



Università degli Studi di Padova

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA INDUSTRIALE
Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria elettrica

Tesi di laurea magistrale

Studio e progettazione di sistemi 'range extender' per mezzi di trasporto su terra e su acqua a propulsione elettrica

Laureando:
Marco Mattiolo

Relatore:
ch.mo prof. Silverio Bolognani

Correlatore:
dott. ing. Mattia Morandin

*Se il problema ha una soluzione,
preoccuparsene è inutile, alla fine
il problema sarà risolto. Se il
problema non ha soluzione, non
c'è motivo di preoccuparsi,
perché non può essere risolto.
(detto Zen)*

Indice

1. La situazione attuale	9
1.1. Motori a combustione interna	13
1.1.1. Motore ad accensione comandata	16
1.1.2. Motore ad accensione spontanea	17
1.1.3. Rendimenti reali dei motori a combustione interna, voci di perdita	19
1.2. Motori elettrici	21
1.2.1. asincrono	26
1.2.2. sincrono a magneti permanenti	28
1.3. Coppia ideale di trazione	32
2. Simulazioni e confronti: efficienza, costi ed emissioni	35
2.1. Veicolo con motore a combustione interna	35
2.1.1. Veicolo privato con motore a combustione interna	35
2.1.2. Trasporto pubblico con motore a combustione interna	38
2.2. Veicolo elettrico a batteria (BEV)	38
2.2.1. Parametri delle simulazioni	38
2.2.2. Risultati delle simulazioni	46
2.2.3. Validazione con risultati precedenti ricerche	51
2.2.4. Autonomia desiderata e percorrenze tipiche	54
2.2.5. Stile di guida	56
2.3. Autobus elettrico a batterie	57
2.3.1. Trasporto pubblico con motore elettrico e linea di contatto	60
2.4. Veicolo con powertrain ibrido elettrico+termico (HEV)	60
2.4.1. Ibrido serie	61
2.4.1.1. Validazione con risultati precedenti ricerche	65
2.4.2. Ibrido parallelo	66
2.5. Veicolo elettrico con cella a combustibile (FCEV)	67
2.6. Auto elettrica con accumulo ibrido batteria+supercondensatore	69
2.7. Approccio globale	69
2.8. Auto elettrica, comunque	75
3. Veicolo ibrido plug-in (PHEV), range extender	79
3.1. Dimensionamento del range extender	80
3.2. Confronti tra PHEV, BEV e veicolo tradizionale per trasporto privato . .	81
3.3. Confronti tra battery swapping, range extending e veicolo elettrico puro nel caso di autobus	87

3.4.	Strategie di controllo del range extender	89
3.4.1.	Sempre acceso	91
3.4.2.	In funzione del SOC della batteria	93
3.4.3.	Svantaggi del range extender	94
3.4.4.	Sfruttando il tragitto programmato nel navigatore	95
4.	Microturbine	97
4.1.	Cicli termodinamici delle turbine (Brayton-Joule)	97
4.1.1.	Ciclo ideale non rigenerativo	98
4.1.2.	Ciclo reale non rigenerativo	101
4.1.3.	Ciclo ideale rigenerativo	103
4.1.4.	Ciclo reale rigenerativo	105
4.1.5.	Ulteriori raffinamenti	106
4.2.	Prestazioni delle microturbine	107
4.2.1.	Microturbine reali	107
4.2.2.	Range extender a microturbina	110
5.	Vaporette	113
5.1.	Principio di funzionamento	113
5.2.	Specifiche del powertrain	113
5.3.	Powertrain termico (riferimento)	114
5.4.	Powertrain ibrido con range extender	115
5.4.1.	Powertrain solo elettrico	117
5.5.	Powertrain con una cella a combustibile come range extender	119
5.6.	Confronto e conclusioni	120
6.	Conclusioni	123
6.1.	Possibili sviluppi futuri	124
A.	Cicli di guida	125
A.1.	EPA UDDS	125
A.2.	FTP	125
A.3.	HWFET	125
A.4.	US06	125
A.5.	LA92	129
A.6.	EUDC	129
A.7.	ECE	129
A.8.	JP10 e JP15	129
A.9.	Formule impiegate, osservazioni	132
B.	Accumulatori	137
B.1.	Accumulatori elettrochimici	139
B.1.1.	Piombo-acido	142
B.1.2.	Ni-MH	142

B.1.3. Li-ion	143
B.1.4. Li-Pol	143
B.1.5. NaNiCl ₂	143
B.2. Serbatoio di combustibile liquido	144
B.3. Serbatoio d'idrogeno	144
B.4. Supercondensatori	144

Introduzione

I consumi energetici globali attuali pongono forti preoccupazioni, sia riguardo le difficoltà di approvvigionamento con bassi costi, impatti e rischi, sia per le emissioni nocive conseguenti all'impiego di energia da fonte fossile. L'aumento della popolazione mondiale, l'aumento del consumo medio *pro capite* conseguente allo sviluppo economico di nazioni popolate e l'esaurimento delle fonti di energia fossile non fanno ben sperare per il futuro.

Il settore dei trasporti su strada, responsabile per circa un sesto del consumo globale di energia primaria, è parte integrante del problema, così come delle possibili soluzioni. In particolare, gli autoveicoli privati sono previsti raddoppiare entro il 2050, con conseguenti problemi di traffico, consumi energetici, inquinamento, oltre ai consumi energetici e di materie prime per la produzione dei veicoli stessi.

In questo lavoro di tesi s'intende analizzare la situazione e le tecnologie attualmente disponibili per la trazione (capitolo 1), valutare consumi e diverse attitudini dei veicoli con motore a combustione interna, elettrici a batteria ed ibridi (capitolo 2), valutare l'applicabilità del concetto di *range extending* per mitigare gli svantaggi che il veicolo elettrico eredita dal suo dispositivo di accumulo (capitolo 3); quindi si è analizzata la tecnologia delle microturbine in riferimento a una possibile funzione di *range extender* (capitolo 4). Come caso reale di possibile applicazione del *range extender*, si è studiato il caso dei vaporetti adibiti a servizio di trasporto pubblico nella laguna di Venezia (capitolo 5).

Si è infine ritenuto opportuno, per l'importanza e vastità dell'argomento, rilegare in appendici apposite l'analisi delle tecnologie di accumulo per mezzi di trasporto (appendice B) e dei cicli di guida impiegati per l'analisi dei consumi di veicoli termici, elettrici e ibridi (appendice A).

1. La situazione attuale

Lo sviluppo di una tecnologia in grado di soddisfare le necessità di mobilità a prezzi accessibili, come il motore a combustione interna, ha rappresentato una grande conquista, sia in termini economici di facilità di commercio e incremento dei volumi trasportabili, sia in termini di qualità della vita come libertà di spostamento e maggiore tempo libero. L'impatto sulla società moderna è tale che gli attuali livelli di benessere e commercio non si sarebbero potuti raggiungere, nè si potrebbero mantenere, senza i combustibili fossili, la loro enorme energia specifica e le tecnologie per convertirla in energia meccanica, e quindi in spostamento.

Da un punto di vista teorico, gli idrocarburi con cui vengono alimentati i motori a combustione interna sono formati da soli atomi di carbonio e idrogeno, e la loro combustione in presenza di ossigeno genera come unici prodotti anidride carbonica (CO_2) e acqua (H_2O): l'acqua è essenziale alla vita e l'anidride carbonica non è tossica a meno che non sia inalata da sola per più di qualche secondo. Purtroppo, i combustibili fossili contengono anche impurità (primariamente zolfo), e il processo di combustione nei motori è ben lontano dall'idealità, col risultato che al condotto di scarico si possono trovare ossidi di zolfo, ossidi di azoto, monossido di carbonio e molecole di idrocarburi incombusti.[7]

Si definiscono esternalità tutti quei costi di varia natura (sociale, ambientale, ...) attribuibili al ciclo di vita (estrazione delle materie prime, trasformazione, consumo/utilizzo e smaltimento) di un prodotto, che non incidono nella determinazione del prezzo del bene (rendendo il prodotto economicamente più appetibile agli acquirenti/consumatori), ma che ricadono poi sull'intera società. Se il prezzo del bene conglobasse tutti i costi, interni ed esterni, connessi col ciclo di vita del prodotto, il mercato selezionerebbe autonomamente i prodotti (e le tecnologie per produrli) globalmente più efficienti, ovvero in grado di massimizzare la differenza tra benefici (nel caso dei trasporti, soddisfare il bisogno di mobilità) e costi (alcuni esempi dei costi esterni collegati ai trasporti è riportato nel prossimo capoverso).

Esternalità dei mezzi di trasporto sono il consumo di suolo sottratto a finalità produttive (anzitutto agricole) per necessità delle strutture fisse funzionali alla mobilità (strade, autostrade, ferrovie, aeroporti, parcheggi), la svalutazione delle aree limitrofe a queste strutture fisse (con segno negativo se rivalutate), l'inquinamento acustico (in misura variabile a seconda della tecnologia di propulsione), il tempo sprecato a causa del traffico e le conseguenze degli incidenti (morti o invalidità). Nel caso dei combustibili fossili, rappresentano esternalità i costi sostenuti globalmente per le conseguenze dell'inquinamento atmosferico (costi sanitari e in vite umane, oltre al peggioramento della qualità della vita per l'insorgenza di malattie respiratorie croniche), per le conseguenze del riscaldamento globale (perdite di vite umane e costi per il rimpiazzo di beni mobili e immobili distrutti da eventi climatici estremi), per le guerre finalizzate al controllo e sfruttamento delle

1. La situazione attuale

risorse petrolifere, nonché la dipendenza strategica dalle nazioni con sottosuoli ricchi di risorse fossili.

Se il prezzo di vendita di un bene (l'automobile) inglobasse, oltre ai costi di materie prime, di produzione e di vendita, anche la somma dei costi esterni (ad esempio: un contributo a un fondo per la costruzione di nuove strade, di entità proporzionale al contributo del veicolo al congestionamento delle arterie viarie esistenti; oppure un importo a favore del servizio sanitario in misura degli incidentati e malati respiratori cronici che il veicolo contribuirà a creare), quel bene risulterebbe molto meno conveniente e il suo acquisto potrebbe venire sostituito da altri consumi (l'acquisto di un'auto più efficiente e sicura, meno inquinante e ingombrante, oppure un abbonamento del trasporto pubblico nel caso in cui questo risponda alle esigenze) più efficienti nel massimizzare la funzione di benessere collettivo, oppure eliminato, nel caso in cui il bisogno soddisfatto da quel bene fosse associato un beneficio divenuto inferiore ai costi. Nella situazione attuale, il prezzo di vendita di un veicolo è determinato dai costi diretti sostenuti dal produttore, dalla curva di domanda del mercato (espressa come quantità di veicoli che gli acquirenti sono disposti ad acquistare in funzione del prezzo di vendita, influenzabile tramite marketing), e dalle tasse imposte dall'entità pubblica: una tassa pari a una quota del prezzo dell'auto non distingue tra modelli più e meno sicuri, efficienti, inquinanti, e non mette quindi il mercato nelle condizioni di effettuare una selezione. Da questo punto di vista, una tassazione basata su criteri tecnici (i consumi, le emissioni e la sicurezza) è più efficiente e desiderabile per l'intera comunità.

Questi ragionamenti di economia teorica vengono intaccati nella loro validità dalla propensione delle persone a non compiere la propria scelta del mezzo di trasporto basandosi solo su criteri tecnici, come il costo del viaggio e la velocità (quindi, la durata), ma anche su altre motivazioni, come preferire il senso d'indipendenza (logistica ed economica) dato dal possesso di un veicolo privato con livelli di potenza, comfort e costo ben oltre il limite del superfluo, o di più auto per nucleo familiare (laddove la "seconda auto" sia usata molto poco, o impiegata per tragitti copribili anche col trasporto pubblico o con energia muscolare), sull'acquisto di un abbonamento del trasporto pubblico, anche laddove questo riesca a soddisfare le necessità a un costo inferiore, sgravando l'utente della responsabilità di guidare (permettendo di impiegare il tempo in attività più piacevoli) e delle scocciature burocratiche e di manutenzione inerenti al possesso di un veicolo (al prezzo di una minor versatilità rispetto il veicolo privato).

Il modello risultante di mobilità privata, basato sul possesso di una o più auto per nucleo familiare (606 autovetture circolanti ogni 1000 abitanti in Italia, dati Istat 2011[5]) e di tragitti di lunghezza medio-breve (32.4 km percorsi in media giornalmente a persona, dati Isfort 2011 [1]) non è sostenibile¹. Il mezzo privato esaspera in particolare, per l'elevato numero di veicoli circolanti, le esternalità dei mezzi di trasporto relative a congestione e inquinamento, atmosferico ed acustico:

¹Il concetto di "sostenibilità" è introdotto e definito nel rapporto Brundtland dell'ONU[4]: Humanity has the ability to make development sustainable to ensure that it meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs.

- il congestionamento delle arterie stradali esistenti rende necessari potenziamenti infrastrutturali periodici, costosi e invasivi;
- il traffico sottrae tempo ad altri scopi, peggiorando la qualità della vita;
- il traffico favorisce il verificarsi di incidenti, per una minore distanza tra veicoli;
- la preferenza diffusa per il trasporto privato, e i conseguenti abbandono, diseconomia e depotenziamento dei mezzi pubblici, portano sulle strade guidatori inesperti (perchè si spostano di rado) o inabili (es. sotto l'effetto di sostanze psicotrope) che aumentano il rischio generale di incidenti.

Inoltre, il mezzo privato è poco efficiente:

- per le ridotte distanze percorse, il motore a combustione interna e il sistema di trattamento dei fumi di scarico lavora prevalentemente in condizioni di transitorio termico, con efficienze ridotte;
- per il maggiore rapporto tra massa del veicolo e massa trasportata, è meno efficiente del trasporto pubblico (trasportare dieci persone in dieci auto private è molto meno efficiente che non trasportare le stesse persone con un unico mezzo, a maggior ragione se si considerano i consumi e gli inquinanti emessi nella fase di produzione dei veicoli).

Infine, la diffusione del mezzo privato, unita alla relativa economia e facilità di rifornirlo di energia, ha effetti anche sull'urbanistica e sulla socializzazione, effetti tanto più evidenti in fasi di sviluppo economico e demografico come nell'Italia del secondo dopoguerra: a parità di durata del tragitto casa-lavoro (o casa-servizi: in generale casa-città), spostarsi con energia fossile invece che con energia muscolare permette di coprire distanze superiori, ovvero rende possibile risiedere in campagna anche alla popolazione non impegnata nel lavoro agricolo, permettendo di allontanarsi dall'accresciuto traffico e inquinamento dei centri urbani.

La ricerca dell'indubbio beneficio di vivere in una casa singola in mezzo al verde, invece che in un rumoroso condominio di un quartiere residenziale, ha come conseguenze:

- la parcellizzazione degli appezzamenti agricoli liberi da ostacoli e coltivabili;
- che tutti gli spostamenti vengono effettuati in auto, vista l'elevata distanza tra abitazioni e servizi;
- i centri abitati (con strade di larghezza insufficiente) sono sovraffollati di auto;
- i centri commerciali e direzionali vengono spostati al di fuori delle città, in vicinanza di strade a scorrimento veloce, per poter essere raggiunti più facilmente;
- uffici e negozi del centro città sono più scomodi da raggiungere, perdono clienti in favore dei grandi centri commerciali e direzionali fuori città, e chiudono;

1. La situazione attuale

- i centri abitati, sempre meno vivibili (a causa del traffico) e meno serviti, si spopolano in favore di lottizzazioni che estendono le città in orizzontale;
- l'estensione delle città in orizzontale aumenta le distanze da percorrere, rendendo gli spostamenti con energia muscolare sempre meno desiderabili;
- le lottizzazioni vengono accettate dal potere politico al fine di incamerare gli oneri urbanistici, ma in assenza di programmazione i nuovi insediamenti sono serviti (strade, trasporti, linee elettriche, telefoniche, del gas, uffici pubblici, poste, scuole, ospedali, polizia) in modo inadeguato, in quanto progettati per una densità di popolazione molto inferiore (rurale);
- la densità abitativa di una periferia diffusa è insufficiente per programmare ed esercire in economia il trasporto pubblico, lasciando il mezzo privato come unica alternativa;
- in mancanza di programmazione (il proponente privato delle lottizzazioni ha come priorità le abitazioni da vendere), i dintorni delle abitazioni mancano di luoghi di aggregazione, gioco, svago, riducendo le interazioni umane e sociali e più in generale la qualità della vita.

Il trasporto su strada (non solo di persone) risulta responsabile per un sesto delle emissioni globali di anidride carbonica (tabella 1.1); in Italia, il trasporto su strada è responsabile per ben un quarto delle emissioni di CO_2 (sempre in tabella 1.1, col 29% del consumo di energia primaria [10]).

Il desiderio di mitigare l'inquinamento dell'aria, di salvare l'umanità dalle conseguenze del cambiamento climatico (invero dotato di enorme inerzia e amplificato da meccanismi naturali di feed-back positivo) e di mantenere il livello di mobilità, ricchezza, benessere e qualità di vita anche nell'eventualità di un esaurimento (o abbandono volontario!) dei combustibili fossili, porta a ricercare e implementare tecnologie innovative improntate a una maggiore sostenibilità, nella mobilità come nell'intero campo dell'energia:

- il protocollo di Kyoto, firmato nel 1997, ha come obiettivo la riduzione delle emissioni climalteranti, al fine di contenere la concentrazione di CO_2 in atmosfera sotto le 450ppm, nella speranza che questo riesca a scongiurare l'intensificarsi della frequenza di eventi climatici estremi (aumento della temperatura media sulla superficie terrestre contenuto entro i 2°C);
- il programma d'azione comunitaria "Europa 2020" prevede, tra gli altri obiettivi, di ridurre le emissioni del 20% rispetto il livello del 1990, portare al 20% la quota di consumi finali di energia soddisfatti con fonti rinnovabili e incrementare del 20% l'efficienza energetica;
- sempre la comunità europea, col progetto "Roadmap 2050", intende ridurre entro il 2050 le emissioni dell'80% rispetto al livello del 1990, imponendo al settore della generazione elettrica la decarbonizzazione totale (azzeramento delle emissioni);

- come se ciò non bastasse, è in discussione in sede europea la fissazione di alcuni obiettivi (non vincolanti) al 2030: 40% di riduzione dei gas serra rispetto alle emissioni del 1990, 30% di energia da rinnovabili, 40% di riduzione dei consumi (le cifre esatte sono oggetto di dibattito in corso)[36].

A questo riguardo, è significativo notare:

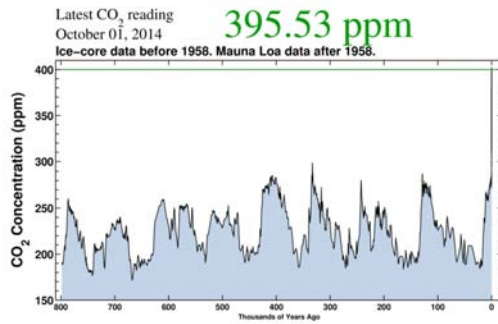
1. come i grafici di figura 1.1 lascino spazio a pochi dubbi riguardo l'incidenza del contributo antropico sulla concentrazione atmosferica di CO_2 ;
2. come il continuare l'estrazione e il consumo dei combustibili fossili (imposto dalla domanda mondiale di energia versatile e a basso costo) significhi ri-emettere in atmosfera i gas ad effetto serra assorbiti milioni di anni fa per mezzo della fotosintesi da parte di organismi vegetali primitivi, poi decomposti anaerobicamente a formare i giacimenti d'idrocarburi fossili;
3. come le leggi economiche suggeriscano che, in mancanza di risoluzioni sostenute da una forte determinazione della popolazione a livello globale, l'estrazione dei combustibili fossili continuerà finché non saranno stati consumati i giacimenti di più facile ed economico sfruttamento e il costo marginale dei combustibili successivamente estraibili risulterà superiore a quello di altre fonti energetiche, o al prezzo che i consumatori saranno disposti a pagare;
4. come riportare la composizione chimica dell'atmosfera e la temperatura media globale alle condizioni delle ere geologiche in cui era disabitata, non sia per nulla desiderabile.

Si intende valutare e confrontare le prestazioni energetiche, economiche ed ambientali dei vari mezzi di trasporto e delle tecnologie di propulsione, al fine di individuare il paradigma di mobilità più efficiente, economico, sostenibile e desiderabile. La sfida che ci si para davanti, ovvero soddisfare il crescente bisogno di mobilità (numero di veicoli circolanti triplicato dal 2000 al 2050, [19]) e il consumo energetico di una popolazione sempre maggiore in maniera sostenibile (ovvero riducendo, o mitigando, consumi ed emissioni) e ad un costo accettabile, è enorme, richiedendo scelte e soluzioni ambiziose sia a livello tecnologico che sociale: nondimeno, sfide similmente sovrastanti hanno costellato la storia dell'umanità e sono state superate. Analizzare problemi e escogitare soluzioni è il mestiere dell'ingegnere.

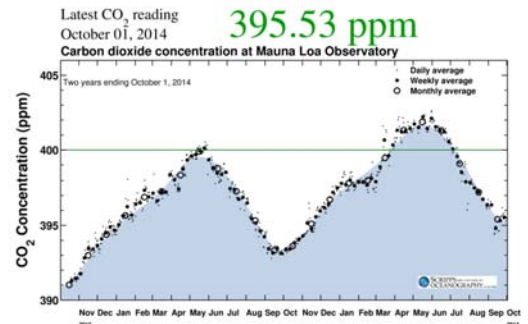
1.1. Motori a combustione interna

A causa dell'elevata complessità della fisica inerente ad un motore a combustione interna, se ne studia il comportamento tramite i cicli termodinamici ideali di riferimento. I cicli termodinamici si basano su ipotesi non verificate nella realtà, ma hanno il pregio di essere facili da studiare e di dare un'indicazione di massima sul comportamento del motore reale. Le ipotesi di idealità formulate per i cicli termodinamici sono:

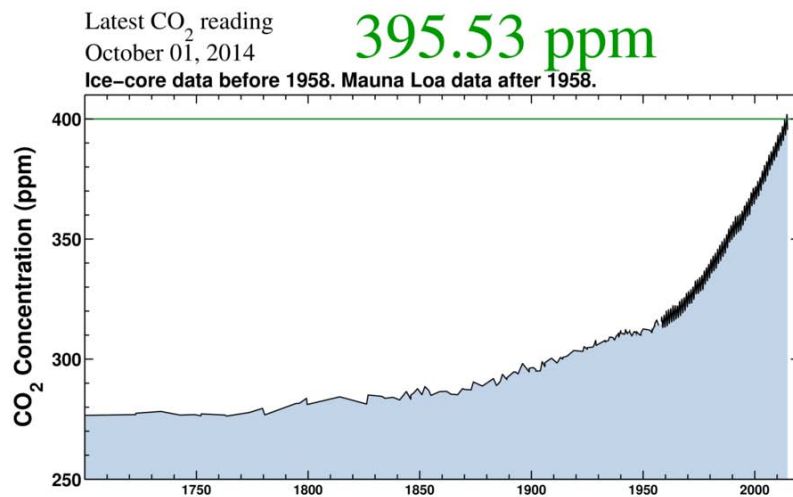
1. La situazione attuale



(a) ultimi 800 000 anni



(b) ultimi due anni



(c) dal 1700 ad oggi

Figura 1.1.: registrazioni delle concentrazioni di gas CO_2 in atmosfera presso l'osservatorio Mauna Loa nelle Hawaii (dette anche Keeling curve), i dati precedenti il 1958 derivano da misurazioni sul ghiaccio polare, fonte: Scripps institution of oceanography, University of California San Diego [43]

1.1. Motori a combustione interna

Mton CO2 (% del totale)	globali	paesi OECD europei (12%)	Italia (1.3%)
produzione di elettricità e calore	13 066.8 (41.7%)	1 353.6	134.2
altri usi propri dell' industria energetica	1 542.9 (4.9%)	182.5	17.8
manufatturiero e costruzioni	6 508.7 (20.7%)	590.8	54.8
trasporti	7 001.1 (22.3%)	936.5	108.2 (27.5%)
di cui, su strada	5 172.0 (16.5%)	877.4	102.0 (26.0%)
altri settori	3 222.9 (10.3%)	683.6	78.0
di cui, residenziale	1 851.6 (5.9%)	430.8	50.9 (13.0%)
TOTALE	31 342.3	3 747.1	393.0

Tabella 1.1.: emissioni di CO2 per settore nel 2011, dati IEA [2] (per paesi “OECD europei” s’intendono: Austria, Belgium, Czech Republic, Denmark, Estonia, Finland, France, Germany, Greece, Hungary, Iceland, Ireland, Italy, Luxembourg, Netherlands, Norway, Poland, Portugal, Slovak Republic, Slovenia, Spain, Sweden, Switzerland, Turkey, United Kingdom)

- nessun flusso di materia tra volume del cilindro e ambiente esterno;
- le fasi di combustione e di scarico dei gas caldi vengono sostituite con uno scambio termico attraverso le pareti della camera di scoppio;
- le compressioni ed espansioni sono adiabatiche reversibili (isoentropiche);
- il fluido di lavoro è un gas ideale, non viene considerata la presenza del combustibile (la cui portata è trascurabile rispetto al flusso d’aria), nè il comportamento reale dei gas (calori specifici variabili con la temperatura, reazioni chimiche alle alte temperature tali da modificare la composizione e il comportamento dei gas).

Pertanto, nello studio di un motore, si valuta il lavoro fornito dal modello termodinamico ideale, a cui si sottraggono le componenti di dissipazione, anch’esse modellizzate.

Entrambi i modelli di motore a combustione interna di seguito (sezioni 1.1.1 e 1.1.2) presi in considerazione sono formati da uno o più cilindri (del tipo di figura 1.2) in cui avviene la combustione della miscela combustibile-aria e la trasformazione dall’energia chimica del combustibile nell’energia meccanica dell’albero rotante: il moto alternativo del pistone, sospinto dalla pressione della combustione, viene trasformato dal complesso biella-manovella nel moto rotatorio dell’albero (inserito nel foro della manovella); in corrispondenza del cielo del cilindro, sono praticati dei fori per alloggiare le valvole di ammissione e scarico dei gas nel cilindro, e la candela che accende la miscela aria-carburante scoccando una scintilla (le candele sono presenti solo nei motori ad accensione comandata).

1. La situazione attuale

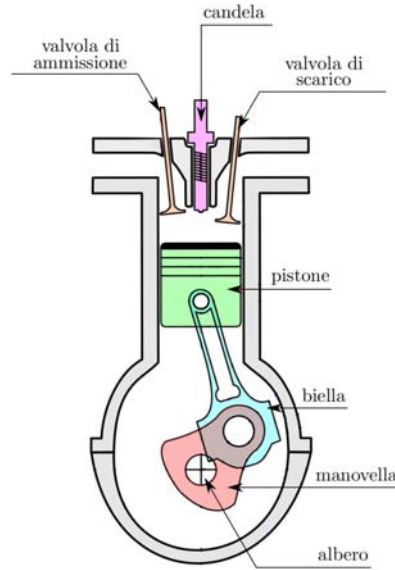


Figura 1.2.: sezione del cilindro di un motore a combustione interna[34]

1.1.1. Motore ad accensione comandata

Il motore ad accensione comandata, così chiamato perché l'ignizione della miscela aria-combustibile viene innescata dallo scoccare di una scintilla nella camera di combustione, viene studiato per analogia col ciclo Otto termodinamico. Il ciclo Otto (il cui diagramma pressione-volume è riportato in figura 1.3) si basa su una prima fase di compressione isoentropica (1-2), nella quale il volume occupato dal fluido di lavoro all'interno del cilindro passa dal valore massimo al valore minimo (rapporto di compressione $r_v = \frac{V_{max}}{V_{min}} = \frac{V_1}{V_2}$), seguita da un riscaldamento a volume costante (isocoro 2-3), poi una fase di espansione isoentropica (3-4) e infine un raffreddamento isocoro (4-1).

Per il primo principio della termodinamica ($dU = dQ - dL$) applicato a una trasformazione ciclica ($\oint dU = 0$), il lavoro estratto dal ciclo ($L = L_{34} - |L_{12}|$, con $L_{12} < 0$) equivale al calore fornito al fluido ($Q_{23} - |Q_{41}|$, con $Q_{41} < 0$): ricordando che le trasformazioni isoentropiche sottostanno alla

$$TV^{k-1} \text{ costante}$$
$$T_3 = T_4 \left(\frac{V_4}{V_3} \right)^{k-1} \qquad T_2 = T_1 \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1}$$

con $k = \frac{c_p}{c_v}$ funzione della composizione del gas e della temperatura (per l'aria a temperatura ambiente $k = 1.4$), il rendimento risulta

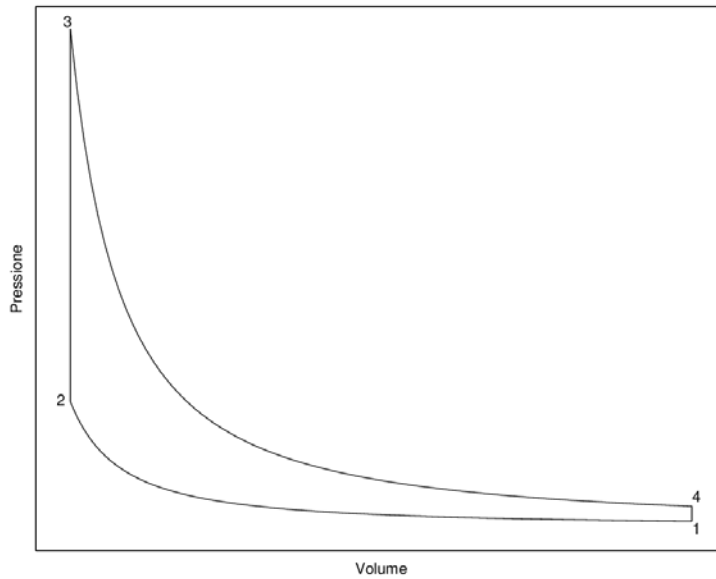


Figura 1.3.: diagramma di Clapeyron di ciclo Otto ideale

$$\begin{aligned}
 \eta_{Otto} &= \frac{L}{Q_{23}} = \frac{Q_{23} - |Q_{41}|}{Q_{23}} = 1 - \frac{|Q_{41}|}{Q_{23}} = 1 - \frac{c_v(T_4 - T_1)}{c_v(T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} \\
 &= 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_4 r_v^{k-1} - T_1 r_v^{k-1}} = 1 - r_v^{1-k}
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

ovvero, con $k = 1.4$ e $r_v = 11$, $\eta_{Otto} = 61.7\%$ (vedi figura 1.4). Da questo rendimento massimo teorico, per giungere al comportamento del motore reale è necessario considerare la non-idealità del processo di combustione, le perdite di calore alle superfici del cilindro, l'energia spesa per aspirare ed espellere il fluido di lavoro dal cilindro, gli attriti del motore, ma la formula del rendimento riesce a fornire l'indicazione, valida anche per il motore reale, che quanto maggiore è il rapporto di compressione (limitato dal voler evitare la detonazione spontanea del combustibile, che a sua volta dipende dal numero di ottani di quest'ultimo), tanto maggiore sarà il rendimento.

1.1.2. Motore ad accensione spontanea

Il motore ad accensione spontanea è basato sul ciclo termodinamico Diesel (figura 1.5), il quale differisce dal ciclo Otto nella fase di combustione-riscaldamento (2-3) che qui avviene a pressione costante (nel motore reale, il cilindro aspira solo aria e il combustibile viene iniettato verso il termine della fase di compressione, di modo che bruci spontaneamente per le elevate temperature raggiunte comprimendo il fluido di lavoro): il rapporto

1. *La situazione attuale*

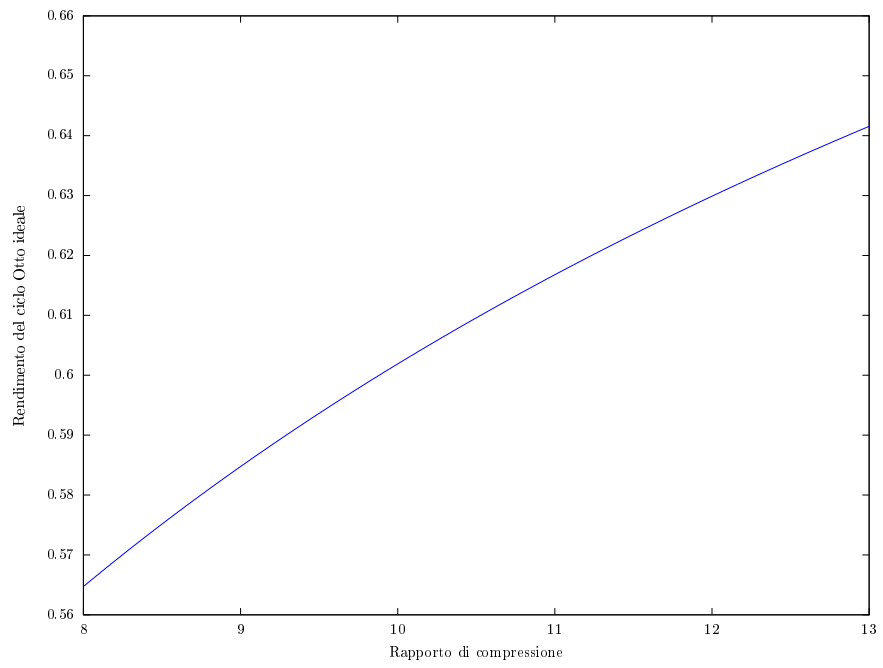


Figura 1.4.: rendimento del ciclo Otto ideale al variare del rapporto di compressione (formula (1.1)), con $k = 1.4$

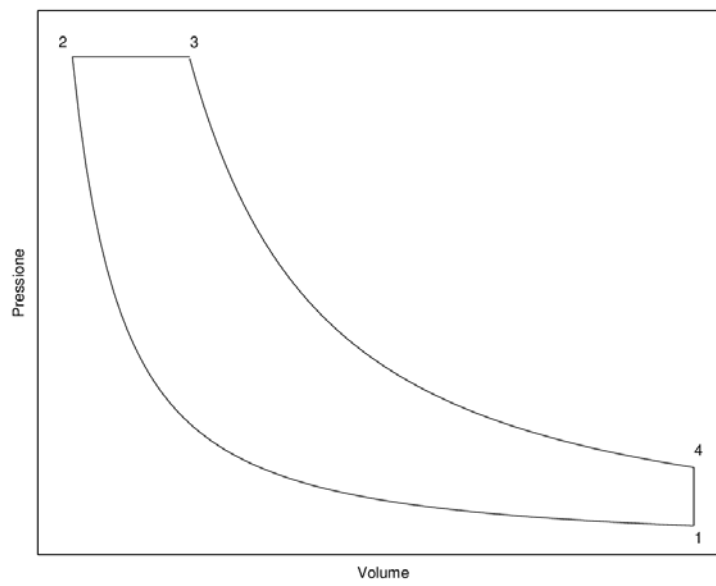


Figura 1.5.: diagramma di Clapeyron di ciclo Diesel ideale

tra i volumi di fine e inizio combustione è detto rapporto di combustione $r_c = \frac{V_3}{V_2}$. Il rendimento risulta quindi (tenendo che, per la compressione isoentropica vale $T_2 = T_1 r_v^{k-1}$, per il riscaldamento isobaro $T_3 = r_c T_2$ e infine

$$T_4 = T_3 \left(\frac{V_3}{V_4} \right)^{k-1} = T_3 \left(\frac{V_3}{V_1} \right)^{k-1} = T_3 \left(\frac{V_3}{V_2} \frac{V_2}{V_1} \right)^{k-1} = T_3 \left(\frac{r_c}{r_v} \right)^{k-1} = r_c T_2 \left(\frac{r_c}{r_v} \right)^{k-1}$$

)

$$\begin{aligned} \eta_{Diesel} &= \frac{L}{Q_{23}} = 1 - \frac{|Q_{41}|}{Q_{23}} = 1 - \frac{m c_v (T_4 - T_1)}{m c_p (T_3 - T_2)} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{k(T_3 - T_2)} \quad (1.2) \\ &= 1 - \frac{r_c T_2 \left(\frac{r_c}{r_v} \right)^{k-1} - T_2 r_v^{1-k}}{k(r_c T_2 - T_2)} = 1 - \frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)} r_v^{1-k} \end{aligned}$$

. A parità di rapporto di compressione r_v , il rendimento del ciclo Diesel è inferiore al rendimento del ciclo Otto (vedi figura 1.6; infatti il termine $\frac{r_c^k - 1}{k(r_c - 1)}$, sviluppato in serie di Taylor al primo ordine nell'intorno di $r_c = 1$, diventa $\frac{[1 + k r_c^{k-1} (r_c - 1) + \dots] - 1}{k(r_c - 1)} = r_c^{k-1}$ che, per $k = 1.4$ e $r_c \geq 1$, è sempre superiore all'unità), ma i motori ad accensione spontanea vengono progettati con rapporti volumetrici di compressione superiori, proprio volendo comprimere il volume del cilindro per portare la miscela aria-carburante alla temperatura di auto-ignizione di quest'ultimo. In figura 1.6 è riportato l'andamento del rendimento della formula (1.2), al variare del rapporto di compressione r_v e per due diversi valori del rapporto di combustione r_c ($r_c = 1$ indica una combustione a volume costante, caratteristica del ciclo Otto; $r_c \simeq 2$ è un valore tipico per i motori a ciclo Diesel): il ciclo Otto mostra un rendimento teorico più elevato, ma per rapporti di compressione preclusi dal presentarsi della detonazione spontanea (non comandata dalla candela) della benzina.

1.1.3. Rendimenti reali dei motori a combustione interna, voci di perdita

I valori dei rendimenti espressi dalle formule (1.1) e (1.2) (figure 1.4 e 1.6, rispettivamente per motore a benzina e gasolio) sono i valori teorici di efficienza del ciclo termodinamico ideale: non dipendono nè dalle condizioni atmosferiche (temperatura, pressione, umidità dell'aria aspirata) nè dalle condizioni operative (velocità e potenza erogata) del motore.

Indicato con η_{tI} il rendimento termodinamico ideale, si definisce un rendimento $\eta_{tFA} \approx (1 - 0.25\phi)\eta_{tI}$ del ciclo aria-combustibile (dove ϕ è il rapporto combustibile-aria rispetto al rapporto stechiometrico², ovvero $\phi = \frac{(\dot{m}_c/\dot{m}_a)}{(\dot{m}_c/\dot{m}_a)_{stech}} = \left(\frac{\dot{m}_c}{\dot{m}_a} \right) \left(\frac{\dot{m}_a}{\dot{m}_c} \right)_{stech}$), il cui diagramma termodinamico è ancora rappresentato dalle figure 1.3 e 1.5, ma in cui si considera il

²in condizioni stechiometriche, è presente la quantità d'aria sufficiente a ossidare completamente il combustibile

1. La situazione attuale

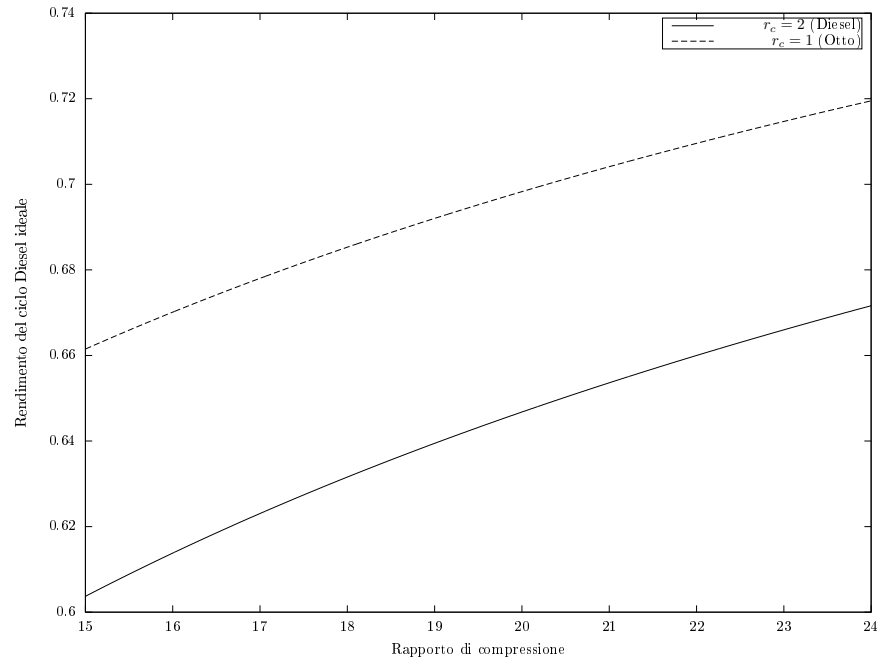


Figura 1.6.: rendimento del ciclo Diesel ideale in funzione del rapporto di compressione r_v e del rapporto di combustione r_c (formula (1.2))

comportamento reale dei gas e la presenza del combustibile: per i motori ad accensione comandata, è normalmente $\phi \simeq 1$ e quindi $\eta_{tFA} \approx 0.75\eta_{tI}$.

Per giungere al rendimento termodinamico reale, le fonti di perdita ulteriori da considerare sono, in ordine approssimativo d'importanza:

1. perdite di calore attraverso le pareti della camera di combustione;
2. tempo di combustione non istantaneo, ovvero una porzione della carica di combustibile brucia quando il pistone si è già abbassato rispetto al punto morto superiore, non producendo lavoro; ciò implica un abbassamento della pressione massima di ciclo rispetto al ciclo ideale;
3. l'apertura della valvola di scarico prima del termine della fase di espansione provoca un brusco abbassamento di pressione all'interno del cilindro, scaricando (senza sfruttarla) una parte dell'energia posseduta dal fluido;
4. combustione non completa, ovvero una parte di energia viene scaricata insieme ai fumi senza essere sfruttata, sotto forma di idrocarburi incombusti;
5. nei motori ad accensione comandata, l'ignizione viene comandata in anticipo rispetto al punto morto superiore, quindi aumenta il lavoro richiesto al pistone durante il termine della fase di compressione (l'anticipo di ignizione risulta da un compromesso dovuto al tempo di combustione finito).

Il livello di combustibile incombusto misurato a valle dello scarico è nell'ordine del 1-2% del combustibile in ingresso, ma l'importanza delle perdite per combustione non completa è superiore, perchè una parte del combustibile che non fornisce lavoro viene combusto nella fase di scarico dal cilindro.

A livello di stima, si possono assumere costanti le perdite 2-5, ed esprimere il rendimento termodinamico reale come $\eta_t \approx \eta_{tFA} \eta_{losses} (1 - Q) \approx 0.8 \eta_{tFA}$, dove $\eta_{losses} \simeq 95\%$ rappresenta le voci di perdita 2-5 e Q è la quota di calore perso (voce 1), con $Q \approx 15\%$: Q aumenta se aumenta il rapporto area-volume del cilindro (proporzionale al rapporto tra energia persa alle pareti e energia immessa nel cilindro sotto forma di combustibile) o il rapporto combustibile-aria, mentre cala al crescere della velocità del motore.

Infine, una quota del lavoro netto fornito dal fluido di lavoro nel cilindro $L' = \eta_t m_c LHV$ viene persa per attriti:

1. attrito per sfregamento tra parti metalliche, come l'anello della testa del pistone con le pareti del cilindro;
2. attriti dei gas, principalmente con le valvole;
3. perdite meccaniche negli accessori del motore e nelle loro cinghie di trasmissione;
4. perdite nella trasmissione del moto dall'albero del motore alle ruote.

L'efficienza meccanica $\eta_m = \frac{L_{out}}{L'}$ è molto sensibile alle condizioni di guida: quasi nulla quando la potenza richiesta è nulla (veicolo lasciato procedere per inerzia, oppure fermo o in fase di frenatura, il rendimento è nullo perchè il lavoro erogato è nullo ma viene consumato combustibile per vincere gli attriti e mantenere il motore in rotazione), può raggiungere valori dell'ordine dell'80% quando la velocità è bassa e la potenza richiesta elevata (quindi coppia vicina al valore di progetto), normalmente vale 40 – 45%: è basso perchè il motore si trova normalmente a funzionare erogando una potenza molto inferiore alla potenza di picco per cui è stato dimensionato.[21]

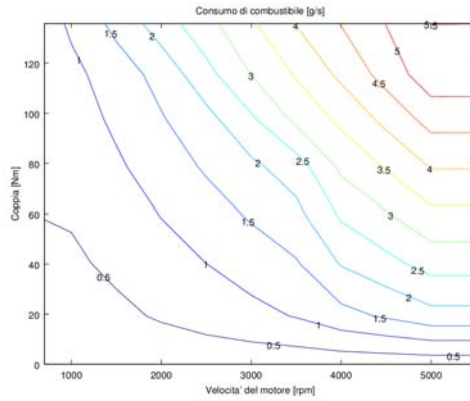
A titolo d'esempio, riporto nelle figure 1.7, 1.8 e 1.9 le caratteristiche di un motore reale (Saturn 1.9L benzina), così come riportate nel database del simulatore ADVISOR[39], e le curve isorendimento di un motore diesel (figura 1.10).

1.2. Motori elettrici

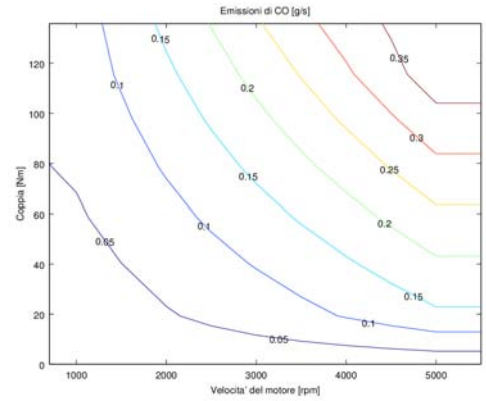
I motori elettrici convertono l'energia elettrica ai propri morsetti in energia meccanica all'albero. I motori elettrici (considerando per semplicità solo gli esemplari rotanti) si distinguono, a seconda dell'alimentazione, in motori in corrente continua e motori in corrente alternata: questi ultimi si dividono ulteriormente secondo il numero di fasi elettriche, la frequenza delle correnti di alimentazione, il numero di poli magnetici al proprio interno, e secondo il principio di funzionamento (asincrono detto anche ad induzione, sincrono).

In figura 1.11 è riportato lo schema elettrico generale di un motore elettrico alimentato in corrente alternata trifase: ad ognuno dei tre morsetti elettrici esterni è applicata una

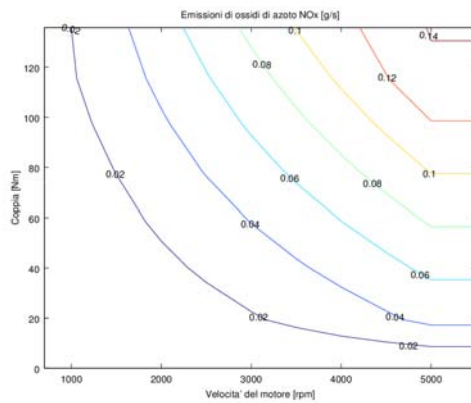
1. La situazione attuale



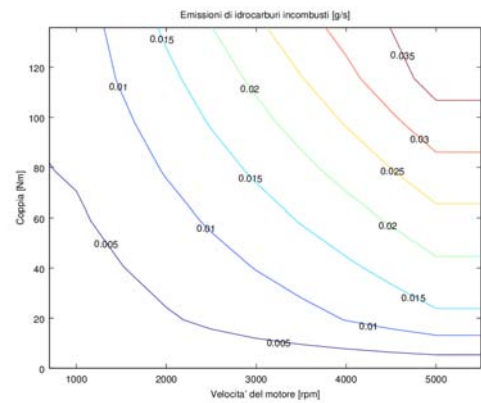
(a) consumo di combustibile



(b) emissioni di monossido di carbonio CO



(c) emissioni di ossidi di azoto NO_x



(d) emissioni di idrocarburi incombusti

Figura 1.7.: caratteristiche di consumi ed emissioni del motore Saturn 1.9L 63kW ad accensione comandata (fonte: database del simulatore Advisor da misure effettuate nel 1996 presso l'università della California)

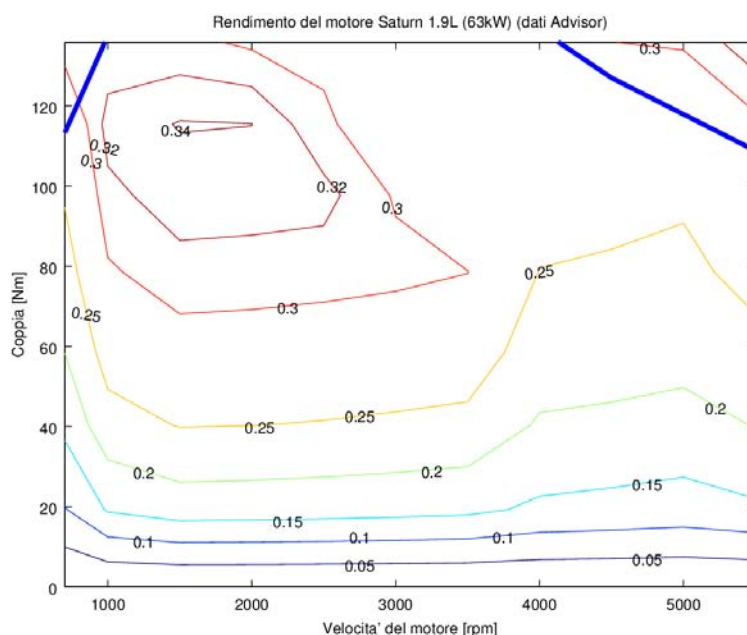


Figura 1.8.: rendimento del motore Saturn 1.9L 63kW a benzina (fonte: database del simulatore Advisor)

tensione variabile, la quale causa la circolazione di corrente nella corrispondente fase della macchina, con l'effetto ultimo di sviluppare coppia meccanica all'albero.

Nella maggioranza dei casi, viene alimentato il solo statore della macchina, mentre il rotore è o passivo (motore a induzione o a riluttanza) oppure dotato di una propria magnetizzazione (motore sincrono a magneti permanenti); esiste inoltre il caso di rotore alimentato direttamente (motore sincrono a rotore avvolto o asincrono con doppia alimentazione), che non è d'interesse. Infine, nei motori in corrente continua, è il rotore ad essere alimentato con la corrente che sviluppa coppia, mentre gli avvolgimenti statorici producono il campo magnetico necessario al funzionamento della macchina (a meno che non siano sostituiti da magneti permanenti).

Il motore elettrico ha il pregio di essere:

- reversibile, ovvero la stessa macchina può funzionare sia da motore che da generatore, il che permette di recuperare in fase di frenata parte dell'energia precedentemente fornita per accelerare il veicolo e reinviarla al dispositivo di accumulo, diminuendo il consumo energetico netto;
- sovraccaricabile, ovvero può fornire, per tempi ridotti, potenze superiori alla nominale (assorbendo correnti maggiori della nominale) senza che gli avvolgimenti raggiungano temperature tali da degradare i materiali isolanti, il che permette di dimensionarlo per una potenza inferiore rispetto un motore a combustione interna con analoga potenza di picco;

1. La situazione attuale

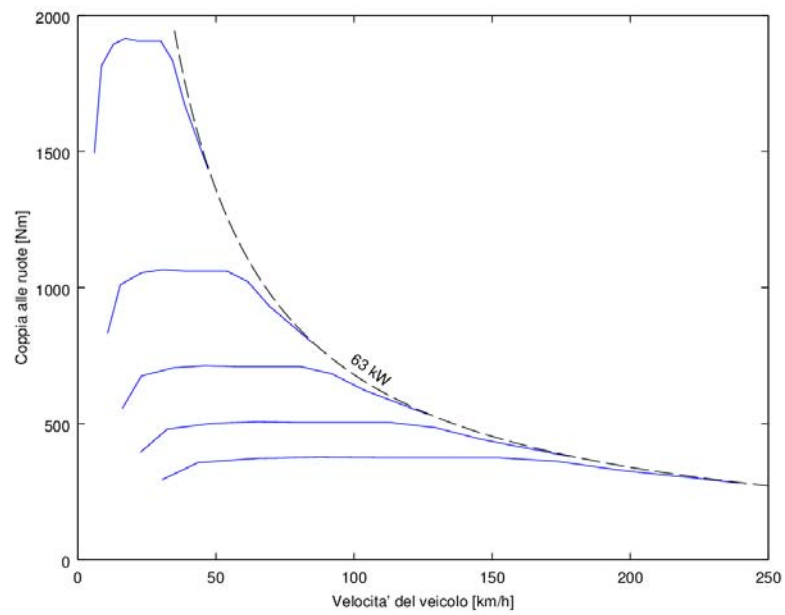


Figura 1.9.: caratteristica coppia-velocità del veicolo, ricavata dai limiti di funzionamento del motore Saturn 1.9L 63kW, modificati secondo i rapporto di riduzione delle varie marce (fonte: database del simulatore Advisor)

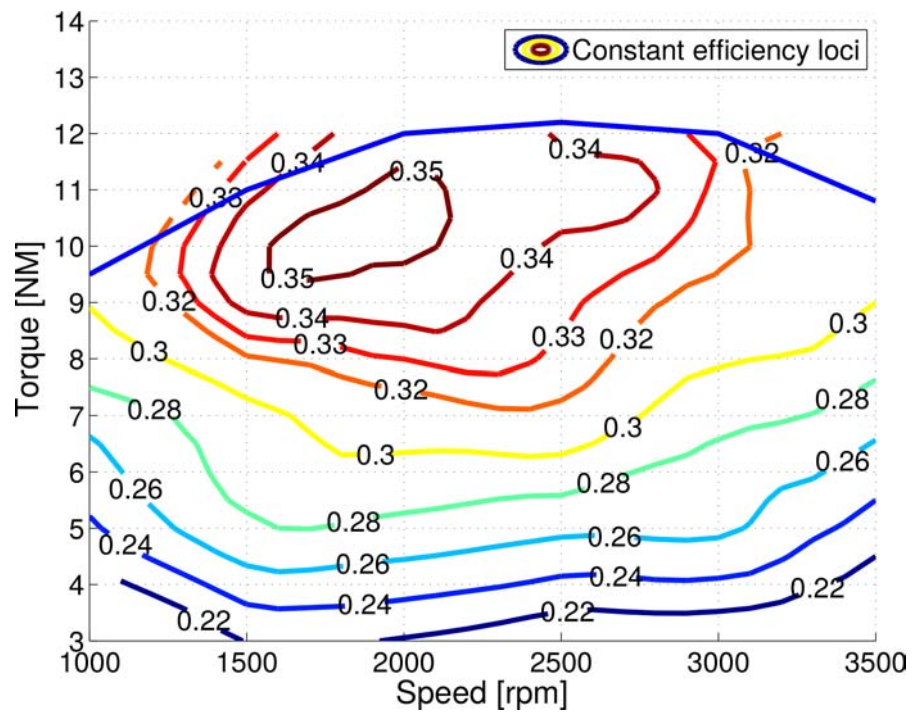


Figura 1.10.: rendimento del motore diesel 3kW in dotazione al banco ibrido del laboratorio EDLab Padova (misure e grafico ad opera del correlatore, dott. Morandin)

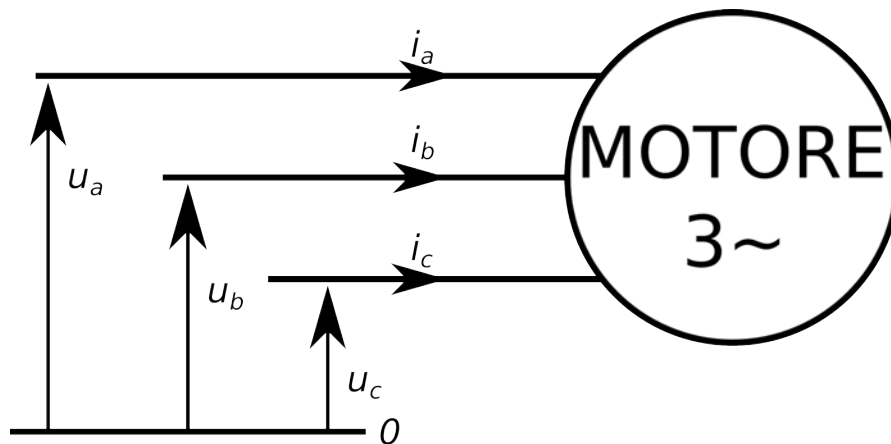


Figura 1.11.: paradigma di motore elettrico a corrente alternata trifase

1. La situazione attuale

- altamente efficiente sull'intero campo di funzionamento.

Il motore elettrico è intrinsecamente più efficiente del motore a combustione interna: quest'ultimo, sviluppando al proprio interno un processo di combustione, vede il proprio rendimento massimo limitato dal secondo principio della termodinamica ($\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_0}{T_{max}}$, dove T_{max} è la temperatura massima dei gas combusti e T_0 la temperatura ambiente: ad esempio, con $T_0 \simeq 40^\circ C = 313K$ e $T_{max} \approx 1300^\circ C = 1573K$, risulta $\eta_{Carnot} = 1 - \frac{313}{1573} \simeq 0.8$) e dal fatto che, in condizioni di guida reali, il motore si trova a funzionare in regioni del proprio campo di funzionamento con rendimento medio molto inferiore al massimo. Al contrario, le perdite del motore elettrico si possono suddividere in:

- perdite Joule negli avvolgimenti statorici (e rotorici, se esistenti³), dipendono dal quadrato della corrente, grandezza che è collegata alla coppia sviluppata dal motore

$$P_J = P_{J,s} + P_{J,r} = R_s I_s^2 + R_r I_r^2 \propto C^2$$

dove R_s e R_r sono, rispettivamente, la resistenza di una fase di statore o di rotore, mentre I e P_J sono le rispettive correnti e perdite per effetto Joule;

- perdite per isteresi e correnti parassite nei materiali ferromagnetici investiti da flusso magnetico variabile, dipendono (con legge lineare o quadratica) dalla frequenza delle correnti d'alimentazione, grandezza correlata alla velocità del motore;
- perdite meccaniche per gli attriti nei cuscinetti e tra superfici rotoriche e aria al traferro, considerate proporzionali alla velocità.

Un ulteriore vantaggio del motore elettrico è che, avendo una caratteristica elettromeccanica più aderente alla coppia idealmente richiesta per scopi di trazione (figura 1.17), non necessita di una trasmissione con cambio variabile e ha pertanto un più elevato rendimento di trasmissione motore-ruote. Per le simulazioni volte a determinare i consumi di un'auto elettrica, si è ritenuto di assumere un rendimento medio (sulle varie condizioni di funzionamento) dell'85% (motore a magneti permanenti).

1.2.1. asincrono

Le fasi statoriche vengono alimentate con una terna di tensioni sinusoidali sfasate tra loro di 120 gradi elettrici; l'evoluzione temporale delle tensioni e la disposizione spaziale degli avvolgimenti di fase fa sì che la distribuzione di campo magnetico risultante, alternativamente diretto dallo statore verso il rotore e viceversa, ruoti con frequenza pari al prodotto della frequenza di alimentazione per il numero di coppie polari del motore $f_B = f_{IP}$; per la legge di Lenz, nei circuiti rotorici cortocircuitati circolano delle correnti tali da contrastare i campi magnetici statorici, il che richiama maggiori correnti nello statore, finchè non si raggiunge una condizione di regime per i valori efficaci di corrente e

³nel caso di motore a magneti permanenti, non ci sono avvolgimenti rotorici e quindi nemmeno le relative perdite

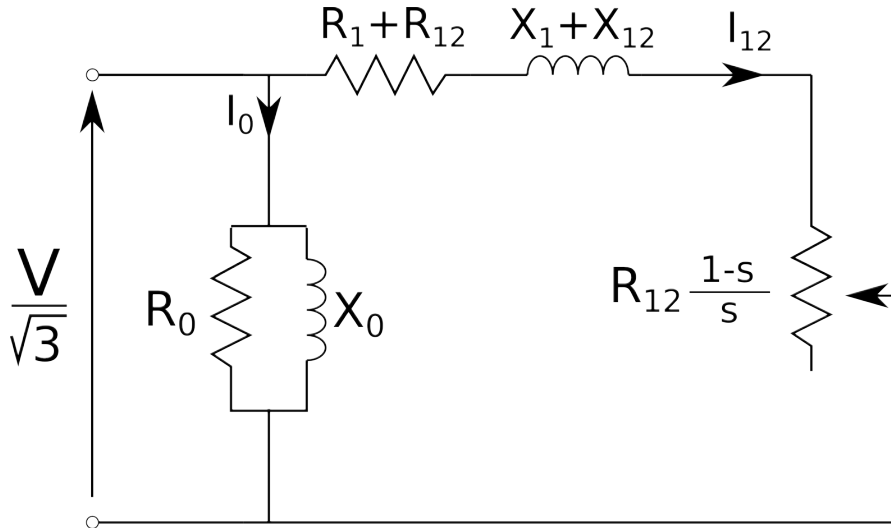


Figura 1.12.: circuito elettrico semplificato monofase equivalente di motore asincrono trifase

induzione magnetica. I conduttori attivi sono pertanto immersi in un campo magnetico ad essi ortogonale (attraversa il traferro in direzione radiale) e percorsi da corrente; ne consegue una forza tangenziale distribuita sui conduttori

$$\vec{F} \left[\frac{N}{m} \right] = \vec{i} \times \vec{B}$$

che, moltiplicata per la lunghezza attiva del motore e sommata per il numero di conduttori degli avvolgimenti, determina due momenti meccanici uguali e opposti su rotore e statore, i quali trascinano il rotore nel verso di rotazione del campo magnetico statorico.

Si definisce scorrimento la differenza di velocità tra campo magnetico statorico e rotore, rapportata alla velocità del campo.

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad n = n_0(1 - s) = \frac{60f}{p}(1 - s) [rpm]$$

Quanto maggiore è lo scorrimento, tanta più corrente viene richiamata ai morsetti del motore, erogando maggiore coppia e riportando infine il motore in condizione di scorrimento ridotto (normalmente entro il 5%). Pertanto, modificando la frequenza di alimentazione, si adatta la velocità di sincronismo n_0 e, a meno dello scorrimento, la velocità effettiva del motore.

È riportato in figura 1.12 il circuito elettrico semplificato di motore asincrono trifase (nel quale R_1 , R_{12} , X_1 , X_{12} rappresentano, rispettivamente, resistenze e reattanze di statore e di rotore riportate allo statore, e viene introdotta una impedenza Z tale per cui $Z^2 = R_1^2 + X^2$ e la reattanza $X = X_1 + X_{12}$), da cui si possono ricavare le espressioni di potenza e coppia:

1. La situazione attuale

$$\begin{aligned}
 I_{12} &= \frac{\left(\frac{V}{\sqrt{3}}\right)}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_{12}}{s}\right)^2 + X^2}} \\
 P_m &= 3 \left(R_{12} \frac{1-s}{s}\right) I_{12}^2 = \frac{V^2 \left(R_{12} \frac{1-s}{s}\right)}{\left(R_1 + \frac{R_{12}}{s}\right)^2 + X^2} \\
 C &= \frac{P_m}{\Omega_m} = \frac{P_m}{\Omega_0(1-s)} = \frac{V^2 \left(R_{12} \frac{1-s}{s}\right)}{\Omega_0(1-s) \left[\left(R_1 + \frac{R_{12}}{s}\right)^2 + X^2\right]} = \frac{V^2 \frac{R_{12}}{s}}{\Omega_0 \left(R_1^2 + \frac{R_{12}^2}{s^2} + 2R_1 \frac{R_{12}}{s} + X^2\right)} \\
 &= \frac{V^2}{\Omega_0 \frac{s}{R_{12}} \left(Z^2 + \frac{R_{12}^2}{s^2} + 2R_1 \frac{R_{12}}{s}\right)} = \frac{V^2}{\Omega_0 Z \left(\frac{Zs}{R_{12}} + \frac{R_{12}}{Zs} + \frac{2R_1}{Z}\right)} \quad (1.3)
 \end{aligned}$$

Si può dedurre dall'analisi dell'espressione (1.3) come la caratteristica meccanica di un asincrono si possa modificare:

- agendo sulla resistenza rotorica, ovvero modificando il rapporto $\frac{R_{12}}{Z}$ (figura 1.13);
- agendo sulla frequenza di alimentazione, ovvero modificando la velocità di sincronismo $n_0 = \frac{60}{2\pi} \Omega_0 = \frac{60f}{p}$ (figura 1.14).

La variazione della resistenza rotorica è possibile solo in caso di rotore avvolto collegato a un reostato esterno, o di rotore a doppia gabbia (nel quale si sfrutta la variazione della impedenza rotorica con lo scorrimento per ottenere una diversa caratteristica meccanica in avviamento e a regime): le diverse caratteristiche meccaniche ottenibili con reostato esterno sono rappresentate in figura 1.13. Per ottenere un'elevata coppia d'avviamento (a $n \simeq 0$ e $s \simeq 1$), si alza la resistenza rotorica; invece a regime ($n \simeq n_0$, $s \simeq 0$) si esclude il reostato esterno per avere una R_{12} più piccola possibile e ridurre le perdite Joule.

In figura 1.14, invece, si può apprezzare come la velocità di rotazione di un motore asincrono dipenda dalla frequenza delle tensioni di alimentazione, mentre la coppia massima dipenda dal rapporto tra il modulo delle tensioni e la frequenza. In figura 1.15 sono inoltre riportate le curve iso-rendimento di un motore asincrono: si noti come i rendimenti siano penalizzati (rispetto ai motori a magneti permanenti, il cui rendimento è riportato in figura 1.16) dalla presenza di una componente magnetizzante di corrente che, essendo funzionale a creare il flusso magnetico, è essenziale al funzionamento del motore, ma contribuisce alle perdite Joule senza erogare coppia.

1.2.2. sincro a magneti permanenti

Il motore sincro a magneti permanenti funziona sfruttando la stessa legge fisica già citata nel caso del motore asincrono, con la differenza che il campo magnetico rotorico è prodotto da dei magneti permanenti, o immersi nel rotore (IPM, *interior permanent magnet*) o incollati e bendati alla superficie rotorica (SPM, *surface permanent magnet*). Si può già intuire che il rendimento mostrato da una tale famiglia di motori superi quello

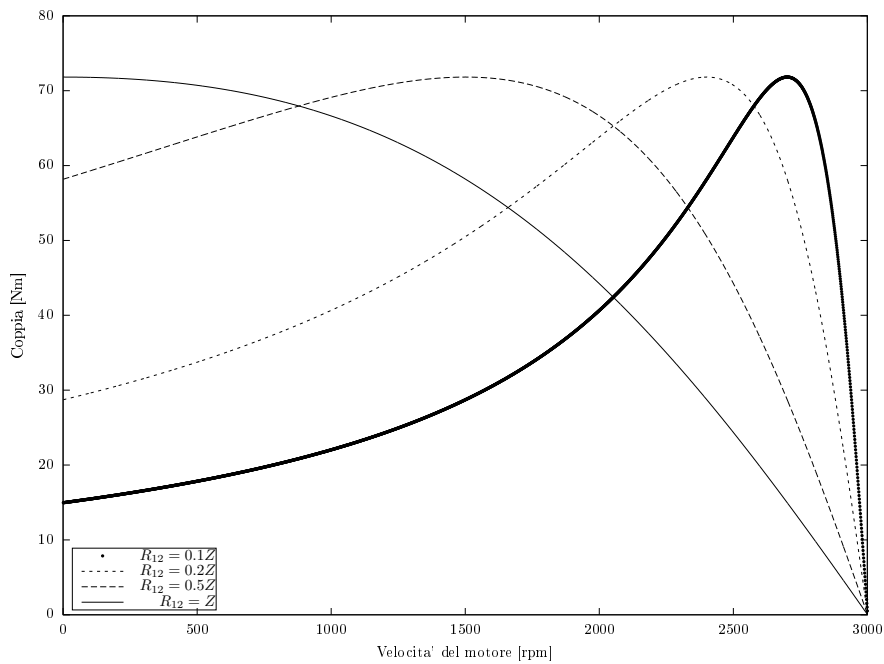


Figura 1.13.: caratteristica meccanica di un motore asincrono, variando la resistenza rotorica

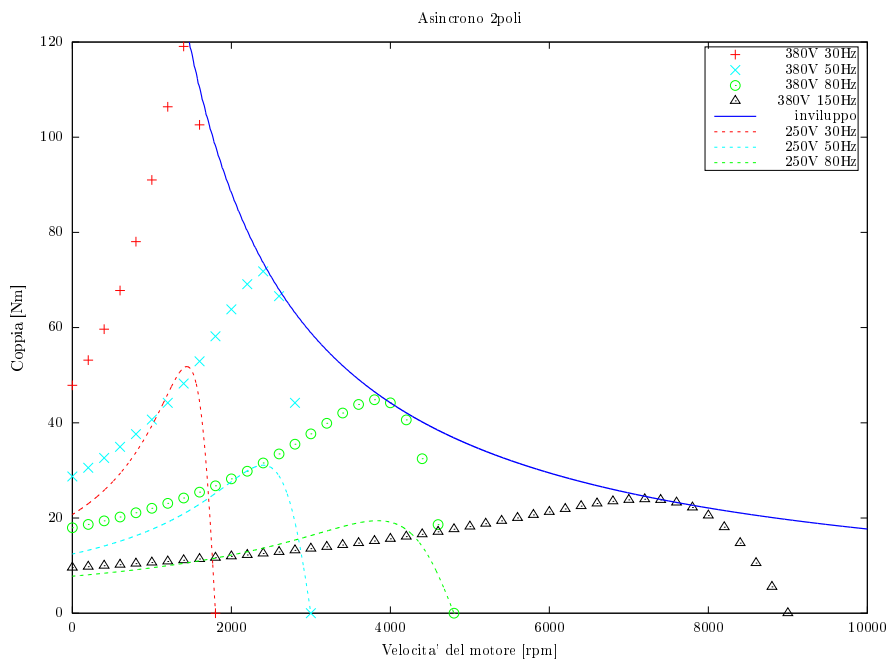


Figura 1.14.: caratteristica meccanica di un motore asincrono, variando frequenza e modulo delle tensioni di alimentazione

1. La situazione attuale

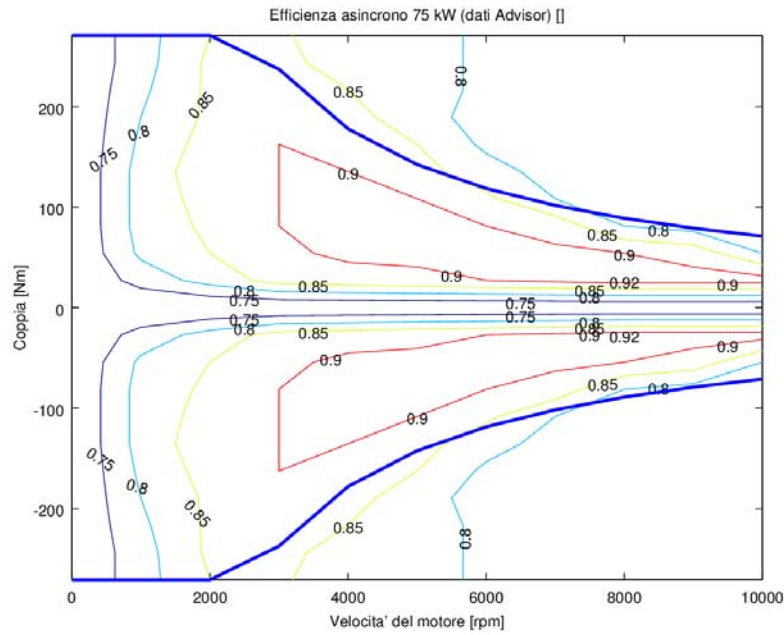


Figura 1.15.: mappa dell'efficienza di un motore asincrono da 75kW (fonte: database Advisor)

degli asincroni, proprio per l'assenza delle perdite Joule relative alle correnti rotoriche e alla corrente magnetizzante nello statore.

Lo studio di tali motori viene semplificato dall'impiego della teoria dei vettori spaziali in sistema di riferimento sincrono[33]: s'immagina di sostituire gli avvolgimenti di fase di statore con due bobine ortogonali rotanti alla stessa velocità del rotore

- bobina di asse diretto, allineata con l'asse magnetico di rotore (nel caso di un SPM, affacciata alla superficie del magnete permanente);
- bobina di asse in quadratura, situata sull'asse interpolare rotorico.

Nel caso di un SPM, le due bobine agiscono su percorsi magnetici di eguale riluttanza, in quanto il rotore è un cilindro solido e i magneti permanenti hanno una permeabilità molto vicina a quella del vuoto ($\mu_r \simeq 1.05$). Nel caso di un IPM, il flusso prodotto dalla bobina dell'asse diretto deve attraversare i magneti immersi nel rotore ed incontra pertanto una maggiore riluttanza rispetto al flusso dell'asse in quadratura, il quale penetra nel rotore senza incontrare le barriere in cui sono immersi i magneti.

L'equazione delle tensioni (in un sistema di riferimento rotante sincrono col rotore) di un motore SPM è

$$\mathbf{u} = R\mathbf{i} + L\frac{d\mathbf{i}}{dt} + j\omega_{me}L\mathbf{i} + j\omega_{me}\Lambda_{mg} \quad (1.4)$$

in cui $\omega_{me} = p\omega_m = p\frac{2\pi}{60}n = 2\pi f \left[\frac{rad}{s}\right]$ è la pulsazione angolare elettromeccanica, tanto maggiore della velocità di rotazione meccanica quante più sono le coppie polari p della macchina.

Riscrivendo l'equazione (1.4) suddividendo le componenti di asse diretto e in quadratura (rispettivamente, parte reale e immaginaria della formula), si ottiene:

$$\begin{aligned} u_d &= Ri_d + L\frac{di_d}{dt} - \omega_{me}Li_q \\ u_q &= Ri_q + L\frac{di_q}{dt} + \omega_{me}Li_d + \omega_{me}\Lambda_{mg} \end{aligned} \quad (1.5)$$

In termini di potenza:

$$\underbrace{u_d i_d + u_q i_q}_{\frac{2}{3}P_{in}} = \underbrace{Ri_d^2 + Ri_q^2}_{\frac{2}{3}P_{Joule}} + \underbrace{Li_d di_d + Li_q di_q}_{<\frac{2}{3}P_{magn}>=0} + \underbrace{\omega_{me}L(-i_q i_d + i_d i_q)}_{=0} + \underbrace{\omega_{me}\Lambda_{mg}i_q}_{\frac{2}{3}P_{em}}$$

Ricordando che la potenza reale è una volta e mezza la potenza calcolata nel sistema di riferimento sincrono (a causa dei coefficienti usati nelle matrici di trasformazione dei sistemi di riferimento, che per l'appunto mantengono l'ampiezza delle grandezze ma non la potenza risultante), la componente di potenza elettrica trasformata in potenza meccanica è:

$$P = \frac{3}{2}\omega_{me}\Lambda_{mg}i_q = M\omega_m$$

da cui

$$M = \frac{3}{2}p\Lambda_{mg}i_q \quad (1.6)$$

Riscrivendo la (1.5) in condizioni di regime (valori costanti di tensione e corrente, scritti in maiuscolo) e trascurando le resistenze, diventa

$$\begin{aligned} U_d &= -\Omega_{me}LI_q \\ U_q &= \Omega_{me}LI_d + \Omega_{me}\Lambda_{mg} \end{aligned} \quad (1.7)$$

Se ci si trova in condizione $I_d = 0$, $I_q = I_N$, ovvero si fa circolare solo la componente di corrente che dà coppia (I_q), ci si trova nel luogo MTPA (*max torque per amps*, massimo rapporto coppia su corrente). All'aumentare della velocità di rotazione, la tensione sugli avvolgimenti della macchina cresce, come da formula (1.7): al raggiungimento della velocità base Ω_B dell'azionamento, la circolazione della corrente necessaria ad erogare la coppia nominale dà una tensione di macchina pari al limite imposto dal motore o dall'inverter dell'azionamento.

1. La situazione attuale

$$U_N = \sqrt{U_d^2 + U_q^2} = \sqrt{(\Omega_B L I_N)^2 + (\Omega_B \Lambda_{mg})^2} \approx \frac{\Omega_B}{\Lambda_{mg} + \frac{L I_N}{2}}$$

Per far funzionare il motore al di sopra della velocità base, bisogna accettare un calo della coppia disponibile: a parità di corrente $\sqrt{I_d^2 + I_q^2} = I_N$, si cala la componente I_q (e quindi la coppia) e si inietta una $I_d < 0$ necessaria a mantenere la tensione nei limiti dell'azionamento (funzionamento in deflussaggio). Al raggiungimento della velocità Ω_{max} , la macchina non è più in grado di erogare coppia, tutta la corrente è sull'asse diretto:

$$U_q = U_N = \Omega_{max} L (-I_N) + \Omega_{max} \Lambda_{mg}$$

$$\Omega_{max} = \frac{U_N}{\Lambda_{mg} - L I_N}$$

Nei motori SPM il campo di velocità di funzionamento in deflussaggio non ha interesse pratico, non essendo molto esteso: normalmente è

$$\frac{\Omega_{max}}{\Omega_B} \simeq 1.05 - 1.10$$

I motori IPM mostrano un campo di velocità in deflussaggio più esteso, ma sono caratterizzati da formule più complesse per il MTPA e la coppia. In particolare dall'espressione della coppia (formula (1.8)) si osserva come siano presenti due termini:

- un termine di coppia (detta *cilindrica*) $\frac{3}{2} p \Lambda_{mg} i_q$ presente anche nella formula relativa al SPM;
- una componente di coppia (detta *di riluttanza*) peculiare dell'IPM, proporzionale alla diversa riluttanza incontrata lungo i percorsi magnetici delle linee di flusso di asse diretto e in quadratura ($L_d - L_q$), e che richiede per manifestarsi dell'iniezione di una componente i_d di corrente ($i_d < 0$, essendo $L_d < L_q$).

$$M = \frac{3}{2} p \Lambda_{mg} i_q + \frac{3}{2} p (L_d - L_q) i_d i_q = \frac{3}{2} p [\Lambda_{mg} + (L_d - L_q) i_d] i_q \quad (1.8)$$

Da ciò si deduce come l'espressione del MTPA di un IPM (non riportata) sia diversa dal quella del SPM, che non prevedeva componenti di corrente sull'asse diretto.

S'intuisce, per quanto detto sulla possibilità da parte dell'IPM di raggiungere velocità elevate grazie al funzionamento in deflussaggio, come il grafico riportato in figura 1.16 raffiguri l'andamento della caratteristica meccanica e il rendimento di un motore sincrono a magneti permanenti immersi nel rotore, un IPM per l'appunto.

1.3. Coppia ideale di trazione

Per gli scopi di trazione, si richiede al motore di presentare, nella propria caratteristica meccanica:

1.3. Coppia ideale di trazione

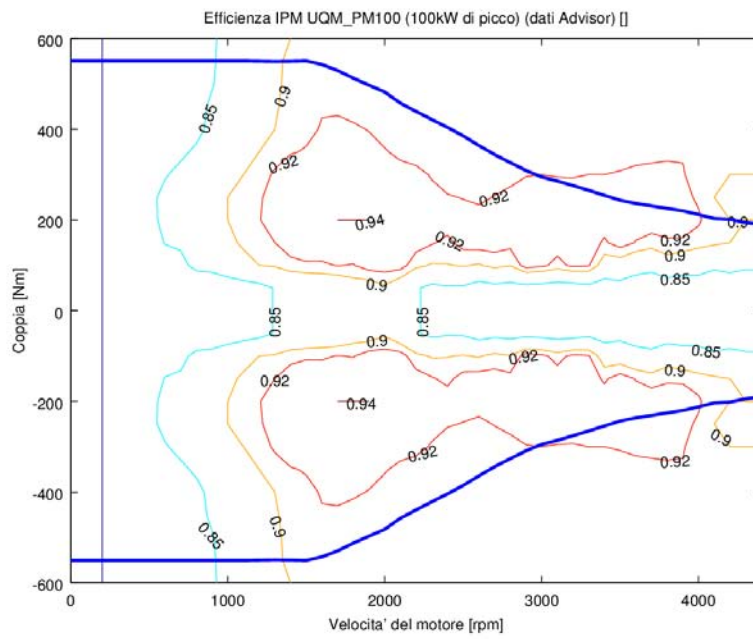


Figura 1.16.: mappa dell'efficienza di un motore sincrono a magneti permanenti da 100kW (fonte: database Advisor)

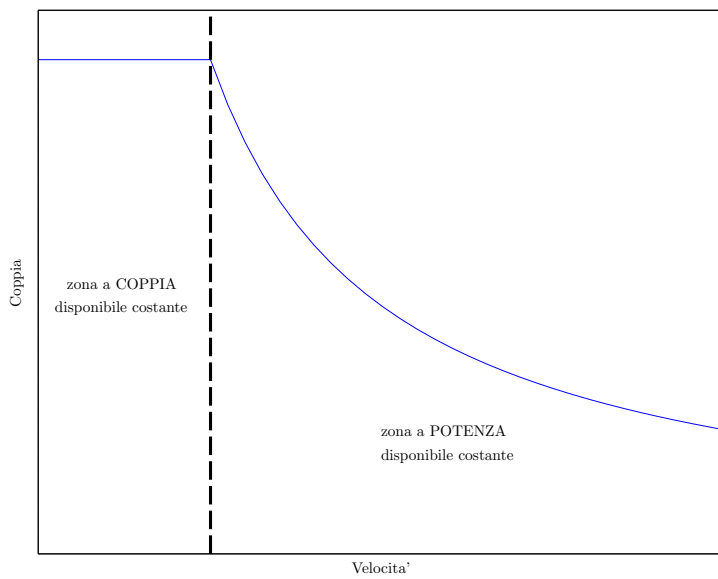


Figura 1.17.: andamento della coppia ideale di trazione

1. *La situazione attuale*

- una zona di funzionamento a coppia costante (pari alla coppia massima) per velocità ridotte (per le quali si vuole accelerare velocemente, quindi con coppie elevate);
- una zona a potenza disponibile costante, con coppia disponibile calante al crescere della velocità;
- viene inoltre vista con favore la possibilità di sovraccaricare temporaneamente il motore, ovvero fargli erogare per un tempo ridotto una coppia superiore a quella per la quale è stato dimensionato (dalla coppia di dimensionamento dipendono l'ingombro, il peso e il costo del motore), sfruttando l'inerzia termica dei materiali per assorbire per un tempo ridotto una corrente maggiore della nominale senza che la temperatura degli isolanti superi il limite.

2. Simulazioni e confronti: efficienza, costi ed emissioni

DISCLAIMER - GIGO (garbage in, garbage out)

Come in tutti i calcoli, anche per i risultati di queste simulazioni, le informazioni contenute nei risultati di un algoritmo hanno validità non superiore a quella dei dati di partenza: se i dati di partenza sono errati o basati su stime inverosimili, i risultati non hanno nessun valore.

Nel caso specifico, ho assunto che i motori funzionassero a rendimento costante, stimato a un valore verosimile, ignorando quindi la variabilità delle efficienze coi punti di funzionamento reali del motore in uno specifico percorso di guida. Analogamente, ho stimato gli altri rendimenti della serie energetica, oltre a costi ed emissioni, per i quali mi sono basato su stime presenti in letteratura.

Sarebbe ovviamente possibile, variando opportunamente i parametri di input delle simulazioni, ottenere qualunque risultato, in favore di ognuna delle tecnologie considerate. I risultati delle simulazioni non sono quindi garantiti nel rispecchiare le effettive efficienze, economie ed emissioni di veicoli reali, ma vogliono risultare verosimili.

Ogni errore è mia esclusiva responsabilità.

Per poter fare delle valutazioni, si stimano i rendimenti di conversione dell'intera catena energetica, dalla fonte primaria alle ruote del mezzo di trasporto, insieme a costi ed emissioni relativi anche alla produzione del veicolo. Inoltre, si conducono delle simulazioni dei consumi del veicolo che percorre i cicli di guida descritti nell'appendice A.

2.1. Veicolo con motore a combustione interna

2.1.1. Veicolo privato con motore a combustione interna

Per un'auto privata con motore a combustione interna, la fonte primaria d'energia sono combustibili fossili (petrolio o gas): per tener conto dell'energia spesa nei processi di estrazione dai giacimenti sotterranei, di raffinazione e infine di distribuzione alle cisterne dei distributori, da queste al serbatoio del mezzo e infine al condotto di aspirazione del motore, s'introduce un rendimento di estrazione-raffinazione-distribuzione dell'ordine del 75% (dissimilmente, [3] ipotizza due rendimenti in serie, uno di raffinazione, l'altro di distribuzione, entrambi del 75%, cioè un rendimento pozzo-serbatoio del 56%; questo valore appare basso, infatti in [3] viene controbilanciato da una stima eccessiva del rendimento medio del motore, del 30% per il motore ad accensione comandata e 43% per il motore ad accensione spontanea, valori più adatti a rappresentare il rendimento massimo

2. Simulazioni e confronti: efficienza, costi ed emissioni



Figura 2.1.: schema della catena energetica (dal pozzo alle ruote) per auto con motore a combustione interna

che non quello reale medio durante un ciclo di guida). Il rendimento di trasformazione del motore a combustione interna non è univoco; dipende dal tipo di motore (a combustione comandata o spontanea, rispettivamente per combustibili benzina o gasolio), dalle sue dimensioni (che dipendono dalla potenza di picco richiesta, ovvero dalle prestazioni del veicolo), dalle condizioni atmosferiche e dal punto coppia-velocità di funzionamento (deciso dalla velocità, accelerazione, riduzione motore-ruote¹, massa del veicolo e percorso e stile di guida): si assume un rendimento medio (media pesata sui vari punti di funzionamento) del 20% per motore a benzina, e 25% per motore a gasolio.

Ciò conduce a un rendimento globale (dal pozzo alle ruote) del 15% per il motore a benzina e di circa il 20% per il motore diesel.

Effettuando una media dei risultati (riportati in tabella 2.1) delle simulazioni, risulta un'efficienza media di $1.39 \frac{km}{kWh}$ per la benzina (corrispondente a $13.9 \frac{km}{l}$, avendo la benzina un contenuto energetico di $42 \frac{MJ}{kg} \simeq 10 \frac{kWh}{l}$, oppure a un consumo di $7.19 \frac{l}{100km}$) e $1.74 \frac{km}{kWh}$ per il gasolio, entrambe valutate dal serbatoio dell'auto alle ruote: nell'ipotesi di un'efficienza pozzo-serbatoio del 75%, si ricava che un'auto a benzina è in grado di percorrere circa 1 km ($1.04 \frac{km}{kWh}$) ogni kWh di energia primaria consumata (questo risultato è inferiore ai valori riportati da [8] in cui viene dato come consumo di energia primaria del veicolo a benzina di riferimento, $2.19 \pm 0.55 \frac{MJ}{km}$, ovvero $1.75 \pm 0.44 \frac{km}{kWh}$; ma in buon accordo coi risultati del simulatore ADVISOR che, per il ciclo UDSS calcola un consumo di $5.3 \frac{l}{100km}$, ovvero $1.89 \frac{km}{kWh}$ di benzina e $1.04 \frac{km}{kWh}$ di energia primaria), mentre un'auto con motore ad accensione spontanea riesce a coprire 1.31 km per ogni kWh di energia primaria consumata.

È difficile valutare le prestazioni di un motore a combustione interna, a causa della sua complessità, dei fenomeni fortemente non lineari che si manifestano al suo interno e i molteplici parametri da cui dipendono: per non appesantire la trattazione, si considerano dei valori medi di rendimenti, emissioni (2.38 kg di CO₂ equivalente per ogni litro di benzina consumato², calcolato come $3.1724 \frac{kgCO_2}{kg} \times 0.75 \frac{kg}{l} = 2.3793 \frac{kgCO_2}{l}$ dal valore di 3.1724 kg di CO₂ equivalente per kg di benzina consumato riportato in [16]) e costi ($1.7 \frac{€}{l}$). Risultano quindi, considerando valori di efficienza di $1.39 \frac{km}{kWh}$ e $1.04 \frac{km}{kWh}$, rispettivamente dal serbatoio e dal pozzo alle ruote, emissioni pari a $171 \frac{gCO_2}{km}$ e $0.12 \frac{€}{km}$.

¹il rendimento di trasmissione η_t dell'energia dal motore alle ruote dipende dalla marcia utilizzata: in prima marcia, si può assumere $\eta_t \simeq 90\%$, mentre per marce/velocità più elevate cala fino a 75%[7]

²viene pertanto trascurato l'impatto delle emissioni inerenti ai processi di estrazione e raffinazione del carburante

2.1. Veicolo con motore a combustione interna

		UDDS	FTP	Highway	US06	LA92	EUDC	ECE	JP10	JP15
Spazio percorso	[km]	11.99	17.77	16.51	12.89	15.80	6.95	0.99	0.66	2.17
Combustibile consumato	[l]	0.825	1.259	1.134	1.459	1.430	0.531	0.057	0.041	0.142
η_{ICE}	$[\frac{km}{kWh}]$	1.452	1.411	1.456	0.883	1.105	1.310	1.739	1.603	1.534
= serbatoio - ruote	$[\frac{km}{l}]$	14.52	14.11	14.56	8.83	11.05	13.10	17.39	16.03	15.34
0.20	$[\frac{km}{100km}]$	6.88	7.09	6.87	11.32	9.05	7.63	5.75	6.24	6.52
Efficienza pozzo - ruote	$[\frac{km}{kWh}]$	1.089	1.058	1.092	0.662	0.829	0.982	1.304	1.203	1.150
Combustibile consumato	[l]	0.660	1.007	0.907	1.168	1.144	0.425	0.046	0.033	0.113
η_{ICE}	$[\frac{km}{kWh}]$	1.816	1.764	1.820	1.104	1.381	1.637	2.174	2.004	1.917
= serbatoio-ruote	$[\frac{km}{l}]$	18.16	17.64	18.20	11.04	13.81	16.37	21.74	20.04	19.17
0.25	$[\frac{km}{100km}]$	5.51	5.67	5.50	9.06	7.24	6.11	4.60	4.99	5.22
Efficienza pozzo - ruote	$[\frac{km}{kWh}]$	1.362	1.323	1.365	0.828	1.036	1.228	1.631	1.503	1.438

Tabella 2.1.: risultati delle simulazioni per l'auto con motore a combustione interna ($\eta_{ICE} = 20\%$ è riferito a un motore a benzina, $\eta_{ICE} = 25\%$ a un motore a gasolio), nell'ipotesi di $\eta_{trasm} = 85\%$

2.1.2. Trasporto pubblico con motore a combustione interna

Il principio di funzionamento non cambia rispetto al trasporto privato con lo stesso motore. Dovendo il motore spingere un mezzo più grande e pesante, è dimensionato per una maggiore potenza e ha quindi un miglior rendimento al picco (come regola empirica, il rendimento migliora quanto maggiore è la potenza); inoltre un motore a combustione interna a cilindrata più elevata ha, a pari numero di cilindri (a meno che non si aumenti la corsa per mantenere l'alesaggio), un minor rapporto tra superficie laterale e volume del cilindro e quindi un minor impatto delle perdite per conduzione dalle pareti.

Inoltre, se il mezzo di trasporto ha una sede viaria dedicata, non risente delle condizioni di traffico e può quindi funzionare più a lungo nelle condizioni di rendimento elevato della propria caratteristica meccanica, evitando gli energeticamente dispendiosi transitori di accelerazione. Per le elevate potenze dei motori dei mezzi del trasporto pubblico, è più frequentemente utilizzata la tecnologia ad accensione spontanea, ovvero alimentati con gasolio: si stima un rendimento pozzo-ruote del 20-25%, dove l'estremo inferiore della stima compete agli autobus (che risentono delle condizioni del traffico e delle frequenti fermate e accelerazioni), mentre l'estremo superiore ai treni (che, godendo di una sede riservata, funzionano più a lungo in condizioni di regime).

2.2. Veicolo elettrico a batteria (BEV)

L'efficienza dell'auto elettrica, dai morsetti d'alimentazione del motore alle ruote, è influenzata pesantemente dall'autonomia desiderata per il veicolo: un'autonomia elevata richiede batterie con molta energia immagazzinata e questo, essendo la densità di energia delle batterie agli ioni di litio vincolata a un massimo di $\sim 0.1 \frac{kWh}{kg}$, porta ad appesantire l'auto con una grande massa di batterie³, con ciò peggiorando l'economia energetica del moto.

2.2.1. Parametri delle simulazioni

Per stimare questo handicap, sono state condotte delle simulazioni sugli stessi cicli di guida già impiegati per l'auto a combustione interna: prima, considerando una batteria appena sufficiente a completare la simulazione (quindi con autonomia elettrica pari alla distanza percorsa nel ciclo di guida, da 1 a 18 km), poi caricando il veicolo di una batteria in grado di garantire autonomie consistenti (da 100 a 300 km⁴). Si può commentare,

³da questo punto di vista, l'auto elettrica è doppiamente svantaggiata rispetto l'auto a combustione interna: la benzina ha una densità di energia molto più elevata ($10 - 13 \frac{kWh}{kg}$) delle batterie (due ordini di grandezza!), inoltre la benzina viene bruciata e i fumi scaricati, alleggerendo (di un peso ovviamente trascurabile) il veicolo, mentre le batterie continuano ad appesantire l'auto (e peggiorarne il rendimento) anche da scariche

⁴è da considerare come, nel tentativo di valutare autonomie elettriche superiori a 300km, l'algoritmo iterativo per il calcolo della batteria necessaria a garantire tale autonomia non sia arrivato a convergenza; ciò suggerisce come, per cicli/stili di guida energeticamente pesanti, il tentativo di innalzare l'autonomia di guida in modalità elettrica tramite l'adozione di batterie più capienti, appesantisca il mezzo e peggiori l'efficienza, al punto da far calare il range, invece di aumentarlo come desiderato

2.2. Veicolo elettrico a batteria (BEV)

osservando i risultati delle tabelle 2.2 e 2.3, la scarsa praticità di dotare un'auto, con massa a vuoto (senza sistemi di accumulo) di circa 1200 kg, di batterie con peso superiore al 50% del peso del veicolo stesso, e quindi l'inapplicabilità di auto elettriche a batteria (BEV, battery electric vehicle) con autonomie superiori ai 2-300 km, allo stato attuale della densità energetica delle batterie.

Al fine di rendere le simulazioni più realistiche, si è considerato che l'estensione dell'autonomia di un'auto elettrica richiede d'appesantire il veicolo della massa del pacco batterie, ma che questo peso aggiuntivo non possa essere sostenuto dalla struttura del veicolo, a meno di rinforzare anche quest'ultima; ovvero, secondo [14], ogni kg aggiuntivo di batteria richiede da 0 a 2 kg in più nella struttura che deve accogliere la batteria. Si è assunto che questa massa aggiuntiva sia di 1 kg per ogni kg aggiuntivo di batterie (in linea con quanto ipotizzato in [14]), ma si ritiene che questo onere aggiuntivo possa essere eliminato in fase di progetto (quindi per un veicolo elettrico progettato da zero e non per una versione elettrica di veicolo termico già esistente), ad esempio integrando il pacco batterie nel pianale dell'auto.

Per il pacco batterie, si sono usati i dati dei moduli LPS12400 della LongPowerSystems (tensione nominale di cella 12.8V, carica nominale 400Ah in 49kg di massa).[40]

Il dimensionamento dell'accumulo di un veicolo a batteria (tabella 2.2) in grado di percorrere al massimo 18km non è particolarmente realistico, ma presenta già i vari aspetti del problema del dimensionamento: se si accetta di lasciar scaricare temporaneamente la batteria al di sotto del limite minimo, avverranno delle reazioni chimiche irreversibili al suo interno che ne degradano le prestazioni a lungo termine, decurtandone in definitiva la vita utile; se invece si sceglie di dimensionare il pacco batterie di modo che lo stato di carica non scenda mai al di sotto del suo limite minimo, si dovranno usare più moduli di accumulo (meno stressati, quindi con vita utile più lunga), aumentando il peso del veicolo e peggiorandone l'efficienza.

Lungo la catena di trasformazione dell'energia, a monte delle ruote, vengono stimati i seguenti rendimenti per i vari stadi di conversione (rappresentati in figura 2.3):

- trasmissione dal motore alle ruote $\eta_{trasm} = 90\%$;
- rendimento del motore elettrico $\eta_{mot.el} \simeq 85\%$, come valore medio sulle varie condizioni di funzionamento (rendimento di motore a magneti permanenti; nel caso di motore asincrono il rendimento andrebbe abbassato di circa 5-10 punti percentuali per tener conto delle perdite Joule nelle barre rotoriche);
- inverter bidirezionale di trazione $\eta_{inv} = 96\%$, in cui per ogni interruttore elettronico si hanno (con riferimento alle figure 2.2)
 - perdite in stato di conduzione $V_{DS(on)}I_{DS}$
 - perdite in stato di interdizione $V_{DS}I_{DS(off)}$, normalmente trascurabili essendo $I_{DS(off)}$ nell'ordine dei decimi di μA
 - perdite di switching $\frac{1}{T_s} \left[\left(\frac{V_{DS}}{2} I_{DS} t_{rv} + V_{DS} \frac{I_{DS}}{2} t_{fi} \right) + \left(V_{DS} \frac{I_{DS}}{2} t_{ri} + \frac{V_{DS}}{2} I_{DS} t_{fv} \right) \right]$, proporzionali a V_{DS} , I_{DS} e alla frequenza di switching $f_s = \frac{1}{T_s}$, e tanto minori

2. Simulazioni e confronti: efficienza, costi ed emissioni

	UDDS	FTP	Highway	US06	La92	EUDC	ECE	JP10	JP15
Spazio percorso	[km]	11.99	17.77	16.51	12.89	15.80	6.95	0.66	2.17
Potenza media al DC link	[kW]	4.26	4.80	12.28	17.98	6.96	10.39	2.02	4.44
Consumo netto (pot. media)	[kWh]	1.72	2.65	2.73	3.16	2.94	1.21	0.08	0.30
Capacità nominale batteria	[kWh]	5.12	5.12	5.12	5.12	5.12	5.12	5.12	5.12
Massa batteria	[kg]	49	49	49	49	49	49	49	49
Efficienza dalla batteria alle ruote	$[\frac{km}{kWh}]$	6.972	6.710	6.046	4.079	5.370	5.726	8.134	7.173

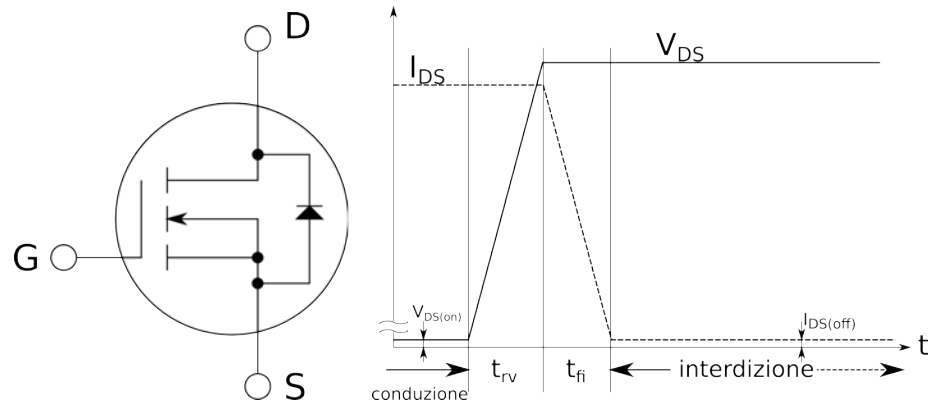
Tabella 2.2.: risultati delle simulazioni con autonomia della batteria uguale alla distanza percorsa nel ciclo di guida

2.2. Veicolo elettrico a batteria (BEV)

Autonomia consentita dalla batteria [km]	UDDS		FTP		Highway		US06		La92		EUDC		ECE		JP10		JP15	
	50	147	147	147	147	147	196	147	147	147	147	147	147	147	196	196	196	196
Massa	100	245	245	294	294	294	441	343	294	343	294	490	343	343	343	343	343	392
[kg]	150	392	441	441	441	441	784	588	490	588	490	735	490	490	539	539	539	588
batteria	250	980	1029	882	882	882	n.c.	1568	1078	1568	1078	735	735	833	833	833	833	882
	300	1519	1568	1274	1274	1274	n.c.	n.c.	1519	n.c.	1519	1078	1078	1274	1274	1274	1274	1274
Efficienza dall'uscita della batteria alle ruote	50	6.12	5.95	5.57	5.57	5.57	3.61	4.80	5.25	4.80	5.25	7.93	7.93	7.58	7.58	7.58	7.58	6.80
[$\frac{km}{kWh}$]	100	5.63	5.50	5.03	5.03	5.03	3.06	4.05	4.74	4.05	4.74	7.05	7.05	6.75	6.75	6.75	6.75	5.87
	150	4.95	4.62	4.59	4.59	4.59	2.53	3.41	4.15	3.41	4.15	6.08	6.08	5.78	5.78	5.78	5.78	5.17
	200	4.10	4.01	4.10	4.10	4.10	2.02	2.75	3.59	2.75	3.59	5.33	5.33	4.85	4.85	4.85	4.85	4.46
	250	3.32	3.17	3.62	3.62	3.62	n.c.	2.04	3.03	2.04	3.03	4.43	4.43	3.90	3.90	3.90	3.90	3.70
	300	2.55	2.45	3.05	3.05	3.05	n.c.	n.c.	2.52	n.c.	2.52	3.57	3.57	3.02	3.02	3.02	3.02	3.01

Tabella 2.3.: risultati delle simulazioni con autonomia della batteria variabile (n.c.: l'algoritmo di dimensionamento del pacco batterie non arriva a convergenza)

2. Simulazioni e confronti: efficienza, costi ed emissioni



- (a) rappresentazione circuitale di un interruttore elettronico: se polarizzato direttamente ($V_{DS} > 0$), un impulso applicato al gate (porta G) fa entrare l'interruttore in stato di conduzione ($I_{DS} > 0$)
- (b) grafico di tensioni e correnti applicate ad un interruttore elettronico: esiste un piccolo ritardo non intenzionale (non mostrato) tra comando di blocco imposto al gate e l'inizio della rampa di salita della tensione (rv , *rise voltage*)

Figura 2.2.

quanto migliori sono le prestazioni dinamiche dell'interruttore (cioè ridotti t_{rv} , t_{fi} , t_{ri} , t_{fv});

- DC link $\eta_{DClink} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{P_{out}}{P_{out} + P_{loss}} = \frac{1}{1 + \frac{P_{loss}}{P_{out}}} = \frac{1}{1 + \frac{R_{DClink,serie} I_{DC}^2}{V_{DC} I_{DC}}} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta V_{DClink}}{V_{DC}}} \simeq 1$, tanto più elevato quanto più elevata è la tensione⁵ V_{DC} (e quindi ridotta la corrente, a parità di potenza in transito) e quanto più il collegamento è corto, le perdite aumentano all'aumentare della potenza richiesta dal motore e quindi della corrente, mantenendosi comunque su valori trascurabili;
- convertitore elettronico DC/DC tra DC link e batteria $\eta_{DC-DC} = 96\%$;
- rendimento di carica-scarica della batteria $\eta_{batt} = 95\%$, dato dal rapporto tra l'energia estraibile dalla batteria e l'energia precedentemente immessa (vedi l'appendice B sulle batterie);
- perdite nel caricabatterie (raddrizzatore a diodi più convertitore DC/DC, oppure raddrizzatore a tiristori, non richiede bidirezionalità a meno che non si voglia implementare il V2G, vehicle-to-grid, che permette alla batteria del veicolo in sosta con caricabatterie connesso alla rete di scambiare potenza con la rete, in funzione delle necessità locali e istantanee di quest'ultima) $\eta_{charger} = 95\%$;

⁵il cui innalzamento è sconsigliato da ragioni di sicurezza date dalla contiguità tra circuiti in tensione e persone elettricamente inesperte, per quanto bene possa essere progettato e segregato il circuito

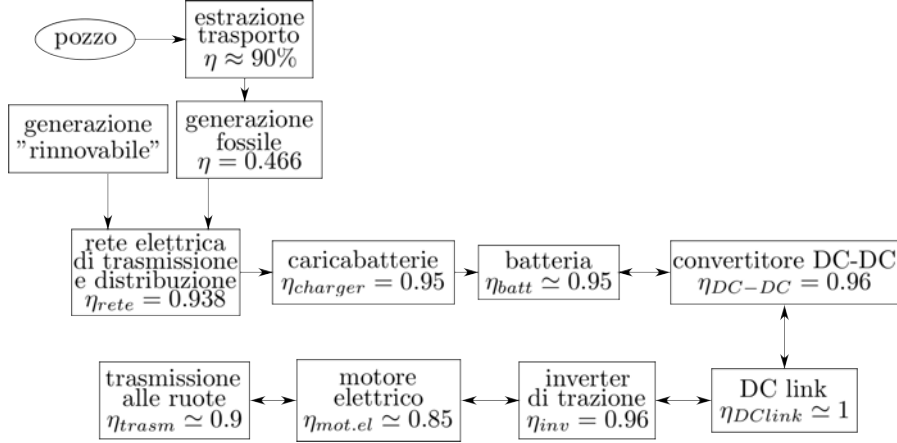


Figura 2.3.: schema della catena energetica relativa all'auto elettrica a batteria

- rete elettrica di trasmissione e distribuzione, dalla centrale di produzione alla presa elettrica cui è collegato il caricabatterie $\eta_{rete} = 93.8\%$ [9]⁶;
- rendimento di generazione, per il quale si possono prendere i valori medi del rendimento termico e delle emissioni delle centrali di generazione italiane nel 2011 (46.6% [10] e circa 400gCO₂/kWh[12, 13]), oppure posso differenziare i rendimenti e le emissioni delle varie fonti di generazione elettrica (tabella 2.4);
- nel caso di fonti fossili, bisogna anche considerare un rendimento di estrazione, trasporto e raffinazione, dal pozzo-miniera all'ingresso in centrale elettrica; in considerazione dei ridotti processi di raffinazione e delle importanti quantità, si assume un rendimento pozzo-centrale del 90%.

L'efficienza pozzo-ruote (well-to-wheel, vedi la catena energetica schematizzata in figura 2.3) risulta quindi:

1. nel caso di fonte primaria fossile,

$$\begin{aligned} \eta_{WTW} &= \eta_{estr} \eta_{gen} \eta_{rete} \eta_{charger} \eta_{batt} \eta_{DCDC} \eta_{DClink} \eta_{inv} \eta_{mot.el} \eta_{trasm} \\ &\simeq 0.9 \times 0.466 \times 0.938 \times 0.95 \times 0.95 \times 0.96 \times 1 \times 0.96 \times 0.85 \times 0.9 \simeq 0.25 \end{aligned} \quad (2.1)$$

⁶se l'energia elettrica con cui si vuole caricare la batteria è autoprodotta, o da un campo fotovoltaico o da un generatore che co-genera calore e elettricità per processi industriali, si può omettere il rendimento dovuto alle perdite di rete: di fatto, quest'energia non impegna la rete elettrica pubblica e non le si può quindi attribuire una quota delle perdite in rete; a rigore, andrebbe considerato un rendimento, specifico per ogni unità energetica, in funzione delle resistenze longitudinali interessate lungo il percorso elettrico tra generatore e carico

$$\eta_{rete} = \frac{P_{out}}{P_{in}} = \frac{VI}{VI + RI^2} = \frac{1}{1 + \frac{RI}{V}} = \frac{1}{1 + \frac{\Delta V}{V}}$$

2. Simulazioni e confronti: efficienza, costi ed emissioni

Tipologia di centrale	Rendimento [%]	Emissioni $\left[\frac{gCO_2eq}{kWh_{el}}\right]$
idroelettrico	85 *	10
termoelettrico, carbone	35-40 (50)	1000
termoelettrico, olio	35-45	770
termoelettrico, gas	45 (60)	400
termoelettrico, biomasse	30-40	15-35
nucleare	30-35 *	66
fotovoltaico	10-15 *	32
eolico	40-45 *	10

Tabella 2.4.: rendimenti ed emissioni specifiche di alcune tecnologie di generazione, per le fonti i cui rendimenti sono asteriscati, vedi le considerazioni di pagina 46[13, 11]

- nel caso di fonte rinnovabile in rete (grandi impianti idroelettrici, eolici, fotovoltaici, ...; vedi considerazioni a pagina 46)

$$\begin{aligned}\eta_{WTW} &= \eta_{rete}\eta_{charger}\eta_{batt}\eta_{DCDC}\eta_{DClink}\eta_{inv}\eta_{mot.el}\eta_{trasm} \\ &\simeq 0.938 \times 0.95 \times 0.95 \times 0.96 \times 1 \times 0.96 \times 0.85 \times 0.9 \simeq 0.60\end{aligned}$$

- nel caso di energia auto-prodotta da impianto a fonte rinnovabile

$$\begin{aligned}\eta_{WTW} &= \eta_{charger}\eta_{batt}\eta_{DCDC}\eta_{DClink}\eta_{inv}\eta_{mot.el}\eta_{trasm} \\ &\simeq 0.95 \times 0.95 \times 0.96 \times 1 \times 0.96 \times 0.85 \times 0.9 \simeq 0.64\end{aligned}$$

dall'efficienza si possono infine ricavare i consumi:

$$E \left[\frac{kWh}{km} \right] = \left(\eta_{WTW} \left[\frac{km}{kWh} \right] \right)^{-1}$$

Ipotizzando un costo dell'auto senza powertrain di €15000 ([14, 8]), un costo del powertrain a benzina di €2600, 4300 per il diesel e 4500 per l'elettrico (quest'ultimo con margine di incertezza di 1300€[8]), costi di manutenzione di 0.04 €/km ([8], anche se lo stesso articolo avanza l'ipotesi che, una volta che le officine avranno acquisito esperienza coi motori elettrici, i costi di manutenzione delle auto elettriche potrebbero dimezzarsi), costo delle batterie di 500 € per kWh di capacità ([15]), prezzo dell'energia elettrica (alla presa murale cui è collegato il caricabatterie, alimentato in corrente alternata secondo un contratto domestico in bassa tensione⁷, importo comprensivo di servizi di rete e tasse) di

⁷effettuare la ricarica dell'accumulatore del veicolo tramite un allacciamento alla rete sotto contratto domestico con potenza contrattuale di 3kW:

- prelude la possibilità di effettuare una ricarica rapida (che richiederebbe la disponibilità di decine di kW, tra i 20kW del "AC level 2" e i 50kW del "DC fast charging", vedi appendice B);

2.2. Veicolo elettrico a batteria (BEV)

0.20€/kWh e prezzo dei carburanti 1.7€/l (circa $0.17 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$); assumo inoltre che la produzione del veicolo comporti l'emissione di 8500 kg di CO_2 equivalente (equivalente, ai fini dell'effetto serra), la produzione delle batterie 120 kg di CO_2eq per kWh di capacità ([14]).

Per entrambe le soluzioni ipotizzo una percorrenza di 200000 km nell'intera vita del veicolo⁸.

Calcolo infine i costi e le emissioni sull'intero ciclo di vita del veicolo:

$$C [\text{€}] = C_{\text{acquisto}} + C_{\text{bat}} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] \times E_{\text{bat}}[\text{kWh}] + (200000 \text{ km}) \times \left(\frac{C_{\text{energia}} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right]}{\eta \left[\frac{\text{km}}{\text{kWh}} \right]} + C_{\text{manutenzione}} \left[\frac{\text{€}}{\text{km}} \right] \right) \quad (2.2)$$

$$\nu [\text{kg}CO_2eq] = \nu_{\text{produzione}} + \nu_{\text{bat}} \left[\frac{\text{kg}CO_2eq}{\text{kWh}} \right] \times E_{\text{bat}}[\text{kWh}] + (200000 \text{ km}) \times \frac{\nu \left[\frac{\text{kg}CO_2eq}{\text{kWh}} \right]}{\eta \left[\frac{\text{km}}{\text{kWh}} \right]} \quad (2.3)$$

oppure, in termini specifici per km percorso:

$$c \left[\frac{\text{€}}{\text{km}} \right] = \frac{(C_{\text{acquisto}}[\text{€}] + C_{\text{bat}} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] \times E_{\text{bat}}[\text{kWh}])}{200000 \text{ km}} + \frac{C_{\text{energia}} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right]}{\eta \left[\frac{\text{km}}{\text{kWh}} \right]} + c_{\text{manutenzione}} \left[\frac{\text{€}}{\text{km}} \right] \quad (2.4)$$

$$\nu \left[\frac{\text{kg}CO_2eq}{\text{km}} \right] = \frac{(\nu_{\text{produzione}} + \nu_{\text{bat}} \left[\frac{\text{kg}CO_2eq}{\text{kWh}} \right] \times E_{\text{bat}}[\text{kWh}])}{200000 \text{ km}} + \frac{\nu \left[\frac{\text{kg}CO_2eq}{\text{kWh}} \right]}{\eta \left[\frac{\text{km}}{\text{kWh}} \right]} \quad (2.5)$$

-
- costringe l'utente a coordinare temporalmente la ricarica del veicolo col funzionamento degli altri carichi domestici, per evitare di incorrere in un distacco per superamento del limite di potenza;

per superare questi limiti, è possibile richiedere un allacciamento alla rete dedicato alla ricarica del veicolo elettrico, con adeguato livello di potenza contrattuale, il cui maggior esborso (in termini di corrispettivi fissi mensili) si giustifica solo nel caso di consumi importanti (più veicoli da ricaricare) e di effettiva necessità di ricarica rapida, ovvero solo per stazioni di ricarica pubbliche

⁸[22] segnala come i confronti normalmente effettuati in paper scientifici assumano valori di percorrenza totale tra 150000 e 300000 km, mentre gli studi effettuati dalle case automobilistiche assumano cautelativamente una percorrenza di 150000 km; in [8] viene rimarcato come invece i componenti dei veicoli debbano essere progettati per resistere a una percorrenza di 300000 km

2. Simulazioni e confronti: efficienza, costi ed emissioni

2.2.2. Risultati delle simulazioni

Nel caso di batteria con 100 km di autonomia, risulta un'efficienza media di 5.30 km/kWh dall'uscita della batteria alle ruote (tabella 2.3), ovvero

$$\begin{aligned}\eta_{WTW} &= \eta_{estr}\eta_{gen}\eta_{rete}\eta_{charger}\eta_{batt}(\eta_{DC-DC}\eta_{DC-link}\eta_{inv}\eta_{mot.el}\eta_{trasm}) \\ &= 0.9 \cdot 0.466 \cdot 0.938 \cdot 0.95 \cdot 0.95 \cdot \left(5.30 \frac{km}{kWh}\right) = 1.88 \frac{km}{kWh}\end{aligned}\quad (2.6)$$

di energia primaria, con un'emissione complessiva di $\frac{400 \text{ gCO}_2/\text{kWh}}{4.487 \text{ km/kWh}} = 89.1 \frac{\text{gCO}_2}{\text{km}}$ ($4.487 \frac{\text{km}}{\text{kWh}}$ riferiti all'energia in uscita dalla centrale) e una spesa (per la sola energia) di $\frac{0.20 \text{ €/kWh}}{3.718 \text{ km/kWh}} = 0.042 \frac{\text{€}}{\text{km}}$ (4.783 km percorsi per kWh di elettricità AC-BT alla spina del caricabatterie).

Nell'ipotesi le batterie dell'auto potessero venir caricate interamente con elettricità prodotta in:

- centrali idroelettriche⁹, l'efficienza di energia primaria risulterebbe $3.81 \frac{\text{km}}{\text{kWh}}$, con $2.23 \frac{\text{gCO}_2}{\text{km}}$ di emissioni;
- centrale termoelettrica alimentata a carbone, $1.4 - 1.6 \frac{\text{km}}{\text{kWh}}$ di energia primaria, $223 \frac{\text{gCO}_2}{\text{km}}$ di emissioni;
- centrale a gas, $1.8 \frac{\text{km}}{\text{kWh}}$ di energia primaria e $89 \frac{\text{gCO}_2}{\text{km}}$ di emissioni;
- centrale nucleare, $1.4 \frac{\text{km}}{\text{kWh}}$ riferito all'energia primaria ($4.487 \frac{\text{km}}{\text{kWh}}$ rispetto all'energia elettrica in uscita dalla centrale) e $15 \frac{\text{gCO}_2}{\text{km}}$ di emissioni;
- impianto fotovoltaico domestico, $4.78 \frac{\text{km}}{\text{kWh}}$ (riferito all'energia elettrica prodotta) e $7.6 \frac{\text{gCO}_2}{\text{km}}$;
- grosso impianto fotovoltaico connesso alla rete AT, $4.48 \frac{\text{km}}{\text{kWh}}$ e $7 \frac{\text{gCO}_2}{\text{km}}$;
- eolico in rete, $4.48 \frac{\text{km}}{\text{kWh}}$ e $2.2 \frac{\text{gCO}_2}{\text{km}}$.

Il confronto tra i consumi di energia primaria del veicolo con motore elettrico e con motore termico non è immediato quando si ipotizza di produrre l'elettricità da fonti rinnovabili (come idroelettrico o eolico) o da nucleare, ovvero da fonti per le quali non vi è un rilevante costo di "combustibile" (spesa per l'approvvigionamento dell'energia primaria: gratuita per idroelettrico e eolico quando c'è disponibilità di acqua/vento, esigua per il nucleare) e quindi, nell'ipotesi che i costi fissi (di costruzione dell'impianto produttivo) siano già stati ammortizzati, l'energia viene prodotta ad un costo molto basso: se le batterie del veicolo elettrico vengono ricaricate da un impianto eolico off-grid, l'efficienza del veicolo elettrico determina (insieme con le caratteristiche di ventosità del sito) il diametro

⁹questo sarebbe il caso reale di auto elettrica caricata tramite la rete elettrica di nazione con porzione preponderante di idroelettrico nel mix di produzione elettrica (es. Norvegia, anche se la quota di produzione idroelettrica oscilla di anno in anno a causa della variabilità climatica[44])

2.2. Veicolo elettrico a batteria (BEV)

Autonomia [km]	Cicli di guida arrivati a convergenza	Efficienza di energia primaria [$\frac{km}{kWh}$]	Costo dell'energia [€/km]	Emissioni (energia) [gCO ₂ /km]
(0)	9	2.314	0.034	72
50	9	2.115	0.037	79
100	9	1.881	0.042	89
150	9	1.628	0.048	103
200	9	1.389	0.057	121
250	8	1.073	0.073	156
300	7	0.796	0.099	211
MCI	9	1.04	0.12	171

Tabella 2.5.: riepilogo dei consumi di energia primaria, emissioni e costi di elettricità, al variare dell'autonomia in modalità solo elettrico del veicolo, considerando l'intero parco centrali italiano

della turbina e la capacità della batteria necessaria a coprire l'autonomia desiderata, e quindi i costi fissi di acquisto dell'impianto, ma i costi variabili dell'energia di trazione (in €/km percorso) sono nulli e da confrontare coi costi dei carburanti dei motori termici. In questi casi (il nucleare presenta, per esempio, rendimenti di generazione molto bassi, nell'ordine del 30-35%, a causa del ciclo termodinamico limitato per motivi di sicurezza) risulterebbero pertanto efficienze di energia primaria particolarmente basse, il che farebbe apparire la tecnologia poco efficiente, senza considerare i vantaggi di rendere sfruttabili a costi molto bassi forme d'energia primaria altrimenti inaccessibili. Il medesimo ragionamento potrebbe valere anche per il fotovoltaico (costo di "combustibile" nullo quando disponibile), ma un impianto fotovoltaico ha una vita utile comparabile (circa il doppio) col tempo di ammortamento, quindi la porzione della vita dell'impianto durante la quale è valido ipotizzare che i costi fissi siano già stati ammortizzati non è significativa.

Dall'osservazione della tabella 2.5, si ricava come l'auto elettrica sia energeticamente più efficiente dell'auto con motore a combustione interna ad accensione comandata solo se dotata di batterie per autonomie non superiori ai 200-250 km (effettuare il confronto con la più efficiente auto con motore ad accensione spontanea, in grado di percorrere 1.31 km per ogni kWh di energia primaria consumata, non cambia la sostanza dei risultati). I risultati della terza colonna di tabella 2.5 (essendo valori medi, i risultati relativi ad autonomie maggiori, per le quali alcuni cicli di guida energeticamente dispendiosi non sono arrivati a convergenza, sono meno significativi e quindi non sono stati riportati) sono riportati graficamente in figura 2.4; le figure 2.5 e 2.6 riportano invece i risultati relativi a costi ed emissioni sull'intero ciclo di vita del veicolo, sempre confrontando auto elettriche a batteria con diversa autonomia e auto con motore a combustione interna ad accensione comandata.

Dall'esame della figura 2.5, s'evince come l'auto elettrica risulti economicamente conveniente per un'autonomia massima di 50 km, mentre già con un'autonomia di 100km i costi totali si equivalgono e per autonomie superiori il costo dell'auto elettrica a batteria

2. Simulazioni e confronti: efficienza, costi ed emissioni



Figura 2.4.: efficienza di energia primaria per auto elettriche a batteria con diverse autonomie e confronto con auto a combustione interna (i numeri bianchi indicano, per ogni valore di autonomia, il numero di cicli di guida giunti a convergenza sui quali viene effettuata la media)

2.2. Veicolo elettrico a batteria (BEV)

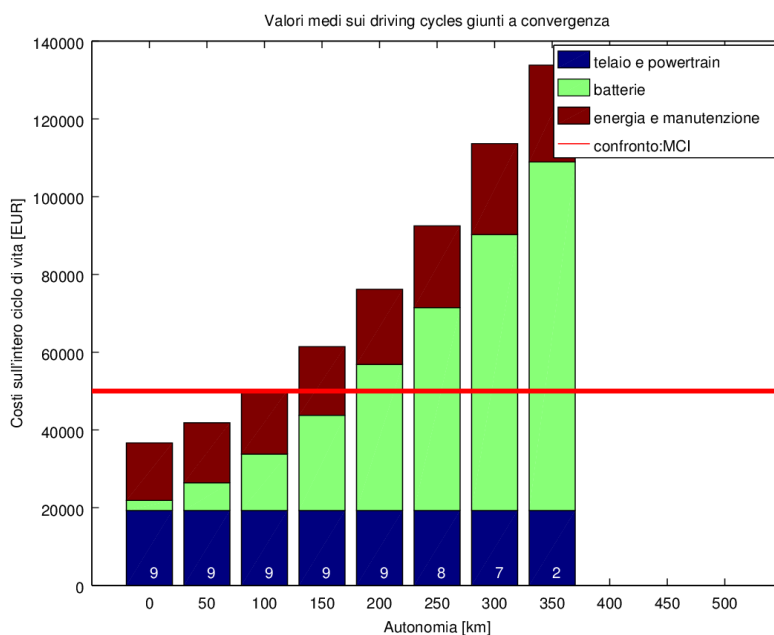


Figura 2.5.: costi sull'intero ciclo di vita per auto elettriche a batteria con diverse autonomie e confronto con auto a combustione interna

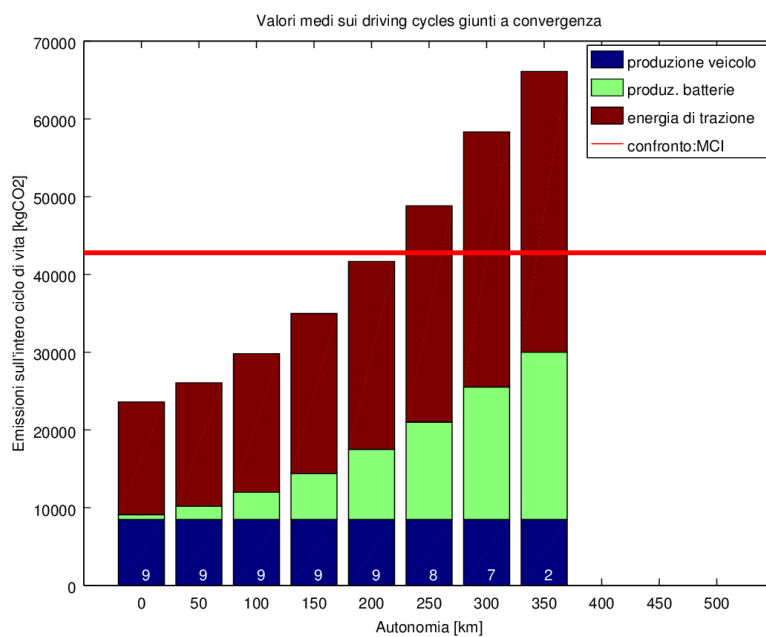


Figura 2.6.: emissioni totali sul ciclo di vita per auto elettriche a batteria con diverse autonomie e confronto con auto a combustione interna

2. Simulazioni e confronti: efficienza, costi ed emissioni

supera quello dell'auto a benzina, principalmente a causa del costo del pacco batterie. Per tutti e tre i grafici (2.4, 2.5 e 2.6) vale la considerazione secondo la quale, oltre una certa autonomia giungono a convergenza solo i cicli di guida con consumi bassi, pertanto i risultati delle medie deviano in favore del veicolo elettrico e non mantengono lo stesso valore dei risultati mediati su tutti i cicli di guida.

Per quanto riguarda le emissioni totali sul ciclo di vita del veicolo (figura 2.6), l'auto elettrica diventa peggiore dell'auto a benzina per autonomie di 250km e superiori, proprio a causa delle emissioni inquinanti in centrale per gli aumentati consumi (in $\frac{kWh}{km}$) conseguenti all'appesantimento del veicolo. È da notare come ([22] e [26]), considerando tra i contributi inquinanti non solo le emissioni climalteranti ma anche altri impatti ambientali, quali:

- acidificazione del suolo e dell'atmosfera, e tossicità per i relativi ecosistemi;
- assottigliamento dello strato di ozono;
- eutrofizzazione degli ecosistemi acquatici;
- tossicità per gli esseri umani;
- formazione di ossidanti fotochimici;
- emissione di particolato;
- consumo delle riserve minerarie;
- consumo delle riserve fossili;

i veicoli elettrici risultino per alcuni aspetti peggiori delle attuali auto con motore a combustione interna. In particolare, secondo [26] (che analizza i soli impatti su acidificazione dell'atmosfera, assottigliamento dello strato d'ozono, eutrofizzazione, formazione di ossidanti fotochimici, emissioni climalteranti e tossicità umana), i veicoli elettrici a batterie risultano peggiori dei veicoli tradizionali per quanto riguarda eutrofizzazione e tossicità umana, con una preponderanza di inquinamento inerente alla fase di produzione delle batterie. Analogamente [22], il quale analizza dieci classi di impatto, afferma le auto elettriche esser peggio delle controparti spinte da motore termico per quanto riguarda tossicità per l'uomo, tossicità per gli ecosistemi acquatici, eutrofizzazione, impoverimento delle riserve minerarie; le due tipologie di veicolo mostrare impatti confrontabili per quanto riguarda emissioni climalteranti, acidificazione dei terreni, formazione di particolato, tossicità per gli ecosistemi terrestri e impoverimento dei giacimenti fossili (i contributi all'impoverimento delle riserve e al riscaldamento globale, per le auto elettriche, variano considerevolmente a seconda del mix energetico).

Si possono affinare queste prime osservazioni ricordando come i risultati, di energia ed emissioni, (in tabella 2.5) dipendano fortemente dalla conformazione del parco di generazione della rete elettrica da cui ricarica la batteria (vedi figure 2.7 e 2.9); in questi aspetti, considerare il mix di generazione italiano (alimentato prevalentemente da gas),

2.2. Veicolo elettrico a batteria (BEV)

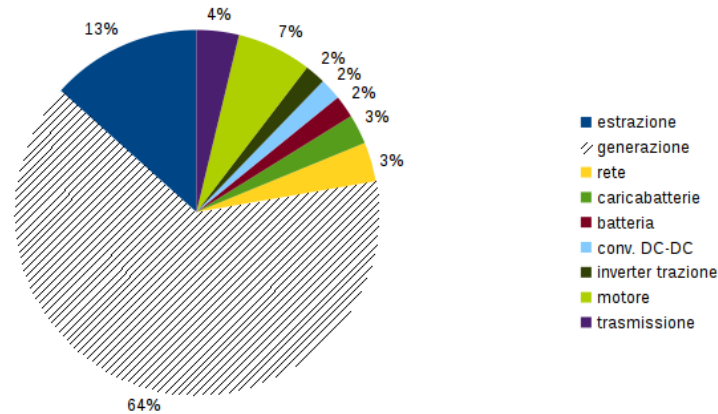


Figura 2.7.: ripartizione delle perdite, dalla centrale di generazione alla trasmissione motore-ruote, per auto elettrica alimentata a batteria caricata da rete (usando i rendimenti riportati nelle pagine 39 e seguenti): le perdite relative alla fase di generazione dell'energia elettrica sono il principale limite all'efficienza globale di un veicolo elettrico

è fortemente penalizzante per l'auto elettrica, le cui prestazioni globali trarrebbero giovamento dalla possibilità di sfruttare una fonte di energia rinnovabile e/o con emissioni ridotte (fotovoltaico domestico, oppure rete elettrica alimentata da nucleare, idroelettrico, fotovoltaico ed eolico). Inoltre, dall'osservazione della figura 2.9, si può ipotizzare come il possesso (o l'investimento nell'acquisto) di un impianto fotovoltaico di potenza sufficiente, e dotato di accumulo tale da accumulare energia durante il giorno per poi ricaricare il veicolo quando si desidera, permetta di abbattere quasi due terzi delle emissioni totali (considerando un impianto fotovoltaico domestico, la quota energia delle emissioni relative all'intera vita del veicolo ammonta a $8 \frac{gCO_2}{km} \times 200000km \approx (1.6-2) \times 10^3 kgCO_2$, da confrontare coi $18.7 \times 10^3 kgCO_2$ di figura 2.9)¹⁰.

2.2.3. Validazione con risultati precedenti ricerche

Al fine di validare i risultati delle simulazioni effettuate, si sono presi i risultati di ricerche effettuate da altri ricercatori in precedenza, per osservare la concordanza delle tendenze emerse.

In particolare, si è estrapolato dai risultati di (2.4) e (2.5) le componenti di energia, evidenziando la dipendenza di costi ed emissioni per la sola energia di trazione dall'autonomia elettrica del veicolo, che influenza l'efficienza tramite il peso totale di quest'ultimo.

¹⁰per quanto riguarda l'abbattimento dei costi, nel grafico di figura 2.8 è riportato un contributo per energia e manutenzione di $\sim 16k\text{€}$ il quale, considerando un importo relativo alla manutenzione di $0.04 \frac{\text{€}}{km} \times 200000km = 8k\text{€}$, lascia una quota di spesa per approvvigionamento dell'energia di trazione di circa $8k\text{€}$: al confronto con questa spesa per energia elettrica da rete, il prezzo d'acquisto di un impianto fotovoltaico di dimensioni adeguate (con accumulo) potrà essere inferiore, ma non trascurabile

2. Simulazioni e confronti: efficienza, costi ed emissioni

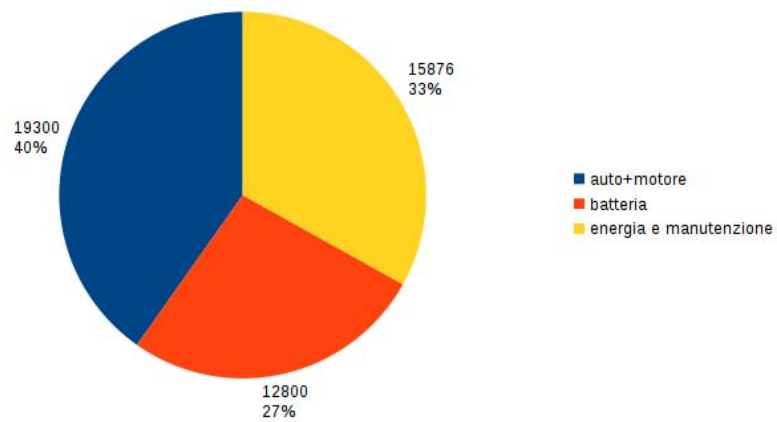


Figura 2.8.: componenti del costo dell'auto elettrica con autonomia 100 km sul ciclo di guida UDDS

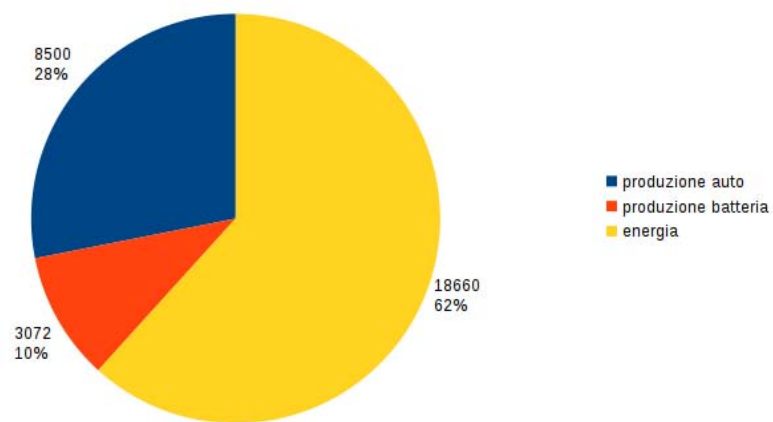
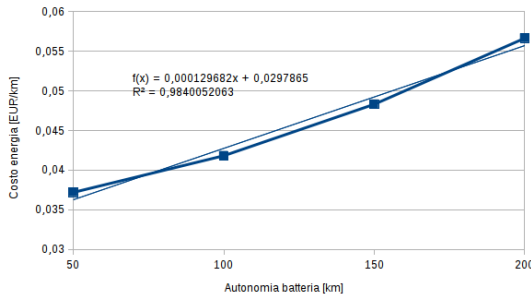
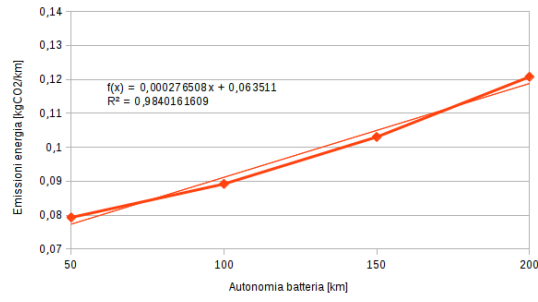


Figura 2.9.: componenti delle emissioni dell'auto elettrica con autonomia 100 km sul ciclo di guida UDDS: le emissioni collegate alla produzione di energia elettrica sono preponderanti, da cui la necessità di impiegare fonti di generazione elettrica a basso impatto inquinante

2.2. Veicolo elettrico a batteria (BEV)



(a) componente energia dei costi al km



(b) componente energia delle emissioni al km

Figura 2.10.: grafici e interpolazioni dei risultati riportati in tabella 2.5

L'interpolazione è stata effettuata sui valori di autonomia per cui tutti i cicli di guida sono giunti a convergenza, al fine di mantenere uniformità nella valutazione; inoltre si è ignorata la percorrenza "0" che coincide al percorrere i cicli di guida una sola volta, il che non corrisponde ad una reale autonomia nulla e avrebbe quindi falsato il risultato dell'interpolazione.

Risultano come equazioni interpolanti (riportate nelle figure 2.10):

$$c_{en} \left[\frac{\text{€}}{\text{km}} \right] = 1.3 \times 10^{-4} \text{ autonomia}[\text{km}] + 0.0298$$

$$\nu_{en} \left[\frac{\text{kgCO}_2}{\text{km}} \right] = 2.8 \times 10^{-4} \text{ autonomia}[\text{km}] + 0.0635$$

[14] riporta, come risultati delle proprie simulazioni:

$$c_{en} \left[\frac{\$}{\text{mi}} \right] = 1.7 \times 10^{-4} \text{ autonomia}[\text{mi}] + 0.0186$$

$$\nu_{en} \left[\frac{\text{kgCO}_2}{\text{mi}} \right] = 10.3 \times 10^{-4} \text{ autonomia}[\text{mi}] + 0.113$$

i quali, riportati in $\frac{\text{€}}{\text{km}}$ e $\frac{\text{kgCO}_2}{\text{km}}$ (ricordando che è $1\$ \simeq 0.8\text{€}$ e $1\text{mi} \simeq 1.6\text{km}$), diventano

2. Simulazioni e confronti: efficienza, costi ed emissioni

$$\begin{aligned}
 c_{en} \left[\frac{\text{€}}{\text{km}} \right] &= \left[1.7 \times 10^{-4} \frac{\text{\$}}{\text{mi}^2} \times \frac{0.8 \frac{\text{€}}{\text{\$}}}{\left(1.6 \frac{\text{km}}{\text{mi}}\right)^2} \right] \text{autonomia}[\text{km}] + 0.0186 \frac{\text{\$}}{\text{mi}} \times \frac{0.8 \frac{\text{€}}{\text{\$}}}{1.6 \frac{\text{km}}{\text{mi}}} \\
 &= 53 \times 10^{-6} \text{autonomia}[\text{km}] + 0.009 \\
 \nu_{en} \left[\frac{\text{kgCO}_2}{\text{km}} \right] &= \frac{10.3 \times 10^{-4} \frac{\text{kgCO}_2}{\text{mi}^2}}{\left(1.6 \frac{\text{km}}{\text{mi}}\right)^2} \text{autonomia}[\text{km}] + \frac{0.113 \frac{\text{kgCO}_2}{\text{mi}}}{1.6 \frac{\text{km}}{\text{mi}}} \\
 &= 4 \times 10^{-4} \text{autonomia}[\text{km}] + 0.071
 \end{aligned}$$

I costi di [14] risultano circa quattro volte più piccoli di quelli ricavati nelle simulazioni di questa tesi: discrepanza, questa, solo parzialmente spiegata dalle diverse ipotesi sul costo dell'energia elettrica ($0.11 \frac{\text{\$}}{\text{kWh}} \simeq 0.09 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ in [14] contro $0.2 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$ più aderenti alla realtà italiana).

I risultati delle emissioni appaiono invece simili, visto il diverso impatto emissivo della generazione elettrica ($670 \frac{\text{gCO}_2}{\text{km}}$ in [14] contro $400 \frac{\text{gCO}_2}{\text{km}}$ ipotizzati in questo studio, sulla base di [12, 13]). Appare quindi plausibile che il rendimento $\left[\frac{\text{km}}{\text{kWh}}\right]$ dell'auto elettrica sia stato sovrastimato in [14], per l'aver impiegato nelle simulazioni il solo ciclo di guida UDSS, il quale si è dimostrato tra i più energeticamente efficienti (vedi tabelle 2.2 e 2.3).

2.2.4. Autonomia desiderata e percorrenze tipiche

A riguardo dei risultati riportati in questa sezione sulle auto elettriche a batteria, una precisazione: comparare auto elettriche a batteria e auto con motore a combustione interna è possibile solo finché la percorrenza desiderata è inferiore all'autonomia delle batterie; per percorrenze superiori, l'utente dovrebbe programmare delle soste per la ricarica (con l'impaccio di dover reperire un allacciamento alla rete elettrica e poi attendere il termine della ricarica), o noleggiare un'auto a benzina; pertanto le due tipologie di veicolo non sono più equivalenti. Quindi, per ogni valore di autonomia, esiste una platea di guidatori (la cui percorrenza è compatibile con l'autonomia) che potrebbe valutare l'acquisto di un'auto elettrica invece di un'auto a benzina basandosi sui confronti relativi alla propria autonomia d'interesse.¹¹ Risulta pertanto interessante, per le aziende che vogliono progettare e vendere veicoli elettrici, conoscere quali siano le percorrenze giornaliere tipiche dei loro potenziali acquirenti.

In [29] vengono analizzati i dati sulle percorrenze giornaliere dei partecipanti a uno studio su traffico e stili di guida all'interno dello stato statunitense della Georgia, stato che supera la già elevata media statunitense per km percorsi all'anno pro capite dai suoi abitanti (19500 contro 16200): da questo scenario di percorrenze elevate, è ragionevole aspettarsi una sovrastima del range elettrico richiesto a un veicolo a batteria. Lo studio

¹¹Eccezione che cade fuori da questo ragionamento è quella dei mezzi (per trasporto pubblico) a tragitto programmato, per i quali si può pensare, viste le elevate percorrenze, di mantenere un'autonomia delle batterie relativamente ridotta (ottenendo in questo modo efficienze elevate) e dotando le fermate di fine linea con stazioni di ricarica veloce o di "battery swapping", che consiste nel mantenere presso il capolinea alcune batterie in ricarica da sostituire con quelle scariche del veicolo giunto a fine corsa.

2.2. Veicolo elettrico a batteria (BEV)

riporta una percorrenza media giornaliera di 72km (44.7mi) e mediana di 48km (29.9mi), ignorando nell'analisi statistica le giornate con percorrenza nulla. Inoltre:

- una percorrenza giornaliera di 160km (100mi) viene superata in media (dalla media dei guidatori) per 23 giorni all'anno;
- una percorrenza giornaliera di 240km (150mi) viene superata in media solo per nove giorni all'anno;
- una percorrenza giornaliera di 450km (280mi) viene superata in media solo per tre giorni all'anno.

È quindi possibile progettare, ed acquistare, un veicolo elettrico che garantisca un'autonomia di almeno 240km, sapendo che il proprietario del veicolo incorrerà in disagi (noleggiare un'auto, o impiegare il secondo veicolo in suo possesso, avente maggiore autonomia, sia questa con una batteria più pesante o a combustione interna) in media 9 giorni all'anno.

Lo studio non trova, inoltre, correlazione statistica tra il numero di giorni in cui il veicolo ha percorrenza non nulla e la percorrenza giornaliera media dello stesso. Gli autori di [29] analizzano anche la percorrenza giornaliera massima dei veicoli partecipanti allo studio, al fine di individuare l'autonomia di un veicolo a batteria in grado di soddisfare le esigenze di un guidatore che "non abbia alternative alla propria BEV", ovvero non voglia noleggiare un'altra auto e che possieda un unico veicolo:

- con autonomia di 160km (100mi) si può sostituire il 9% dei veicoli;
- con autonomia di 500km (313mi) si può sostituire il 50% dei veicoli.

Si vede quindi come un'auto elettrica a batteria non sia in grado di soddisfare appieno i livelli di percorrenza attualmente conseguiti con auto con motore a combustione interna, a meno che il guidatore non possa/voglia organizzarsi per cambiare veicolo nei giorni in cui prevede una maggiore percorrenza (es. per andare in vacanza). Si vada alla sezione 2.8 per ulteriori considerazioni in merito.

D'interesse sono anche ulteriori dati riportati in [29]:

- secondo un sondaggio NHTS (National Household Travel Survey), il nucleo familiare statunitense medio possiede 1.9 veicoli, mentre il guidatore medio compie 4.1 viaggi su 46.8km (29.1mi) al giorno;
- un sondaggio USDOT afferma il 78% dei viaggi casa-lavoro ricadere entro il raggio dei 64km (40mi);
- sempre da fonte NHTS, solo il 18% dei viaggi in auto negli Stati Uniti è per motivi di lavoro, il 40% viene invece classificato come 'famiglia o personale' e il 30% come 'sociale o ricreativo';

2. Simulazioni e confronti: efficienza, costi ed emissioni

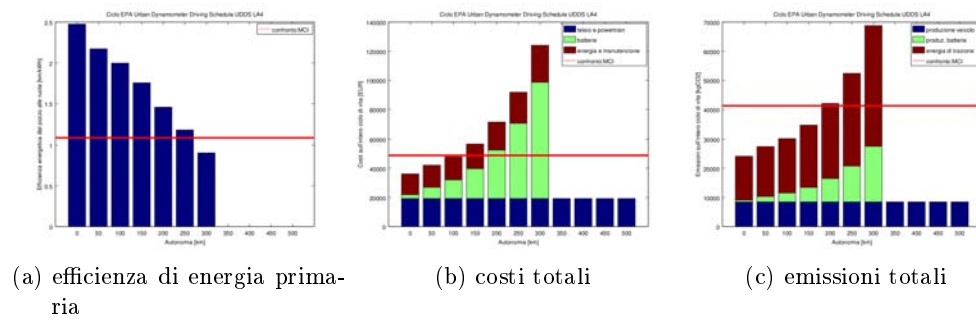


Figura 2.11.: ciclo UDDS

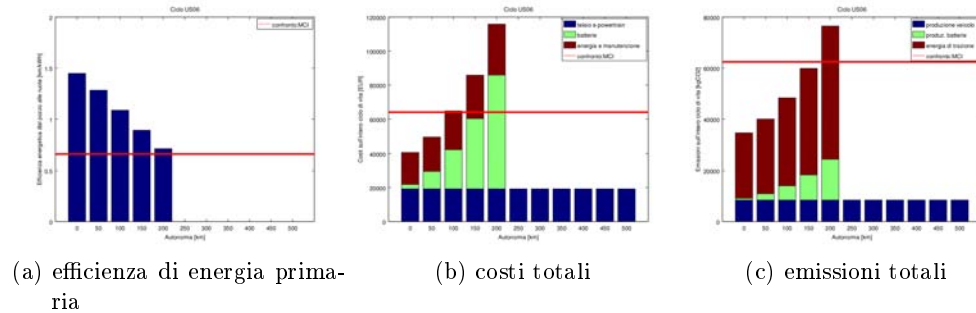


Figura 2.12.: ciclo US06

- la percentuale di veicoli parcheggiati (tra quelli partecipanti allo studio sulla percorrenza) non è mai inferiore al 75%, il che è particolarmente significativo se si pensa come iniziative di *car sharing* (o qualunque altra idea diminuisca il numero di auto richieste, prodotte ed acquistate, aumentando l'utilizzo di ciascun veicolo) potrebbero diminuire il numero di auto circolanti e in produzione, e quindi il consumo di materiali ed energia impiegati nel processo di produzione.

2.2.5. Stile di guida

Per valutare l'importanza dello stile di guida sui consumi, e quindi anche su emissioni e costi, si riportano anche, nelle figure 2.11 e 2.12, gli omologhi delle figure 2.4, 2.5 e 2.6 calcolati non come valor medio su diversi cicli di guida, ma sui cicli di guida rispettivamente UDDS e US06 (vedi appendice A per le caratteristiche dei cicli di guida). Il ciclo UDDS presenta molte più accelerazioni e decelerazioni rispetto al US06, che prevede invece una velocità media elevata senza soste: si nota come l'auto elettrica, capace di recuperare energia durante le decelerazioni, performi molto bene nel ciclo UDDS, mantenendo inoltre il vantaggio (per autonomie ridotte) anche nel ciclo US06 in cui i consumi di entrambi i veicoli peggiorano a ragione dell'elevata velocità.

2.3. Autobus elettrico a batterie

Analogamente alle simulazioni condotte per auto private (risultati nelle figure 2.4, 2.5 e 2.6), sono state condotte simulazioni anche per un veicolo da trasporto pubblico, ovvero un autobus con parametri fisici:

- massa senza powertrain 10 tonnellate (comprende anche la massa dei passeggeri);
- area frontale 7.5 m^2 ;
- coefficiente aerodinamico $c_x = 0.7$.

Dai risultati riportati in figura 2.13 (in confronto alla figura 2.4), appare evidente come la maggiore massa a vuoto dell'autobus imponga un dimensionamento oneroso del pacco batterie già per autonomie richieste di 100km (solo 5 cicli di guida giungono a convergenza, nessuno per autonomia di 150km). Confrontando i risultati dei veicoli elettrici a batteria, privato e pubblico, a parità di autonomia garantita (caso 50km, l'unico valore di autonomia per il quale la simulazione dell'autobus dà risultati validi), si hanno valori di efficienza di energia primaria rispettivamente di $2.115 \frac{\text{km}}{\text{kWh}}$ e $0.261 \frac{\text{km}}{\text{kWh}}$: il rapporto tra i due valori di efficienza è circa 8, ovvero, se si considera un affollamento medio di un veicolo privato di 1-2 persone, il mezzo pubblico diventa più efficiente (in termini di consumi specifici, $\frac{\text{kWh}}{\text{pass.} \times \text{km}}$) quando l'affollamento supera i 10-20 passeggeri.

Sia i risultati di figura 2.13 (veicolo pubblico) e di figura 2.4 (veicolo privato) mostrano un'efficienza doppia del veicolo elettrico a batteria con autonomia 50km rispetto all'analogo veicolo con motore a combustione interna.

Per quanto riguarda le immagini 2.14 e 2.15, si osserva come l'autobus elettrico con autonomia delle batterie 50km (come già il veicolo privato, cfr. figure 2.5 e 2.6) risulti meno costoso e anche meno inquinante della controparte termica, la quale mantiene il vantaggio di un'autonomia elevata. Grazie alle elevate percorrenze di un mezzo pubblico, però, il problema dell'autonomia del veicolo elettrico a batterie risulta facilmente risolvibile, in quanto una percorrenza elevata comporta consumi (e costi) importanti, e quindi l'interesse economico a ridurre i consumi, anche per mezzo di investimenti importanti:

- si può pensare a stazioni di battery swapping alla confluenza di più linee, nelle quali sostituire le batterie scariche con batterie ricaricate a terra;
- si può pensare a topologie di powertrain che affianchino alle batterie un dispositivo basato su combustibili fossili, per migliorare al contempo l'autonomia e l'efficienza (sezione 2.4 e capitolo 3);
- per flussi di passeggeri (e quindi frequenza dei mezzi) veramente elevati, può assumere validità economica eliminare le batterie e alimentare il veicolo elettrico con un impianto fisso (ad esempio, linea di contatto e pantografo sul veicolo), come descritto nella prossima sezione.

2. Simulazioni e confronti: efficienza, costi ed emissioni

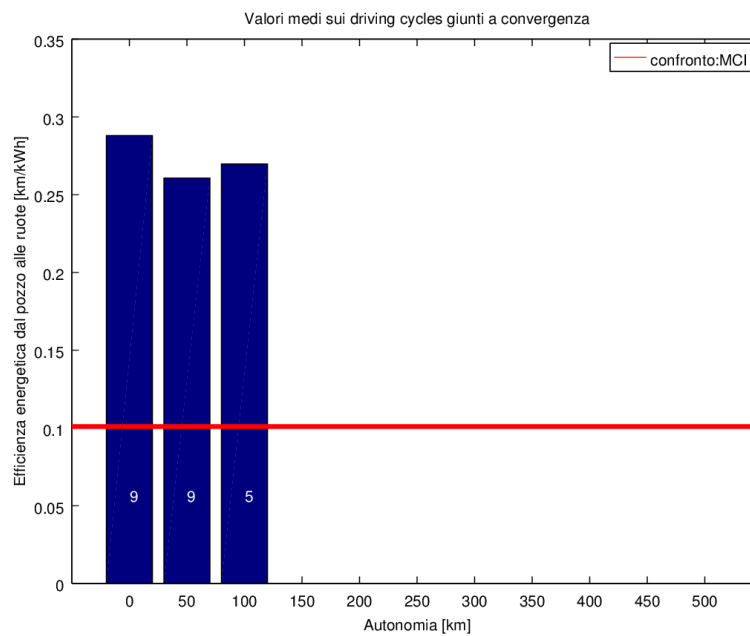


Figura 2.13.: efficienza di energia primaria per autobus elettrici a batteria con diverse autonomie e confronto con autobus con powertrain termico (i numeri bianchi indicano, per ogni valore di autonomia, il numero di cicli di guida giunti a convergenza sui quali viene effettuata la media)

2.3. Autobus elettrico a batterie

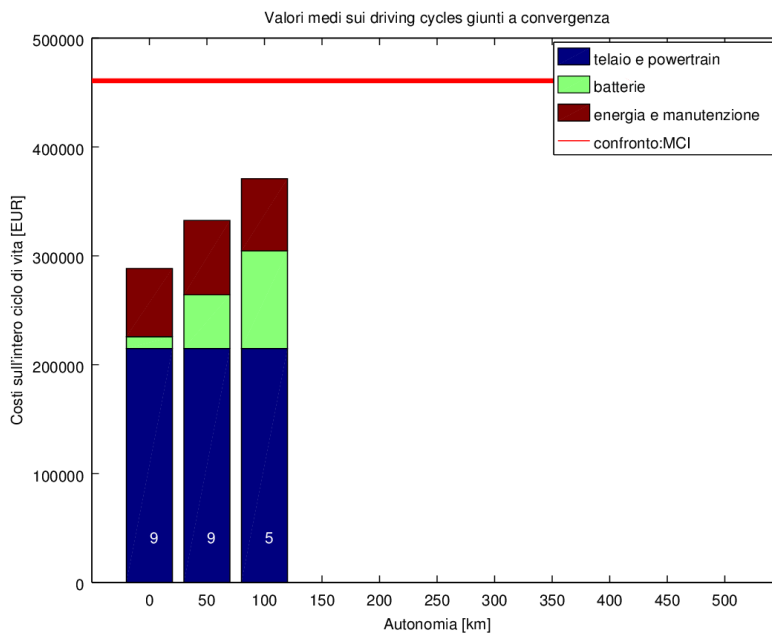


Figura 2.14.: costi sull'intero ciclo di vita per autobus elettrici a batteria con diverse autonomie e confronto con autobus con powertrain termico

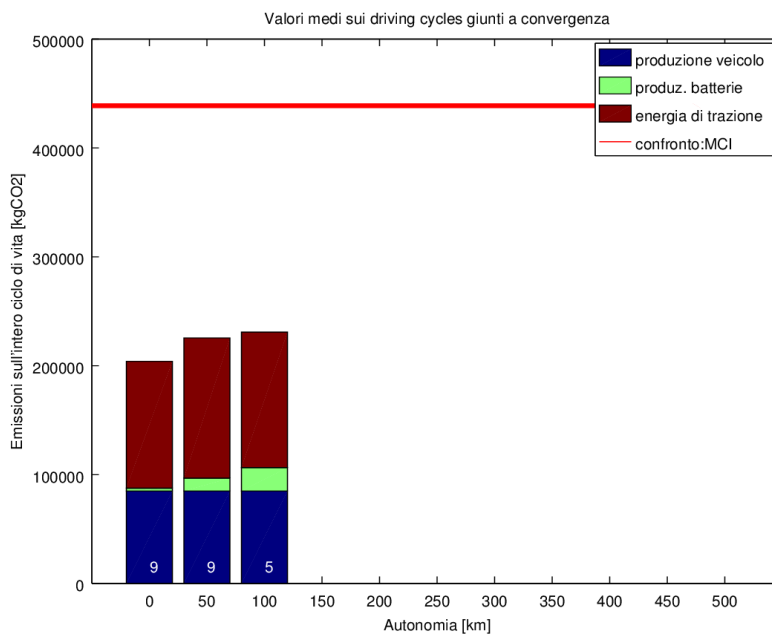


Figura 2.15.: emissioni totali sul ciclo di vita per autobus elettrici a batteria con diverse autonomie e confronto con autobus con powertrain termico

2.3.1. Trasporto pubblico con motore elettrico e linea di contatto

Nelle situazioni in cui l'elevato flusso di passeggeri rende desiderabile l'impiego della trazione elettrica per il più elevato rendimento del motore, si può ovviare ai problemi della limitata autonomia e del peso delle batterie da trasportare mediante impianti di alimentazione fissi, come ad esempio il sistema catenaria-pantografo impiegato nelle metropolitane e ferrovie. Per la rilevanza degli impianti fissi sul costo totale del sistema di trasporto, tale soluzione viene impiegata solo su direttrici ad elevatissima richiesta di mobilità.

2.4. Veicolo con powertrain ibrido elettrico+termico (HEV)

Per superare il problema dell'autonomia ridotta (causa della cosiddetta *range anxiety*) propria dei veicoli alimentati a batterie, si cerca di sfruttare l'elevata densità di energia dei combustibili fossili, da bruciare all'interno di un motore a combustione interna accoppiato al motore elettrico con varie topologie, al fine di raggiungere la migliore economia energetica o di massimizzare le prestazioni.

Il risultato di questo accoppiamento tra motore elettrico e termico è un veicolo a powertrain ibrido (HEV, *hybrid electric vehicle*) il cui scopo è superare i problemi di autonomia dell'auto elettrica a batteria e la scarsa efficienza energetica del veicolo tradizionale.

Per ridurre i consumi, si recupera energia in frenata sfruttando il motore elettrico e si possono controllare i due motori di modo da far assorbire ed erogare le oscillazioni di potenza dal motore elettrico, lasciando al motore a combustione interna il compito di erogare la potenza media richiesta (nelle applicazioni di trazione, il valore di potenza media è molto minore del picco, vedi ad esempio figura A.12 a pagina 135) il che permette di dimensionare il motore termico per una potenza di molto inferiore, a parità di prestazioni del veicolo, e di farlo funzionare in condizioni maggiormente efficienti: rimpicciolendo il motore a combustione interna, è possibile fargli erogare una coppia vicina alla coppia nominale di progetto, e quindi di farlo funzionare in regioni caratterizzate da rendimenti (relativamente) elevati, come si può intuitivamente ricavare dall'osservazione della figura 1.10 a pagina 25, raffigurante una mappa di rendimenti tipica per un motore a combustione interna.

D'altra parte, la tecnologia ibrida può essere implementata al fine di migliorare le prestazioni, senza badare ai consumi, ad esempio affiancando il motore elettrico a quello termico per fornire maggior spunto in accelerazione.

Inoltre gli ibridi, essendo intrinsecamente una tecnologia ponte tra gli attuali veicoli a combustione interna e i veicoli elettrici, possono essere visti come uno strumento per sviluppare tecnologie (accumulatori, motori, stazioni di ricarica) e economie di scala che poi verranno sfruttate dalle auto puramente elettriche, che attualmente soffrono di ridotta autonomia, e alti tempi di ricarica e prezzi d'acquisto.

Gli ibridi si possono classificare, oltre che per la topologia e il percorso del flusso di potenza, in ragione delle potenze dei vari motori, tramite il grado di ibridazione (*hybridization factor*, HF).

2.4. Veicolo con powertrain ibrido elettrico+termico (HEV)

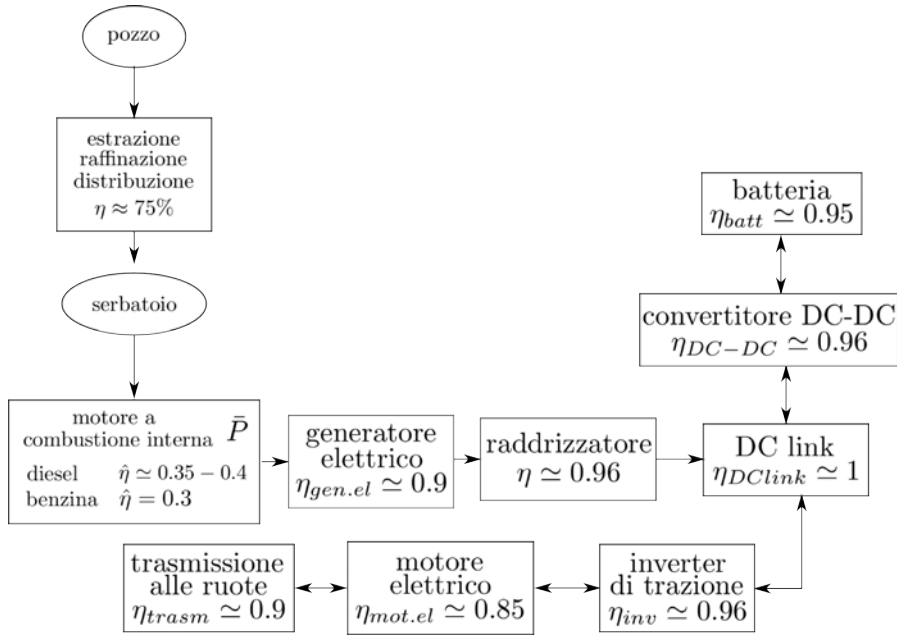


Figura 2.16.: catena di trasformazione dell'energia, dal pozzo alle ruote, per un veicolo con powertrain ibrido serie

$$HF = \frac{P_{m.el}}{P_{m.el} + P_{m.term}}$$

Si riconosce come un'auto tradizionale, con solo motore a combustione interna, abbia $P_{m.el} = 0$ e quindi $HF = 0$, mentre un veicolo puramente elettrico abbia $HF = \frac{P_{m.el}}{P_{m.el}+0} = 1$. I primi modelli di auto ibride inseriti sul mercato avevano grado di ibridazione ridotto, impiegando un motore elettrico che può esser visto come un sovradimensionamento del motorino d'avviamento, per applicazioni di "Start&stop" e recupero di energia dalla frenata. In futuro, col progredire di nuove soluzioni tecnologiche e l'apertura di nuove prospettive commerciali, potrà diventare appetibile la produzione di auto "sempre più elettriche", con grado di ibridazione approssimante l'unità.

2.4.1. Ibrido serie

L'ibrido serie si chiama così perché l'energia fluisce attraverso la serie formata da: serbatoio di benzina, motore a combustione interna, generatore elettrico, raddrizzatore (con capacità di invertire il flusso di potenza per avviare il motore a combustione interna, trascinandolo con il generatore), DC link (eventualmente dotato di uno o più stadi di accumulo), inverter, motore di trazione e la trasmissione alle ruote.

Pregi di questa topologia sono la possibilità di scegliere (nell'ipotesi lo stadio di accumulo sia dimensionato per assorbire le oscillazioni di potenza) il punto di funzionamento del motore termico, essendo questo scollegato dalle ruote, per conseguire il massimo

2. Simulazioni e confronti: efficienza, costi ed emissioni

rendimento, la semplicità del controllo dovuta proprio alla linearità del powertrain, la possibilità di semplificare la trasmissione dal motore alle ruote grazie alla buona caratteristica meccanica del motore elettrico (adatta agli scopi di trazione) e la flessibilità dei collegamenti di potenza (cavi elettrici, e non alberi meccanici) che consente maggior libertà progettuale nel dislocare i diversi componenti del powertrain all'interno del veicolo. In alcune applicazioni non votate all'efficienza, manca uno stadio di accumulo elettrico¹² e pertanto il motore termico deve erogare in ogni istante la potenza di trazione; il vantaggio di una tale impostazione è di poter avere alle ruote la migliore caratteristica meccanica del motore elettrico.

Svantaggi sono le perdite dovute alle multiple trasformazioni operate sull'intera energia di trazione e il costo di due macchine elettriche distinte, di cui una (il motore di trazione) dimensionata per fornire per brevi periodi la potenza di picco richiesta alle ruote. Infatti il rendimento di trasformazione dal serbatoio alle ruote (tank to wheel) risulta essere la produttoria dei rendimenti dei componenti la serie raffigurata in figura 2.16:

$$\eta_{TtW} = \eta_{ICE} \eta_{gen.el} \eta_{raddr} \eta_{DClink} \eta_{inverter} \eta_{mot.el} \eta_{trasm}$$

(dove η_{DClink} comprende anche il rendimento di carica/scarica degli eventuali dispositivi di accumulo di energia necessari per soddisfare le richieste di trazione, lasciando al motore termico a monte il compito di erogare una potenza costante) ed è pertanto limitato dai componenti a rendimento scarso. Viene quindi effettuata una stima dei rendimenti della catena, per confrontare il η_{TtW} dell'ibrido serie con quello di un veicolo tradizionale, assunto del 20% (ignorando per entrambe le tecnologie i carichi aggiuntivi a quello di trazione, ovvero i cosiddetti hotel loads, come il condizionamento dell'abitacolo¹³):

- rendimento del motore a combustione interna funzionante a regime nel punto di massimo rendimento 35% (motore benzina);
- rendimento del generatore 90%;
- raddrizzatore tra generatore e DC link 96%;
- DC link e relativo accumulo 98% (la potenza media viene trasmessa attraverso il DC link quasi senza perdite, solo l'energia della potenza oscillante entra nella batteria e viene interessata da perdite);
- inverter 96%;
- motore elettrico 85%;
- rendimento della trasmissione motore-ruote (trasmissione semplificata per la buona caratteristica meccanica del motore elettrico) 90%.

¹²non si può mai dire che l'accumulo manchi del tutto, essendo l'inerzia dei motori in rotazione, a rigore, anch'essa un accumulo energetico

¹³considerando anche questi carichi aggiuntivi, per il veicolo tradizionale [17] stima un rendimento complessivo serbatoio-ruote del 7%

2.4. Veicolo con powertrain ibrido elettrico+termico (HEV)

Il rendimento dal serbatoio alle ruote, senza tener conto dei minori consumi resi possibili grazie al recupero di energia in frenata, è del $\eta_{rTW} = 21.8\%$, di poco superiore al rendimento del veicolo tradizionale. Per valutare l'apporto della frenata rigenerativa, conduco alcune simulazioni, i cui risultati sono riportati in tabella 2.6: l'efficienza di carburante media risulta $2.031 \frac{km}{kWh}$, ovvero $20.3 \frac{km}{l}$ ($4.92 \frac{l}{100km}$). In termini di energia primaria, l'efficienza media è di $1.523 \frac{km}{kWh}$. L'incremento di efficienza rispetto all'auto con motore a benzina è del 46%, e del 16% rispetto l'auto a gasolio (si potrebbe pensare di impiegare un motore ad accensione spontanea a bordo dell'ibrido serie, per migliorare ancor più le efficienze¹⁴¹⁵), mentre la diminuzione di efficienza rispetto il veicolo a batteria è del 19%.

Dalle simulazioni su costi ed emissioni dell'intero ciclo di vita, effettuate coi medesimi dati già presentati nella sezione 2.2, risulta:

- per il veicolo ibrido serie un costo (di acquisto del veicolo, delle batterie e del combustibile) totale di 49 k€ (contro i 50 k€ del veicolo tradizionale, quindi sostanzialmente equivalenti);
- emissioni (produzione veicolo, produzione batterie e prodotti della combustione) totali per 33 tonCO₂eq (per il veicolo tradizionale 43 tonCO₂eq, quindi il veicolo equivalente serie si dimostra meno inquinante, nonostante le emissioni totali siano determinate per più di metà dal contributo della combustione, e sia stata mantenuta l'ipotesi emissiva di $2.38 \frac{kgCO_2}{l}$ presa da [16], ignorando cioè eventuali minori emissioni per l'ibrido serie grazie al regime continuo di funzionamento del motore termico).

Si può quindi affermare che un ibrido serie (con accumulo dimensionato per permettere al motore a combustione interna di funzionare a potenza costante; se il motore termico è chiamato a fare regolazione, il rendimento sarà minore, così come i vantaggi) è più efficiente di un veicolo tradizionale (ma non a livelli da rovesciare le considerazioni della sezione 2.7), richiede ancora un'alimentazione da combustibili fossili (a differenza del veicolo elettrico a batteria, la cui energia potrà, in futuro, essere prodotta da un parco di generazione elettrica rinnovabile) e per questo inquina solo poco meno di un veicolo tradizionale, pur restando superiore a quest'ultimo per le prestazioni meccaniche del motore.

Lo svantaggio di costo dato dalle due macchine elettriche è mitigato dalla sovraccaricabilità delle stesse: come si può apprezzare dalla figura A.11 a pagina 134, al motore

¹⁴in [16], il motore diesel viene preso in considerazione come generatore per range extender (ovvero con le stesse modalità di funzionamento di un ibrido serie), ma viene scartato per le elevate emissioni (NO_x e particolato) caratterizzanti il punto di funzionamento a massimo rendimento; emissioni che rendono necessario un impianto di trattamento fumi ingombranti e costosi, consistenti in filtri che bloccano le particelle indesiderate: per ripulire questi filtri, il motore diesel viene periodicamente portato a condizioni di funzionamento (con efficienze ridotte) tali da fargli emettere fumi caldi, al fine di bruciare le particelle sulle superfici dei filtri

¹⁵anche in [37] l'eventualità di un range extender basato su motore a combustione interna diesel è stata considerata e scartata per l'assenza di "esperienza di Diesel piccoli ottimizzati secondo peso ed efficienza", proprio in considerazione della ridotta potenza nominale richiesta dall'applicazione di fornire la potenza media di trazione

2. Simulazioni e confronti: efficienza, costi ed emissioni

Ciclo di guida	UDDS	FTP	Highway	US06	LA92	EUDC	ECE	JP10	JP15
Distanza percorsa	[km]	11.99	17.77	16.51	12.89	15.80	6.95	0.99	2.17
Batteria	[kWh]	5.12	5.12	5.12	5.12	5.12	5.12	5.12	5.12
	[kg]	49	49	49	49	49	49	49	49
Potenza media al DC link	[kW]	4.30	4.85	12.46	18.37	7.04	10.53	2.04	4.48
Consumo di benzina	[kWh]	5.51	8.49	8.80	10.25	9.46	3.91	0.37	0.97
Economia di combustibile	$[\frac{km}{kWh}]$	2.175	2.092	1.876	1.257	1.670	1.779	2.544	2.238
Economia di energia primaria	$[\frac{km}{kWh}]$	1.63	1.57	1.41	0.94	1.25	1.33	1.98	1.68

Tabella 2.6.: risultati delle simulazioni volte a valutare l'economia di carburante di un veicolo ibrido serie

2.4. Veicolo con powertrain ibrido elettrico+termico (HEV)

di trazione vengono richieste punte di potenza per un tempo limitato, mentre per il restante tempo si trova a funzionare a una potenza media ben più bassa del picco; ciò permette, se il motore elettrico è progettato con un'inerzia termica tale da consentirgli, di dimensionare il motore per la potenza media richiesta, limitando ingombro, peso e costo, ma mantenendo la potenzialità di supplire al picco per brevi intervalli (al contrario, un motore a combustione interna dev'essere dimensionato per la potenza massima richiesta, il che lo rende più pesante e comporta che funzioni spesso a carico parziale, con perdite elevate).

2.4.1.1. Validazione con risultati precedenti ricerche

Dai risultati delle simulazioni, risultano costi ed emissioni operative (inerenti il consumo di combustibile per la propulsione del veicolo) pari a:

$$c_{en} = 0.0837 \left[\frac{\text{€}}{\text{km}} \right]$$
$$\nu_{en} = 117.2 \left[\frac{\text{gCO}_2}{\text{km}} \right]$$

Confrontando questi ultimi risultati con la tabella 2.5, si evince come un veicolo ibrido serie sia caratterizzato da un più elevato costo al km, ma da emissioni paragonabili con quelle di BEV con autonomie tra 150 e 200km.

In [14], erano state effettuate simulazioni ipotizzando veicoli ibridi serie con diverse autonomie garantite dalla batteria (concettualmente più simile al PHEV analizzato nel capitolo 3): essendo però costi ed emissioni per unità di percorso distinte in modalità elettrica (motore termico spento, energia di trazione estratta dalle batterie) e modalità ibrida (generatore acceso), risulta possibile confrontare, a parità di capacità delle batterie, i risultati in modalità ibrida (con autonomia quasi nulla) di [14] con i risultati delle simulazioni del veicolo ibrido serie di questo capitolo.

2. Simulazioni e confronti: efficienza, costi ed emissioni

$$\begin{aligned}
c_{enHEV} &= 0.0583 \left[\frac{\$}{mi} \right] + 0.00013 \left[\frac{\$}{mi^2} \right] \times autonomia[mi] \\
&= 0.0583 \left[\frac{\$}{mi} \right] \times \frac{0.8 \frac{\text{€}}{\$}}{1.6 \frac{km}{mi}} + \left[0.00013 \left[\frac{\$}{mi^2} \right] \times \frac{0.8 \frac{\text{€}}{\$}}{(1.6 \frac{km}{mi})^2} \right] \times autonomia[mi] \\
&= 0.0292 \left[\frac{\text{€}}{km} \right] + \left(41 \times 10^{-6} \left[\frac{\text{€}}{km^2} \right] \right) \times autonomia[km] \\
\nu_{enHEV} &= 0.221 \left[\frac{kgCO_2}{mi} \right] + 0.00049 \left[\frac{kgCO_2}{mi^2} \right] \times autonomia[mi] \\
&= \frac{0.221 \left[\frac{kgCO_2}{mi} \right]}{1.6 \left[\frac{km}{mi} \right]} + \frac{0.00049 \left[\frac{kgCO_2}{mi^2} \right]}{(1.6 \frac{km}{mi})^2} \times autonomia[mi] \\
&= 0.138 \left[\frac{kgCO_2}{km} \right] + 0.00019 \left[\frac{kgCO_2}{km} \right] \times autonomia[km]
\end{aligned}$$

Considerando un'efficienza, dalla batteria alle ruote, di circa $5 \frac{km}{kWh}$ come per il veicolo elettrico (tabella 2.3), una batteria da 5kWh come quella impiegata nelle simulazioni del veicolo ibrido serie garantisce un'autonomia di 25km; per cui i risultati di [14] diventano:

$$\begin{aligned}
c_{enHEV} &= 0.0292 \left[\frac{\text{€}}{km} \right] + \left(41 \times 10^{-6} \left[\frac{\text{€}}{km^2} \right] \right) \times 25[km] = 0.0302 \simeq 0.03 \left[\frac{\text{€}}{km} \right] \\
\nu_{enHEV} &= 0.138 \left[\frac{kgCO_2}{km} \right] + 0.00019 \left[\frac{kgCO_2}{km} \right] \times 25[km] = 0.1428 \simeq 143 \left[\frac{gCO_2}{km} \right]
\end{aligned}$$

I risultati delle emissioni sono in buon accordo, mentre la discrepanza tra i costi si spiega col basso prezzo della benzina negli Stati Uniti (prezzi del 2007 presi come riferimento da [14]):

$$c_{benz} = 3 \left[\frac{\$}{gal} \right] \times \frac{0.8 \frac{\text{€}}{\$}}{3.785412 \frac{l}{gal}} = 0.634 \left[\frac{\text{€}}{l} \right]$$

2.4.2. Ibrido parallelo

Il concetto dell'ibrido parallelo prevede di accoppiare motore elettrico e termico, tramite un ingranaggio meccanico, di modo che la potenza somministrata alle ruote sia la somma delle potenze erogate dai due motori: ciò permette di usare il motore elettrico per erogare/assorbire i picchi di potenza, lasciando che il motore termico lavori a regime, oppure tenere il motore termico spento quando la potenza richiesta è bassa (a velocità ridotte), usare il motore elettrico per avviare il motore termico, recuperare energia in

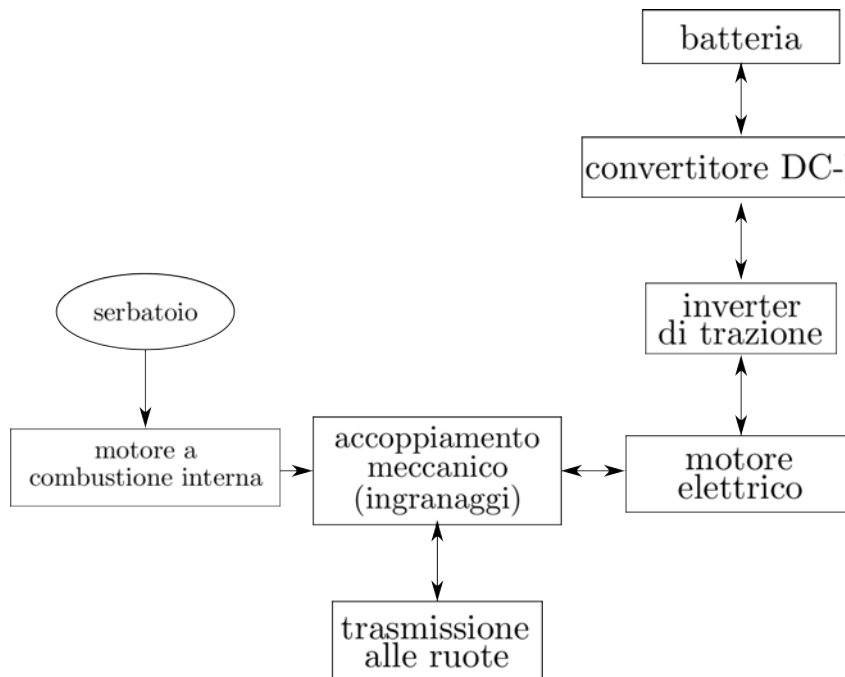


Figura 2.17.: schema del powertrain ibrido parallelo

frenata e in generale quando la potenza richiesta è minore di quella erogata dal motore a combustione interna.

I due motori possono essere accoppiati in coppia o in velocità: se sono accoppiati in coppia, un ingranaggio recapita alle ruote la somma delle coppie erogate dal motore termico ed elettrico (i due motori possono ad esempio agire sullo stesso albero), coppie che possono essere controllate indipendentemente, ma le velocità del veicolo e dei due motori sono decise dalla riduzione degli ingranaggi e dalla conservazione delle potenze. Similmente, nell'accoppiamento di velocità, vengono sommate le velocità dei due motori, ma le coppie diventano variabili dipendenti.

Vantaggi di questa topologia sono di presentare minori perdite, grazie alla catena energetica più corta (accumulo-motori-ingranaggi-trasmissione-ruote), e minor ingombro rispetto alla topologia serie. Svantaggi sono che l'accoppiamento meccanico tra motore termico, motore elettrico e ruote non permette di circoscrivere il punto di funzionamento del motore endotermico bene quanto nella topologia serie, e che la struttura complessa ne complica anche il controllo.

2.5. Veicolo elettrico con cella a combustibile (FCEV)

Una possibile alternativa di lungo periodo all'auto elettrica a batteria consisterebbe nell'utilizzare un serbatoio d'idrogeno da cui ricavare energia elettrica per mezzo di una cella a combustibile, dispositivo elettrochimico che converte idrogeno e ossigeno, prenden-

2. Simulazioni e confronti: efficienza, costi ed emissioni

do quest'ultimo dall'ambiente, in energia elettrica e acqua. Attuali handicap di questa tecnologia sono l'elevato costo, lo scarso rendimento ($\sim 50\%$) e la scarsa dinamica della cella a combustibile, insieme con la scarsa densità volumetrica di energia del serbatoio d'idrogeno, che consente di ottenere autonomie accettabili solo accettando un serbatoio molto ingombrante, oppure innalzando la pressione dell'idrogeno nel serbatoio, con conseguenti preoccupazioni per la sicurezza, oppure comprimendo e raffreddando l'idrogeno allo stato liquido, con l'ingombro e i consumi dell'impianto criogenico.

Questa tecnologia potrebbe diventare interessante qualora si riuscisse ad incrementare le prestazioni delle celle a combustibile (principalmente il prezzo), ma potrebbe divenire influente se nel frattempo venisse migliorata la densità energetica delle batterie, infatti:

- l'idrogeno non esiste allo stato libero in natura, pertanto andrebbe prodotto impiegando altre forme di energia primaria, col rischio di ottenere una catena energetica lunga ed inefficiente, consistente nel trasformare energia (elettrica o chimica, a seconda della tecnologia) in idrogeno, poi questo in elettricità nella cella a combustibile del veicolo e infine l'energia elettrica in movimento nel motore elettrico;
- l'idrogeno è un vettore energetico, al pari dell'elettricità, ma non esiste attualmente una rete di distribuzione dell'idrogeno capillare e diffusa quanto la rete elettrica, il che rappresenta un altro svantaggio dei veicoli ad idrogeno rispetto ai veicoli elettrici.

Per superare la necessità di costruire un'intera rete di trasporto e distribuzione dell'idrogeno, è possibile pensare a degli impianti di rifornimento di idrogeno, ognuno collegato alla rete elettrica e dotato di impianto di idrolisi per la produzione locale dell'idrogeno: questo approccio potrebbe risultare efficace solo nel caso in cui la produttoria dei rendimenti $\eta_{idrolisi}\eta_{accumuloH2}\eta_{fuelcell}$, dall'energia elettrica di rete all'energia elettrica nel DC link del veicolo, risulti maggiore dei rendimenti di ricarica del veicolo elettrico $\eta_{charger}\eta_{accumulo.elettrico}$; oppure nel caso in cui l'autonomia fornita dall'auto elettrica con cella a combustibile la renda maggiormente appetibile rispetto l'auto elettrica a batteria, nonostante il maggior rendimento di quest'ultima. Al momento, le celle a combustibile raggiungono rendimenti massimi del 40-60% (a seconda della tipologia e dell'impiego), mentre gli impianti di produzione dell'idrogeno mostrano un'efficienza del 75% (*reforming* da gas metano), pertanto $\eta_{idrolisi}\eta_{accumuloH2}\eta_{fuelcell} \simeq 0.3 - 0.45$, contro l'80-90% di una batteria: appare quindi evidente come la risoluzione dei problemi "scarsa densità energetica" e "ridotta autonomia" delle batterie renderebbe la più corta filiera elettrica pienamente soddisfacente per le esigenze di trazione.

Sono attualmente allo studio dispositivi detti *on-board reformer* in grado di sfruttare combustibili fossili (principale candidato è il metanolo) da cui estrarre l'idrogeno da trasformare poi in elettricità in una cella a combustibile: questo dispositivo risolverebbe il problema rappresentato dall'ingombro del serbatoio d'idrogeno in pressione a bordo, sostituendolo con una più piccola tanica di combustibile liquido, e della necessità di una rete di distribuzione del gas idrogeno. Permane la sfida di rendere la catena reformer-

fuel cell-motore elettrico più efficiente di un motore a combustione interna direttamente alimentato a metanolo.

2.6. Auto elettrica con accumulo ibrido batteria+supercondensatore

Le auto elettriche a batteria sono limitate dalle prestazioni del sistema di accumulo; come descritto nell'appendice B, le batterie si dividono in batterie per energia e batterie per potenza; le prime conferiscono al veicolo una autonomia accettabile, ma limitano la velocità e l'accelerazione massime per l'incapacità di sopportare l'erogazione di elevate correnti. Si può aggirare tale limitazione [41] accoppiando una batteria ad elevata densità di energia con una ad elevata densità di potenza, ma il dispositivo di accumulo risultante sarebbe pesante; una soluzione al problema potrebbe venire dal sostituire la batteria in grado di erogare/assorbire potenze elevate con un altro dispositivo con prestazioni in potenza uguali o superiori, ma minor ingombro e peso, ad esempio i supercondensatori.

I supercondensatori (appendice B.4) hanno valori di capacità (da decine a migliaia di Farad) di molto superiori a quelle ottenibili coi classici condensatori elettrolitici (ordine dei mF o μF), grazie alla loro struttura microporosa che permette di accumulare grandi quantità di carica di segno opposto a distanze ridotte, ma mantengono l'ottima dinamica necessaria ad assorbire/erogare potenze elevate e discontinue. Accoppiando una batteria ad elevata energia con un banco di supercondensatori si può pensare di scaricare la batteria a corrente costante (allungandone la vita utile), e affidare l'erogazione/assorbimento delle elevate differenze di potenza richieste in accelerazione e in frenata rigenerativa ai supercondensatori.

A titolo di esempio, sono riportati in figura 2.18 i valori di corrente erogata dalla batteria quando essa è l'unico componente di accumulo energetico: si noti il picco massimo di corrente richiesta alla batteria, di circa 150A (contro i 17A nominali). Invece, in presenza dei supercondensatori (grafici di figura 2.19), il picco di corrente richiesto alla batteria si riduce a 65A. In questa simulazione si è imposto che la componente non costante della potenza di trazione venisse presa in carico per un quarto dalla batteria e per tre quarti dai supercondensatori, questo per una maggior aderenza alla realtà, con i limiti spiegati alla fine dell'appendice B.4 che impediscono di assegnare alla potenza erogata dai supercondensatori andamenti arbitrari.

2.7. Approccio globale

Una volta stimati consumi energetici, emissioni e costi totali delle automobili con diversa tecnologia propulsiva e di accumulo, è possibile formulare alcune considerazioni di carattere generale. Ad esempio, l'auto elettrica è più efficiente dell'auto con motore termico, ma questa maggiore efficienza assume piena importanza solo se anche la restante catena di trasformazione energetica ha rendimenti elevati e basse emissioni, con particolare riferimento alla trasformazione da energia primaria in elettrica: è pertanto desiderabile che la fonte di energia primaria sia rinnovabile e che i rendimenti di trasformazione siano

2. Simulazioni e confronti: efficienza, costi ed emissioni

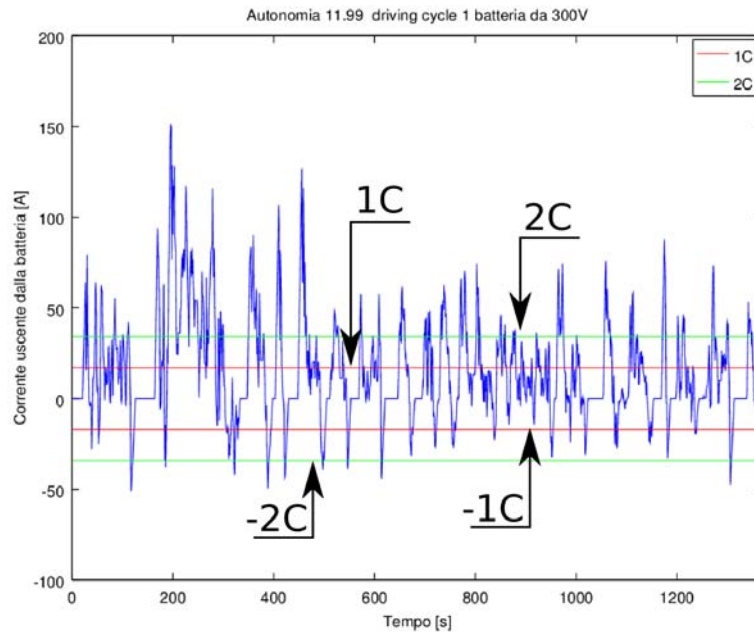
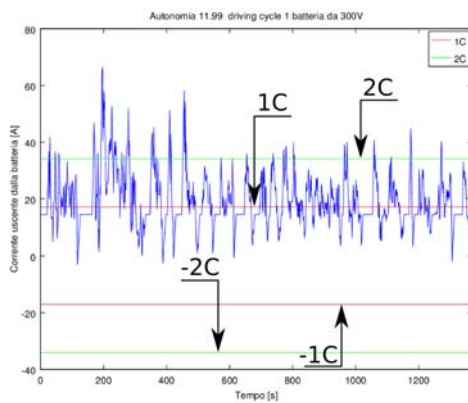
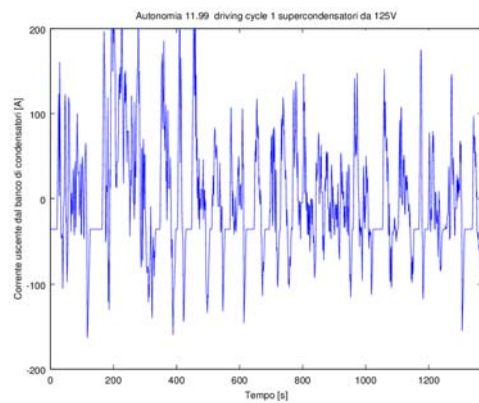


Figura 2.18.: corrente uscente dalla batteria nel caso di ciclo UDDS percorso una sola volta, accumulo composto dalla sola batteria



(a) corrente uscente dalla batteria



(b) corrente erogata dai supercondensatori

Figura 2.19.: corrente uscente dalla batteria e dai supercondensatori nel caso di ciclo UDDS percorso una sola volta, accumulo composto da batteria e supercondensatori

elevati. In mancanza di un tale cambiamento nel complesso di generazione elettrica, la diffusione delle auto elettriche avrebbe l'effetto di spostare il consumo di energia fossile, dai veicoli alle centrali elettriche: ciò permetterebbe di ridurre il consumo energetico e spostare le emissioni (sperabilmente riducendole) dai centri urbani ai camini delle centrali di generazione, laddove sarebbero facilmente abbattute, secondo la regola empirica che è più facile migliorare il rendimento e mitigare le emissioni di un unico grande impianto che non di tanti piccoli, grazie all'economie di scala.¹⁶

C'è però da chiedersi se sia desiderabile migliorare l'efficienza degli spostamenti effettuati con tanti veicoli di trasporto privato (avendo passato in rassegna nel capitolo 1 i meccanismi secondo i quali il trasporto privato, pur essendo spesso un male necessario, peggiori la qualità generale della vita), quando un incremento dell'utilizzo del trasporto pubblico (o degli spostamenti ad energia muscolare, per tragitti brevi) avrebbe un impatto senz'altro più significativo, a livello di consumi ed emissioni, ma anche di decongestionamento stradale, rapporti sociali e benessere generale.

Allargando lo sguardo a livello globale, si può avviare un'altra serie di ragionamenti:

- [19] stima per il 2050 una popolazione globale di 10 miliardi di persone e 2.5 miliardi di veicoli (rispetto ai 7 miliardi di persone e 1 miliardo di veicoli attuali, e ai 6 miliardi di persone e 700 milioni di veicoli del 2000, anno di riferimento per l'articolo [19]);

¹⁶A questo riguardo, sono interessanti i risultati ottenuti da RSE in [26] per quanto riguarda la simulazione della qualità dell'aria in Italia nel 2030 nei due scenari:

1. senza diffusione di veicoli elettrici, la variazione di emissioni è dovuta all'evoluzione delle auto circolanti e del parco di generazione elettrica;
2. con diffusione di veicoli elettrici, un'ulteriore variazione delle emissioni rispetto al caso 1, "porta ad un bilancio emissivo che, rispetto allo scenario di riferimento, è caratterizzato da un incremento delle emissioni di SO_2 , una riduzione delle emissioni di NO_x , un piccolo incremento nelle emissioni di particolato, come indicato in Tabella"

	SO_2 [Mg]	NO_x [Mg]	PM [Mg]
generazione termoelettrica	3170	2702	167
vetture a combustione interna sostituite	-325	-13778	-134
totale	2845	-11077	33

In tabella sono riportate le variazioni delle emissioni nello scenario con veicoli elettrici rispetto a quello senza, con evidenziati il calo di emissioni delle auto a combustione interna sostituite e l'aumento per la maggiore produzione termoelettrica.[26]

"L'evoluzione del settore termoelettrico e, principalmente, del parco circolante al 2030 introduce riduzioni significative della concentrazione [di NO_2] su tutto il territorio italiano (comprese fra il 15 ed il 30%) ed in particolare nelle aree urbane dove il contributo dai trasporti è particolarmente significativo. L'introduzione dei veicoli elettrici determina un'ulteriore riduzione delle concentrazioni, seppure in misura minore rispetto al caso precedente (1 ppb max, pari al 6% della concentrazione media annua al 2030). [...] l'evoluzione del parco circolante al 2030 comporta una riduzione della concentrazione media annua [di PM2.5] variabile fra il 5 ed il 17% che, nelle principali aree urbane corrisponde a circa $5 \frac{\mu g}{m^3}$. La successiva introduzione dello scenario di penetrazione del veicolo elettrico determina un ulteriore per quanto modesto miglioramento della qualità dell'aria. La riduzione massima si attesta a circa $0.2 \frac{\mu g}{m^3}$, corrispondenti ad una percentuale variabile fra 0.5 e 1.5% della concentrazione media annua." [26]

2. Simulazioni e confronti: efficienza, costi ed emissioni

- un parco veicolare triplicato consumerebbe, a tecnologia inalterata, il triplo dell'energia primaria;
- nelle stime riportate nella sezione 2.1, l'efficienza di energia primaria per un'auto a combustione interna è circa $1 \frac{km}{kWh}$ (1.04 per motore a benzina, 1.31 se diesel; cfr. pagina 36);
- per un'auto elettrica con autonomia 100 km risulta un'efficienza di energia primaria di $1.88 \frac{km}{kWh}$ (vedi formula 2.6 a pagina 46), efficienza di energia primaria che raggiunge $3.81 \frac{km}{kWh}$ nel caso l'elettricità provenga interamente da centrali idroelettriche;
- a meno di incrementare drasticamente l'efficienza del parco di generazione elettrica, un parco veicolare triplicato con efficienza quasi raddoppiata rispetto all'attuale (quindi con transizione totale al trasporto elettrico entro il 2050), consumerebbe il 50% in più dell'energia primaria attualmente richiesta dal settore trasporti;
- con ogni probabilità, queste enormi nuove richieste di energia verrebbero soddisfatte con fonte fossile, dati gli attuali sviluppi dei mercati di generazione rinnovabile (in espansione, ma ancora poco significativi di fronte al crescente consumo energetico globale)¹⁷ e di combustibili fossili (aumento dell'estrazione globale e abbassamento dei prezzi ad opera dello sfruttamento di giacimenti non convenzionali, come lo shale gas e le sabbie bituminose, la cui estrazione è particolarmente inquinante ma viene comunque attuata, sia per il desiderio delle nazioni interessate di diminuire la dipendenza energetica estera, sia perchè la domanda energetica mondiale spinge i prezzi dei combustibili al punto da rendere competitive anche queste tecnologie poco efficienti).

Il trend di continua crescita del consumo energetico globale fa sì che la crescita (in termini assoluti) di potenza di generazione rinnovabile installata, pur supportata da incentivi, non riesca a tenere il passo della crescita della domanda, necessitando a supporto anche un parallelo aumento di potenza installata da fonte fossile: si ottiene quindi un aumento delle emissioni, ad opera della crescita di domanda energetica, nonostante gli importanti investimenti a supporto di energie rinnovabili e tecnologie "verdi". In questo scenario e nell'ipotesi che l'intera popolazione mondiale condivida la determinazione ad evitare gli effetti ambientali dell'inquinamento (in particolare le emissioni climalteranti, non foss'altro che per evitare in futuro i costi e i danni di eventi meteorologici estremi), è obiettivo primario la riduzione (del trend di aumento) dei consumi, di modo che l'aumento della potenza di generazione rinnovabile installata si traduca in un aumento della

¹⁷sono rilevanti al riguardo le osservazioni riportate in [42] riguardo i trend di crescita delle varie fonti primarie nella fornitura energetica globale: il carbone, dopo aver raggiunto il 5% nel 1840, ha raggiunto il 50% solo 60 anni dopo; il petrolio, giunto al 5% nel 1915, ha impiegato 60 anni per arrivare al 40%; il gas naturale, giunto al 5% nel 1930, ha impiegato poco più di 50 anni per arrivare al 25%; risulta quindi difficile credere, viste le inerzie del sistema energetico, che le "rinnovabili moderne" (fotovoltaico ed eolico) possano diventare la principale fonte di energia globale in tempi brevi, per lo meno in assenza di politiche *ad hoc* e della riduzione dei consumi energetici globali

quota di generazione rinnovabile, insieme a interventi di mitigazione delle emissioni della residua generazione da fonte fossile (CCS, *carbon capture and storage*, cattura e sequestro della CO_2 emessa) e di accoppiamento degli impianti di generazione rinnovabile non programmabile con dispositivi di accumulo, per ridurre la necessità di mantenere attiva generazione fossile di riserva per la modulazione.

Si ritiene importante evidenziare come il perseguimento dell'obiettivo di riduzione dei consumi energetici globali implichi, se non un peggioramento della qualità della vita della popolazione, senz'altro una riduzione delle aspettative di miglioramento future della stessa, il che suscita alcuni filoni di discussione:

1. se sia verificata l'ipotesi della unanime determinazione dell'umanità a rinunciare all'attuale stile di vita in ragione di danni ambientali non immediatamente percepiti;
2. se sia possibile, nel mentre si abbassano i consumi energetici, mitigare il peggioramento della qualità della vita della popolazione tramite interventi di carattere sociale;
3. le popolazioni dei paesi poveri o in via di sviluppo condividono il desiderio di abbattere le emissioni, la disponibilità a partecipare nella riduzione dei consumi energetici e a ridurre le proprie aspettative di qualità della vita, per contrastare gli effetti dell'inquinamento accumulato nella biosfera dai paesi ricchi?

Nell'ottica di ridurre i consumi, giova ricordare come i consumi energetici (e quindi le emissioni) del settore trasporti siano legati non all'esigenza di mobilità in sè, ma dipendano fortemente dalle modalità di trasporto:

- tempo di viaggio, ovvero velocità commerciale del mezzo di trasporto, perchè viaggiare a velocità elevate significa consumare potenze importanti (vedi formula (A.1) a pagina 132);
- massa del mezzo di trasporto, perchè l'obiettivo è trasportare i 70-80 kg di massa corporea del viaggiatore più qualche bagaglio, mentre i consumi energetici sono determinati (per la loro preponderanza) dalla massa del mezzo di trasporto, ovvero le 1-2 tonnellate di un'auto privata o 8-10 di un bus (l'autobus consuma di più perchè più pesante, ma è anche in grado di trasportare maggiore massa utile, ovvero passeggeri);
- trasporto pubblico o privato (il trasporto pubblico è meno flessibile, sia in termini di destinazioni che di orari, soprattutto se mal progettato, ma è più efficiente sia in termini di consumi per passeggero al km, che di consumi totali, perchè un autobus che trasporta dieci persone consuma meno di dieci automobili private con a bordo il solo guidatore);
- fonte di energia primaria sfruttata (carbone, petrolio, gas, idroelettrico, nucleare, fotovoltaico, eolico, biomasse, geotermico);

2. Simulazioni e confronti: efficienza, costi ed emissioni

- distribuzione dell'energia, dalla fonte primaria all'accumulo del veicolo;
- come tale energia viene convertita in movimento nel motore del mezzo (motore a combustione interna, motore elettrico, motore centrale o motore-ruota).

I veicoli elettrici sono avvantaggiati rispetto i veicoli con motore a combustione interna perchè danno la possibilità di diversificare e ampliare il numero delle fonti di energia primaria sfruttabili, inoltre il motore elettrico ha un rendimento molto più elevato del motore a combustione interna (circa 4 volte) e permette il recupero di energia mediante la frenata rigenerativa. In un contesto di consumo di energia primaria (dal pozzo alle ruote), il veicolo elettrico risulta più efficiente, con margini di miglioramento per quanto riguarda la generazione elettrica. Di contro, l'auto elettrica è svantaggiata per quel che riguarda l'autonomia, i tempi di ricarica e i costi: tutti e tre questi svantaggi sono imputabili al dispositivo di accumulo energetico, in termini di densità di energia, densità di potenza e costo.

Si potrebbe produrre un ragionamento sulla causa del problema, cioè la domanda stessa di mobilità:

“non si potrebbe ottenere un risparmio di energia forse maggiore di quello ottenibile convertendo l'intero parco automobilistico (operazione certo non economica) da propulsione termica ad elettrica (a meno di una poderosa ma improbabile conversione del parco di generazione elettrica verso fonti non inquinanti), se si mantenessero le auto a combustione interna (magari incentivando le vetture con motori ad accensione spontanea, più efficienti di quelli ad accensione comandata) ma si disincentivassero gli spostamenti brevi (per i quali i transitori termici di motore a combustione e sistema di trattamento fumi occupano una frazione temporale importante, abbassando il rendimento medio; i quali tragitti brevi potrebbero venire sostituiti con spostamenti ad energia muscolare, senza rilevanti disagi) o non necessari effettuati con tecnologie non efficienti (trasporto privato con combustibili fossili)? Se la popolazione umana fosse concentrata in un numero ristretto di città, sviluppate tramite una progettazione urbanistica volta a mantenere distanze “pedonabili/ciclabili” tra i luoghi di residenza, i luoghi di lavoro, di aggregazione e di svago e di pubblica utilità, quanto sarebbe diverso il consumo di energia per la mobilità? E sarebbe un mondo con un livello accettabile di qualità della vita?”

But we like to engineer our way to a solution, not change behaviors. (Tom Murphy, professore di fisica all'Università della California, San Diego, <http://physics.ucsd.edu/do-the-math/2011/07/100-mpg-on-gasoline>)

2.8. Auto elettrica, comunque

Ci si pone ora nella situazione di dover progettare un'auto elettrica, indipendentemente dalle prestazioni e dalle prospettive energetiche globali. Per rendere l'auto elettrica appetibile al grande pubblico, è necessario individuarne i punti deboli e cercare di mitigarli:

- problemi di autonomia (le batterie rappresentano una forma di accumulo a bassa densità energetica, quindi si deve scegliere se dotare il veicolo di batterie pesanti e ingombranti, oppure accettare un range di guida limitato);
- tempi di ricarica lunghi (a seconda della capacità delle batterie di accumulare grande energia e accettare elevate correnti);
- scarsissima diffusione attuale dell'infrastruttura delle stazioni di ricarica.

Questi problemi, tutti riconducibili ai limiti intrinseci nel dispositivo fisico di accumulo energetico, possono essere affrontati in vari modi:

- sviluppo di nuove batterie, con migliore densità energetica;
- rimpiazzare l'accumulo elettrochimico (batteria) con un insieme composto da serbatoio di combustibile, motore termico, generatore elettrico, sfruttando l'elevata densità energetica dei combustibili fossili;
- penetrazione capillare dell'infrastruttura di stazioni di ricarica, abbinata a una tecnologia di ricarica veloce o di battery swapping (come quello recentemente annunciato da Tesla Motors[23], richiede però uno sforzo di uniformazione delle batterie per poter essere applicato su tutti i veicoli).

Per completezza, va citata anche la proposta di auto elettrica accoppiata con possibilità di noleggiare un'auto a combustione interna in caso di percorrenze maggiori, presentata negli Stati Uniti per il lancio del modello 500e della Fiat[20]. Pur essendo una valida proposta, nella prospettiva di allargare il mercato delle auto elettriche combattendo la *range anxiety*, non è una valida soluzione nel caso di maggiori percorrenze impreviste.

Per quanto riguarda il primo approccio, ricerche finalizzate a raggiungere prestazioni superiori a quelle delle attuali batterie (sia come densità energetica che densità di potenza, senza dimenticare sicurezza e costi) sono già in corso.

La seconda soluzione comporterebbe di sostituire una parte del dispositivo di accumulo elettrochimico con un dispositivo di generazione elettrica alimentato a combustibile: questo approccio, analogo a un veicolo ibrido serie con accumulo, prende il nome di *range extender*. Un veicolo elettrico con range extender condivide la topologia del veicolo ibrido serie, ma si distingue per la batteria con capacità sufficiente ad assorbire le oscillazioni di potenza, il che permette di far funzionare il motore a combustione interna a potenza costante, o addirittura con capienza tale da garantire una certa autonomia in modalità elettrica pura (con range extender spento). Il range extender può essere progettato, o come dispositivo di emergenza per raggiungere una stazione di ricarica con la batteria

2. Simulazioni e confronti: efficienza, costi ed emissioni

scarica (riducendo le prestazioni del veicolo, di modo che la potenza del range extender soddisfi la potenza media di trazione), o per elevate percorrenze, nel qual caso il serbatoio dev'essere opportunamente dimensionato e si può prevedere che l'efficienza energetica risulterà:

- per percorrenze ridotte (inferiori all'autonomia della batteria, quindi tragitto in modalità elettrica con range extender spento), di poco inferiore (a causa del peso aggiuntivo del range extender) a quella di un'auto elettrica a batteria, ma superiore a quella di un ibrido grazie allo sfruttamento dell'elettricità prelevata da rete;
- per poi calare al livello di un ibrido serie con accumulo, quanto più la percorrenza è elevata, per l'accensione del range extender, col vantaggio sul BEV di non necessitare di soste per la ricarica;
- in entrambe le casistiche (percorrenze ridotte o elevate) l'auto con range extender mostra efficienza inferiore, rispettivamente al BEV e HEV, a causa della massa degli elementi aggiunti al powertrain, ma ha il pregio di adattarsi a tutti i tipi di tragitto, cosa che altrimenti necessiterebbe dell'acquisto di due veicoli separati

La terza soluzione permette di accettare che i veicoli abbiano autonomie ridotte, ma che le stazioni di ricarica siano così diffuse e la ricarica del veicolo così veloce, che la sosta per la ricarica non rappresenti un inconveniente.

Ricaricare una batteria da 35 kWh nominali (capienza media per un'autonomia di 100 km) in 5 minuti significa erogare una potenza di $(0.75 \times 35 \text{ kWh}) \times \frac{60/h}{5} = 315 \text{ kW}$, valore che rappresenta sicuramente una sfida, sia per la rete elettrica da cui tale potenza viene richiamata, sia per l'elettronica del caricabatterie e per la batteria che deve accettare tale potenza, dal momento che le batterie in grado di accettare/erogare potenze elevate difficilmente contengono una grande energia e viceversa. Si può quindi immaginare di distinguere le batterie per veicoli elettrici in due categorie, a seconda del profilo di utilizzo per cui il veicolo viene progettato:

- batterie con scarsa capacità e potenza elevata (entrambe in termini relativi), per auto elettriche con autonomia ridotta e ricarica rapida;
- batteria con capacità elevata e potenza ridotta, per veicoli con autonomia elevata e ricarica "lenta".

Dal punto di vista della rete elettrica, inoltre, ogni stazione di ricarica certamente non rifornirà un veicolo alla volta, ovvero l'assorbimento di punta di una stazione di ricarica sarà nell'ordine del MW: la rete attuale è in grado di erogare tale potenza, o sarebbero necessari potenziamenti della rete di alta tensione, costosi e spesso osteggiati dalla popolazione?

Una possibile alternativa alla sfida della ricarica rapida risiede nella possibilità di dotare le stazioni di ricarica di batterie ricaricate con velocità di ricarica normale (possibilità di modulare la richiesta energetica della stazione di ricarica con algoritmi di ricarica intelligenti, in funzione del grado di carico della rete elettrica e della richiesta di batterie

2.8. Auto elettrica, comunque

cariche), che vengono inserite nell'auto al posto della batteria scarica, la quale viene a sua volta posta in ricarica (battery swapping); ciò consentirebbe di livellare l'assorbimento elettrico del punto di ricarica e abbattere i tempi di attesa; d'altra parte, prima che un tale approccio diventi realtà, sono necessari uno sforzo di uniformazione dei modelli di batterie dei vari costruttori, in modo che siano intercambiabili tra le varie auto e la fondazione di società di gestione dei punti di ricarica, le quali assumerebbero l'onere di acquistare, mantenere e ricaricare le batterie, fornendo ai guidatori di auto elettriche un servizio in abbonamento, il che permetterebbe di scorporare il costo delle batterie dal prezzo d'acquisto dell'auto elettrica, rendendola maggiormente attraente, anche se non necessariamente economica sull'intera vita del veicolo.

3. Veicolo ibrido plug-in (PHEV), range extender

Un veicolo ibrido plug-in è una vettura con motore di trazione elettrico, dotata di due fonti d'energia:

- batteria, con possibilità di ricarica da rete (*plug-in*), dimensionata per garantire una certa autonomia in modalità *pure electric*;
- motore termico accoppiato ad un generatore elettrico, in grado di generare energia elettrica per ricaricare la batteria o da inviare direttamente al motore anche durante il moto del veicolo, aumenta l'autonomia (*range extender*) fornita dalla sola batteria.

Di conseguenza, l'efficienza (in termini di energia primaria consumata), i costi e le emissioni relativi alla percorrenza dipendono dalla quota di energia di trazione prelevata dalla batteria e dalla quota presa in carico dal range extender.

Il motore termico viene fatto funzionare a potenza costante per migliorarne il rendimento medio; la potenza alla quale viene fatto funzionare (decisa in fase di dimensionamento) influenza l'autonomia del veicolo:

- se la potenza di dimensionamento è ridotta (ad esempio perchè si vuole risparmiare spazio e peso da caricare a bordo), si può immaginare che il motore termico rimanga sempre acceso col veicolo in funzione (addirittura, potrebbe restare acceso a caricare le batterie anche finchè la macchina è parcheggiata) allo scopo di diminuire la pendenza con cui cala lo stato di carica della batteria durante la guida e aumentare l'autonomia; a batteria scarica, il veicolo può funzionare a velocità ridotta (potenza limitata al valore erogato dal motore termico), per raggiungere la più vicina stazione di ricarica;
- se il motore viene dimensionato per la potenza media richiesta in un ciclo di guida tipico, esistono due alternative, che si distinguono per la durata di funzionamento del range extender:
 1. la batteria viene dimensionata per assorbire le oscillazioni di potenza, mentre la potenza media di trazione viene fornita dal motore termico (la batteria è così piccola che non ha senso fornire l'auto di circuito caricabatterie), è il caso di un ibrido serie con accumulo;
 2. la batteria viene dimensionata per garantire una autonomia significativa, pertanto il veicolo funziona con la sola energia proveniente dalla batteria (motore

3. Veicolo ibrido plug-in (PHEV), range extender

termico spento, modalità elettrica) e una volta scaricata questa, avvia il motore termico per erogare la potenza media di trazione ed eventualmente ricaricare la batteria;

- si possono immaginare anche altri criteri di dimensionamento.

3.1. Dimensionamento del range extender

Ad esempio, in [16], si dimensiona la potenza del range extender, tramite la scelta di una velocità massima obiettivo che il veicolo deve poter mantenere anche a batteria completamente scarica. Pertanto, fissata la v_{max} desiderata (ad esempio, 120 km/h), si ricava (imponendo $v(t) = v_{max}$ e $\frac{dv}{dt} = 0$ nella formula (A.1) a pagina 132) la corrispondente potenza alle ruote

$$P_{ruoteVmax} = Mg v_{max} f_r \cos\alpha + \frac{1}{2}\rho_a C_x A_f v_{max}^3 + Mg v_{max} \sin\alpha$$

, la quale, fissate le caratteristiche fisiche del veicolo (massa M , coefficiente aerodinamico C_x , area frontale A_f), dipende solo dalla velocità e dalla pendenza della strada.

Si giunge quindi alla potenza di dimensionamento del range extender, risalendo la catena di trasformazione energetica, e aggiungendo i consumi per aumentare il comfort dell'abitacolo (cosiddetti *hotel loads*, per i quali si può assumere potenza costante dell'ordine dei 3kW per una vettura di lusso):

$$P_{RE} = \frac{1}{\eta_{raddr}} \left(\frac{P_{ruoteVmax}}{\eta_{trasm}\eta_{motore}\eta_{inverter}} + P_{hotel} \right)$$

Va sottolineato come, con range extender acceso e batteria completamente scarica, la potenza disponibile alle ruote sia solo quella fornita dal range extender (sottratte le perdite e i carichi dell'abitacolo), il che garantisce la possibilità di viaggiare in piano alla velocità v_{max} desiderata, ma non di poter raggiungere tale velocità con rampa di accelerazione a piacere: si può osservare, dalla figura A.10 a pagina 133, come la potenza richiesta durante la fase di accelerazione sia sempre maggiore della potenza per mantenere la velocità di fine accelerazione. Si può quindi intravedere come un simile dimensionamento del range extender non garantisca un'assoluta libertà di guida nell'intervallo di velocità $[0; v_{max}]$, soprattutto riguardo l'intensità delle accelerazioni, a meno che non si ammetta l'impiego della batteria, ammettendo di poterla scaricare temporaneamente al di sotto del suo limite minimo nel transitorio di accelerazione, o che si accetti di viaggiare per alcuni minuti a velocità ridotta per consentire la ricarica delle batterie e poter poi usufruire di maggiori prestazioni in accelerazione.

Ponendo $v_{max} = 120 \text{ km/h}$ e $\alpha = 0$ (strada in piano) come specifiche per il dimensionamento del range extender di un veicolo con un veicolo di massa $M = 1500 \text{ kg}$, coefficiente aerodinamico $C_x = 0.3$, area frontale $A_f = 2 \text{ m}^2$ e coefficiente dell'attrito pneumatici-asfalto $f_r = 0.0175$, risulta $P_{ruoteVmax} = 8.58 + 13.33 + 0 = 21.92 \text{ kW}$ (il termine di potenza preponderante a questa velocità è ovviamente quello aerodinamico), con $P_{hotel} = 1.5 \text{ kW}$, si ottiene infine una potenza richiesta al range extender di 32 kW .

3.2. Confronti tra PHEV, BEV e veicolo tradizionale per trasporto privato

potenza	configurazione	cilindrata
5-12 kW	monocilindro	397.6 cc
10-24 kW	2 cilindri in linea	795.2 cc
15-37 kW	3 cilindri in linea	1192.8 cc
15-55 kW	3 cilindri in linea (turbocompresso)	1192.8 cc

Tabella 3.1.: caratteristiche del motore a benzina progettato da Lotus per impiego in un sistema range extender[16]

Se volessi invece dimensionare un range extender per un autobus (che però normalmente non ha lunghi periodi a velocità costante¹, quindi questo range extender andrebbe dimensionato con altri criteri), con $v_{max} = 80 \text{ km/h}$, $\alpha = 0$, $M = 8000 \text{ kg}$, $C_x = 0.7$, $A_f = 7.5 \text{ m}^2$, $f_r = 0.015$, $P_{hotel} = 10 \text{ kW}$ risulta $P_{ruoteV_{max}} = 26.16 + 34.57 + 0 = 60.73 \text{ kW}$ e $P_{RE} = 94 \text{ kW}$.

Una volta stabilita la potenza che il dispositivo range extender dev'essere in grado di erogare, si può procedere alla progettazione, o alla scelta di un modello a catalogo; esempi sono i dispositivi TRE (Turbo Range Extender) della Capstone Turbines, le cui caratteristiche sono riportate in tabella 4.1 a pagina 108 e i range extender basati su motori a ciclo Otto sviluppati dagli ingegneri Lotus[16], i cui dati sono riportati in tabella 3.1.

3.2. Confronti tra PHEV, BEV e veicolo tradizionale per trasporto privato

Sono state condotte delle simulazioni per valutare consumi, costi ed emissioni di un'auto PHEV: sono state simulate diverse percorrenze con veicoli dotati di diverse autonomie, pertanto i risultati di queste simulazioni (a differenza di quelli condotti nella sezione 2.2) rendono auto con diversa capienza della batteria confrontabili, perchè viene considerata la stessa percorrenza per tutte. La strategia adottata è quella di dimensionare il range extender per la potenza media del ciclo di guida (senza considerare hotel loads) riportata a monte del DC link, e comandarne l'accensione prima che lo stato di carica della batteria scenda sotto il limite minimo (l'istante di accensione viene scelto tramite un algoritmo iterativo che anticipa l'istante di accensione finchè lo stato di carica della batteria non resta sempre sopra il limite): un tipico andamento dell'energia nella batteria è riportato in figura 3.1.

Nei grafici delle figure 3.2, 3.3, 3.4, 3.5, 3.6, 3.7, 3.8, 3.9, sono anche riportati per confronto, oltre ai valori di efficienza, costi ed emissioni relativi all'auto con motore a combustione interna, anche i risultati della sezione 2.2 relativi all'auto elettrica a batteria (per percorrenze/autonomie superiori, l'auto elettrica a batteria non era giunta a

¹a meno che non si tratti di autobus da lunghe percorrenze

3. Veicolo ibrido plug-in (PHEV), range extender

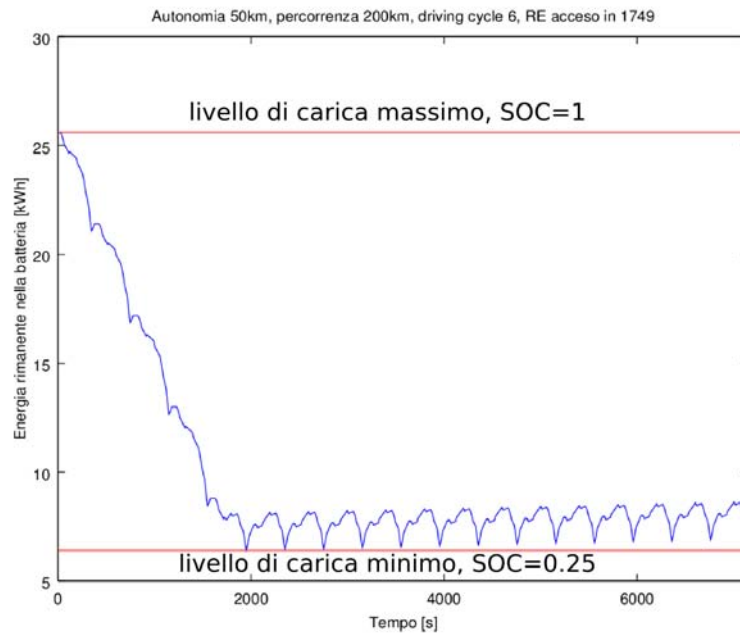


Figura 3.1.: andamento dell'energia della batteria di veicolo PHEV con batteria da 50 km di autonomia, ripetendo il ciclo di guida UDDS fino alla percorrenza di 200 km

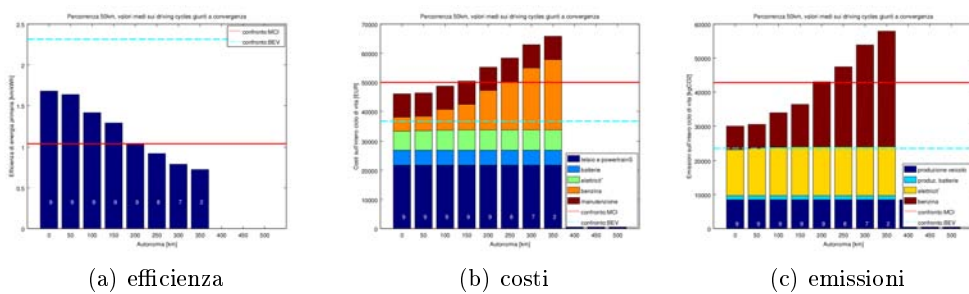


Figura 3.2.: risultati delle simulazioni per PHEV con percorrenza 50 km

3.2. Confronti tra PHEV, BEV e veicolo tradizionale per trasporto privato

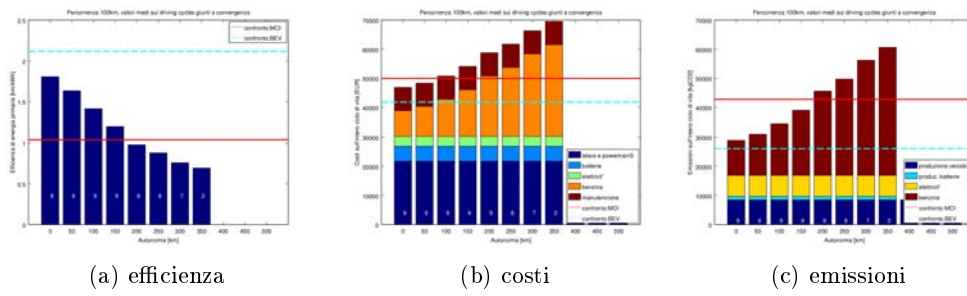


Figura 3.3.: risultati delle simulazioni per PHEV con percorrenza 100 km

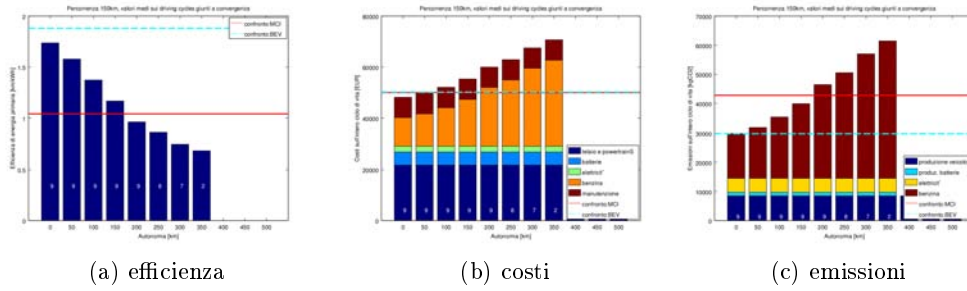


Figura 3.4.: risultati delle simulazioni per PHEV con percorrenza 150 km

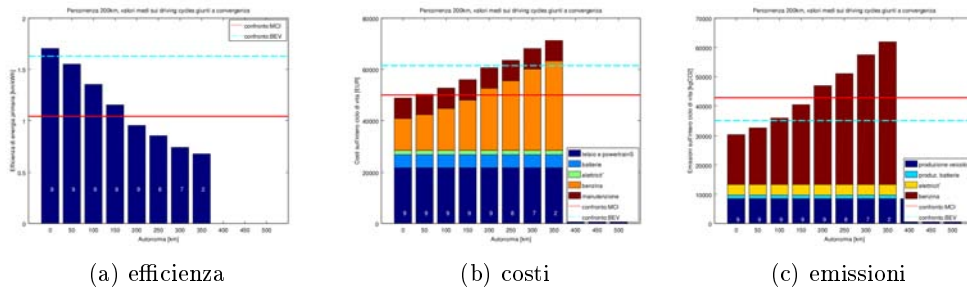


Figura 3.5.: risultati delle simulazioni per PHEV con percorrenza 200 km

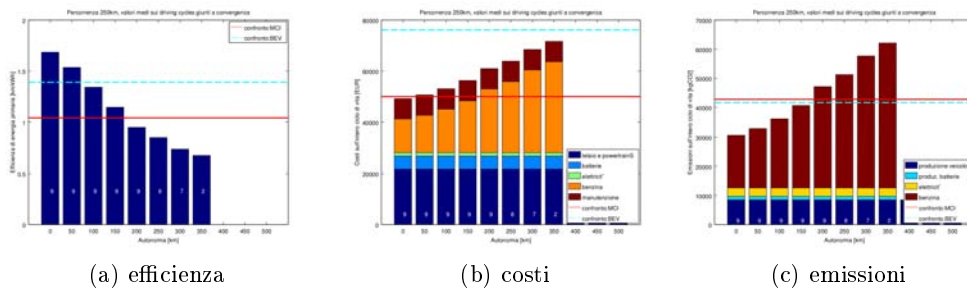


Figura 3.6.: risultati delle simulazioni per PHEV con percorrenza 250 km

3. Veicolo ibrido plug-in (PHEV), range extender

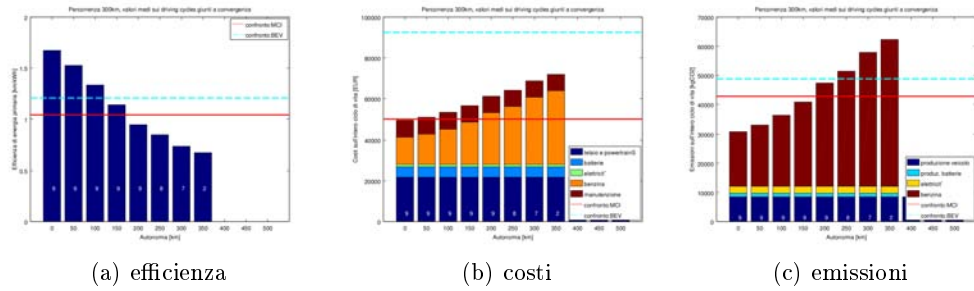


Figura 3.7.: risultati delle simulazioni per PHEV con percorrenza 300 km

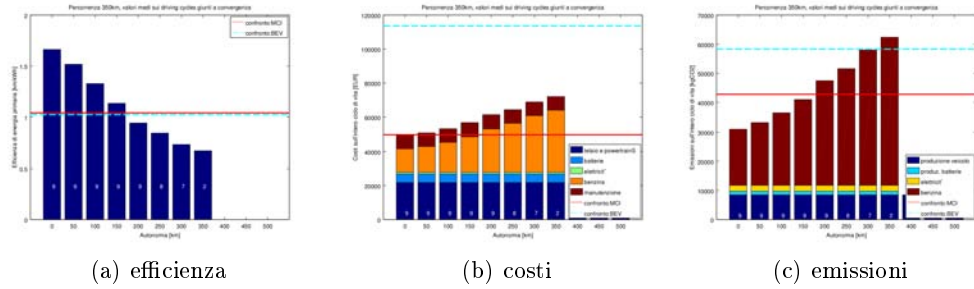


Figura 3.8.: risultati delle simulazioni per PHEV con percorrenza 350 km

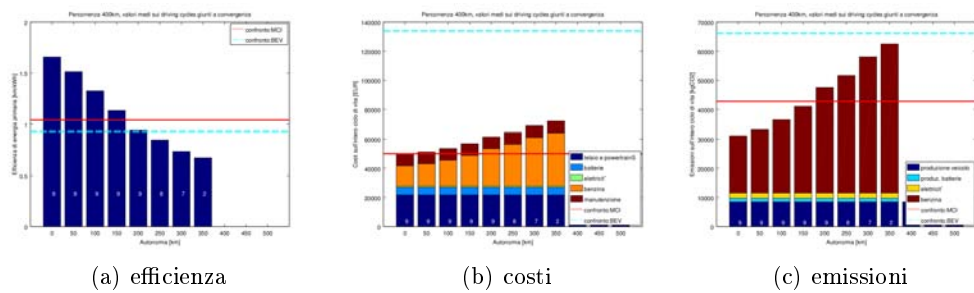


Figura 3.9.: risultati delle simulazioni per PHEV con percorrenza 400 km

3.2. Confronti tra PHEV, BEV e veicolo tradizionale per trasporto privato

convergenza); costi ed emissioni sono stati calcolati, analogamente alle simulazioni del BEV, con le formule

$$\begin{aligned}
 C [\text{€}] = & C_{\text{telaio}} + C_{\text{mot.termico}} + C_{\text{gen.elettr}} + C_{\text{mot.elettr}} + C_{\text{bat}} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] \times E_{\text{bat}}[\text{kWh}] + \\
 & + (200000 \text{ km}) \times \frac{C_{\text{elettrBT}} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] \times E_{\text{elettr.consumata}}[\text{kWh}]}{d [\text{km}] \times \eta_{\text{charger}} \eta_{\text{batt}}} \quad (3.1) \\
 & + (200000 \text{ km}) \times \left(\frac{C_{\text{combust}} \left[\frac{\text{€}}{\text{kWh}} \right] \times E_{\text{comb.consumato}}[\text{kWh}]}{d [\text{km}]} + C_{\text{manutenzione}} \left[\frac{\text{€}}{\text{km}} \right] \right)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \nu [\text{kgCO}_2\text{eq}] = & \nu_{\text{produzione}} + \nu_{\text{bat}} \left[\frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{kWh}} \right] \times E_{\text{bat}}[\text{kWh}] + \\
 & + (200000 \text{ km}) \times \frac{\nu_{\text{elettr}} \left[\frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{kWh}} \right] \times E_{\text{elettr.consumata}}[\text{kWh}]}{d [\text{km}] \times \eta_{\text{rete}} \eta_{\text{charger}} \eta_{\text{batt}}} \quad (3.2) \\
 & + (200000 \text{ km}) \times \frac{\nu_{\text{benzina}} \left[\frac{\text{kgCO}_2}{\text{l}} \right] \times E_{\text{comb.consumato}}[\text{kWh}]}{E_{\text{spec.benzina}} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{l}} \right] \times d [\text{km}]}
 \end{aligned}$$

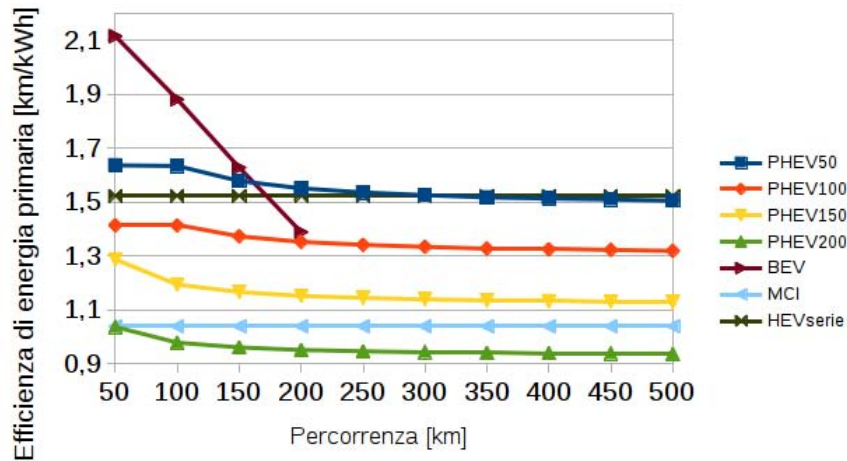
emerge una tendenza:

- per percorrenze medio-brevi (fino a 200-250km), per le quali l'auto a batteria (con batteria di autonomia pari alla percorrenza) pesa il minimo indispensabile, questa risulta la migliore per efficienza, costi ed emissioni;
- per percorrenze superiori, il veicolo ibrido plug-in (con batteria ad autonomia ridotta) diventa la scelta dominante, presentando un più razionale sfruttamento di energia primaria e minori costi ed emissioni totali.

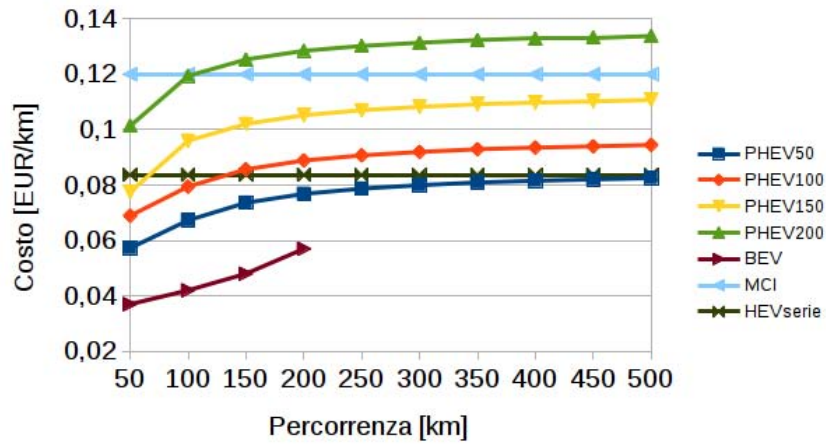
Questa tendenza è confermata dai grafici delle figure 3.10, nelle quali sono riportati i valori di efficienza, costi ed emissioni, confrontati per veicoli ibridi plug-in (con diverse autonomie in modalità elettrica), elettrici a batteria, ibridi serie e tradizionali (motore a benzina): si può notare come un'auto elettrica a batteria con autonomia ridotta sia la scelta più efficiente, economica e meno inquinante per tragitti brevi, o nel caso si sia disposti a suddividere un tragitto più lungo in tanti spostamenti brevi intervallati dalle soste per la ricarica della batteria. Seguono il veicolo ibrido plug-in con autonomia elettrica da 50 km, il veicolo ibrido serie, quindi i PHEV con 100 e 150 km di autonomia elettrica, il veicolo a benzina e infine il PHEV con batteria sufficiente a percorrere 200 km.

Appare quindi evidente come la scelta tra auto elettrica a batteria e auto ibrida plug-in dipenda dalla predisposizione dell'acquirente a modificare le proprie abitudini: nel caso di tragitti lunghi, l'auto con range extender permette un'esperienza di guida simile all'attuale, mentre l'auto elettrica costringe a effettuare (e programmare) delle soste per la

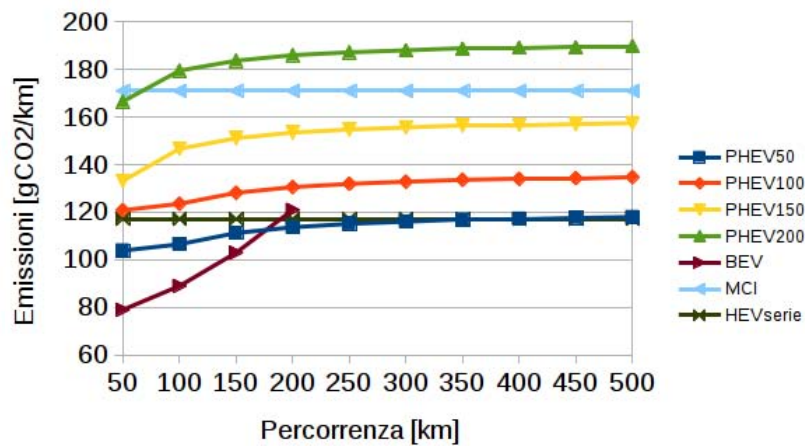
3. Veicolo ibrido plug-in (PHEV), range extender



(a) confronti tra le efficienze di energia primaria



(b) confronti tra i costi al km



(c) confronti tra le emissioni al km

Figura 3.10.: confronti tra veicoli plug-in (con autonomia elettrica 50, 100, 150, 200 km), veicoli a batteria (per i quali l'autonomia coincide con la percorrenza), veicoli con powertrain ibrido serie e veicoli tradizionali (motore a benzina)

3.3. Confronti tra battery swapping, range extending e veicolo elettrico puro nel caso di autobus

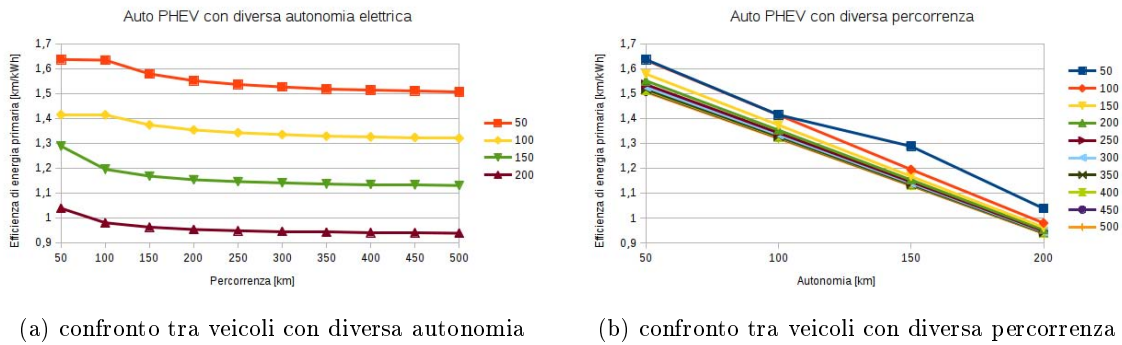


Figura 3.11.: efficienze di energia primaria per veicoli ibridi plug-in

ricarica, pertanto è probabile che un guidatore che effettua sovente viaggi lunghi preferisca la PHEV alla BEV, e viceversa per guidatore con tragitti prevalentemente brevi; inoltre, per tragitti brevi (nel senso di inferiori all'autonomia della batteria), anche il veicolo ibrido plug-in avanza assorbendo energia dalla batteria, senza accendere il range extender e quindi senza emettere fumi di scarico, apparendo a un osservatore esterno uguale in tutto e per tutto a un veicolo elettrico.

Si valutano ora gli andamenti delle efficienze di energia primaria per veicoli ibridi plug-in con diverse autonomie e percorrenze (andamenti già riportati in figura 3.10a), al fine di riconoscere i diversi effetti di autonomia e percorrenza:

- in figura 3.11a si può notare come, fissata l'autonomia elettrica del veicolo, l'aumento della percorrenza (ovvero il passaggio da un funzionamento "elettrico a batteria" ad uno "ibrido serie") non penalizzi l'efficienza di più del 10-15%;
- come s'evince invece dall'osservazione della figura 3.11b, fissata la percorrenza del veicolo (ovvero le esigenze di mobilità del possibile acquirente), una maggiore autonomia penalizza molto l'efficienza, anche oltre il 50%.

In questo confronto si è scelto di non considerare l'eventualità del battery swapping, la cui applicabilità ai veicoli privati non è attualmente all'orizzonte, per motivazioni di carattere organizzativo (necessità di standardizzare le batterie affinché risultino interscambiabili) che lo rendono una soluzione applicabile solo al caso di aziende di trasporto pubblico che scelgano di rinnovare una porzione consistente (sostenibilità economica) della propria flotta, affidandosi ad un'unica azienda (compatibilità dei componenti) per la fornitura di powertrain elettrici, batterie e stazioni di ricarica con battery swapping.

3.3. Confronti tra battery swapping, range extending e veicolo elettrico puro nel caso di autobus

I risultati finora conseguiti (riportati nelle sezioni 2.2 e 3.2) permettono di valutare quale sia l'approccio migliore per una flotta di mezzi adibiti al trasporto pubblico (quindi

3. Veicolo ibrido plug-in (PHEV), range extender

con tragitti e percorrenze ben noti):

1. battery swapping, ovvero ogni autobus viene equipaggiato con batterie di autonomia ridotta, tale da permettere di coprire la tratta interessata un certo numero di volte; arrivato al capolinea con la batteria quasi scarica, quest'ultima viene sostituita con un'altra batteria e lasciata a ricaricare presso la stazione di ricarica del capolinea;
2. range extending, ovvero l'autobus viene equipaggiato, oltre che della batteria, di un generatore (range extender) alimentato a combustibile;
3. veicolo elettrico puro, con autonomia della batteria sufficiente a coprire la percorrenza giornaliera massima prevista (nel caso delle elevate percorrenze di un mezzo pubblico, questa scelta è dominata dall'opzione *battery swapping*).

Si consideri, ad esempio il caso di batterie con autonomia 50 km (quale multiplo intero della lunghezza di una tratta urbana): nel caso del mezzo elettrico, una volta percorsi i 50 km le batterie sono scariche e il mezzo si trova al capolinea, vengono sostituite le batterie e il mezzo riparte (soddisfacendo le condizioni di validità delle simulazioni della sezione 2.2); nel caso del mezzo con range extender, all'abbassamento del livello di carica delle batterie sotto una soglia minima, viene avviato il generatore termico e il mezzo prosegue la propria corsa senza necessità di soste.

Come si può notare dalle figure 3.12, 3.13, 3.14, l'approccio del battery swapping è migliore del range extending sia per quanto riguarda l'efficienza energetica, che per quanto riguarda costi ed emissioni totali sull'intero ciclo di vita del mezzo.

Se invece si aggiungesse l'ipotesi che non si sia ancora affermata e diffusa una (unica) tecnologia di battery swapping (come potrebbe essere nei primi anni di sviluppo di veicoli elettrici, ovvero nel periodo attuale)², o che si preferisca evitare la sosta per ricarica o battery swapping, resterebbero le due ipotesi:

1. acquistare una flotta di veicoli elettrici le cui batterie sono dimensionate in base a un compromesso tra autonomia, frequenza e durata delle ricariche, e quindi:
 - a) accettare che il veicolo includa un sistema di accumulo dimensionato per la percorrenza massima giornaliera, ovvero acquistare e guidare un mezzo pesante, costoso e poco efficiente;
 - b) accettare l'inconveniente delle soste per ricaricare l'accumulo del veicolo³;
 - c) accettare l'inconveniente e sostenere i costi per l'installazione delle colonnine di ricarica presso la rimessa.

²è necessario uno sforzo di comunicazione e coordinamento tra i reparti di ricerca e sviluppo dei vari produttori, affinché sia possibile sostituire le batterie facilmente, velocemente e in sicurezza (sempre ammesso che alcuni produttori non preferiscano sviluppare una soluzione proprietaria per poi diffonderla con strategie di marketing variamente discutibili, al fine di renderla lo standard *de facto* e monopolizzare il mercato)

³il numero di soste sarà inversamente proporzionale all'autonomia, mentre la loro durata risulterà proporzionale alla stessa

3.4. Strategie di controllo del range extender

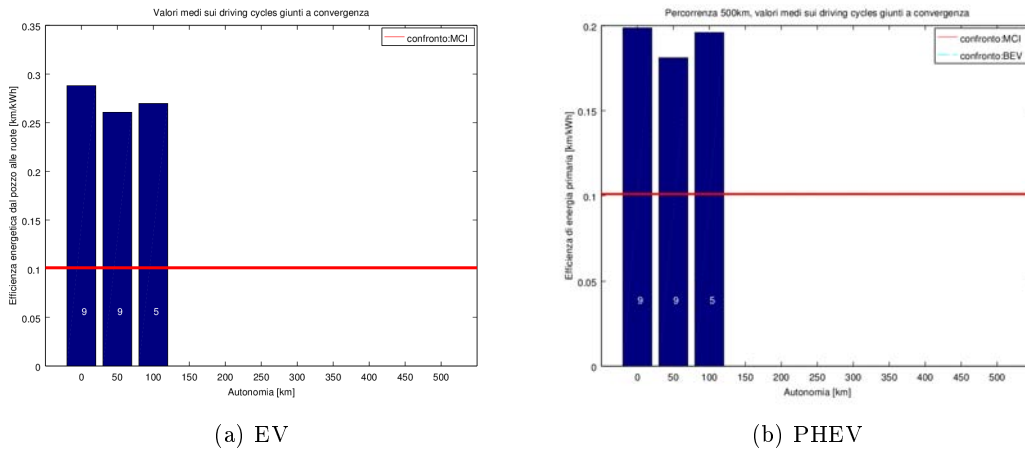


Figura 3.12.: confronto sull'efficienza di energia primaria tra veicoli pubblici a batteria e con range extender

2. acquistare un veicolo dotato di range extender.

Nella scelta tra queste due soluzioni entrano:

- una componente oggettiva, data dal confronto tra il minor costo delle batterie nella soluzione con range extender (e del motore elettrico di trazione, chiamato a spingere un veicolo più leggero) rispetto la soluzione puramente elettrica e il costo del range extender;
- una componente soggettiva, data dal valore attribuito al tempo di attesa del termine della ricarica e alle conseguenti ripercussioni sul servizio.

3.4. Strategie di controllo del range extender

Esistono infinite strategie possibili per il controllo del dispositivo di range extending; volendo far funzionare quest'ultimo a potenza costante, si può dimensionarlo affinché eroghi la potenza media di trazione, lasciando allo stadio di accumulo il compito di erogare/assorbire la differenza tra potenza generata dal range extender e potenza richiesta istantaneamente dal motore di trazione; si può altrimenti farlo funzionare a potenza variabile, ma questa strategia porta generalmente a un basso rendimento medio. D'altra parte, problema del funzionamento a potenza costante è che la potenza di trazione non è nota a priori, il che rende difficile far erogare al range extender una potenza vicina alla media di quella richiesta.

3. Veicolo ibrido plug-in (PHEV), range extender

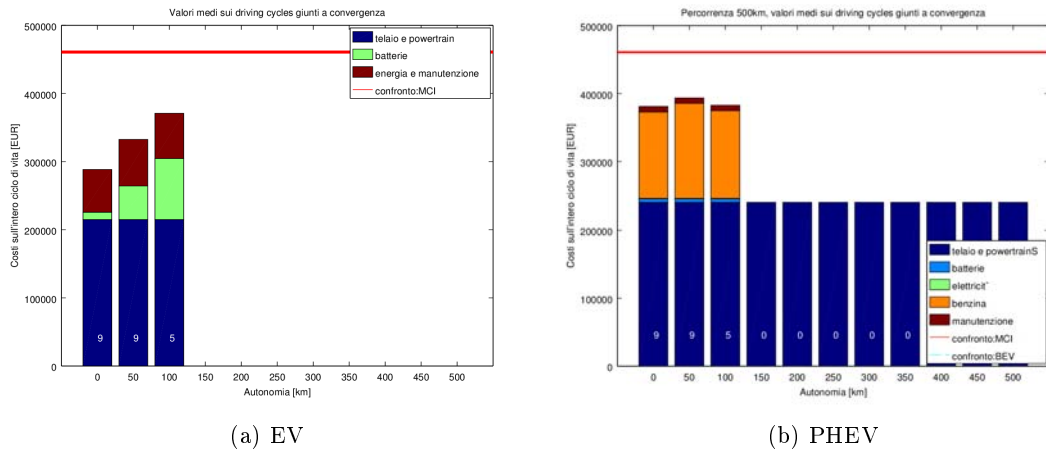


Figura 3.13.: confronto sui costi totali tra veicoli pubblici a batteria e con range extender

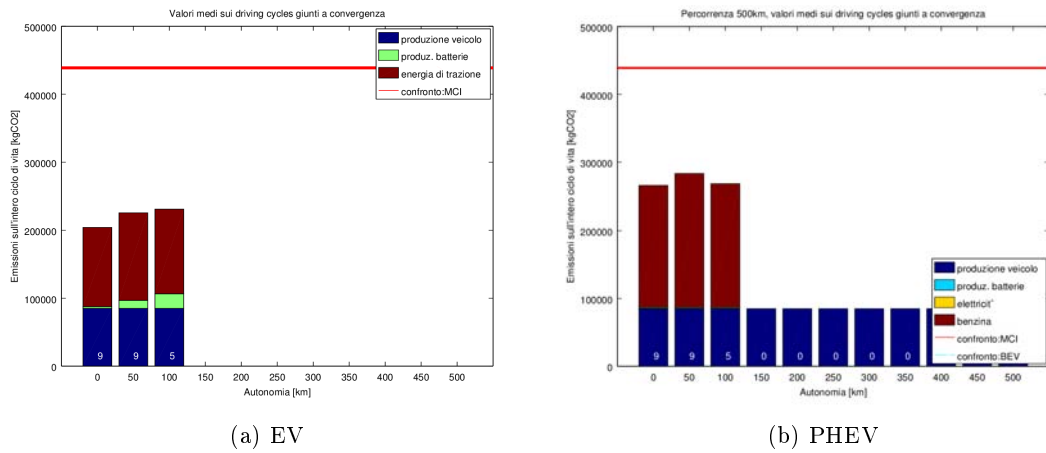


Figura 3.14.: confronto sull'emissioni totali tra veicoli pubblici a batteria e con range extender

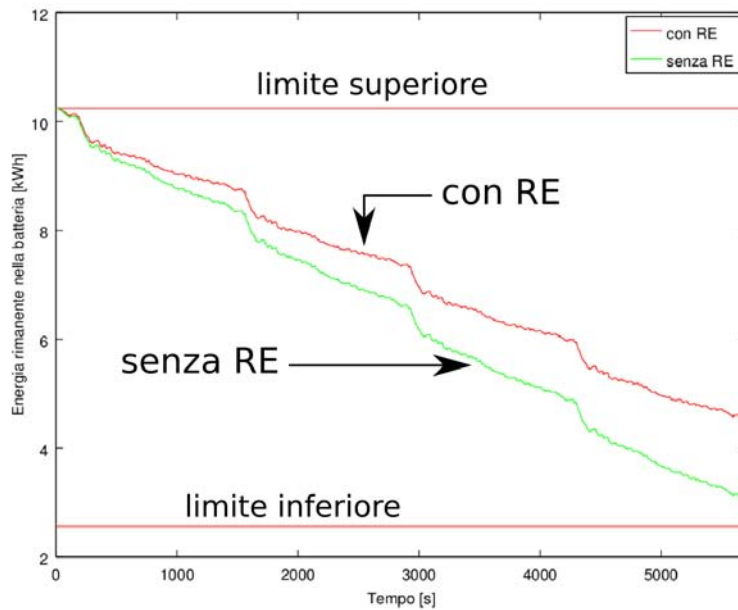


Figura 3.15.: andamento nel tempo dell'energia contenuta nel dispositivo di accumulo, senza range extender e con range extender di potenza un quinto di quella media di trazione

3.4.1. Sempre acceso

Una delle possibili strategie di progettazione (e controllo) del range extender consiste nel far funzionare il range extender in modalità continua, in modo da sgravare la batteria di una parte della potenza media richiesta dal motore di trazione.

Se si sceglie di dimensionare il range extender affinché eroghi una potenza più piccola della potenza media di trazione, resta in carico alla batteria il compito di erogare la restante potenza media e le oscillazioni: l'andamento temporale dello stato di carica della batteria risulta pertanto ancora mediamente decrescente, ma con minor pendenza rispetto al caso elettrico puro (senza range extender), come rappresentato nel grafico di figura 3.15.

Se invece si sceglie di dimensionare il range extender sulla potenza media di trazione, alla batteria resta il compito di assorbire le oscillazioni di potenza, ma il suo stato di carica ha valor medio costante (vedi figura 3.16): diventa allora necessario prevedere dei dispositivi per evitare il sovraccarico della batteria, ad esempio quando viene recuperata l'energia della frenata con batteria già pienamente carica. Si può inoltre pensare, non dovendo il dispositivo di accumulo erogare una potenza media, ma assorbire solamente la potenza oscillante, d'impiegare un banco di supercondensatori (in luogo del pacco batterie) che hanno il vantaggio di maggiori potenze specifiche e dinamiche più veloci nel variare la potenza in uscita.

3. Veicolo ibrido plug-in (PHEV), range extender

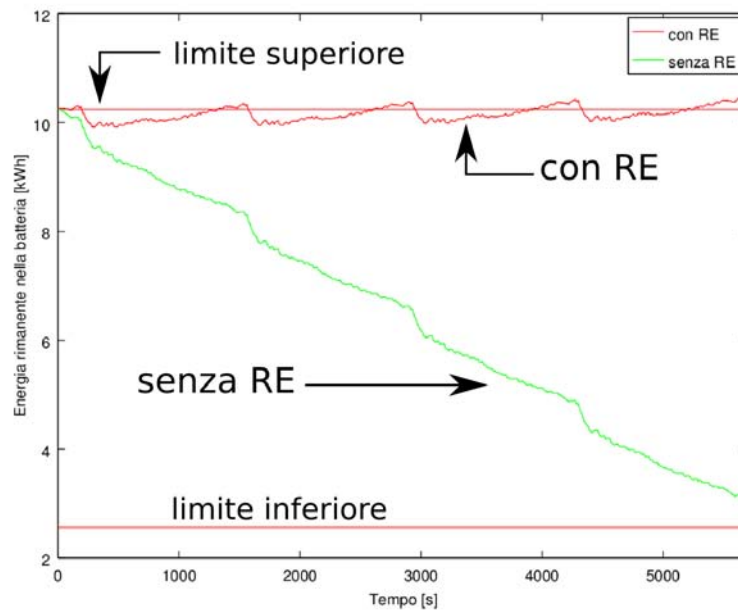


Figura 3.16.: andamento nel tempo dell'energia contenuta nel dispositivo di accumulo, senza range extender e con range extender di potenza pari a quella media di trazione: in questo secondo caso, la banda di oscillazione ridotta consentirebbe l'impiego di una batteria meno capiente

3.4. Strategie di controllo del range extender

Si può infine immaginare di sovradimensionare il range extender rispetto la potenza media di trazione, con l'effetto che, a range extender in funzione, il livello di carica della batteria mediamente aumenta; in questo caso andrebbe anche considerata l'eventualità che, con potenze di trazione ridotte e dispositivo di accumulo prossimo al margine superiore del proprio stato di carica, il range extender venga spento e che si proceda nel tragitto in modalità solo-elettrico finché lo stato di carica della batteria lo consente. Ciò permette di:

- effettuare alcune porzioni di tragitto in modalità solo-elettrico (range extender spento, nessuna emissione inquinante), apprezzabilmente nelle grandi città e in ogni luogo in cui la qualità dell'aria sia a livelli d'attenzione;
- terminare il tragitto con il dispositivo di accumulo pienamente carico, il che permette di evitare di estrarre energia dalla rete elettrica o addirittura di immetterne; questa caratteristica potrebbe dimostrarsi interessante in nazioni le cui reti elettriche sono alimentate da centrali inquinanti e poco efficienti, o laddove il prezzo del carburante alla pompa sia favorevole (in termini di unità monetaria per unità di energia) rispetto al prezzo dell'energia elettrica.

Il più grande svantaggio di questo approccio è che sovente non si conosce a priori la potenza di trazione, e quindi nemmeno il suo valore medio: si è pertanto costretti a progettare il range extender secondo una potenza media stimata per un tragitto tipico (oppure calcolata sulla base di alcune ipotesi, cfr. 3.1), magari arrotondando la stima per eccesso al fine di evitare residui di *range anxiety*.

3.4.2. In funzione del SOC della batteria

Assumendo che la potenza di trazione, e il suo valor medio, siano ignoti, si può impostare una strategia di controllo del range extender basata sullo stato di carica del dispositivo di accumulo. Ad esempio, con un limite minimo dello stato di carica della batteria al 25%:

- il range extender verrà acceso quando il SOC (*state of charge*, stato di carica) scende sotto il 30-35%;
- il range extender verrà spento quando il SOC risale sopra il 90%.

Si vengono dunque a delineare due modalità di funzionamento:

- a range extender spento, modalità *charge-depleting* o *pure-electric*, il veicolo procede estraendo energia dalla sola batteria;
- a range extender acceso, modalità *charge-sustaining*, il range extender supplisce alla potenza di trazione e, con l'eccesso, ricarica la batteria.

La durata relativa delle due modalità di funzionamento dipende dalla potenza del range extender rispetto la potenza media di trazione: se il range extender è sovradimensionato

3. Veicolo ibrido plug-in (PHEV), range extender

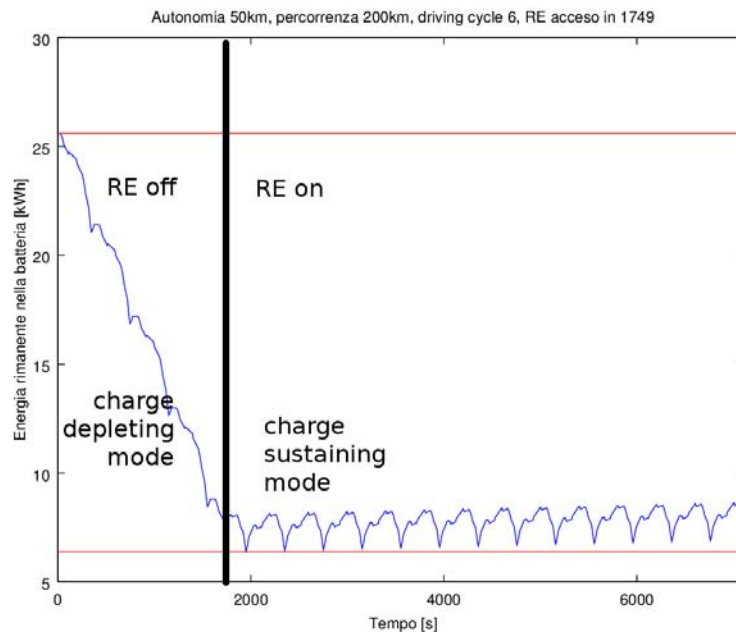


Figura 3.17.: andamento dell'energia, già riportato in figura 3.1, con evidenziate le fasi charge-depleting (range extender spento) e charge-sustaining (range-extender acceso)

rispetto la potenza media di trazione, è sufficiente un relativamente breve funzionamento in modalità charge-sustaining per ristabilire il SOC del dispositivo di accumulo; se la potenza del range extender uguaglia la potenza media di trazione, pur col range extender acceso il SOC della batteria resterà mediamente costante; se la potenza del range extender è inferiore alla potenza media di trazione, l'accensione del range extender non è sufficiente a evitare la scarica della batteria, ma la rallenta soltanto, consentendo di coprire una maggiore distanza rispetto quella garantita dalla sola batteria (una volta scaricata, è necessario effettuare una sosta per ricaricare la batteria, o esternamente o tramite il range extender).

In figura 3.17 si riporta un andamento tipico del livello di carica del dispositivo di accumulo di un veicolo con range extender, con evidenziate le fasi a range extender spento e acceso.

3.4.3. Svantaggi del range extender

Con calcoli spannometrici riferiti all'energia al DC link, si può vedere come l'energia prodotta dal range extender sia meno efficiente, più costosa e più inquinante dell'energia estratta dalle batterie precedentemente ricaricate tramite la rete elettrica:

3.4. Strategie di controllo del range extender

- dal pozzo al DC link, batteria ricaricata da rete

$$\begin{aligned}\eta_{WtDClink} &= \eta_{estr}\eta_{gen}\eta_{rete}\eta_{charger}\eta_{batt}\eta_{DC-DC} \\ &= 0.9 \times 0.466 \times 0.938 \times 0.95 \times 0.95 \times 0.96 \simeq 0.34\end{aligned}$$

$$c_{enDClink} = \frac{0.2 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}}{\eta_{charger} \times \eta_{batt} \times \eta_{DC-DC}} = \frac{0.2}{0.95 \times 0.9 \times 0.95} \simeq 0.246 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

$$\nu_{enDClink} = \frac{400 \frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}}}{\eta_{rete}\eta_{charger}\eta_{batt}\eta_{DC-DC}} = \frac{400 \frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}}}{0.938 \times 0.95 \times 0.95 \times 0.96} \simeq 492 \frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}}$$

- dal pozzo al DC link, range extender

$$\eta_{WtDClink} = \eta_{estr.distr}\eta_{ICE}\eta_{gen.el}\eta_{raddr} = 0.75 \times 0.35 \times 0.9 \times 0.96 \simeq 0.23$$

$$c_{enDClink} = \frac{1.7 \frac{\text{€}}{\text{l}}}{10 \frac{\text{kWh}}{\text{l}} \times \eta_{ICE}\eta_{gen.el}\eta_{raddr}} = \frac{1.7}{10 \times 0.35 \times 0.9 \times 0.96} \simeq 0.562 \frac{\text{€}}{\text{kWh}}$$

$$\nu_{enDClink} = \frac{2380 \frac{\text{gCO}_2}{\text{l}}}{10 \frac{\text{kWh}}{\text{l}} \times \eta_{ICE}\eta_{gen.el}\eta_{raddr}} = \frac{2380}{10 \times 0.35 \times 0.9 \times 0.96} \simeq 787 \frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}}$$

Ne consegue la necessità di far erogare al range extender solo l'energia strettamente necessaria per concludere il tragitto giungendo a un punto di ricarica, ovvero evitando che all'inizio della fase di ricarica la batteria contenga ancora energia utilizzabile.

Tale obiettivo non è ovviamente conseguibile nè mantenendo il range extender sempre acceso durante il moto, nè accendendolo a batteria scarica e mantenendolo acceso fino alla ricarica completa, dal momento che questo aumenterebbe le probabilità di completare il viaggio con energia prodotta nel range extender ancora contenuta nella batteria.

Dalla constatazione del necessariamente sporadico impiego del range extender, si può immaginare di progettare dispositivi di range extending estraibili o rimorchiabili dal veicolo, da trasportare solo quando l'autonomia delle batterie non è sufficiente per il tragitto previsto.

3.4.4. Sfruttando il tragitto programmato nel navigatore

La strategia di controllo più avanzata ipotizza la conoscenza del tragitto, tramite la destinazione impostata nel navigatore del veicolo⁴. Prendendo come dato il tragitto

⁴prevedendo che alcuni automobilisti potrebbero trovare invadente l'obbligo di inserire la propria destinazione nel navigatore (anche nel caso di tragitti praticati di frequente, per i quali non si necessita d'indicazioni di percorso), si immagina la possibilità di minimizzare il disturbo chiedendo, in luogo

3. Veicolo ibrido plug-in (PHEV), range extender

suggerito dal navigatore, una stima delle velocità istantanee del veicolo basata sui limiti di velocità stradali e sulle condizioni di traffico permette di abbozzare una stima della richiesta di energia nel corso del tragitto. Confrontando la richiesta di energia prevista con l'energia inizialmente disponibile nel dispositivo di accumulo e con la potenza erogabile dal range extender, la logica di controllo è in grado di:

- prevedere l'attivazione del range extender al tempo necessario affinché lo stato di carica della batteria non esca dai limiti fissati;
- anticipare l'attivazione del range extender, nel caso in cui parte del tragitto sia interessata da provvedimenti di limitazione alla circolazione di veicoli inquinanti;
- proporre al guidatore l'alternativa tra
 - programmare una sosta per la ricarica lungo il tragitto (ad esempio, nel caso in cui non si voglia/possa accendere il range extender per colpa delle emissioni, o nel caso in cui l'energia elettrica da rete sia particolarmente conveniente), programmata sulla base del livello di carica previsto nel corso del viaggio e delle stazioni di ricarica situate lungo di esso (la cui posizione è nota dalle mappe del navigatore);
 - programmare l'accensione del range extender;
- anticipare l'attivazione del range extender, nel caso la potenza di quest'ultimo sia inferiore rispetto la potenza media di trazione prevista;
- evitare l'accensione del range extender, nonostante il basso livello di energia nell'accumulo e l'elevata richiesta di potenza per la trazione, perchè si prevede di recuperare energia a breve, ad esempio per un tratto di strada in discesa o per una decelerazione (prevista conoscendo i limiti di velocità sulle strade da percorrere), riportando lo stato di carica a valori accettabili;
- evitare l'accensione del range extender, nonostante il basso livello di carica della batteria, perchè si è in prossimità della destinazione, presso la quale sarà possibile effettuare la ricarica da rete;
- accendere il range extender per un tempo strettamente indispensabile a raggiungere una stazione di ricarica con accumulo scarico.

del completo indirizzo di destinazione, d'indicare solo la città, o la zona, o anche solo la percorrenza prevista (in quest'ultimo caso la logica di controllo del veicolo dovrebbe stimare in *real time* il consumo di energia previsto, sulla base della percorrenza rimasta e dell'attuale livello di consumo)

4. Microturbine

4.1. Cicli termodinamici delle turbine (Brayton-Joule)

Il principio di funzionamento di una turbina a gas [27] può essere desunto dallo schema di figura 4.1:

- l'aria viene aspirata in condizioni ambiente p_1, T_1 in 1;
- quindi viene compressa alla pressione p_2 (rapporto di pressione $r_p = \frac{p_2}{p_1}$) assorbendo il lavoro negativo di ciclo $|L_{12}| = c_p(T_2 - T_1)$;
- in camera di combustione il combustibile viene miscelato con la portata d'aria compressa e quindi acceso; viene fornito al fluido il calore positivo di ciclo $Q_{23} = c_p(T_3 - T_2)$ a pressione pressochè costante;
- i gas caldi prodotti della combustione vengono inviati in turbina, dove rilasciano il lavoro positivo di ciclo $L_{34} = c_p(T_3 - T_4)$;
- i gas in uscita dalla turbina, ancora caldi ma a pressione atmosferica (non c'è più lavoro meccanico da rilasciare a meno di recuperare il calore, ad es. con un ciclo a vapore), vengono rilasciati all'ambiente.

Invece di raffreddare il fluido di lavoro per reinviarlo al compressore, realizzando un ciclo chiuso, si preferisce immettere nel compressore aria fresca presa dall'atmosfera, opportunamente filtrata per evitare l'ingresso e la deposizione sulle pale del compressore di particelle di sporco e polvere, che a lungo andare altererebbero la fluidodinamica all'interno del compressore, peggiorandone il comportamento.

Il lavoro netto prodotto dal ciclo vale:

$$L_n = L_{34} - |L_{12}| = c_p [(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)]$$

Il rendimento termico di ciclo:

$$\eta_t = \frac{L_n}{Q_{23}} = \frac{(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2}$$

Si definisce inoltre una grandezza, il rapporto dei lavori,

$$RL = \frac{L_{34} - |L_{12}|}{L_{34}} = 1 - \frac{L_{compr}}{L_{turb}} = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4}$$

che da un'idea di quanto lo specifico modello di turbina sia sensibile agli effetti delle irreversibilità: se, considerando il ciclo termodinamico ideale, è $RL \simeq 0$, significa che il

4. Microturbine

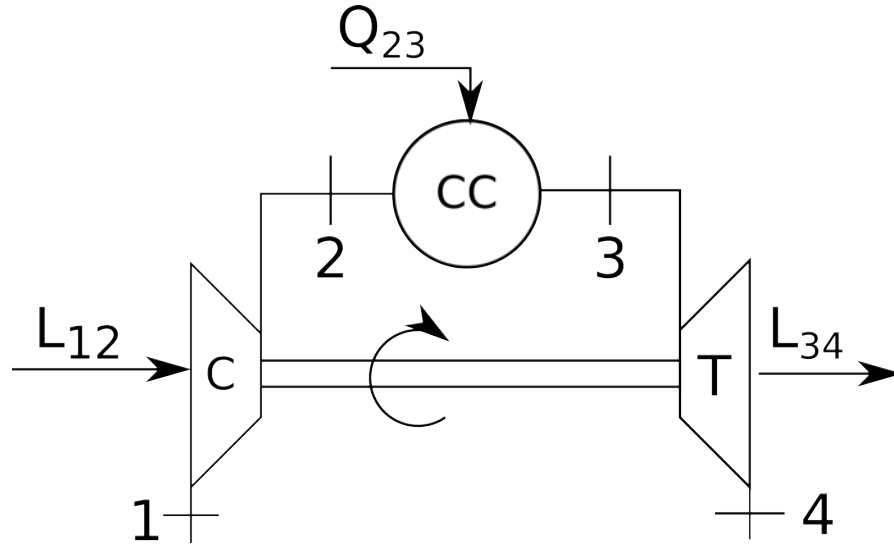


Figura 4.1.: schema d'impianto di turbina a gas a singolo albero, singola combustione e senza scambiatore rigenerativo

lavoro positivo di ciclo (estratto dalla turbina) e quello negativo (speso nel compressore) sono dello stesso ordine di grandezza, pertanto nella macchina reale (nella quale il presentarsi delle irreversibilità aumenta il lavoro da spendere nel compressore e diminuisce il lavoro estratto in turbina) risulterebbe un lavoro netto di ciclo molto piccolo, se non negativo.

Il punto 1 del ciclo di lavoro coincide con le condizioni ambientali, il punto 3 è deciso dal rapporto delle pressioni e dalla temperatura massima che i materiali della turbina possono sopportare. I punti 2 e 4 stanno sulle isobare dei punti 3 e 1, rispettivamente, e la loro temperatura è decisa dal rapporto di pressione e dall'eventuale non idealità delle trasformazioni di compressione ed espansione.

Dall'espressione del lavoro netto si può facilmente ricavare la potenza erogata dalla turbina $P = \dot{m}_a L_n$, conoscendo la portata d'aria all'ingresso del compressore. Non è un grave errore considerare la portata costante su tutto il ciclo, ovvero ignorare la portata di combustibile iniettato nel punto 2, in quanto la temperatura massima che i materiali della turbina riescono a sopportare è ben inferiore alle temperature di combustione adiabatica dei più comuni combustibili, il che significa che la combustione deve sempre avvenire in eccesso d'aria per limitare la temperatura d'ingresso in turbina a valori tollerabili; per questo, l'aria all'uscita della turbina contiene ancora molto ossigeno, il che permette di inviarla in una seconda camera di combustione e di seguito in una seconda turbina (questa complicazione impiantistica non è stata considerata).

4.1.1. Ciclo ideale non rigenerativo

Assumendo trasformazioni termodinamiche ideali, la compressione 1-2 e l'espansione 3-4 sono isoentropiche (segmenti verticali in figura 4.2: $dS = \left(\frac{dQ}{T}\right)_{rev} + dS_{irr} = 0$),

4.1. Cicli termodinamici delle turbine (Brayton-Joule)

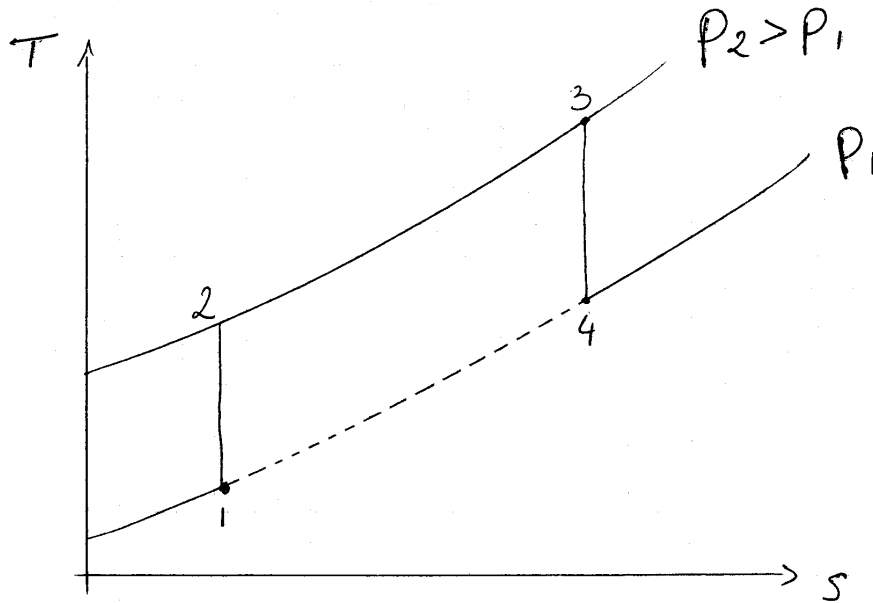


Figura 4.2.: grafico termodinamico del ciclo a gas ideale senza scambiatore nel diagramma T-s

ovvero adiabatiche ($dQ = 0$) reversibili ($dS_{irr} = 0$). Per queste trasformazioni vale:

$$p^{\frac{1-k}{k}} T = \text{costante} \quad \frac{T_2}{T_1} = \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{p_1}{p_2}\right)^{\frac{1-k}{k}} = r_p^{\frac{k-1}{k}}$$

dove k è (nel caso di trasformazione adiabatica) il rapporto tra i calori specifici del gas all'interno del ciclo, per l'aria circa 1.4.

$$\eta_t = 1 - \frac{T_4 - T_1}{T_3 - T_2} = 1 - \frac{T_3 r_p^{\frac{1-k}{k}} - T_2 r_p^{\frac{1-k}{k}}}{T_3 - T_2} = 1 - r_p^{\frac{1-k}{k}} \quad (4.1)$$

Il rendimento cresce col rapporto delle pressioni (vedi figura 4.3), fino a un massimo per il quale il ciclo ha lavoro netto nullo e rendimento pari al rendimento di Carnot (limite superiore del rendimento ottenibile in un ciclo termodinamico), in corrispondenza del rapporto di pressioni

$$(r_p)_{max} = \left(\frac{T_3}{T_1}\right)^{\frac{k}{k-1}}$$

per il quale le temperature T_2 e T_3 si equivalgono (al crescere di r_p , la temperatura T_2 di fine compressione cresce, mentre la temperatura massima di ciclo T_3 resta vincolata dal limite tecnologico dei materiali della turbina), pertanto:

- il calore positivo di ciclo Q_{23} è nullo, così come il lavoro netto $L_n = \eta_t Q_{23} = 0$, ovvero non viene bruciato combustibile e non viene estratto lavoro netto dal ciclo;

4. Microturbine

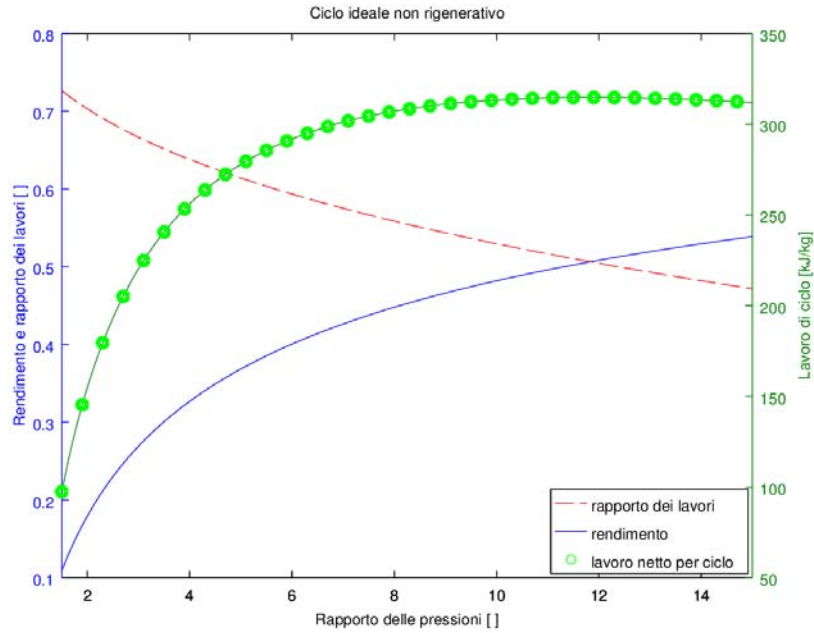


Figura 4.3.: andamenti delle grandezze caratteristiche (rendimento, rapporto dei lavori e lavoro netto) al variare del rapporto delle pressioni

- le trasformazioni 2-3 e 4-1, ora collassate, sono divenute isoterme, pertanto il ciclo si può considerare di Carnot (due adiabatiche reversibili e due isoterme).

$$RL = \frac{L_{netto}}{L_{turb}} = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4} = 1 - \frac{T_1 r_p^{\frac{k-1}{k}} - T_1}{T_4 r_p^{\frac{k-1}{k}} - T_4} = 1 - \frac{T_1}{T_4} = 1 - \frac{T_1}{T_3} r_p^{\frac{k-1}{k}}$$

Fissati i valori T_1 (ambiente) e T_3 (TIT, temperatura di ingresso in turbina), il rapporto dei lavori cala al crescere del rapporto delle pressioni (vedi figura 4.3): al crescere di r_p , aumenta l'effetto delle irreversibilità su η_t e L_n .

$$L_n = c_p [(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)] = c_p \left[T_3 \left(1 - r_p^{\frac{1-k}{k}} \right) - T_1 \left(r_p^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right] \quad (4.2)$$

Il lavoro netto di ciclo raggiunge un massimo in corrispondenza del rapporto di pressione ottimale

$$(r_p)_{opt} = \sqrt{(r_p)_{max}} = \left(\frac{T_3}{T_1} \right)^{\frac{k}{2(k-1)}}$$

per poi decrescere fino a $L_n = 0$ per $(r_p)_{max}$.

Pertanto, in un ciclo ideale senza scambiatore di calore:

1. fissato il rapporto delle pressioni

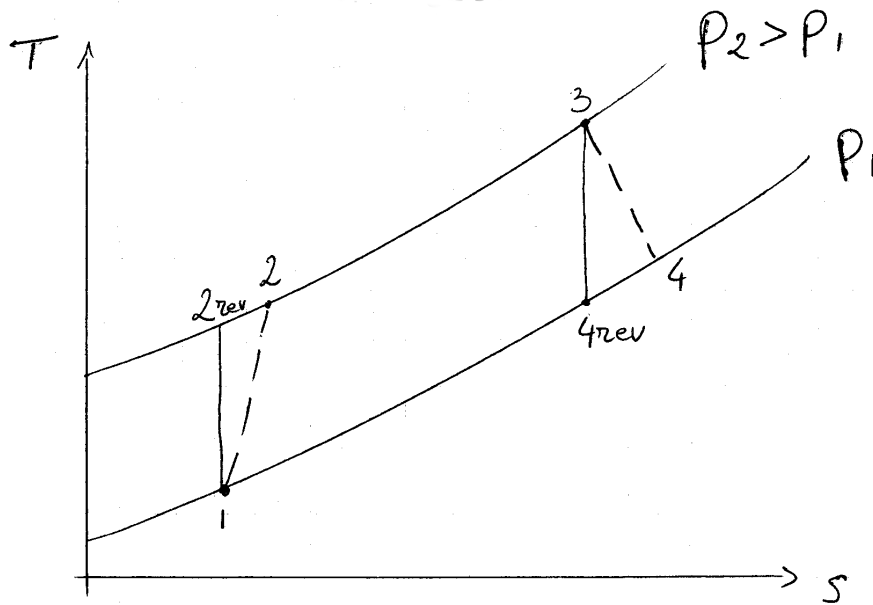


Figura 4.4.: grafico termodinamico del ciclo a gas reale senza scambiatore nel diagramma T-s

- il rendimento è fissato;
 - all'aumentare della temperatura massima di ciclo, aumentano sia il lavoro netto che il rapporto dei lavori (ovvero è possibile ottenere la stessa potenza con una minor portata d'aria in ingresso e il comportamento della macchina reale migliora);
2. fissate le temperature T_1 e T_3 , all'aumentare del rapporto delle pressioni:
- il rendimento aumenta;
 - il rapporto dei lavori cala;
 - il lavoro netto aumenta fino a un massimo per poi calare e infine si annulla quando il diagramma del ciclo collassa.

4.1.2. Ciclo reale non rigenerativo

Considerando le irreversibilità:

- i punti 1 e 3 restano fissati;
- il riscaldamento 23 resta tutto sommato isobaro;
- le trasformazioni di compressione 12 ed espansione 34 vengono considerate adiabatiche irreversibili.

4. Microturbine

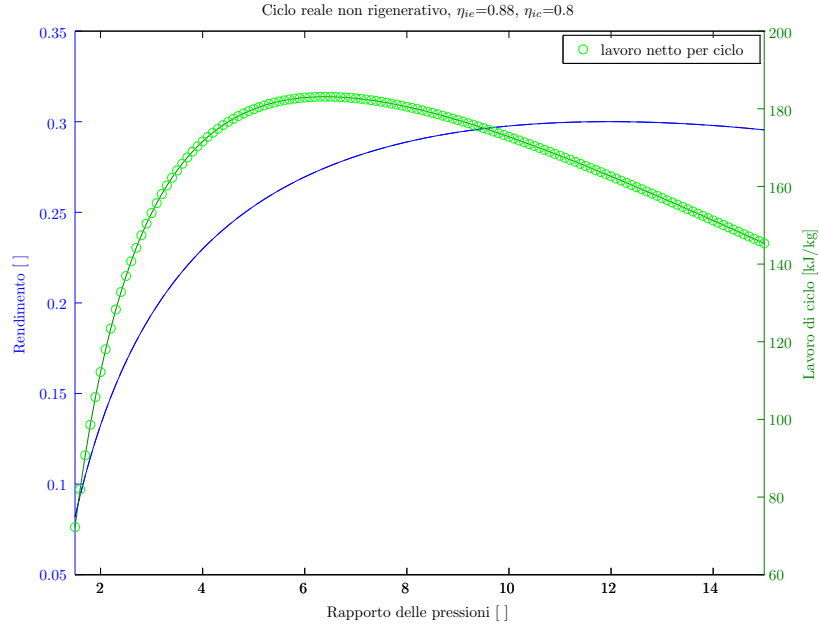


Figura 4.5.: andamenti di rendimento e lavoro netto al variare del rapporto delle pressioni ($\eta_{ie} = 0.88$ e $\eta_{ic} = 0.8$ presi da [24])

Si tiene conto delle irreversibilit  tramite dei rendimenti isoentropici, che fanno crescere il lavoro richiesto dal compressore, e calare il lavoro erogato dalla turbina

$$\eta_{ic} = \frac{L_{12ideale}}{L_{12reale}} = \frac{T_{2rev} - T_1}{T_2 - T_1} \qquad \eta_{ie} = \frac{L_{34reale}}{L_{34ideale}} = \frac{T_3 - T_4}{T_3 - T_{4rev}}$$

$$L_{12} = \frac{L_{12id}}{\eta_{ic}} > L_{12id} \qquad L_{34} = \eta_{ie} L_{34id} < L_{34id}$$

; valori realistici dei rendimenti isoentropici sono compresi tra 0.8 e 0.9.

$$\eta_t = \frac{\eta_{ie} T_3 \left(1 - r_p^{\frac{1-k}{k}} \right) - \frac{T_1}{\eta_{ic}} \left(r_p^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)}{T_3 - T_1 - \frac{T_1}{\eta_{ic}} \left(r_p^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)} \quad (4.3)$$

$$L_n = c_p [(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)] = c_p \left[\eta_{ie} T_3 \left(1 - r_p^{\frac{1-k}{k}} \right) - \frac{T_1}{\eta_{ic}} \left(r_p^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right] \quad (4.4)$$

A differenza del caso ideale, il rendimento del ciclo reale (vedi figura 4.5 ed equazione (4.3)) non continua a crescere indefinitamente, ma raggiunge un massimo e poi cala. Il lavoro netto di ciclo (figura 4.5 e formula (4.4)) diventa massimo per

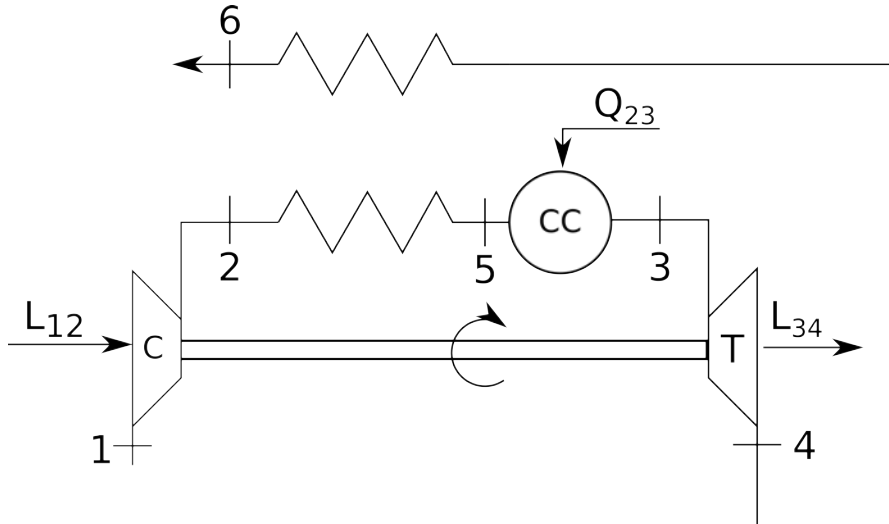


Figura 4.6.: schema di impianto con scambiatore rigenerativo

$$(r_p)_{opt} = \left(\frac{T_3}{T_1} \eta_{ic} \eta_{ie} \right)^{\frac{k}{2(k-1)}}$$

generalmente inferiore al rapporto di pressioni per cui si ha il massimo rendimento. Ciononostante, si sceglie di lavorare in $(r_p)_{opt}$, perchè massimo lavoro netto significa minima portata (e quindi dimensioni) a parità di potenza in uscita, e perchè si lavora con un rendimento non molto inferiore al massimo.

4.1.3. Ciclo ideale rigenerativo

Aggiungendo uno scambiatore di calore tra flussi all'uscita del compressore e all'uscita della turbina (schema in figura 4.6), si ottiene di recuperare parte del calore (altrimenti disperso) presente nei gas all'uscita della turbina, e di effettuare parte del riscaldamento 23 senza consumare combustibile (diagramma termodinamico in figura 4.7).

Avendo supposto trasformazioni ideali, compressione ed espansione sono isoentropiche, e lo scambio termico all'interno dello scambiatore è totale: $T_5 - T_2 = T_4 - T_6$.

$$\begin{aligned} \eta_t &= \frac{L_{34} - L_{12}}{Q_{53}} = \frac{(T_3 - T_4) - (T_2 - T_1)}{T_3 - T_5} = 1 - \frac{T_2 - T_1}{T_3 - T_4} \\ &= 1 - \frac{T_1 r_p^{\frac{k-1}{k}} - T_1}{T_3 - T_3 r_p^{\frac{1-k}{k}}} = 1 - \left(\frac{T_1}{T_3} \right) \frac{r_p^{\frac{k-1}{k}} - 1}{1 - r_p^{\frac{1-k}{k}}} \end{aligned}$$

L'espressione del lavoro netto di ciclo è ancora quella del ciclo non rigenerativo (formula (4.2)), il rapporto dei lavori non è più una grandezza significativa in quanto non tiene conto delle irreversibilità all'interno dello scambiatore.

4. Microturbine

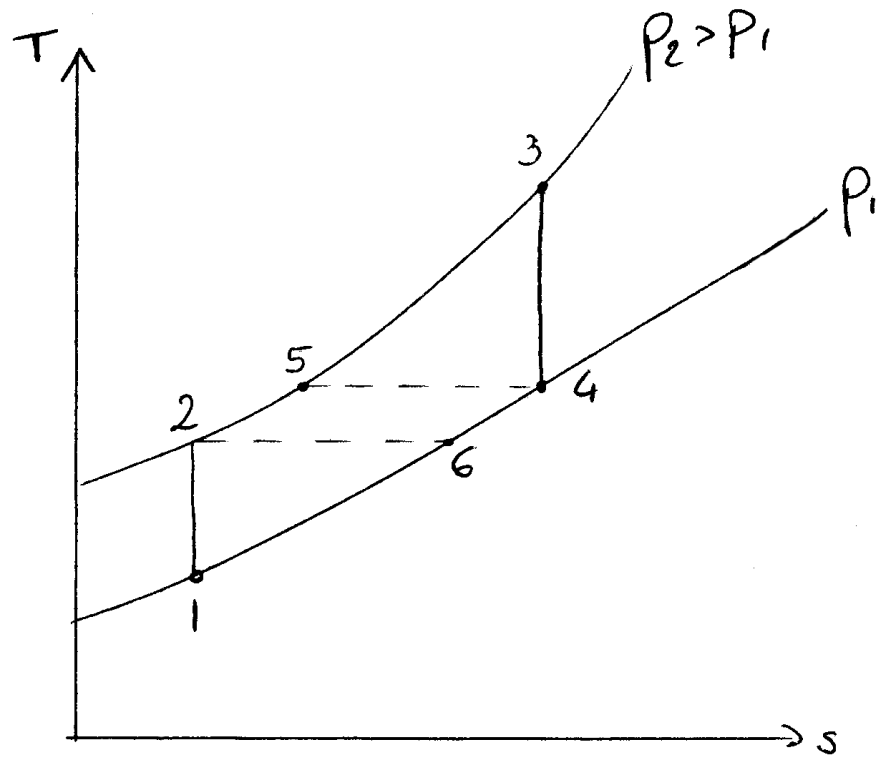


Figura 4.7.: ciclo termodinamico di turbina a gas con scambiatore, supposte ideali le trasformazioni all'interno di compressore, scambiatore e turbina

4.1. Cicli termodinamici delle turbine (Brayton-Joule)

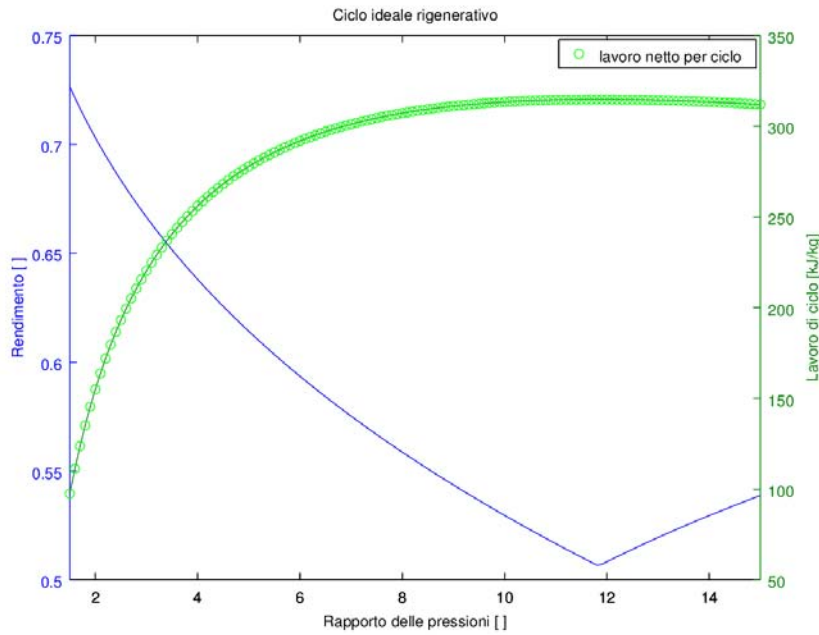


Figura 4.8.: andamenti di rendimento e lavoro netto al variare del rapporto delle pressioni

In corrispondenza del rapporto di pressioni

$$r_p = \left(\frac{T_3}{T_1} \right)^{\frac{k}{2(k-1)}}$$

si ha $T_2 = T_4$, pertanto oltre tale rapporto delle pressioni non è più possibile scambio di calore perchè il gas in uscita dal compressore è già più caldo del gas all'uscita della turbina: per questi valori di r_p , l'espressione del rendimento termico torna a essere quella del ciclo non rigenerativo (formula (4.1)). Gli andamenti di rendimento e lavoro netto sono riportati in figura 4.8.

4.1.4. Ciclo reale rigenerativo

Si considerano gli effetti delle irreversibilità nelle trasformazioni di compressione, espansione e scambio termico rigenerativo; si ipotizza trasformazione isobara all'interno dello scambiatore, il che non è vero perchè per ottenere un buon scambio termico, i tubi dello scambiatore devono essere lunghi e stretti per massimizzare il contatto fluido-parete, con il risvolto negativo delle perdite di pressione lungo il flusso del fluido. Viene definita l'efficienza termica dello scambiatore rigenerativo

$$e = \frac{Q_{reale}}{Q_{ideale}} = \frac{T_5 - T_2}{T_4 - T_2}$$

e il rendimento termico dell'impianto risulta

4. Microturbine

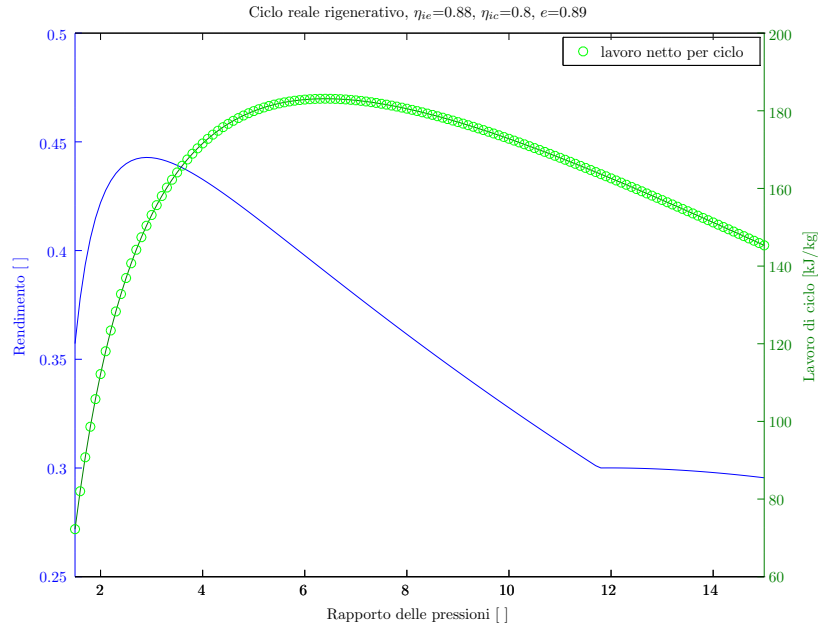


Figura 4.9.: andamenti di rendimento e lavoro netto al variare del rapporto delle pressioni ($\eta_{ie} = 0.88$, $\eta_{ic} = 0.8$ e $e = 0.89$ presi da [24])

$$\eta_t = \frac{\eta_{ie} T_3 \left(1 - r_p^{\frac{1-k}{k}} \right) - \frac{T_1}{\eta_{ic}} \left(r_p^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right)}{T_3 + T_1 (e - 1) \left[1 + \frac{1}{\eta_{ic}} \left(r_p^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \right] - e T_3 \left[1 - \eta_{ie} \left(1 - r_p^{\frac{1-k}{k}} \right) \right]}$$

Come nel caso del ciclo reale senza scambiatore, anche qui il rendimento massimo viene ottenuto per rapporti di pressione di poco inferiori a quello per cui si ottiene il massimo lavoro netto specifico.

4.1.5. Ulteriori raffinamenti

Per migliorare le prestazioni, lo schema dell'impianto può essere migliorato con aggiunte che vengono solitamente impiegate solo per applicazioni stazionarie per la complessità e ingombro che introducono:

- la fase di compressione può essere divisa in due, con raffreddamento intermedio (*intercooling*), il che riduce il lavoro complessivo di compressione;
- si può dividere anche la fase di espansione, con post-combustione all'uscita della prima turbina (la cui pressione di uscita è maggiore della pressione ambiente) resa possibile dall'elevato eccesso d'aria impiegato per la prima combustione, come spiegato in precedenza.

4.2. Prestazioni delle microturbine

4.2.1. Microturbine reali

A causa dei vincoli economici, il compressore della microturbina è a singolo stadio, ed è quindi in grado di imprimere rapporti di compressione $r_p < 5$. Gli stessi vincoli impediscono anche l'impiego di leghe metalliche resistenti alla temperatura, oppure materiali ceramici, o ancora pale di turbina raffreddate, limitando la massima temperatura all'ingresso della turbina a 1050°C . A causa del limitato rapporto delle pressioni, infine, la temperatura di uscita dalla turbina ($> 600^\circ\text{C}$) risulta superiore alla temperatura di uscita dal compressore ($< 300^\circ\text{C}$), il che rende possibile il recupero termico ad opera di uno scambiatore che intercetta il flusso caldo in uscita dalla turbina e il flusso 'freddo' in uscita dal compressore.[31]

Il recupero è nondimeno desiderabile: come si può desumere dai grafici delle figure 4.5 e 4.9, la rigenerazione termica permette di guadagnare almeno 15 punti percentuali di rendimento (da 25% a oltre 40%). D'altra parte, lo scambiatore è un componente costoso, ingombrante e sensibile:

- ingombrante, perchè per ottenere un'elevata efficienza η dello scambio termico è necessaria un'ampia superficie di contatto fluido-parete, il che segue una logica contraria alla miniaturizzazione delle microturbine e fa inoltre calare le densità di potenza (sia di volume che rispetto alla massa) dell'intera macchina, il che la rende meno appetibile;
- sensibile, perchè le pareti dello scambiatore sono in contatto con fluidi a temperature molto diverse, il che rende necessario, per evitare l'instaurarsi e il propagarsi di cricche a causa della diversa deformazione termica, impiegare materiali e procedimenti di produzione finalizzati a minimizzare gli sforzi termici e limitare i gradienti termici nello scambiatore, limitando le prestazioni dinamiche della turbina.

A riguardo delle prestazioni dinamiche di una microturbina, ovvero di quanto velocemente è possibile variare la potenza erogata senza sottoporre i materiali a stress eccessivi che ne comprometterebbero la vita utile, in [31] si riporta come:

- l'avvio a freddo di una microturbina impieghi 90 secondi in presenza dello scambiatore e 15 secondi altrimenti;
- il passaggio da funzionamento a vuoto a quello a piena potenza richieda 5 secondi in assenza di scambiatore e 10 secondi altrimenti;
- lo spegnimento da funzionamento a piena potenza impieghi circa 30 secondi.

Sempre in [31], sono riportati i dati di due dispositivi range-extender basati su microturbine, il C30 e il C65 della Capstone Turbines (dati dichiarati dal produttore), parzialmente richiamati in tabella 4.1: risulta una densità di potenza del dispositivo pari a $0.3 - 0.5 \frac{\text{kW}}{\text{kg}}$ e $85 - 145 \frac{\text{kW}}{\text{m}^3}$.

4. Microturbine

	C30	C65
Potenza elettrica [kW]	30	65
Rendimento $\frac{P_{el,out}}{\dot{m}_c LHV}$	0.26	0.29
Massa, generatore elettrico incluso [kg]	91	135
Dimensioni, generatore incluso [mm]	572x729x836	666x893x759
Emissioni di NOx	<9ppmv (gas naturale), <35ppmv (comb. liquido)	
Emissioni di CO	<50ppmv (gas naturale), <15ppmv (diesel)	

Tabella 4.1.: caratteristiche tecniche (a potenza nominale, 15% in volume di ossigeno residuo allo scarico) di due impianti range-extender proposti dalla Capstone Turbines[31]

Interessanti sono i valori riportati per la vita prevista di una microturbina, nel caso specifico la C30: grazie alla semplicità costruttiva e alle poche parti mobili, viene stimata una durata di vita di circa 80k ore, con intervalli di manutenzione di 8k ore e incidenza dei costi di manutenzione di $3 - 8 \times 10^{-3} \frac{\text{€}}{\text{kWh}_{el}}$. Ogni avvio con macchina fredda diminuisce la vita utile della stessa di 5-6 ore: risulta quindi possibile effettuare 14k avvii e mantenere una vita utile di 10k ore, il che consente (nell'ipotesi che il veicolo, nel quale il range extender è inserito, abbia una vita utile di 5k ore) di sfruttare maggiormente la microturbina, alzando la TIT per migliorare il rendimento, senza diminuire la vita utile del range extender al di sotto della vita attesa del veicolo.[31]

I costi di produzione sono attualmente nell'intorno dei $700 - 850 \frac{\text{€}}{\text{kWh}_{el}}$, con 800 unità (segmento di mercato con potenza inferiore ai 100kW elettrici) complessivamente prodotte nell'anno 2010; la principale voce che fa alzare il prezzo è lo scambiatore termico; la Capstone stima che le microturbine raggiungerebbero il livello di costo dei motori a pistone quando se ne producessero almeno 10k unità all'anno.

In tabella 4.2 sono riportati i dati tecnici di alcuni motori candidati ad essere accoppiati ad un generatore elettrico per formare un apparato range extender: si vede come le microturbine abbiano una dinamica limitata e un rendimento più basso (nei rispettivi punti di massimo rendimento). Proprio la presenza dello scambiatore termico, necessario per elevare l'efficienza a livelli comparabili con gli altri motori, limita la dinamica della macchina, per i già citati problemi di gradiente termico nel materiale; la sua rimozione, a costo di un peggior rendimento, migliora la densità di potenza del complesso e abbassa i costi di produzione.

In entrambe le conformazioni, con e senza recupero termico, le microturbine svettano sui motori a pistoni in quanto a rumore e vibrazioni contenuti, basse emissioni nocive, assenza dell'impianto di trattamento fumi, flessibilità di alimentazione (accetta sia combustibili liquidi che gassosi).

4.2. Prestazioni delle microturbine

	Rendimento netto (20kW cost.)	Densità di potenza		Accensione a freddo [s] (max)	Accensione a caldo [s] (max)	Passaggio da vuoto a pieno carico [s] (max)
		[W/kg]	[W/l]			
Cella a combustibile (PEFC)	0.58	900	1100	30	3	1
Motore lineare free-piston	0.37	750	510	1	1	1
Motore Diesel 4 tempi	0.36	220	160	1	1	1
Motore Otto 2 tempi	0.25	1000	490	1	1	1
Motore Otto 4 tempi	0.3	830	390	1	1	1
Motore Wankel	0.28	1030	2143	1	1	1
Microturbina a gas con recupero $e = 90\%$	0.28	400	100	90	20	10
Microturbina a gas senza recupero	0.15	750	520	15	12	5

Tabella 4.2.: prestazioni di diversi generatori candidati per l'inclusione in un range extender[31]

4. Microturbine

4.2.2. Range extender a microturbina

Si è pensato all'eventualità di accoppiare una turbina (microturbina, viste le potenze ridotte e la necessità di ridurre al massimo gli ingombri) con un generatore per formare un range extender.

Rispetto ai motori a combustione interna alternativi, le turbine presentano:

- basse emissioni;
- poche parti mobili, quindi maggiore affidabilità;
- flessibilità nella scelta del combustibile (liquidi e gassosi);
- minori rumore e vibrazioni;
- dinamica più lenta nel variare la potenza erogata.

In particolare, le microturbine si distinguono dalle turbine per la loro

- elevatissima velocità di rotazione (nell'ordine del centinaio di migliaia di giri al minuto), che permette di adottare cuscinetti a foglio d'aria, evitando l'impiego di lubrificanti pericolosi/infiammabili;
- massima semplicità, infatti una microturbina solitamente è composta di compressore e turbina (entrambi a singolo stadio, cioè una singola serie di pale agisce sul fluido, il che limita le prestazioni ma garantisce la massima compattezza dell'insieme) forgiati insieme con l'albero in un unico pezzo.

Per la loro elevatissima velocità di rotazione, esistono due conformazioni delle microturbine per la generazione di elettricità:

1. un'unica turbina trascina compressore e generatore, il quale generatore elettrico è giocoforza limitato di diametro per evitare sforzi centrifughi eccessivi e genera tensione alternata in alta frequenza;
2. una turbina trascina il compressore e un'altra, in cascata alla prima, trascina il generatore elettrico su un secondo albero, la cui velocità può essere scelta a seconda della frequenza elettrica desiderata.

A causa delle ridotte dimensioni, nelle pale della turbina non si possono applicare i processi metallurgici impiegati nelle turbine normali, cioè ricavare all'interno dell'albero e delle pale una serie di canali e fori che adducono aria fresca spillata all'uscita del compressore con l'intento di formare sulla superficie delle pale uno strato d'aria fresca che mantiene la temperatura della superficie entro i limiti di sopportazione del metallo, nonostante l'elevata temperatura d'ingresso in turbina finalizzata a massimizzare il rendimento. Nelle microturbine, il desiderio di contenere i costi porta a impiegare materiali economici senza canali di raffreddamento interno, limitando la TIT a 950°C (1750°F , [24]): sono in corso ricerche per innalzare la TIT ammissibile tramite l'impiego di materiali ceramici.

emissioni con 30 kW in uscita $\left[\frac{g}{kWh}\right]$	motore alternativo a benzina 63kW (figura 1.7)	microturbina a gas 30kW ([24])
NO_x	6	0.23
CO	18	0.63
HC incombusti	1.8	< 0.08
CO_2	~ 800	800

Tabella 4.3.: confronto tra le emissioni di un motore alternativo a benzina (dati presi dal database del simulatore ADVISOR) e microturbina a gas (dati dichiarati dal costruttore estratti da [24])

La ridotta temperatura d'ingresso in turbina, da una parte penalizza il rendimento, ma mantiene delle emissioni di NO_x (che si formano soprattutto quando la temperatura supera i $1600^\circ C$) ridotte, rendendo le microturbine una soluzione poco inquinante (come tutte le turbine, il livello di emissioni dipende dal combustibile impiegato, ottenendo il livello minimo quando si consuma gas naturale), insieme alle basse emissioni di CO e di idrocarburi incombusti, intrinseche alla combustione completa effettuata in camera di combustione. Per effettuare una valutazione del livello di emissioni, si riportano nella tabella 4.3 le emissioni di una microturbina con potenza nominale 30kW prodotta dalla Capstone Turbines Corp. (dati [24]) e di un motore benzina (figura 1.7 a pagina 22)¹.

Per le applicazioni di range extending, l'energia elettrica dev'essere fornita al DC link, da cui viene instradata o verso l'inverter del motore di trazione o verso la batteria, a seconda che l'attuale potenza richiesta sia rispettivamente minore o maggiore della potenza erogata dal range extender. Pertanto, dovendo essere trasformata in corrente continua, è indifferente la frequenza di generazione; anzi, diventa preferibile generare in alta frequenza, sia per la semplificazione della microturbina (composta di un solo albero), sia perchè il raddrizzamento di una forma d'onda in alta frequenza risulta in una forma d'onda continua con sovrapposte armoniche di ordine elevato, il cui filtraggio è semplificato proprio dall'elevata frequenza.

¹Per questa colonna, si è considerato il punto di funzionamento a $95.5Nm$ e $3000rpm$ (ovvero $P = 95.5 \left(\frac{2\pi 3000}{60}\right) = 30kW$). In particolare per le emissioni di CO_2 , [16] riportava 2.38kg emessi ogni litro di benzina consumato, perciò

$$\frac{2.38 \frac{kgCO_2}{l_{in}}}{10 \frac{kWh_{in}}{l_{in}} \times 0.3 \frac{kWh_{out}}{kWh_{in}}} = 0.793 \frac{kgCO_2}{kWh_{out}}$$

che, considerando l'incertezza relativa al rendimento nel punto di funzionamento considerato, può essere approssimato a $800 \frac{gCO_2}{kWh_{out}}$

5. Vaporetti

5.1. Principio di funzionamento

In condizioni di moto uniforme (velocità costante) la spinta S esercitata dall'elica uguaglia le resistenze R al moto [30]:

$$\sum F = S - R = 0 = m \frac{dv}{dt}$$

Trascurando le asperità dello scafo (ad es. timone e alette anti-rollio), la forza resistente al moto è determinata da tre contributi:

1. resistenza di attrito R_a , definita come la risultante lungo la direzione di spostamento delle forze infinitesime di attrito tangenziale acqua-scafo;
2. resistenza di vortici R_v , causata dalla distribuzione vorticoso di velocità che il movimento dello scafo determina nel fluido circostante, a poppa del vaporetto questi moti vorticosi determinano una depressione che si oppone all'avanzamento del mezzo;
3. resistenza d'onda R_o , data dai sistemi di onde trasversali e divergenti rispetto la direzione di avanzamento, creati al passaggio dello scafo grazie a una quota di energia ceduta dallo stesso.

I primi due contributi, di attrito e di vortici, dipendono dallo stato e dall'estensione della superficie sommersa dello scafo e variano secondo la velocità (relativa tra scafo e fluido circostante) con legge circa quadratica. Per una nave ben progettata, la resistenza di vortici diventa componente trascurabile della resistenza totale. La componente di resistenza d'onda è proporzionale al peso del vaporetto e alla quarta potenza della velocità: oltre determinati valori di velocità, quindi, la resistenza totale al moto incrementa molto velocemente per azione della resistenza d'onda. Infine, per velocità (relative tra imbarcazione e vento) elevate diventa necessario computare nelle resistenze al moto anche la componente aerodinamica dovuta alle parti emerse, mentre per una determinazione accurata delle resistenze (a qualunque valore di velocità) si tiene conto delle asperità sommerse dello scafo tramite un coefficiente correttivo $R_{tot} = 1.05 - 1.10 (R_a + R_v + R_o)$.

5.2. Specifiche del powertrain

Si desidera studiare l'applicabilità della filosofia *range extending* anche ai vaporetti, i quali condividono con gli autobus la caratteristica di essere mezzi di trasporto pubblico a tragitto programmato, e quindi:

5. Vaporetti

- con consumi facilmente ricavabili e costanti, essendo i tragitti sempre uguali;
- con consumi totali di energia importanti, visto l'utilizzo intenso, il che rende qualunque miglioramento di efficienza, costi od emissioni particolarmente rilevante.

Present boats for such service are 150 kW diesel powered. Range is 16 hours daily service with “start-and-stop” docking frequency up to 3 min of navigation, consuming 500 litres of fuel a day. The daily energy delivered at the propeller is estimated as 500 kWh, with a mean power of 30 kW in the 16 h/day service. [28]

Dai dati disponibili, si sono ricavate le seguenti ipotesi di funzionamento:

- 16 ore di funzionamento ininterrotto;
- 30 kW di potenza media all'elica (ininterrottamente per 16 ore, ovvero un'energia totale erogata di $30kW \times 16h = 480kWh \simeq 500kWh$ al giorno);
- potenza massima erogabile dal motore diesel nell'intorno dei 150 kW (considerando un rendimento di trasmissione dell'80%, risulta una potenza di picco all'elica di 120 kW)¹;
- ciclo di navigazione (tragitto da una fermata alla successiva) con durata minima di 3' (situazione in cui ci si pone cautelativamente per ottenere la massima frequenza di picchi di potenza), con profilo di potenza formato da un picco iniziale (distacco dal molo e accelerazione) di durata incognita (si ritiene ipotesi realistica 10 secondi), seguito dall'erogazione di una potenza di valore costante (fase di *cruising*) tale da rendere la potenza media nel periodo pari ai 30kW delle specifiche (secondo le altre ipotesi, della durata di 145 secondi), infine un altro picco di potenza (decelerazione e avvicinamento all'attracco, stimato in ulteriori 10 secondi), quindi 15 secondi con potenza erogata nulla per consentire lo sbarco e l'imbarco dei passeggeri (vedi l'esempio riportato in figura 5.1).

5.3. Powertrain termico (riferimento)

Il powertrain di riferimento è quindi quello raffigurato in figura 5.2, formato da un serbatoio, un motore diesel e la trasmissione da quest'ultimo all'elica. Il rendimento globale medio (sulla giornata) del powertrain è il rapporto tra l'energia in uscita (all'elica) e l'energia in ingresso (combustibile):

¹la potenza massima erogabile dal motore (non essendo il motore diesel sovraccaricabile, la potenza massima erogabile coincide con la potenza nominale, valore rispetto al quale il motore è stato progettato) è quasi certamente superiore alla potenza massima richiesta durante il normale esercizio del vaporetto, essendo il motore scelto a catalogo sulla base di una stima (con opportuno margine) della potenza massima richiesta all'albero dell'elica

5.4. Powertrain ibrido con range extender

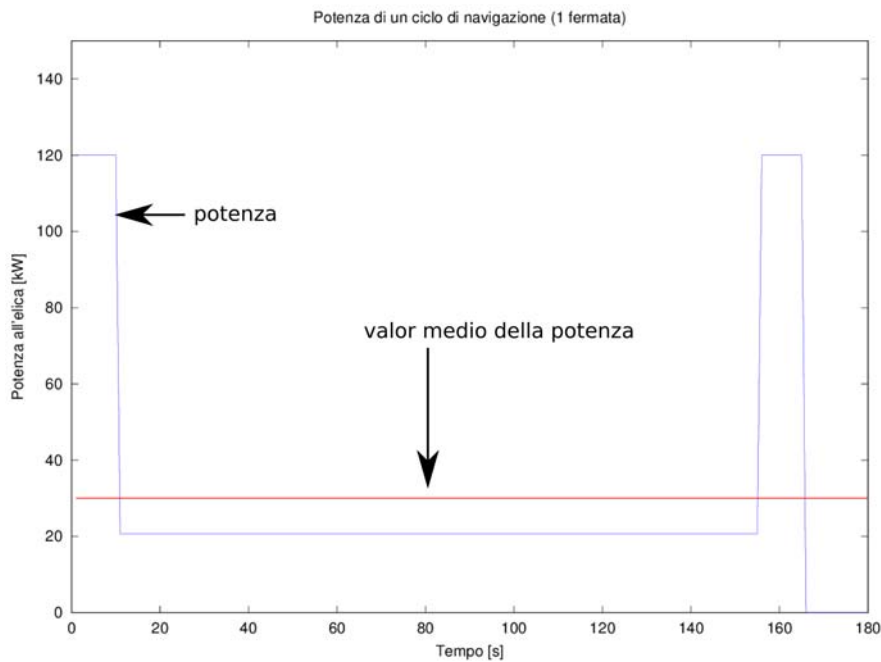


Figura 5.1.: esempio di andamento di potenza all'elica durante un ciclo di navigazione, e valor medio della potenza

$$\eta_{tot} = \frac{E_{out}}{E_{in}} \simeq \frac{500 \text{ kWh}}{5000 \text{ kWh}} \simeq 10\%$$

Essendo anche $\eta_{tot} = \eta_{motore}\eta_{trasm}$, si può ricavare il rendimento medio del motore diesel tramite una stima del rendimento della trasmissione motore-elica: con $\eta_{trasm} \approx 0.8$, risulta $\eta_{motore} \simeq \frac{0.1}{0.8} \simeq 12\%$. Si noti che, essendo il η_{tot} stato sovrastimato ($E_{gasolio} = 500 \text{ l} \times (10.7 \frac{\text{kWh}}{\text{l}}) = 5350 \text{ kWh}$) e il η_{trasm} verosimilmente sottostimato, il η_{motore} sarebbe risultato con ogni probabilità ancora peggiore (nell'ordine del 9-10%); ciononostante si preferisce mantenere la stima precedente, vista la scarsa precisione dei dati di partenza, l'ignoranza relativa a eventuali consumi ausiliari (riscaldamento e illuminazione dei locali passeggeri, strumentazione della cabina di pilotaggio) e l'indifferenza dei risultati del confronto rispetto a tali correzioni.

5.4. Powertrain ibrido con range extender

Il powertrain proposto è invece composto di:

- serbatoio di gasolio;
- motore diesel erogante potenza costante;
- generatore elettrico accoppiato al motore diesel;

5. Vaporetti

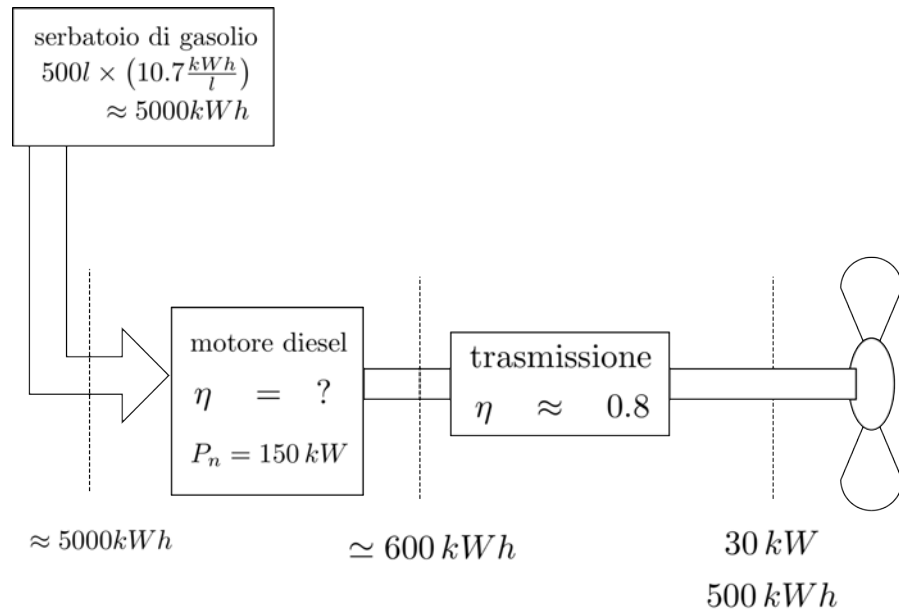


Figura 5.2.: schema del powertrain del vaporetto di riferimento, l'efficienza del motore diesel era inizialmente ignota ma è stata ricavata dai dati a disposizione

- convertitori statici e accumulo;
- motore elettrico di propulsione;
- trasmissione;
- elica.

Nonostante la notevole complicazione introdotta (schema del powertrain in figura 5.3), il powertrain è potenzialmente più efficiente grazie al funzionamento agevolato del motore diesel che, funzionando a potenza costante, raggiunge una maggiore efficienza con minor ingombro. Considerando infatti che un motore diesel può raggiungere una efficienza massima superiore al 35% (al confronto con un rendimento medio del 10% per un motore direttamente collegato alla trasmissione, con condizioni di funzionamento variabili a seconda delle esigenze di trazione) e ipotizzando, su base cautelativa, un rendimento dell'85% per il generatore elettrico (erogante anch'esso una potenza costante) e dell'80% per il motore elettrico (comprendente anche le perdite dell'elettronica di potenza e dell'accumulo) e mantenendo l'ipotesi dell'80% di rendimento per la trasmissione motore-elica, risulta un rendimento totale serbatoio-elica pari a

$$\eta_{tot} = \eta_{mot.diesel} \eta_{gen.eletr} \eta_{mot.eletr} \eta_{trasm} = 0.35 \times 0.85 \times 0.8 \times 0.8 = 0.19$$

ovvero quasi il doppio dell'efficienza del powertrain tradizionale.

5.4. Powertrain ibrido con range extender

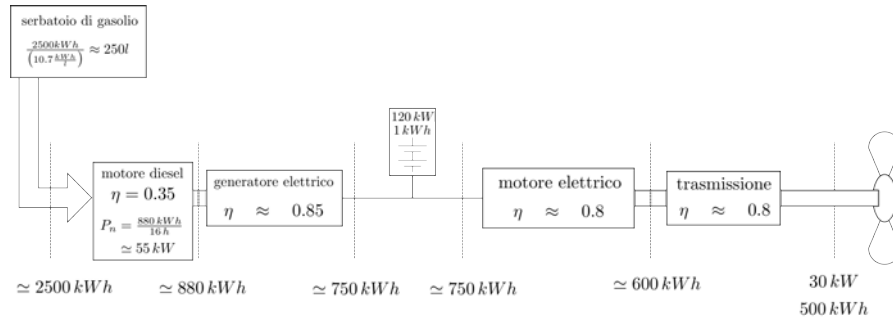
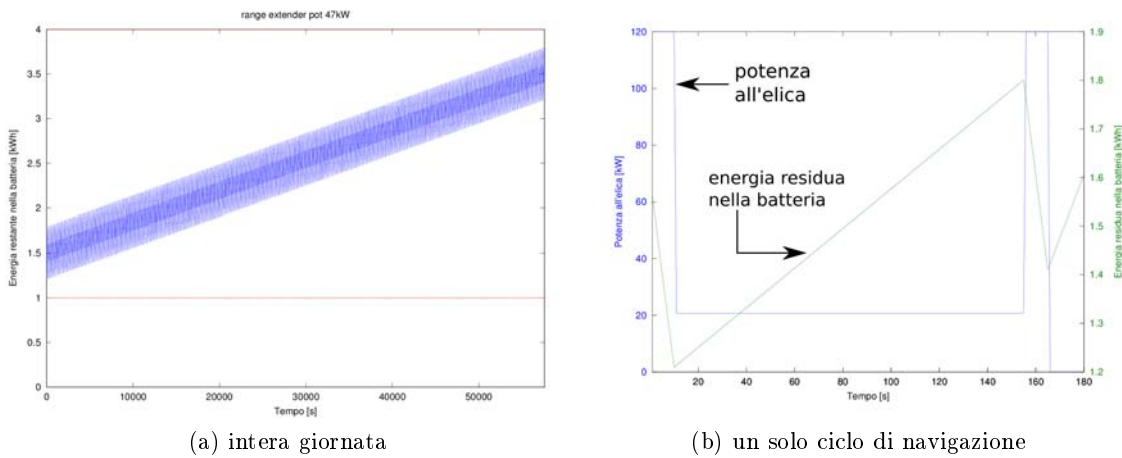


Figura 5.3.: schema del powertrain del vaporetto con motore di propulsione elettrico e range extender a gasolio



(a) intera giornata

(b) un solo ciclo di navigazione

Figura 5.4.: valori di energia residua nel dispositivo di accumulo del vaporetto con range extender, durante l'intera giornata (sinistra) e durante un singolo ciclo di navigazione (destra, sovrapposto alla forma d'onda di potenza all'elica)

Ciò si traduce in consumi di carburante dimezzati (250 litri invece dei 500 consumati giornalmente dal powertrain di riferimento), a parità di energia giornaliera all'elica, come schematizzato in figura 5.3.

Il dispositivo di accumulo elettrico, batteria o supercondensatore, deve avere capacità sufficiente ad assorbire le oscillazioni di potenza (vedi figura 5.1 e i risultati delle simulazioni nelle figure 5.4) ovvero una capacità trascurabile rispetto all'ipotesi di powertrain puro elettrico (vedi paragrafo seguente), in cui l'accumulo viene dimensionato per contenere, alla mattina, l'energia di trazione necessaria per l'intera giornata.

5.4.1. Powertrain solo elettrico

È interessante notare come un vaporetto con powertrain interamente elettrico avrebbe un rendimento "serbatoio"-elica sicuramente più vantaggioso, a prezzo però di una batteria

5. Vaporetti

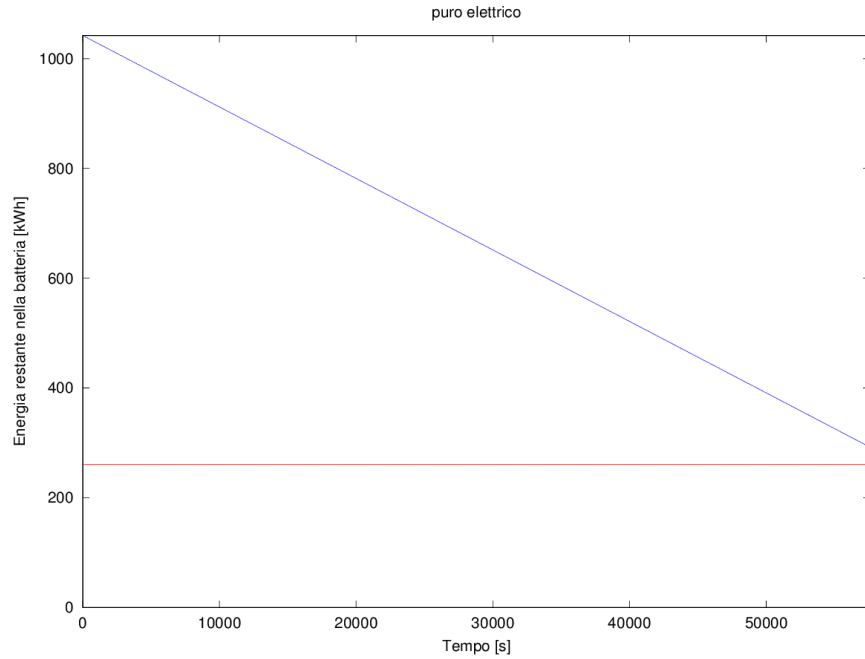


Figura 5.5.: andamento dell'energia residua nella batteria del vaporetto senza range extender

più pesante e ingombrante: per fornire i 500kWh giornalieri richiesti all'elica, vengono richiesti 750-800kWh alla batteria, il che significa dover imbarcare una batteria da 1000-1100kWh ($1000 kWh = \frac{750 kWh}{0.75}$, dove 0.75 è la frazione di energia utilizzabile rispetto la capacità nominale della batteria, vedi figura 5.5).

Riprendendo i valori di densità energetica già impiegati nelle simulazioni della sezione 2.2 ed esposti nella tabella B.1 a pagina 140, ovvero $0.1 \frac{kWh}{kg}$, $0.5 \frac{kWh}{l}$ e $500 \frac{€}{kWh}$, si ottiene che una batteria da 1000kWh nominali peserebbe $\frac{1000 kWh}{0.1 \frac{kWh}{kg}} = 10^4 kg = 10 ton$, occuperebbe $\frac{1000 kWh}{0.5 \frac{kWh}{l}} = 2000 l = 2 m^3$ e costerebbe $500 \frac{€}{kWh} \times 1000 kWh = 500 k€$. Il costo di acquisto è certamente eccessivo (considerando un costo di acquisto per vaporetto tradizionale nell'intorno di 800k€, un vaporetto elettrico a batterie costerebbe circa il doppio); ciononostante l'efficienza di un vaporetto elettrico "dal pozzo all'elica"² si può stimare analogamente a quanto fatto a pagina 39:

²questa efficienza, data dalla produttrice tra i rendimenti della serie energetica, non tiene conto dei consumi ridotti che un veicolo più leggero consente di conseguire, a parità di distanza percorsa: di tale aspetto si potrebbe tener conto effettuando un'analisi dell'efficienza in $\frac{km}{kWh}$, la quale risulta impossibile senza una conoscenza almeno sommaria dei valori tipici dei coefficienti presenti nelle formule delle resistenze al moto e degli andamenti di velocità

5.5. Powertrain con una cella a combustibile come range extender

$$\begin{aligned}\eta_{tot} &= \eta_{estr}\eta_{gen}\eta_{rete}\eta_{charger}\eta_{batt}\eta_{inverter}\eta_{motore}\eta_{trasm} \\ &= 0.9 \times 0.466 \times 0.938 \times 0.95 \times 0.95 \times 0.95 \times 0.8 \times 0.8 \simeq 0.216\end{aligned}$$

mentre il rendimento “pozzo-elica” del vaporetto con range extender è

$$\begin{aligned}\eta_{tot} &= \eta_{WTT}\eta_{mot.Dies}\eta_{gen.el}\eta_{mot.el}\eta_{trasm} \\ &= 0.75 \times 0.35 \times 0.85 \times 0.8 \times 0.8 \simeq 0.143\end{aligned}$$

Ai costi di acquisto dei vaporetti a batteria andrebbe inoltre aggiunto lo sforzo economico per dotare la rimessa dei vaporetti di colonnine per la ricarica e di addestrare il personale ad effettuare l'operazione di ricarica in sicurezza. Si può ovviamente immaginare di implementare la strategia *battery swapping*, al fine di ridurre le dimensioni delle batterie, ma ciò richiederebbe ancora maggiori costi di personale per la gestione delle stazioni di ricarica batterie e scambio alle fermate di capolinea, per non parlare delle difficoltà economiche ed organizzative nel ricavare ed esercire a stazioni di ricarica zone ad elevato pregio, come il centro storico lagunare.

5.5. Powertrain con una cella a combustibile come range extender

Si è anche valutata l'eventualità di dotare i vaporetti di powertrain con cella a combustibile, la quale presenta il vantaggio (non indifferente per una città turistica) di una silenziosità assoluta. Il powertrain è quindi composto da:

- bombola di idrogeno in pressione e a temperatura criogenica (sostituibile con un reformer e relativa bombola di metano, ma il costo di questa apparecchiatura, dichiarato in 500k€, la rende un'alternativa impraticabile);
- cella a combustibile, che converte l'energia chimica dell'idrogeno in energia elettrica (tensione in uscita di tipo continuo), con rendimento stimato del 45 – 50% e prezzo approssimativo di 85 – 90 k€(macchina da 60kW);
- convertitore DC-DC, per adattare la tensione d'uscita della cella a combustibile alle necessità di batteria e inverter di trazione, con rendimento stimato di 0.9 e costo 4k€;
- dispositivo di accumulo, necessario a colmare i buchi tra la potenza di trazione richiesta e la potenza erogata dalla cella a combustibile (la cui dinamica è lenta), costo stimato di 20k€;
- motore elettrico, con rendimento stimato in 0.8 (comprendente anche le perdite dell'inverter e delle batterie) e costo nell'ordine dei 10k€ (motore da 150kW);

5. Vaporetti

- trasmissione tra motore ed elica, con rendimento 0.8

Per ottenere i consueti 500kWh giornalieri all'elica, la cella a combustibile ne deve assorbire

$$\frac{500kWh}{0.8 \times 0.8 \times 0.9 \times 0.45} = 1929kWh$$

ovvero circa 60kg di idrogeno al giorno, data la densità energetica dell'idrogeno pari a $33.3 \frac{kWh}{kg}$, per un costo operativo (relativo alla produzione e fornitura di idrogeno per la propulsione) di circa 500€ al giorno.

5.6. Confronto e conclusioni

Riepilogando:

1. il vaporetto tradizionale ha un powertrain il cui costo si aggira sui 20k€ (motore diesel da 150kW), con costi di carburante pari a circa 500€ al giorno (ipotizzando l'azienda di trasporti veneziana abbia accesso a una fornitura defiscalizzata di gasolio, ipotizzato a $\sim 1 \frac{€}{l}$);
2. il vaporetto elettrico con range extender diesel, consumando metà gasolio (rispetto il vaporetto tradizionale) dimezza anche i costi di combustibile (250€/giorno), ha un powertrain il cui costo viene stimato in 70k€, così suddivisi:
 - a) motore diesel da 50kW, 8k€,
 - b) generatore elettrico da 50kW, 5k€,
 - c) batterie da 100kW e 30kWh, 30k€,
 - d) due convertitori statici, 7k€ (uno per raddrizzare la potenza generata di 50kW con costo 2k€, l'altro è l'inverter del motore di propulsione dimensionato per 150kW con costo 5k€),
 - e) motore elettrico da 150kW, 10k€,
3. il vaporetto elettrico a batterie ha un powertrain dal costo proibitivo, a causa delle batterie;
4. il vaporetto con range extender a idrogeno (cella a combustibile) ha un costo del powertrain stimato in 124k€ e un costo per il combustibile di 3-400€/giorno, calcolato tramite i dati del reformer Nuvera PowerTap[38]:
 - a) il produttore del reformer dichiara un consumo di 3.9kWh di elettricità e 56.3kWh di metano (3.75kg con densità energetica del metano $15 \frac{kWh}{kg} \simeq 55 \frac{MJ}{kg}$) per ogni kg di idrogeno prodotto
 - b) ipotizzando un costo medio (tra metano ed elettricità in media tensione) di $0.08 - 0.1 \frac{€}{kWh}$

- c) risulta che ogni traghetto comporta un costo operativo giornaliero di combustibile pari a

$$(60kgH_2) \times (3.9 + 56.3kWh) \times \left(0.08 - 0.1 \frac{\text{€}}{kWh}\right) \approx 290 - 360\text{€}$$

- d) da non ignorare è l'ingombro per batteria e bombole di metano necessari a rifornire il reformer, ovvero 240kWh ($= 4 \frac{kWh}{kgH_2} \times 60kgH_2$) di batterie e 1325l di metano ($= \frac{56.3 \frac{kWh}{kgH_2} \times 60kgH_2}{15 \frac{kWh}{kg} \times 0.17 \frac{kg}{l}} = \frac{225.2kg}{0.17 \frac{kg}{l}}$), che potrebbero essere evitati mantenendo il reformer a terra e installando a bordo direttamente la bombola di idrogeno a temperatura criogenica con ingombro 817l ($= \frac{1929kWh}{2.36 \frac{kWh}{l}}$).³

Il powertrain con range extender diesel appare quindi come la soluzione più economica, in quanto:

- rispetto al vaporetto con powertrain termico tradizionale
 - il costo aumenta per l'acquisto di due motori elettrici e di un accumulo elettrico (batteria o supercondensatore) di capienza minimale
 - l'aumento di costo viene parzialmente bilanciato dal risparmio per un motore diesel più piccolo
 - si dimezzano i consumi, il che permette di risparmiare 250€/giorno e recuperare quindi il maggior esborso di 40k€ per il powertrain in nemmeno sei mesi (160 giorni);
 - si possono abbattere emissioni e rumorosità grazie al regime di rotazione costante del motore;
 - si può controllare (tramite l'inverter del motore elettrico) il regime di rotazione dell'elica, evitando il funzionamento on-off dell'elica nei vaporetti tradizionali, nei quali il fenomeno della cavitazione (la forza trasmessa dall'elica al fluido circostante cala per la formazione di bolle di vapore) non viene nè controllato nè evitato, con maggiori consumi;
- rispetto al vaporetto con powertrain elettrico puro
 - si risparmia sull'acquisto delle batterie (pur essendo il powertrain composto da più macchine, il loro costo assommato non eguaglia il costo delle batterie)

³alternativamente, se si utilizzasse il metano per alimentare un motore a combustione interna come range extender, al posto della catena reformer+cella a combustibile, risulterebbe (ipotizzando un rendimento per il motore a combustione interna alimentato a metano di 0.25) un consumo di 3676kWh ($= \frac{500kWh}{0.8 \times 0.8 \times 0.85 \times 0.25}$), ovvero 245kg di metano contro i 225kg della soluzione con reformer e cella a combustibile: le due soluzioni risultano quindi sostanzialmente equivalenti (con la mancanza di rumore e vibrazioni a favore della soluzione con idrogeno e la maggiore affidabilità a favore della soluzione con motore a combustione interna), vista l'incertezza sui rendimenti di reformer, fuel cell e motore a combustione interna alimentato a metano

5. Vaporetti

- non richiede che le banchine della rimessa dei vaporetti vengano attrezzate con colonnine per la ricarica
- non grava la rete elettrica pubblica per la ricarica (seppur nel periodo di minor carico, il che potrebbe essere aiutato a mitigare l'effetto Ferranti e la necessità di installare reattori d'area per contenere le sovratensioni notturne nelle linee a basso carico della rete elettrica di trasmissione)
- non richiede l'istruzione degli addetti per collegare in sicurezza i vaporetti alle colonnine di ricarica
- non richiede, nell'ipotesi del vaporetto elettrico con *battery swapping*, l'assunzione di addetti alla sostituzione delle batterie
- rispetto al vaporetto con range extender a idrogeno
 - il costo d'acquisto è inferiore
 - l'affidabilità e la facilità di reperire meccanici in grado di riparare il motore a gasolio (invece della cella a combustibile) è senz'altro superiore
 - la rumorosità (comunque superiore a quella della soluzione con reformer e cella a combustibile) può essere smorzata visto il regime di rotazione costante del motore
 - i costi giornalieri sono inferiori, garantendo un rientro più rapido dell'investimento
 - le emissioni sono maggiori.

6. Conclusioni

In questo lavoro di tesi si sono confrontati consumi, costi ed emissioni relativi alla percorrenza simulata di alcuni cicli di guida con un veicolo privato:

- per il veicolo tradizionale (motore a combustione interna), risulta un'efficienza di energia primaria di $1.04 \frac{km}{kWh}$ (nel caso di un veicolo a benzina; $1.31 \frac{km}{kWh}$ per un veicolo alimentato con diesel), costi di $0.12 \frac{€}{km}$ ed emissioni $170 \frac{gCO_2}{km}$;
- per il veicolo elettrico con batterie (autonomia 100km) ricaricate da rete, risulta $1.88 \frac{km}{kWh}$ di efficienza, $90 \frac{gCO_2}{km}$ e $0.042 \frac{€}{km}$, considerando il parco di generazione e il prezzo dell'elettricità della rete italiana
 - nel caso di alimentazione interamente idroelettrica, $3.81 \frac{km}{kWh}$ e $2.2 \frac{gCO_2}{km}$,
 - nel caso di alimentazione da fotovoltaico domestico (che necessiterebbe di un dispositivo per l'accumulo dell'energia durante il giorno e la ricarica notturna del veicolo, le cui perdite, costi ed emissioni vengono ignorati), $4.8 \frac{km}{kWh}$ e $7.6 \frac{gCO_2}{km}$;
- per un veicolo ibrido elettrico-termico con topologia serie, $1.52 \frac{km}{kWh}$, $0.084 \frac{€}{km}$ e $117 \frac{gCO_2}{km}$;
- per un veicolo ibrido plug-in, nel quale una volta terminata l'energia contenuta nelle batterie entra in funzione il range extender ad alimentare il powertrain, efficienze, costi ed emissioni variano a seconda dell'autonomia garantita dalle batterie e della percorrenza
 - nel caso di batterie con autonomia 50km, l'efficienza di energia primaria cala da 1.64 a $1.51 \frac{km}{kWh}$ passando da una percorrenza di 50km (quindi funzionamento completamente elettrico) a una di 500km (funzionamento in modalità ibrido serie),
 - nel caso di batterie con autonomia 100km, l'efficienza passa da 1.41 (percorrenza 50km) a $1.32 \frac{km}{kWh}$ (percorrenza 500km).

Insieme con un'ottima efficienza energetica, il veicolo elettrico a batteria esibisce una bassa densità energetica del dispositivo di accumulo:

- già per 100km di autonomia, la batteria pesa circa 250-300kg, ovvero arriva a costituire anche il 20% della massa totale del veicolo;
- per percorrenze superiori all'autonomia permessa dalle batterie, il veicolo elettrico a batterie necessita di una sosta relativamente lunga per la ricarica.

6. Conclusioni

Nell'ottica di superare sia l'inconveniente delle soste per la ricarica nel caso di tragitti lunghi col veicolo elettrico a batteria, sia la scarsa efficienza del veicolo con motore a scoppio, il veicolo ibrido plug-in mostra un buon compromesso tra versatilità (si adatta sia a viaggi lunghi che corti) e efficienza energetica (per tragitti corti, viene consumata l'energia delle batterie senza accendere il range extender).

Come caso concreto di applicazione del concetto di range extending, si sono considerati i vaporetti del servizio di trasporto pubblico nel centro storico di Venezia e si è giunti alla conclusione che un vaporetto con powertrain ibrido permetterebbe di dimezzare il consumo giornaliero di combustibile (da 500 a 250 litri) rispetto gli attuali vaporetti con motore diesel, garantendo il recupero del maggiore esborso iniziale (per il più complesso powertrain) in meno di sei mesi.

6.1. Possibili sviluppi futuri

Per approfondire ulteriormente le tematiche affrontate in questa tesi, si può pensare di:

- affinare i calcoli svolti mediante misure di consumi reali (non valori medi ipotizzati) su motori reali in condizioni verosimili;
- rendere le simulazioni maggiormente verosimili mediante l'acquisizione di cicli di guida reali, maggiormente rappresentativi dell'utilizzo dei veicoli per mobilità privata;
- abbozzare la logica di controllo del range extender basata su misure in tempo reale della vettura e sulla destinazione impostata nel navigatore.

A. Cicli di guida

Per valutare consumi, costi e emissioni del veicolo elettrico, e confrontare i risultati coi valori dell'omologo mezzo con motore a combustione interna, sono state simulate le percorrenze di diversi cicli di guida (tracciati di velocità reperiti presso l'agenzia per la protezione ambientale statunitense[6]) ideati per rappresentare, con l'auto su un banco di prova, delle condizioni di velocità e accelerazione realistiche (differenziando quindi tragitti urbani e extraurbani, e con vari livelli di congestione stradale): vengono brevemente presentati qui per non appesantire l'esposizione del capitolo 2. Le caratteristiche dei vari cicli di guida sono riportate in tabella A.1.

A.1. EPA UDDS

Il ciclo EPA (Environmental Protection Agency) UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule) esemplifica una guida in tracciato urbano; viene anche chiamato "LA4", o "test urbano". I relativi grafici di velocità, spazio percorso e distribuzione di velocità sono riportati in figura A.1.

A.2. FTP

Il ciclo FTP (Federal test procedure) è composto da una parziale (limitata ai primi 505 secondi) ripetizione del ciclo UDDS; viene anche definito ciclo "EPA75". I grafici sono in figura A.2.

A.3. HWFET

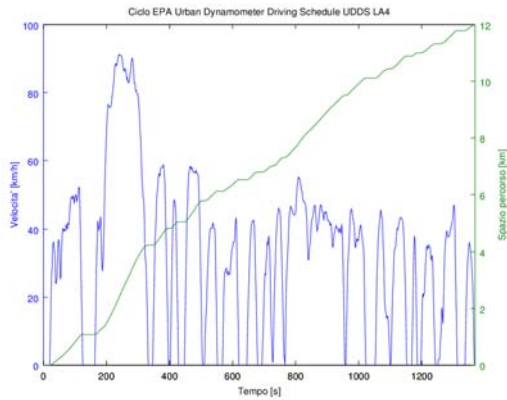
Il ciclo HWFET (Highway Fuel Economy Driving Schedule, ciclo di guida per valutare il consumo di combustibile in autostrada) rappresenta condizioni di guida autostradali con velocità inferiori a 96,6 km/h (60 mph). I grafici sono in figura A.3.

A.4. US06

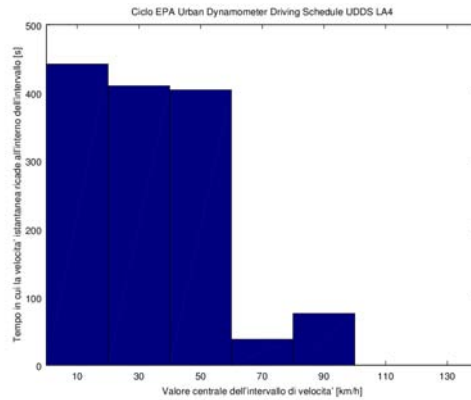
Il ciclo US06 rappresenta una guida aggressiva con accelerazioni elevate; viene anche definito "FTP supplementare". I grafici sono in figura A.4.

	UDDS	FTP	Highway	US06	LA92	EUDC	ECE	JP10	JP15
Distanza coperta	[km]	11.99	17.77	16.51	12.89	15.80	6.95	0.99	2.17
Tempo impiegato	[s]	1369	1874	765	600	1435	400	195	231
Velocità commerciale	$[\frac{km}{h}]$	31.5	34.1	77.7	77.3	39.6	62.6	18.4	33.9
Velocità massima	$[\frac{m}{s}]$	8.76	9.48	21.58	21.48	11.01	17.39	5.10	9.41
	$[\frac{km}{h}]$	91.2	91.2	96.4	129.2	108.1	120.0	50.0	70.0
	$[\frac{m}{s}]$	25.35	25.35	26.78	35.90	30.04	33.33	13.89	19.44
$\frac{dv}{dt} = 0$	[s]	350	480	130	72	396	255	117	68
	%	25.6	25.6	17	12	27.6	63.8	60	50.4
$v(t) = 0$	[s]	259	358	6	45	234	42	64	39
	%	18.9	19.1	0.8	7.5	16.3	10.5	32.8	28.9
$\frac{dv}{dt} > 0$	[s]	544	739	338	275	549	103	42	33
	%	39.7	39.4	44.2	45.8	38.3	25.8	21.5	24.4
$\frac{dv}{dt} < 0$	[s]	475	655	297	253	490	42	36	34
	%	34.7	35	38.8	42.2	34.1	10.5	18.5	25.2

Tabella A.1.: statistiche dei driving cycle utilizzati nelle analisi

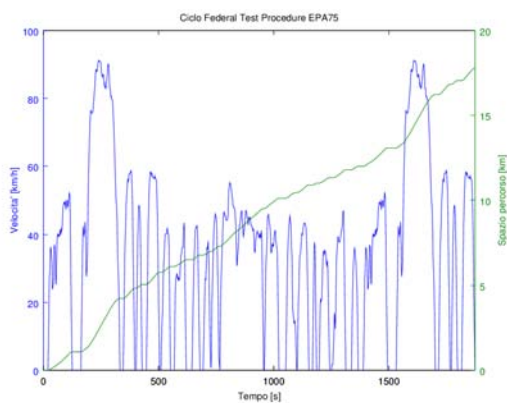


(a) grafico tempo-velocità e tempo-spazio percorso

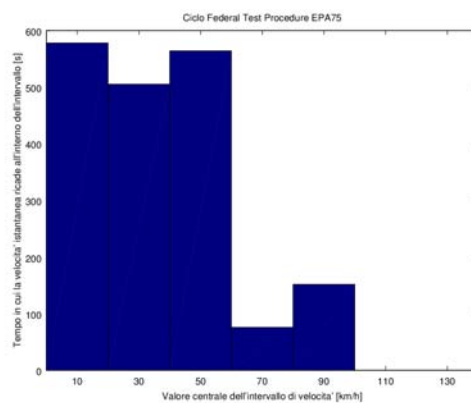


(b) distribuzione delle velocità

Figura A.1.: ciclo EPA UDDS



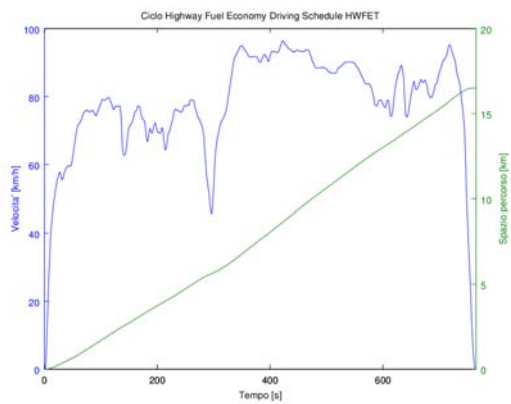
(a) grafico tempo-velocità e tempo-spazio percorso



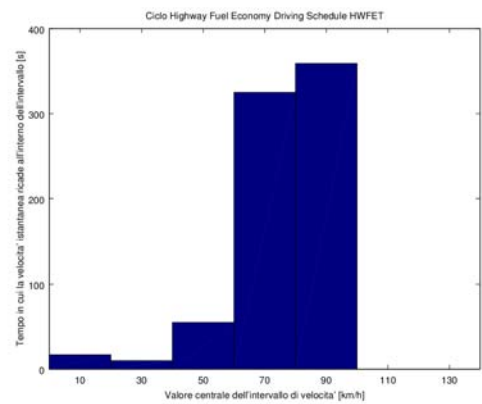
(b) distribuzione delle velocità

Figura A.2.: ciclo EPA75 FTP

A. Cicli di guida

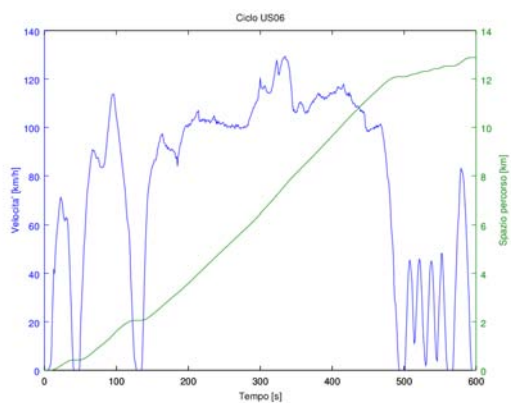


(a) grafico tempo-velocità e tempo-spazio percorso

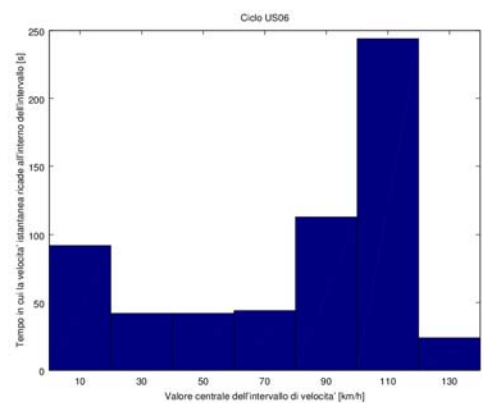


(b) distribuzione delle velocità

Figura A.3.: ciclo HWFET

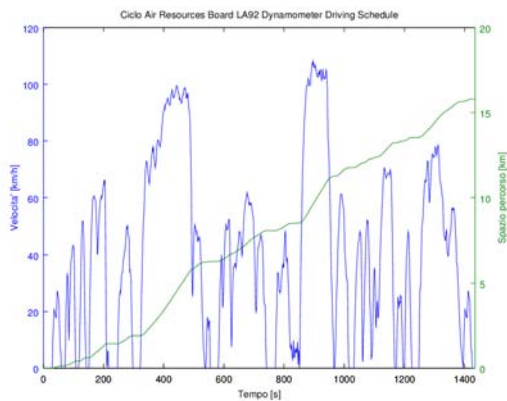


(a) grafico tempo-velocità e tempo-spazio percorso

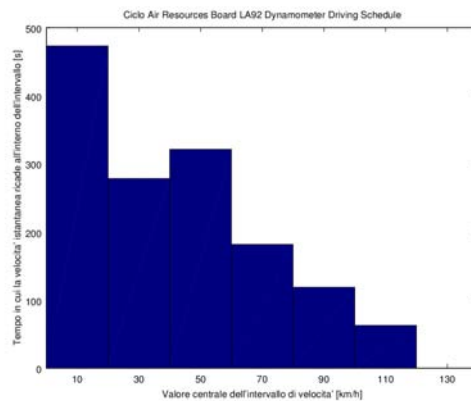


(b) distribuzione delle velocità

Figura A.4.: ciclo US06



(a) grafico tempo-velocità e tempo-spazio percorso



(b) distribuzione delle velocità

Figura A.5.: ciclo LA92

A.5. LA92

Il ciclo LA92 è stato sviluppato come miglioramento del ciclo FTP ai fini della valutazione delle emissioni: rispetto quest'ultimo, presenta una più elevata velocità massima e media, accelerazioni maggiori e tempi ridotti a veicolo fermo. I grafici sono in figura A.5.

A.6. EUDC

Il ciclo UN/ECE (United Nations Economic Commission for Europe) EUDC (Extra-urban driving cycle) costituisce la seconda parte del test "ECE Type 1". I grafici sono in figura A.6.

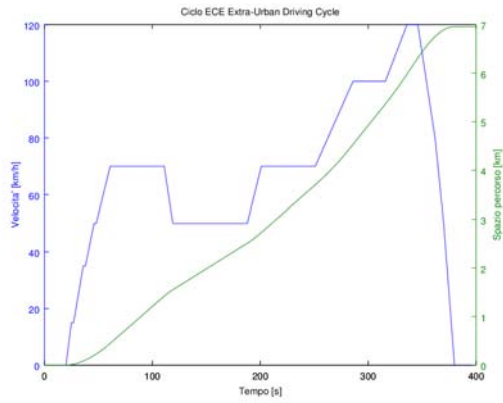
A.7. ECE

Il ciclo "Elementary Urban Cycle" costituisce la prima parte del test "ECE Type 1". I grafici sono in figura A.7.

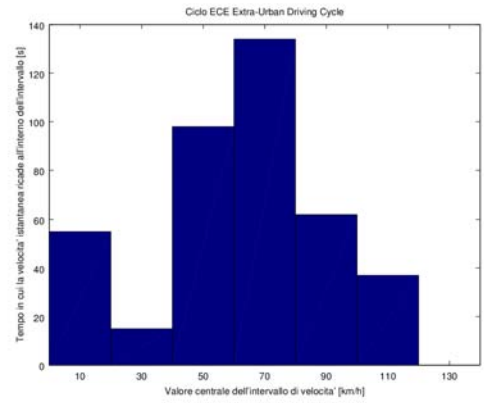
A.8. JP10 e JP15

Questi due cicli di guida vengono impiegati in Giappone come componenti del "test 10.15" per la valutazione di consumi ed emissioni. I grafici del ciclo di guida JP10 sono in figura A.8, per il ciclo JP15 in figura A.9.

A. Cicli di guida

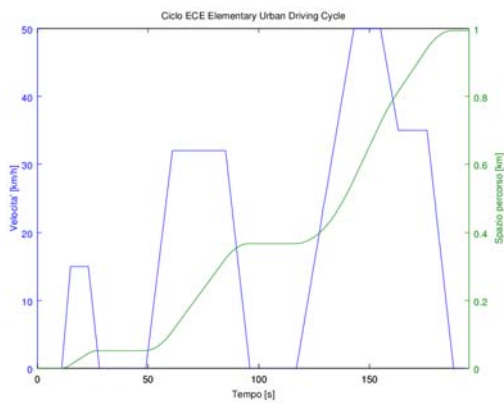


(a) grafico tempo-velocità e tempo-spazio percorso

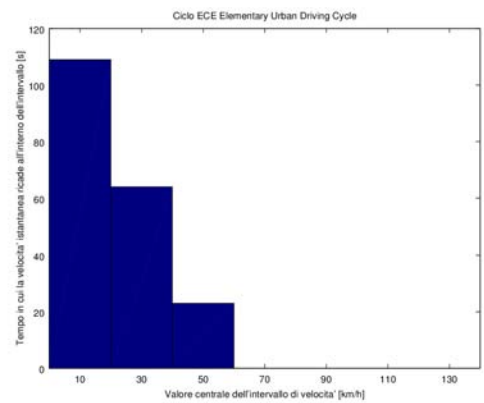


(b) distribuzione delle velocità

Figura A.6.: ciclo EUDC

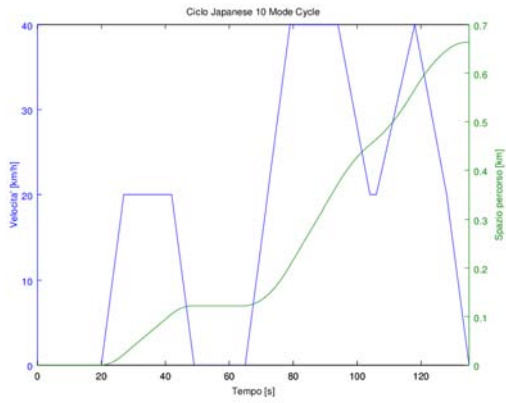


(a) grafico tempo-velocità e tempo-spazio percorso

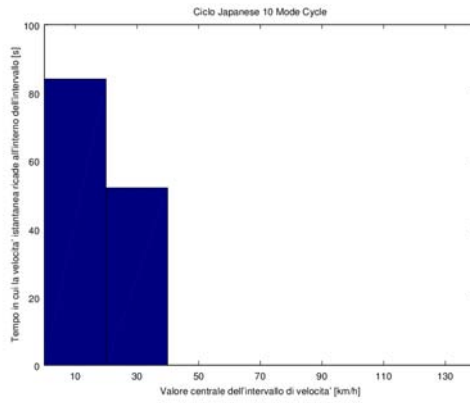


(b) distribuzione delle velocità

Figura A.7.: ciclo ECE

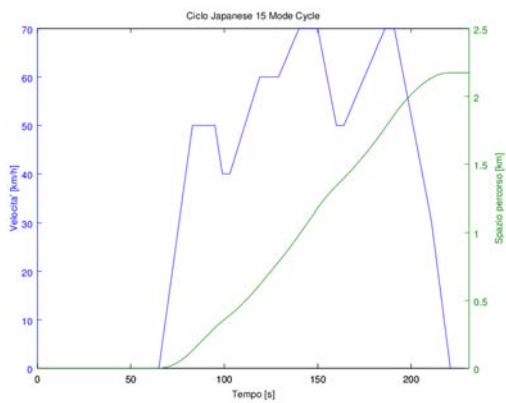


(a) grafico tempo-velocità e tempo-spazio percorso

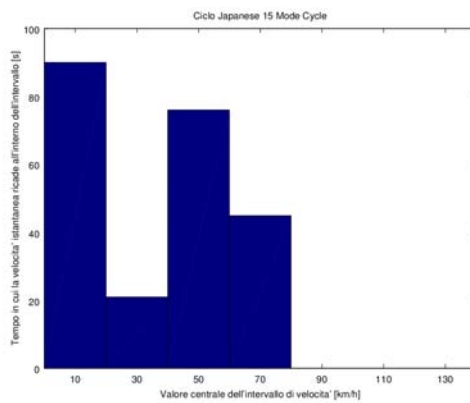


(b) distribuzione delle velocità

Figura A.8.: ciclo JP10



(a) grafico tempo-velocità e tempo-spazio percorso



(b) distribuzione delle velocità

Figura A.9.: ciclo JP15

A.9. Formule impiegate, osservazioni

Ciascun ciclo di guida è stato “progettato” da un’ autorità regolatrice con finalità diverse: rappresentare condizioni di guida urbane, autostradali, con traffico intenso, con frequenti accelerazioni e decelerazioni, a velocità pressochè costante. Come presupposto delle analisi e valutazioni del capitolo 2, ognuno dei cicli di guida sotto esame è stato analizzato trasformando il vettore delle velocità istantanee $v(t)$ (ricavato, per ogni ciclo di guida considerato, da [6]) nell’andamento della potenza alle ruote del veicolo, tramite la formula[7]

$$P(t) = Mg v(t) f_r \cos\alpha + \frac{1}{2}\rho_a C_x A_f v(t)^3 + Mg v(t) \sin\alpha + M\delta v(t) \frac{dv(t)}{dt} \quad (\text{A.1})$$

e poi

termico	elettrico
$P > 0 \quad P_{mot} = \frac{P_{ruote}}{\eta_{trasm}}$	$P > 0 \quad P_{mot} = \frac{P_{ruote}}{\eta_{trasm}}$
$P \leq 0 \quad P_{mot} = 0$	$P = 0 \quad P_{mot} = 0$
	$P < 0 \quad P_{mot} = P_{ruote}\eta_{trasm}$

in cui $v(t)$ $[\frac{m}{s}]$ è la velocità istantanea del veicolo, η_{trasm} $[/]$ è il rendimento della trasmissione dal motore alle ruote, M $[kg]$ è la massa del veicolo, $g = 9.81$ $[\frac{m}{s^2}]$ è l’accelerazione di gravità, f_r $[/]$ è il coefficiente di attrito statico tra i pneumatici e il fondo stradale (nel caso di strada in asfalto o cemento, $f_r = 0.01 \left(1 + \frac{V[km/h]}{160}\right)$ [7]), α $[rad]$ è l’inclinazione della strada (se positivo l’auto è in salita, se negativo è in discesa), $\rho_a = 1.2$ $[\frac{kg}{m^3}]$ è la densità dell’aria, C_x $[/]$ è il coefficiente di attrito aerodinamico (dipende dal profilo con cui il veicolo fende l’aria), A_f $[m^2]$ è l’area frontale, δ è il fattore che tiene conto dell’inerzia delle masse rotanti.

Nelle simulazioni, si è assunto il veicolo avesse:

- una massa a vuoto, comprendente masse del guidatore, del motore termico, della trasmissione meccanica e del carburante nel serbatoio (come prima stima, la massa dell’auto elettrica non è molto diversa) di 1225 kg,
- un coefficiente aerodinamico C_x di 0.3,
- un’area frontale di $2 m^2$,
- un fattore d’inerzia delle masse rotanti $\delta = 1.0425$.

Per tramite della formula (A.1), il grafico di velocità di figura A.6 diventa l’andamento di potenza riportato in figura A.10, in cui è pure riportato l’andamento della velocità per agevolare la comprensione della correlazione velocità-potenza: si nota come i maggiori valori di potenza dipendano dalle accelerazioni, sia in positivo che in negativo, mentre la potenza assorbita a velocità costante dipenda dal valore della velocità. Per comprendere

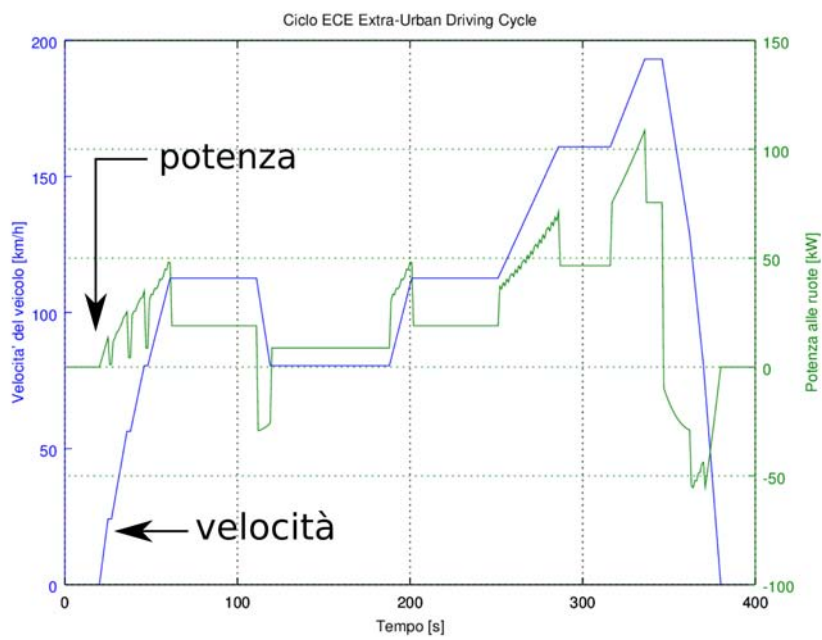


Figura A.10.: influenza della velocità del veicolo nel driving cycle sull'andamento della potenza alle ruote, per il ciclo EUDC: per la velocità, linea blu, scala di sinistra; per la potenza, linea verde, scala di destra

A. Cicli di guida

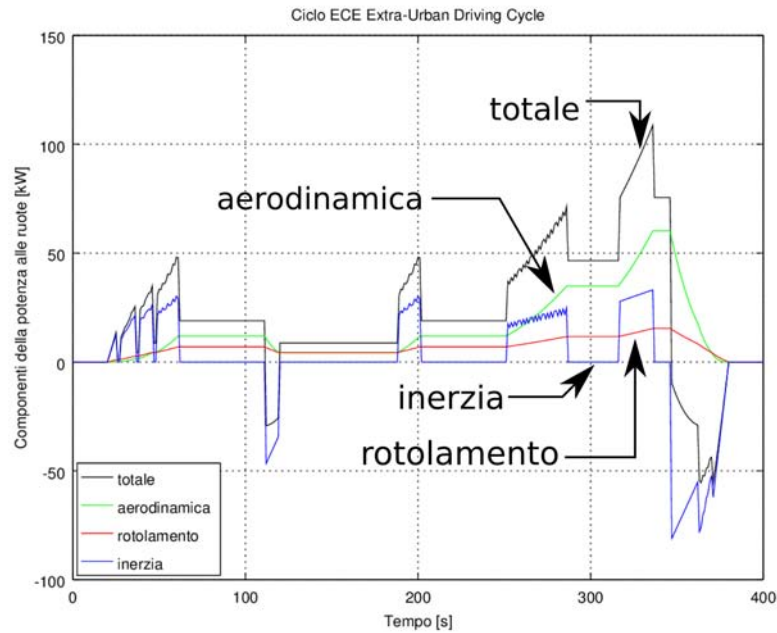


Figura A.11.: componenti che assommano nella totale potenza richiesta alle ruote

le ragioni di ciò, l'andamento delle varie componenti (gli addendi del secondo membro dell'equazione (A.1)) della potenza alle ruote è stato riportato in figura A.11:

- potenza per vincere l'attrito di rotolamento ruote-asfalto $Mg v f_r \cos\alpha$, dipende linearmente dalla velocità;
- potenza per vincere l'attrito aerodinamico incontrato dalla superficie del veicolo esposta all'aria durante il moto, $\frac{1}{2}\rho_a C_D A_f v^3$, dipendendo dal cubo della velocità diventa la componente preponderante per velocità superiori a circa 80 km/h (l'esatto valore della soglia di velocità dipende dai coefficienti fisici e dalla geometria del veicolo);
- potenza per vincere le pendenze $Mg v \sin\alpha$, potenza positiva nel caso di salite e negativa (potenza recuperata dalle ruote verso il motore o dissipata nei freni) nelle discese, in tutti i cicli di guida considerati il percorso è pianeggiante quindi questo contributo è nullo;
- contributo d'inerzia $M\delta v \frac{dv}{dt}$ che tiene conto della inerzia del veicolo e delle sue masse rotanti (motore, trasmissione, ruote), che richiedono una potenza aggiuntiva in fase di accelerazione, potenza che viene poi restituita in fase di frenatura, questo contributo è nullo nella fase a velocità costante.

Osservando la figura A.11 si può notare come effettivamente il contributo dovuto all'inerzia sia presente solo durante i transitori di velocità e come le componenti di potenza

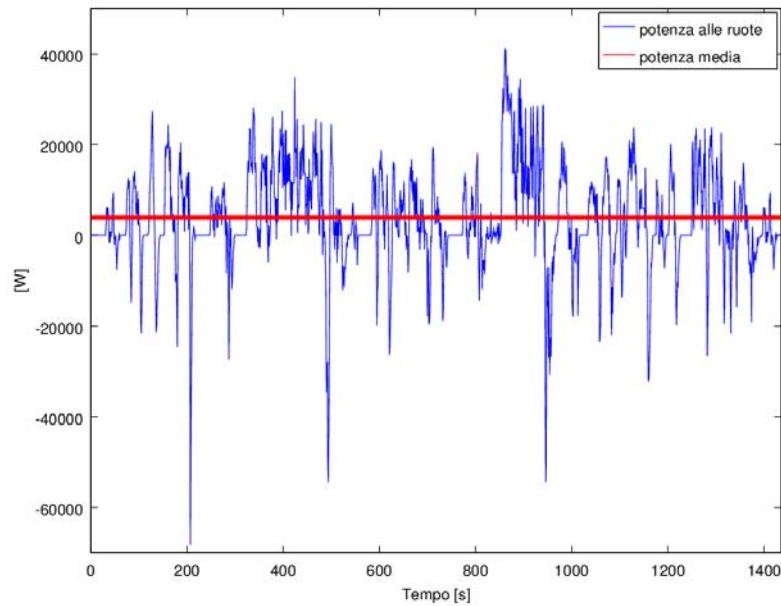


Figura A.12.: grafico della potenza alle ruote durante il ciclo di guida LA92, con evidenziato il valor medio

necessarie a vincere l'attrito di rotolamento e aerodinamico dipendano, rispettivamente, dalla velocità e dalla sua terza potenza (a velocità ridotte l'attrito di rotolamento è preponderante, mentre alle velocità elevate emerge il termine aerodinamico; il valore di velocità di transizione tra i due campi dipende dagli specifici parametri fisici del veicolo, delle sue ruote e della pavimentazione stradale).

Dalla figura A.12, si può invece osservare come il valor medio della potenza di trazione sia molto inferiore al valore di picco; caratteristica questa che avvantaggia i motori elettrici (sovraccaricabili) rispetto ai motori a combustione interna.

B. Accumulatori

L'accumulatore permette di dislocare il veicolo, nel quale avviene l'utilizzo finale dell'energia, rispetto alla sua fonte di energia, rendendolo capace di mobilità.

Esso ristabilisce il proprio stato di carica venendo collegato a una stazione di ricarica/rifornimento per poi, scaricandosi, fornire energia al motore di trazione. Solo in alcuni casi, può ricaricarsi col veicolo in moto, sfruttando l'energia derivante dalla frenata rigenerativa o la produzione di un generatore a bordo. Essendo inserito nella serie di trasformazione dell'energia, può limitare l'energia o la potenza del veicolo, ovvero le prestazioni in termini rispettivamente di autonomia e accelerazione.

Per auto con motore termico, la capienza del serbatoio determina l'autonomia di viaggio senza rifornimenti (un serbatoio da 50 litri permette, anche nell'ipotesi pessimistica di 10 km percorsi con 1 litro di benzina¹, un'autonomia di 500 km, il che costituisce una reale limitazione solo in caso di viaggi estremamente lunghi e inefficienti in località non raggiunte dalla distribuzione di carburanti), mentre la potenza del veicolo è normalmente determinata dal dimensionamento del suo motore.

Per un'auto elettrica BEV, l'accumulatore limita sia l'autonomia del veicolo (secondo l'energia che riesce a immagazzinare) sia la sua potenza (tramite la massima corrente di scarica tollerata). La tecnologia attuale delle batterie le divide in batterie di potenza e di energia: le prime sopportano elevate correnti, ma non sono in grado di immagazzinare un'elevata energia; le seconde immagazzinano molta energia ma mal sopportano di essere caricate e scaricate velocemente; quindi un'auto elettrica alimentata con sole batterie sarà limitata, o nell'autonomia, o nelle velocità e accelerazioni massime raggiungibili. Una possibile soluzione è accoppiare dispositivi di accumulo di caratteristiche diverse, ad esempio una batteria ad elevata energia, per garantire l'autonomia, e un banco di supercondensatori, che assorbono e rilasciano la potenza in eccesso a quella sopportabile dalla batteria.[41]

Un'auto ibrida HEV può essere controllata di modo che il motore termico fornisca una potenza costante, che il motore elettrico fornisca i picchi di potenza in accelerazione, recuperi l'energia in frenata e, se previsto, supplisca all'intera potenza di trazione in condizioni di velocità ridotte (tragitti urbani). In questo caso, l'autonomia è determinata dal serbatoio scaricantesi sul motore termico, mentre la potenza esprimibile dal motore elettrico è limitata dalle correnti accettate dalla batteria sia in scarica che in carica.

¹ovvero un consumo di $10 \frac{l}{100km}$

B. Accumulatori

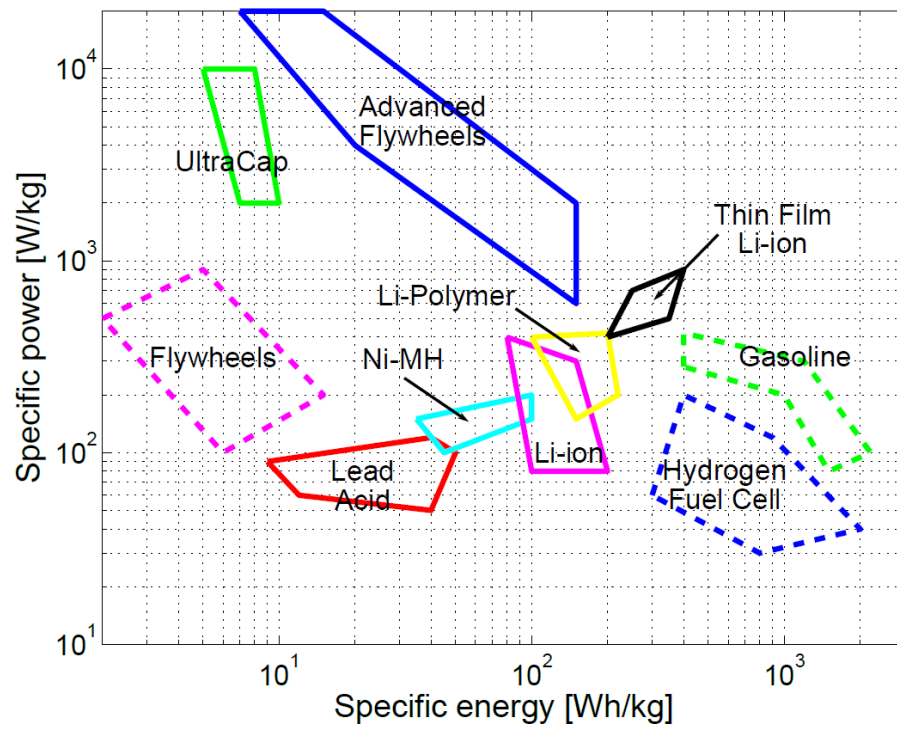


Figura B.1.: grafico di Ragone, rappresentante in scala doppio-logaritmica le densità di potenza ed energia di diverse tecnologie di accumulo[25]

B.1. Accumulatori elettrochimici

Un accumulatore elettrochimico (comunemente “batteria”) converte energia elettrica in energia chimica durante la fase di carica, e energia chimica in elettrica durante la scarica. Ogni batteria è composta da un collegamento serie/parallelo di varie celle: una cella è l’unità fondamentale che conserva tutte le proprietà elettrochimiche della batteria. Ogni cella è composta da due elettrodi, uno positivo e uno negativo (sulla superficie dei quali avvengono le reazioni di ossidoriduzione responsabili della conversione di energia), l’elettrolita, nel quale sono immersi gli elettrodi e disciolti gli ioni che reagiscono sugli elettrodi (assorbendo e rilasciando cariche elettriche), e un separatore poroso che impedisce agli ioni di migrare da un elettrodo all’altro, costringendoli a cedere la propria carica attraverso il circuito elettrico utilizzatore.

Quanto maggiore è la superficie degli elettrodi rispetto al volume dell’elettrolita contenuto nella cella, tanto più veloci sono gli ioni a migrare dall’elettrolita alla superficie elettrodica per reagire e cedere la propria carica; carica ceduta velocemente significa corrente elevata, pertanto per poter erogare e assorbire correnti/potenze elevate, sono necessari elettrodi estesi e affacciati, separati da un ridotto volume di elettrolita, di modo che il percorso di diffusione degli ioni reagenti sia minimo. Inoltre, elettrodi estesi presentano resistenza ridotta al transito di corrente, consentendo di raggiungere rendimenti di carica/scarica buoni anche con correnti elevate (perdite Joule $P_J = ESR \times I^2$, dove ESR sta per resistenza equivalente serie).

Quanto maggiore è il volume dell’elettrolita rispetto alla superficie degli elettrodi, tanto maggiore è l’energia stoccabile sotto forma di ioni disciolti; elevata energia stoccata significa maggiore autonomia per l’auto elettrica alimentata dalla batteria. Però un elevato volume di elettrolita significa un maggiore percorso medio per gli ioni che diffondono verso gli elettrodi, perchè non tutte le cariche della batteria sono possedute da ioni a ridosso della superficie degli elettrodi, quindi carica ceduta lentamente a elettrodi relativamente poco estesi significa correnti ridotte.

Pertanto, nel dimensionamento di una cella, ci si trova di fronte all’alternativa: se costruire una batteria

- con elevata energia ma potenza ridotta (molto elettrolita e elettrodi piccoli, relativamente);
- in grado di erogare potenze elevate per brevi periodi (elettrodi estesi e affacciati, immersi in uno scarso volume di elettrolita).

La tensione nominale di cella dipende dai rispettivi potenziali standard dei materiali costituenti gli elettrodi e dall’elettrolita, mentre la tensione effettiva di cella si discosta dalla nominale secondo la corrente e l’impedenza interna della cella, a sua volta funzione di temperatura, stato di carica e invecchiamento. Quindi ogni cella può essere rappresentata come un generatore reale di tensione, con tensione a vuoto e resistenza interna variabili. Infine, tensione e corrente ai morsetti del pacco batterie dipendono da come le celle sono collegate tra loro all’interno del modulo: in serie, per aumentare la tensione, o in parallelo, per aumentare la corrente.

B. Accumulatori

Chimica della cella	Energia specifica		Potenza specifica	Rendimento energetico	Costo batteria
	teorica	pratica			
	$\left[\frac{Wh}{kg}\right]$	$\left[\frac{Wh}{kg}\right]$	$\left[\frac{W}{kg}\right]$	$\frac{E_{out}}{E_{in}}$	$\left[\frac{\text{€}}{kWh}\right]$
Piombo-acido	170	35-50	150-400	$>80\%$	90-110
Ni-Cd	217	50-60	80-150	75	185-260
Ni-Fe	267	50-60	80-150	75	150-300
Ni-Zn	341	55-75	170-260	65	75-225
Ni-MH	387	79-95	200-300	70	150-260
Al-aria	2815	200-300	160	<50	?
Fe-aria	764	80-120	90	60	40
Zn-aria	888	100-220	30-80	60	70-90
Zn-Br	436	70-85	90-110	65-70	150-190
V	114	20-30	110	75-85	300-320
Na-S	760	150-240	230	80	190-340
Na-NiCl ₂	790	90-120	130-160	80	170-260
Li-FeS	650	100-130	150-250	80	80
Litio	320	80-130	200-300	>95	150*

Tabella B.1.: caratteristiche di alcune celle per accumulatori[7] *:valore ricavato in letteratura, inteso come previsione del prezzo nelle ipotesi di produzione in massa e sviluppo tecnologico

La tensione ai morsetti del pacco batterie varia quindi da un valore minimo, corrispondente al minimo stato di carica tollerabile dalla chimica della batteria, fino a un valore massimo corrispondente alla piena carica. Il processo di ricarica di un accumulatore viene solitamente diviso in due parti:

1. una a corrente costante e pari al massimo tollerato dalla batteria, durante la quale la tensione sale dal valore di inizio carica fin quasi al valore di piena carica;
2. una a tensione costante, durante la quale la tensione aumenta lentamente fino al valore massimo, mentre la corrente cala fino a un valore molto basso, detto *corrente di mantenimento*, necessario a controbilanciare le reazioni chimiche spontanee e mantenere lo stato di carica al suo valore massimo durante l'assestamento degli ioni nell'elettrolita.

In figura B.2 si possono distinguere le due fasi di carica, prima a corrente costante, poi a tensione costante; si può inoltre osservare come la ricarica possa avvenire a diversi valori di corrente nella prima fase (nel caso in figura, la cella ha una corrente nominale di ricarica di 40A), influenzando i tempi di ricarica:

- la ricarica a corrente nominale è caratterizzata da una fase a corrente costante di durata circa 60 minuti seguita da circa 25 minuti di fase a tensione costante;

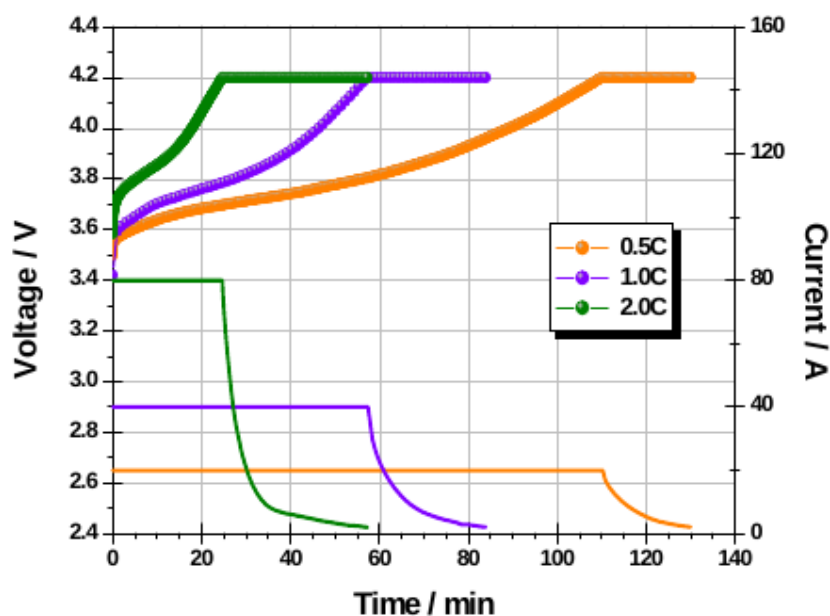


Figura B.2.: caratteristica di carica della cella Kokam SLPB 100216216H, estratto dal datasheet della cella

- la ricarica a corrente doppia ha una fase a corrente costante di 25 minuti e una a tensione costante di 30 minuti;
- la ricarica con corrente metà della nominale presenta una prima fase di durata 110 minuti a corrente costante, seguita da una fase a tensione costante di circa 20 minuti.

Si può osservare come, dimezzando la corrente di ricarica, la durata della fase a corrente costante raddoppi, mentre la durata dell'intero processo di ricarica aumenti solo del 50-55% (invece di raddoppiare), questo perchè la fase di ricarica a tensione costante mantiene una durata circa simile.

Ne consegue che la durata relativa della fase a tensione costante aumenta quanto maggiore è la corrente di ricarica, ovvero la velocità di ricarica desiderata; pertanto, volendo perseguire il risultato di una ricarica rapida (desiderabile per un veicolo elettrico con batterie ad autonomia ridotta, per le quali s'immaginano ricariche frequenti), si può ricaricare il pacco batterie alla massima corrente tollerata dallo stesso, e interrompere il processo al termine della fase a corrente costante; è intuibile come un tale maltrattamento della batteria ne degradi le prestazioni e la vita utile, al limite rendendo necessario l'acquisto di un nuovo pacco batterie prima del fine vita del veicolo. Consegue la necessità di raggiungere un compromesso tra l'aumento del costo totale sull'intero ciclo di vita del veicolo (comprendente l'eventuale sostituzione del pacco batterie) e la riduzione del tempo di ricarica (qualità diversamente contabilizzabile da ciascun cliente). A tale riguardo,

B. Accumulatori

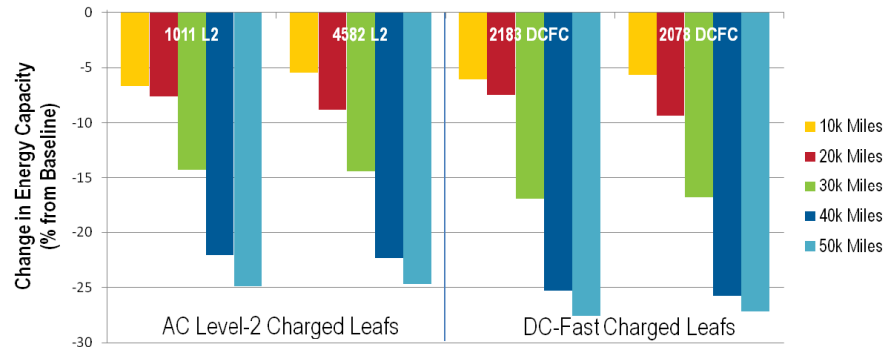


Figura B.3.: degrado della capacità dei pacchi batterie delle auto ricaricate in modalità “AC Level 2” (sinistra) e “DC fast charge” (destra), misurate a intervalli di 16000km (10k miglia)[35]

sono significativi i risultati di un esperimento [35] commissionato dal Dipartimento dell’energia statunitense e condotto dall’INL (Idaho National Laboratory) sulle strade di Phoenix (Arizona), consistente nel far circolare quattro veicoli identici (Nissan Leaf del 2012) e ricaricandone due in modalità “AC Level 2” (potenza massima dello standard 20kW) e gli altri due in modalità “DC fast charge” (potenza di ricarica 50kW). Come si può vedere dai risultati riportati in figura B.3, il degrado dell’autonomia delle batterie è maggiormente correlato con la percorrenza totale² che con la potenza di ricarica.

B.1.1. Piombo-acido

La tecnologia degli accumulatori a piombo-acido è stata scoperta a metà del 19° secolo e, per la sua robustezza, economicità, ampio intervallo termico di funzionamento e buon comportamento alle correnti impulsive, viene usata ancora oggi sulle auto a combustione interna per fornire gli impulsi di potenza necessari ad avviare il motore. Gli elettrodi sono composti di piombo, mentre l’elettrolita è acido solforico diluito: durante la scarica, gli elettrodi di piombo assorbono l’elettrolita mutandosi entrambi in solfato di piombo; durante la carica, il solfato torna all’elettrolita, mentre gli elettrodi tornano ad essere piombo elementare (anodo) e ossido di piombo (catodo). Non viene considerata una tecnologia applicabile alle auto elettriche, a causa della scarsa energia immagazzinata e del peso elevato.

B.1.2. Ni-MH

La tecnologia Ni-MH fa parte della famiglia delle alcaline, e pertanto impiega idrossido di nickel sull’elettrodo positivo, una lega metallica multicomponente sull’elettrodo

²l’esperimento è stato effettuato dal mese di ottobre 2012 al marzo 2014 nello stato di Arizona, il cui clima è senz’altro caldo (temperatura minima notturna a luglio 29°C): questo aspetto è particolarmente penalizzante per il pacco batterie della Nissan Leaf, che non è dotato di un sistema di raffreddamento a liquido delle batterie dal calore sviluppato durante la ricarica

negativo, e una soluzione alcalina come elettrolita. Della famiglia delle alcaline, la tecnologia Ni-Cd sta venendo gradualmente abbandonata per la tossicità del cadmio, mentre le Ni-Zn presentano una durata di vita insoddisfacente; al contrario, la tecnologia Ni-MH viene già usata sulle auto elettriche grazie alle buone densità di energia e potenza, al buon comportamento termico e alla sicurezza anche in condizioni estreme (tolleranza a cariche e scariche oltre i limiti consigliati).

Uno dei problemi di questa tecnologia è il prezzo elevato a causa dei metalli rari impiegati: a meno che non si riesca a sostituirli con alternative meno costose, o impiegarne un quantitativo inferiore, nemmeno la produzione su larga scala riuscirà a farne calare il prezzo.[18]

B.1.3. Li-ion

Al contrario, la prospettiva per la tecnologia agli ioni di litio è di riuscire ad abbassare i costi grazie alla produzione su larga scala: questo, insieme all'assenza di effetto memoria (problemi in presenza di cariche e scariche parziali), le elevate densità di potenza ed energia e all'elevata vita utile (in termini di cicli), rendono promettente il futuro di questa tecnologia; criticità che restano da risolvere sono la vita utile (in termini di anni), i costi e la sicurezza in presenza di temperature estreme o di cariche/scariche fuori dai limiti.[18]

Particolarmente critica è l'eventualità di un *thermal runaway* all'interno di una cella agli ioni di litio, il che rende necessario uno stringente controllo qualità sulla produzione delle celle, limitando le possibili economie della produzione in massa.

L'elettrodo positivo è formato da ossido di litio cobalto ($LiCoO_2$), l'elettrodo negativo da carbonio, e l'elettrolita da sali di litio disciolti in solvente organico.

È allo studio la sostituzione dell'elettrodo positivo da $LiCoO_2$ in litio ferro fosfato ($LiFePO_4$): la cella risultante ha una minore densità energetica, ma presenta rischi minimi per la sicurezza, grazie alla maggiore stabilità (chimica e di dilatazione termica) del litio ferro fosfato.

B.1.4. Li-Pol

Un'evoluzione della tecnologia Li-ion attualmente in via di perfezionamento è la tecnologia litio-polimero: l'elettrolita liquido viene sostituito da un polimero, che non presenta gli stessi rischi di infiammabilità. Gli elettrodi e il polimero elettrolita/separatore vengono sagomati in fogli molto sottili che vengono sovrapposti a formare la cella, la cui forma può essere scelta a seconda delle necessità.

B.1.5. NaNiCl2

Una tecnologia distinta, il cui brevetto è detenuto dall'italiana Fiamm, impiega sodio fuso come elettrodo negativo e cloruro di nickel come elettrodo positivo: le prestazioni sono paragonabili agli ioni di litio, ma i prezzi sono, in prospettiva, molto più competitivi, essendo la disponibilità dei costituenti la cella (sodio, alluminio e nickel) ben più abbondante di quella del litio. Questa tecnologia presenta lo svantaggio di impiegare

B. Accumulatori

un elettrolita che, per esser mantenuto in condizioni operative, cioè allo stato liquido, richiede che la temperatura di cella venga mantenuta tra i 250 e i 300°C: ciò necessita che, per mantenere la batteria carica quando il veicolo rimane spento per un periodo prolungato, venga dissipata energia su delle resistenze per mantenere la cella in temperatura, il che rende questa tecnologia preferibile solo per veicoli ad utilizzo continuativo. Infatti, nel caso di stop prolungati della batteria, è prevista la possibilità di comandare il *battery management system* (BMS, l'elettronica di controllo della batteria) di lasciar raffreddare la cella tramite dei transistori termici ed elettrici controllati; tenendo però presente che i transistori di raffreddamento e di riscaldamento hanno entrambi durate dell'ordine della decina di ore, s'intuisce come questa sia un'effettiva possibilità solo in caso di diversi giorni di inutilizzo preventivato del mezzo, durante i quali il veicolo non può essere utilizzato.

B.2. Serbatoio di combustibile liquido

La benzina, caratterizzata da potere calorifico inferiore di circa $42 \frac{MJ}{kg}$ ($11.7 \frac{kWh}{kg}$) e una densità di $750 \frac{kg}{m^3}$ ($42 \frac{MJ}{kg} \times 0.75 \frac{kg}{l} \simeq 32 \frac{MJ}{l}$), ha caratteristiche migliori delle batterie sia sotto l'aspetto della densità (per unità di massa e di volume) di energia e di potenza, che del prezzo del sistema di accumulo: un serbatoio da 50 litri è in grado di contenere $50l \times 0.75 \frac{kg}{l} \times 11.7 \frac{kWh}{kg} = 438.75 kWh$ di energia sotto forma di combustibile (garantendo quindi un'autonomia di circa 600 km, con un'efficienza serbatoio-ruote di $1.4 \frac{km}{kWh}$, vedi sezione 2.1), con un prezzo irrisorio del dispositivo di accumulo (serbatoio) in termini di € per kWh stoccabile.

B.3. Serbatoio d'idrogeno

L'idrogeno è l'elemento più abbondante nell'universo (ma non è disponibile sulla terra allo stato libero, da cui il problema di doverlo produrre consumando energia), nonché il più leggero: usato come combustibile, ha il pregio di un elevatissimo potere calorifico inferiore ($120 \frac{MJ}{kg}$), superiore anche a quello della benzina, senza emissioni inquinanti (l'unico prodotto di scarto della sua combustione è l'acqua). D'altronde, la sua densità volumetrica di energia è bassa (tra 5 e $8 \frac{MJ}{l}$ a seconda della tecnologia), risulta difficile da stoccare in sufficienti quantità occupando volumi non eccessivi, di qui la necessità di impiegare serbatoi di gas idrogeno in pressione oppure serbatoi termicamente controllati di idrogeno liquido. L'idrogeno può essere sia bruciato in un motore a combustione interna, che convertito in elettricità in una cella a combustibile.

B.4. Supercondensatori

I supercondensatori presentano capacità estremamente elevate (da decine a migliaia di F), il che permette loro di accumulare molta carica (grazie alla struttura microporosa degli elettrodi) anche con tensioni ridotte (da 2-3 a poche centinaia di V). Inoltre la

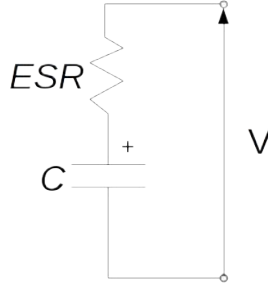


Figura B.4.: circuito elettrico equivalente di un (super)condensatore

loro ESR molto bassa, dovuta all'elevata sezione degli elettrodi, permette l'erogazione di elevate correnti con rendimenti elevati.

A corrente nulla, l'energia immagazzinata nel condensatore vale

$$E_{UC}(t) = \frac{1}{2} C V(t)^2$$

solitamente si sceglie di non scaricare il condensatore fino a tensione nulla, ma da V_{max} a $\frac{V_{max}}{2}$, con un energia utilizzabile di

$$E_{util} = \frac{1}{2} C V_{max}^2 - \frac{1}{2} C \left(\frac{V_{max}}{2} \right)^2 = \frac{3}{8} C V_{max}^2 = \frac{3}{4} E_{UC,max}$$

La corrente di scarica di un condensatore vale (con riferimento alla figura B.4, con V_{C0} la tensione del condensatore a vuoto a inizio scarica e $\tau = (ESR + R_{load})C$ la costante di tempo del circuito):

$$i(t) = \frac{V_{C0}}{ESR + R_{load}} e^{-\frac{t}{\tau}}$$

la potenza erogata sul carico risulta:

$$P_e(t) = R_{load} \times i(t)^2 = R_{load} \left(\frac{V_{C0}}{ESR + R_{load}} e^{-\frac{t}{\tau}} \right)^2 = R_{load} \left(\frac{V_{C0}}{ESR + R_{load}} \right)^2 e^{-2\frac{t}{\tau}} \quad (B.1)$$

Entrambe le grandezze (corrente e potenza, i cui andamenti sono riportati nel grafico in figura B.5) decadono nel tempo con legge esponenziale, quindi la potenza erogata al carico assume valore massimo nell'istante iniziale della fase di scarica, per $t = 0$:

$$P_e(0) = R_{load} \left(\frac{V_{C0}}{ESR + R_{load}} \right)^2 = V_{C0}^2 \frac{R_{load}}{(ESR + R_{load})^2} \quad (B.2)$$

Il produttore (Maxwell Technologies, per esempio) dichiara tra le specifiche del super-

B. Accumulatori

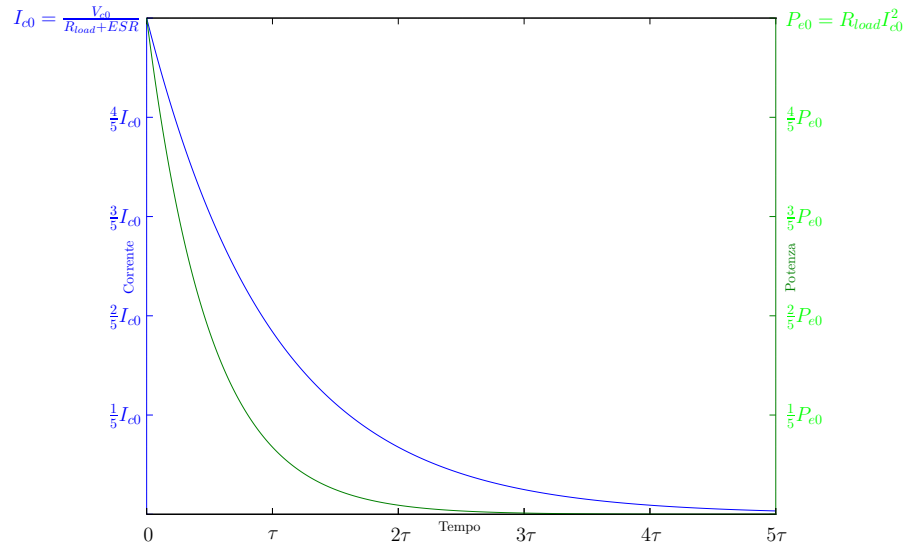


Figura B.5.: andamento di corrente e potenza erogate da un condensatore

condensatore, la potenza massima con la formula

$$P_{max} = \frac{V_{C0}^2}{4 \times ESR}$$

che rappresenta la potenza massima teorica, erogabile solo nei primissimi istanti (sostituendo $t = 0$ nella formula (B.1), il risultato è riportato nella formula (B.2)) e con $R_{load} = ESR$ (carico adattato); nel caso di un veicolo, in cui il supercondensatore è chiamato a erogare/assorbire i picchi di potenza di trazione, non si può dimensionare il supercondensatore immaginando che sia in grado di erogare con continuità la propria potenza massima: sarà necessario o sovradimensionare il banco di supercondensatori (appesantendo l'auto e peggiorando di conseguenza i consumi), oppure accettare che anche la batteria assorba/eroghi una quota di questa componente variabile della potenza di trazione.

Bibliografia

- [1] Indagine Isfort (Istituto superiore di formazione e ricerca per i trasporti), “*Audimob della mobilità 2011*”
- [2] IEA, “*CO2 EMISSIONS FROM FUEL COMBUSTION Highlights*” (2013 Edition)
- [3] R. Agnolin, “*Il confronto tra i rendimenti dalla fonte alla ruota per: 1. auto con motore endotermico 2. auto elettrica 3. auto con idrogeno e fuel cell*”, tesi di laurea, relatore prof. Arturo Lorenzoni, Università degli Studi di Padova, anno accademico 2009/2010
- [4] “*Our common future*”, Bruntland report, United Nations 1987
- [5] “*Italia in cifre*”, Istat 2011
- [6] <http://www.epa.gov/nvfel/testing/dynamometer.htm>
- [7] Mehrdad Ehsani, Yimin Gao, Ali Emadi, “*Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles*”, CRC Press 2010
- [8] Oscar P.R. van Vliet, Thomas Kruithof, Wim C. Turkenburg, André P.C. Faaij, “*Techno-economic comparison of series hybrid, plug-in hybrid, fuel cell and regular cars*”, Journal of Power Sources 195 (2010) 6570–6585
- [9] “*Rapporto statistico UE27 Settore elettrico*”, Gestore Servizi Energetici, 22/01/2013 (dati 2010)
- [10] “*Energy, transport and environment indicators*”, Eurostat, 2013 (dati 2011)
- [11] Benjamin K. Sovacool, “*Valuing the greenhouse gas emissions from nuclear power: A critical survey*”, Energy Policy 36 (2008) 2940–2953
- [12] C. Artioli, C. Bustreo, G. Meneghini, C. Petrovich, I. Vignotto, G. Zollino, “*Una mappa delle emissioni specifiche e del costo medio di generazione di diversi mix elettrici*”, Report RdS/2013/062, Ricerca di Sistema Elettrico
- [13] “*Fattori di emissione di CO2 nel settore elettrico e analisi della decomposizione delle emissioni*”, ISPRA Istituto superiore per la protezione e la ricerca ambientale, rapporto 172/2012
- [14] Shiau, Samaras, Hauffe, and Michalek, “*Impact of Battery Weight and Charging Patterns on the Economic and Environmental Benefits of Plug-in Hybrid Vehicles*”, 2009 Annual Meeting of the Transportation Research Board

Bibliografia

- [15] N. Bonfante, “*Confronto tecnico-economico tra le tecnologie per l’accumulo elettrochimico di energia per la trazione elettrica*”, tesi di laurea, relatore prof. Arturo Lorenzoni, Università degli Studi di Padova, anno accademico 2009/2010
- [16] J. Turner et al. (Lotus engineering), “*The Lotus Range Extender Engine*”, SAE Int. J. Engines, vol.3, 2010
- [17] H. Herzog, “*State of the art of Hybrid Electric Vehicles, atti del convegno 'Ac Motor drives. More electric vehicles: Sistemi elettromeccanici ed elettronici per una mobilità efficiente, sostenibile e sicura'*”, a cura di Fondazione Giacomo Rumor - Centro Produttività Veneto (CPV)
- [18] S.M. Lukic, J. Cao, R.C. Bansal, F.Rodriguez, A.Emadi, “*Energy storage systems for automotive applications*”, IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS, VOL. 55, NO. 6, JUNE 2008
- [19] C.C. Chan, “*The state of the art of electric and hybrid vehicles*”, PROCEEDINGS OF THE IEEE, VOL. 90, NO. 2, FEBRUARY 2002
- [20] <http://www.fiatusa.com/assets/pdf/FIAT-500e-Pass-Program-Official-Rules.pdf>
- [21] Marc Ross, “*Fuel efficiency and the physics of automobiles*”, Contemporary physics 38, 6, 1997
- [22] T.R. Hawkins et al., “*Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicle*”, Journal of industrial ecology, volume 17, numero 1, 2012
- [23] Battery swap, www.teslamotors.com/batteryswap
- [24] C. Soares, “*Microturbines*”, Elsevier, 2007
- [25] Morandin, M.; Ferrari, M.; Bolognani, S.; “*Design and performance of a power train for mild-hybrid motorcycle prototype*”, Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2013 IEEE International
- [26] Michele de Nigris, “*Rapporto di sintesi del progetto: impatto sul sistema elettrico della potenziale diffusione dei veicoli elettrici. Piano Annuale di Realizzazione 2011*”, 31/03/2012, Ricerca sul Sistema Energetico
- [27] A. Cavallini e L. Mattarolo, “*Termodinamica applicata*”, CLEUP 1990
- [28] Documento tecnico consorzio CORILA, Consorzio per il coordinamento delle ricerche inerenti al sistema lagunare di Venezia
- [29] N.S. Pearre et al., “*Electric vehicles: How much range is required for a day's driving?*”, Transportation Research Part C, Elsevier, 2011
- [30] R. Della Volpe, “*Impianti motori per la propulsione navale*”, Liguori, Napoli 1989

- [31] " *Studie zu Range Extender Konzepten für den Einsatz in einem batterieelektrischen Fahrzeug - REXEL*", Ministero delle Finanze del Baden-Württemberg e Istituto dei veicoli prototipo del Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2012
- [32] M. Andriollo, G.A. Martinelli, A. Morini, " *Macchine elettriche rotanti*", Libreria internazionale Cortina, Padova 2009
- [33] S. Bolognani, Dispense per il corso di Azionamenti elettrici
- [34] Morandin, M. ; Faggion, A. ; Bolognani, S.; " *Different torque damping by a constant speed SPM machine drive in domestic cogeneration system*", Electric Machines & Drives Conference (IEMDC), 2013 IEEE International
- [35] <http://avt.inl.gov/energystoragetesting.shtml>, Advanced Vehicle Testing Activity, Idaho National Laboratory
- [36] La Commissione UE propone un obiettivo del 30% (non vincolante) per l'efficienza energetica, redazione del blog di Assoelettrica, <http://www.assoelettrica.it/blog/?p=11479>
- [37] A. Heron, F. Rinderknecht, " *Comparison of range extender technologies for battery electric vehicles*", 2013 8th International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies (EVER)
- [38] Dati tecnici del reformer Nuvera PowerTap, <http://www.nuvera.com/products-services/powertap-hydrogen-generation-appliance-rc/industrial-gas>
- [39] <http://adv-vehicle-sim.sourceforge.net/>
- [40] <http://www.longpowers.com/index.php/en/producten/lithium-ion-battery-packmodule/electric-vehicle-battery-pack-and-module>
- [41] I. Aharon, A. Kuperman, " *Topological overview of powertrains for battery-powered vehicles with range extenders*", IEEE Transactions on power electronics, vol.26, no.3, 868-876, marzo 2011
- [42] V. Smil, " *The long slow rise of solar and wind*", Scientific american, pp.52-57, January 2014
- [43] the Keeling curve, Scripps institution of oceanography, University of California San Diego, <https://scripps.ucsd.edu/programs/keelingcurve/>
- [44] " *Energy Policies of IEA Countries. Norway. 2011 Review*", IEA

Ringraziamenti

“*Nessuno nasce imparato*”: ciò che sono diventato all’età di 24 anni, è ormai senz’altro opera più dell’ambiente che dei geni.

Innanzitutto, la tanto vituperata scuola pubblica italiana da cui mi appresto ad uscire: voglio ringraziare insegnanti e compagni che mi hanno accompagnato, nel bene e nel male. Ciascuno a modo suo, mi hanno messo in guardia dal dedicare troppo tempo allo studio: due nomi per tutti, Vise e Pass (appunto, ciascuno a modo suo!). Ringraziamento doveroso al mio relatore, prof. Bognani, a Mattia, e a tutti gli abitanti del laboratorio di azionamenti elettrici.

Un ringraziamento immancabile alla mia famiglia: soprattutto a mia mamma e mia sorella perchè più a lungo mi hanno dovuto sopportare, in particolare a mia mamma perchè a lei è toccata la mansione più dura; a mio papà per l’esempio di vita e la biblioteca tecnica. Il mondo pullula di esempi di come l’esistenza di un essere divino onnisciente, onnipotente e anche infinitamente buono sia una favola: lui è il mio.

Ai miei compagni di squadra, che mi hanno iniziato all’arte dell’invocazione quotidiana a qualunque essere pretestuosamente innalzato dagli umani al rango ultraterreno (inclusi gli animali da fattoria che con spirito lodevole offrono la loro stessa carne per rinfrancare il corpo e lo spirito di noi umani, un ringraziamento anche a loro!), e tuttora indefessi mi accompagnano verso le vette di quest’arte terapeutica.

A Silvia, infaticabile compagna, senza il cui sorriso la vita sarebbe tanto difficile da sopportare.