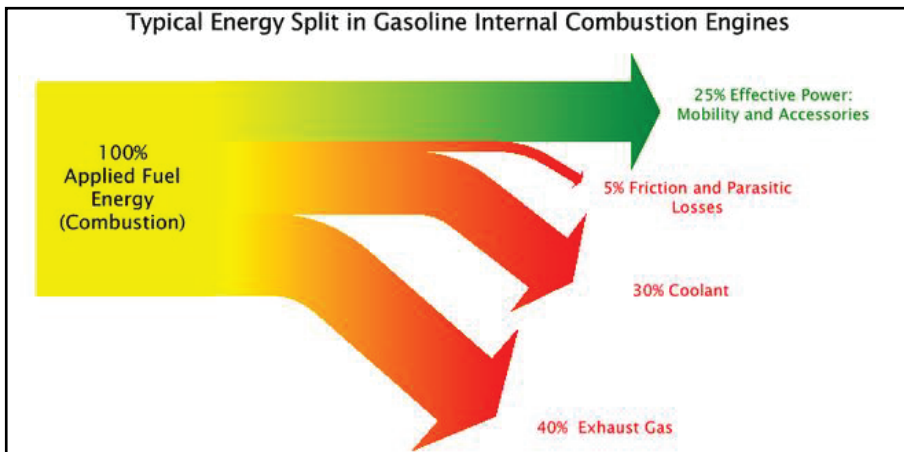


Fig. 1. Energia persa e utile nei motori Ice a benzina, serbatoio-asse
sankey-diagrams.com

Il veicolo tradizionale, in altre parole, è un mezzo altamente energivoro e questo fatto, considerate le dimensioni del parco veicolare, individuale e collettivo, comporta, per le nazioni che non hanno disponibilità di materie prime, problemi di approvvigionamento e di risorse destinate alla loro importazione e ciò si traduce, inevitabilmente, in costi di esercizio più alti per l'utenza e più impattanti per l'ambiente.

1.3. L'autovettura elettrica

Anche se pochi sono disposti a giocarci la camicia, il “mondo intero” si muove nella prospettiva di una sostituzione, più o meno generalizzata, dei motori endotermici con quelli elettrici, sia nella mobilità collettiva su gomma a guida libera, sia in quella individuale. In questo contesto, l'autovettura elettrica, mostra, almeno inizialmente, una presenza più marcata nel mercato dell'auto, con maggior presa rispetto al veicolo collettivo, ciò, soprattutto, in virtù del suo maggior “peso” nel trasporto urbano, di una sua più semplice tecnologia e di una più marcata elasticità della domanda privata rispetto a quella aziendale.

La parola chiave nel contrasto ai danni causati dalla mobilità tradizionale è, infatti, la cosiddetta *e-mobility*: un termine che sintetizza una strategia che, per quanto riguarda la mobilità stradale, è volta alla progressiva sostituzione dell'autovettura Ice con quella elettrica.

A suo fondamento, la presa d'atto che una quota rilevante della mobilità resterà, almeno nel breve-medio periodo, servita dal mezzo privato e che la complessità degli interventi sull'attuale parco veicolare non saranno sufficienti a ridurre in modo drastico i problemi di inquinamento da questo prodotti. Tutto ciò, in dipendenza delle importanti innovazioni tecnologiche in questo campo, soprattutto in materia di trasmissione e di stoccaggio dell'energia elettrica, insieme ai problemi di approvvigionamento dei prodotti petroliferi, dall'andamento altalenante dei loro prezzi alla loro prevista scarsità nel medio-lungo periodo.

Da qui la svolta verso un'autovettura “non inquinante”, silenziosa e assai meno energivora rispetto a quella tradizionale e, quindi, compatibile con un'elevata qualità della vita, specie nelle aree urbane, pur nella consapevolezza che ciò comporterà una radicale innovazione nell'attuale assetto della mobilità.

In realtà i veicoli elettrici in quanto tali, non rappresentano affatto una novità e si basano su una tecnologia funzionale ampiamente consolidata. Già a cavallo tra il XIX e il XX secolo il veicolo elettrico rappresentava la risposta più confacente agli insorgenti problemi della mobilità moderna: in Europa, in quegli anni, circolavano più auto elettriche che con motore a combustione interna, il 90% dei taxi di New York erano alimentati da una batteria e una vettura elettrica aveva stabilito il record mondiale di velocità. Solo a partire dai primi anni del Novecento, le auto dotate di motore endotermico hanno preso sempre più il sopravvento principalmente a causa della loro maggiore auto-

nomia, del minor prezzo d'acquisto e dei più contenuti costi di esercizio derivanti dal basso costo del carburante.

Attualmente, con il termine auto elettrica, spesso si intendono diverse tipologie di veicoli, tra i quali quelli che dispongono di più fonti di energia. In queste pagine, tuttavia, con questo termine, si tratteranno quelli definibili “tutto elettrico”, ossia dotati di un motore che utilizza, come fonte di energia primaria, l'energia chimica immagazzinata in un serbatoio energetico; questo può essere costituito da una o più batterie di concezione alquanto diversificata, o da idrogeno, in grado di renderla disponibile al motore sotto forma di energia elettrica, direttamente, nel caso delle batterie, o tramite trasformazioni in celle a combustibile, nel caso dell'idrogeno.

Sia le auto a batteria, sia quelle a *fuel cell* sono definite *Zev* (*zero emissions vehicles*) e tali sono se non per una piccolissima percentuale di polveri sottili prodotta dalle prime, e per una modesta emissione di acqua, per quanto riguarda le seconde.

Il motore elettrico ha un'efficienza energetica diretta di gran lunga superiore a quello termico essendo caratterizzato da un rendimento energetico pari a circa il 90%, ampiamente superiore ai rendimenti dei motori convenzionali; non va, inoltre, tralasciato il fatto che è reversibile, cioè in grado di fare l'operazione inversa: trasformare l'energia cinetica in elettrica.

Una diversa valutazione, in grado di ridimensionare la sua convenienza energetica, può essere effettuata analizzando la filiera energetica complessiva di entrambi i motori attraverso l'indicatore WTW (*well-to-wheel*), dal pozzo alla ruota, che tiene conto di costi per l'energia legati, oltre che alla tecnologia propulsiva, con batterie o con *fuel cell*, alla tecnologia primaria relativa alla trasformazione dell'energia, sia che si tratti di generare elettricità, sia idrogeno. Anche seguendo tale tipo di analisi, l'efficienza energetica del veicolo elettrico è assai maggiore, circa il doppio, rispetto a quella del termico.

Nella strada verso la diffusione generalizzata della motorizzazione “tutto elettrica”, tuttavia, dagli anni 2000, le case costruttrici hanno introdotto alcune soluzioni tecnologiche termico/elettriche differenti tra loro, che possono essere anche viste come tappe intermedie. Si fa riferimento alle auto dette ibride in quanto rendono disponibili per la trazione due o più sorgenti di energia primaria, delle quali una, nella generalità dei casi, termica, e l'altra elettrica. I veicoli ibridi sono in grado però solo di ridurre, ma non di azzerare, l'inquinamento atmosferico.

Questi si sono sviluppati seguendo differenti soluzioni: quella Hev (*hybrid electric vehicle*), basata su un motore a combustione interna, con anche il compito di ricaricare le batterie, e su un motore elettrico alimentato dalle sole batterie senza nessuna possibilità di collegamento alla rete di alimentazione; la Phev (*plug-in hybrid electric vehicle*), che utilizza batterie con maggiore autonomia permettendo una ricarica delle stesse non solo dal motore termico ma anche dalla rete di alimentazione; l'Erev (*extended range electric vehicle*, veicolo elettrico ad autonomia estesa), in cui il motore a combustione interna è impiegato solo come generatore di corrente per ricaricare la batteria di trazione quando il suo livello di carica è basso.

Le motivazioni per cui le “ibride” hanno avuto, negli ultimi decenni, uno sviluppo notevole e superiore a quelle totalmente elettriche o Fev (*full electric vehicles*), sono legate, proprio, alla presenza del motore termico che, in attesa di ulteriori evoluzioni di quest'ultime, le rende più appetibili sul piano prestazionale.

Infatti, se è vero che i Fev, non utilizzando il motore endotermico per alcuna finalità, non producono CO₂ né alcun altro inquinante, è anche vero che la loro propulsione è totalmente affidata alle batterie, la cui ricarica avviene tramite la rete: questo è il motivo per cui le auto elettriche debbono poter incamerare molta più energia rispetto a quella delle ibride, al fine di concedere ai veicoli una sufficiente autonomia. L'autonomia non adeguata alle aspettative dell'utenza, come si vedrà, è, invece, un handicap, a oggi solo in parte superato, sul quale sono concentrati gli sforzi delle case automobilistiche.

Le auto Fev sul piano della funzionalità non presentano grandi novità: esse sono, infatti, del tutto simili a quelle dotate di motore termico, sia negli allestimenti, sia nella meccanica, fatta eccezione per la trasmissione, molto semplice e senza cambio, e per il motore, più leggero e compatto, a parità di potenza installata, rispetto al tradizionale, alimentato da un pacco di accumulatori capace di trasformare l'energia elettrica prelevata dalle batterie in energia di trazione disponibile alle ruote. Come tutti i motori elettrici, quelli destinati alla trazione possono essere a corrente continua o alternata, e questi ultimi, sincroni, asincroni o a induzione, sono i preferiti dalle Case.

La tecnologia di supporto è chiamata Bev (*battery electric vehicle*); le prime batterie risalgono a più di 200 anni fa, ma solo un tipo è stato commercializzato in modo estensivo per le vetture tradizionali, quello al piombo-acido, utilizzato per l'avviamento e per le altre esigenze del ve-

icolo, con esclusione della propulsione. L'uso a questo fine ha, viceversa, spinto la ricerca verso batterie che potessero garantire migliori prestazioni in termini di autonomia, minori tempi di ricarica, minor massa specifica, maggiore vita utile ecc., attraverso una loro maggiore energia gravimetrica specifica (kWh/kg), e una maggiore densità volumetrica (kWh/l). Il risultato è stato la messa in campo delle diffusissime batterie agli ioni di litio.

Infine, tra i problemi ancora aperti che concernono l'uso delle batterie per la trazione vi sono quelli che riguardano la loro produzione e il loro smaltimento. Per quanto riguarda il primo si sottolinea le difficoltà cui andranno incontro le case produttrici nel procurarsi i principali minerali necessari per la produzione di batterie agli ioni di litio, come il litio e il cobalto, che scarseggiano e si trovano in paesi molto instabili sul piano politico (Cile, Bolivia); per quanto riguarda lo smaltimento, il far fronte alle inimmaginabili conseguenze in termini di impatto. Il dibattito, su questo tema è ancora aperto ed è proteso a trovare nuove soluzioni riguardo una loro rigenerazione e riutilizzo.

D'altra parte il loro percorso ricerca-sviluppo è, tuttora, in essere: un esempio è rappresentato dalle batterie litio-aria, una nuova generazione di accumulatori che promettono un'efficienza dieci volte superiore a quelle attuali. Non si può, d'altro canto, non ricordare quanto sia avanzata, specificamente dalla Toyota, la ricerca nel campo della ricarica induttiva, basata sull'abbinamento di un induttore posato a terra o sotto la pavimentazione stradale, e su un ricevitore a bordo dell'auto che sfrutta la risonanza creata dalle variazioni d'intensità del campo magnetico.

Ma una vera e propria rivoluzione, attesa entro un decennio, sarà la ricarica in moto che prevede strade puntellate da piastre a induzione in modo che sia possibile guidare e al tempo stesso preservare o aumentare l'autonomia del veicolo, ricaricando nel contempo le batterie.

Va sottolineato che, oltre alle batterie, esistono altri sistemi per la conservazione dell'energia elettrica quali gli ultracapacitori, i magneti superconduttori, i volani sottovuoto con circuiti superconduttori ecc. Solo gli ultracapacitori, però, hanno avuto applicazione pratica ai veicoli: questi sono in grado di accumulare meno energia per unità di massa rispetto alle batterie, ma hanno una velocità di scarica fino a cento volte superiore che li rende idonei a fronteggiare i picchi di potenza, ad esempio allo spunto e in accelerazione, mentre le batterie possono fornire l'energia per il funzionamento a regime.