

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA



FACOLTÀ DI INGEGNERIA
CORSO DI LAUREA IN INGEGNERIA DELL'INFORMAZIONE

Modellizzazione ed ottimizzazione di un powertrain ibrido

Relatore:

Ch.mo Prof. Luca SCHENATO

Laureando:

Gianluca BIANCHIN

Anno Accademico: 2011/2012

26 Luglio 2012

Alla mia famiglia, che mi ha dato l'opportunità di proseguire gli studi
e che mi ha sempre sostenuto in ogni mia scelta.

Indice

Prefazione	i
1 Introduzione	1
1.1 Mobilità sostenibile	2
1.1.1 Il problema	2
1.1.2 Le popolazioni, i trasporti e l'ambiente	2
1.2 Cenni storici	4
1.3 Lo stato dell'arte degli HEV	4
1.4 Organizzazione della Tesi	5
1.5 Simboli Impiegati	6
2 Il veicolo ibrido	7
2.1 Classificazione dei veicoli	7
2.1.1 I veicoli tradizionali	7
2.1.2 I veicoli elettrici	7
2.1.3 I veicoli ibridi elettrici	8
2.2 Ibrido serie ed ibrido parallelo	8
2.2.1 HEV Serie	9
2.2.2 HEV Parallelo	11
3 Il veicolo di riferimento e le normative	15
3.1 Dimensionamento del veicolo	15
3.2 Cicli normalizzati Europei	19
3.2.1 Analisi teorica	19
3.2.2 Drive cycles Europei	19
4 Modellizzazione del power-train	23
4.1 Dinamica longitudinale	23
4.1.1 Attrito aerodinamico	24
4.1.2 Attrito volvente	24
4.1.3 Inerzia in salita	25
4.2 Modello del motore a combustione	26
4.2.1 Motivazione al metodo quasi statico	27
4.2.2 Rappresentazioni dell'efficienza	30
4.3 Modello della macchina elettrica	33

4.3.1	Descrizione	33
4.3.2	Mappa reale e modello	33
4.4	Modello delle batterie	35
4.4.1	Modello coulometrico	36
4.4.2	L'equalizzazione	37
4.4.3	Il modello	37
4.5	Modello della trasmissione	38
4.5.1	Il differenziale	38
4.5.2	Il cambio	38
4.5.3	Il ripartitore di coppia	39
5	Le strategie di controllo e l'ottimizzazione	43
5.0.4	Obiettivo	43
5.1	Le strategie di controllo per l'architettura parallelo	44
5.1.1	Tipi di strategie di controllo	45
5.2	Strategie basate su regole	45
5.2.1	Strategie di controllo basate su regole deterministiche	45
5.2.2	Cenno alla logica fuzzy	48
5.3	Strategie basate sull'ottimizzazione	49
5.3.1	Ottimizzazione con funzionale di costo	49
5.3.2	Strategie di ottimizzazione in real-time	50
5.4	Strategia del punto ottimo di funzionamento	51
5.4.1	Descrizione	51
5.4.2	Ripartizione della coppia	52
5.4.3	Soluzione al problema con Matlab	54
5.5	Conclusioni	59
A	Appendice - Codice Matlab	63
A.1	Codice Matlab che disegna la mappa dei consumi del motore termico	63
A.2	Codice Matlab che disegna la mappa del rendimento del motore termico	64
A.3	Codice Matlab che calcola i nuovi punti di lavoro	66
A.4	Codice Matlab che calcola il coefficiente di controllo u_p	71
	Bibliografia	73

Prefazione

Nel mondo si stima la presenza di circa 750 milioni di veicoli, nell'UE i trasporti dipendono dal petrolio e dai prodotti derivati per oltre il 96% del proprio fabbisogno energetico¹. Nonostante la loro diffusione su larghissima scala e gli investimenti fatti nella ricerca, i motori a combustione interna impiegati nelle automobili sono ancora oggi afflitti da molti difetti quali il basso rendimento ed il forte legame tra il punto di funzionamento e l'efficienza, aspetti che penalizzano consumi e prestazioni. Oltre ai bassi rendimenti che li caratterizzano, c'è da considerare un altro aspetto di primaria importanza: questo tipo di motori sono alimentati da combustibile fossile. Da questo punto di vista si evidenziano due problemi che ormai sono all'ordine del giorno nella politica degli stati industrializzati: quello dell'inquinamento atmosferico e quello del reperimento delle risorse combustibili.

Negli ultimi anni è stata rivolta grande attenzione politica verso le problematiche ambientali e le politiche volte allo sfruttamento delle risorse non rinnovabili, quale il petrolio. Da un punto di vista ambientale gli accordi internazionali impongono drastiche riduzioni delle emissioni inquinanti; mentre da un punto di vista economico e politico la riduzione dei consumi di carburante diminuirebbe la dipendenza da scorte petrolifere via via in esaurimento.

I veicoli elettrici rappresenterebbero l'unica alternativa per raggiungere l'ideale di una mobilità "pulita" ossia completamente priva di emissioni inquinanti. Tuttavia, nella sua recente storia, la tecnologia completamente elettrica con alimentazione a batteria è stata (ed è) utilizzata sempre laddove non interessa avere prestazioni oppure una elevata autonomia di viaggio. Nonostante il salto tecnologico dell'elettronica abbia permesso nell'ultimo decennio di migliorare notevolmente le prestazioni di questa nuova generazione di automobile, esse risultano ancora poco presenti nel mercato perché il problema da surclassare è quello di disporre di batterie con capacità di immagazzinare energia per il moto paragonabile a quella dei combustibili fossili.

La soluzione intermedia proposta dalle case automobiliste sembra essere quella della propulsione ibrida. Mentre i veicoli elettrici richiedono ancora notevoli avanzamenti tec-

¹Fonte: Energy and Transport in Europe – Statistical Pocketbook 2010. (Energia e trasporti in Europa - Taccuino statistico del 2010).

nologici per essere competitivi, i veicoli ibridi (HEV, Hybrid Electric Vehicle) possono già garantire un'autonomia energetica soddisfacente e livelli di inquinamento estremamente bassi.

I veicoli HEV possono essere impiegati come soluzione temporanea in attesa dello sviluppo di sistemi di propulsione drasticamente innovativi e in grado di svincolarsi definitivamente dai problemi legati ai carburanti fossili.

Capitolo 1

Introduzione

Sebbene i veicoli ibridi elettrici HEV esistano da sin prima del 1900, negli ultimi 15-20 anni l'interesse per questo tipo di tecnologia è fortemente cresciuto; questo passo in avanti della tecnologia promette grosse aspettative perché a breve termine sembra sanare molti dei problemi legati alla produzione di energia per mezzo dei derivati del petrolio.

Il motivo principale che incentiva l'impiego di questi veicoli è che permettono di aumentare l'efficienza del powertrain di un'auto tradizionale riducendo gli sprechi; e perciò sono in grado di ridurre le emissioni di gas inquinanti. Per powertrain (o powerplant) si intende il gruppo di componenti che generano la potenza in un qualsiasi veicolo e la trasmettono alle ruote. Questo dunque solitamente include i motori, la trasmissione, il cambio, i differenziali e le ruote.

Nei veicoli convenzionali (con ciò intendendo automobili dotate solamente di motore termico) che utilizziamo tutti i giorni, la potenza meccanica è fornita esclusivamente dalla combustione del carburante; mentre in veicoli a tecnologia ibrida un motore termico combinato con una addizionale sorgente di energia (solitamente un motore elettrico supportato da batteria elettrochimica) uniscono la loro azione per generare il moto dell'auto.

La modalità con cui l'energia meccanica proveniente dai due propulsori viene combinata per fornire la trazione del veicolo è determinata da un apposito processo di controllo della vettura, solitamente riferito con il nome di *Energy Management Problem*.

Confrontato con un motore termico un sistema a propulsione ibrida può risparmiare energia per i seguenti motivi:

- un veicolo ibrido può recuperare parte dell'energia cinetica altrimenti persa durante la frenata;
- un veicolo ibrido può spegnere il motore a combustione durante le fasi in cui esso viene impiegato a regime minimo: situazioni in cui solitamente i motori termici hanno bassissima efficienza;
- esso può ottimizzare le fasi a basso rendimento del motore a combustione spostando il suo punto di funzionamento.

Tutte queste situazioni sono permesse grazie alla capacità di immagazzinare energia nelle batterie, che consentono di recuperare energia nelle fasi in cui questa altrimenti verrebbe

dissipata per poi utilizzarla nei momenti di necessità. Con ciò intendendo i momenti in cui il motore termico lavorerebbe con rendimenti eccessivamente bassi.

Il miglioramento nell'economia del carburante dipende fortemente dal tipo di veicolo, dal ciclo di guida che sta effettuando e soprattutto dal sistema di controllo nell'utilizzo del mix delle due fonti di potenza. Il risparmio in termini percentuali può andare dal 10% da parte dei *mild hybrid*¹ fino a oltre il 30% per veicoli *full hybrid*².

1.1 Mobilità sostenibile

Il possesso di un'auto personale offre all'uomo la possibilità di spostarsi dovunque ed in ogni momento. Purtroppo però questo elevato grado di mobilità che viene offerto alla nostra società, paga l'ambiente in maniera negativa e preoccupa l'eco-sostenibilità del pianeta.

1.1.1 Il problema

L'attuale modello del sistema di trasporto persone non è evidentemente sostenibile nel lungo termine a causa delle limitate riserve di combustibile fossile di cui dispone la terra, il quale esaudisce il 97% del fabbisogno complessivo di energia da parte dell'uomo. Possiamo catalogare le fonti energetiche messe a disposizione dal nostro pianeta come: energia rinnovabile, carburanti fossili(o energia non rinnovabile) ed energia nucleare.

La qualità dell'aria, l'effetto serra, il sempre più difficile reperimento di petrolio ed il conseguente aumento del prezzo della benzina hanno spinto sempre più alla ricerca di alternative eco-sostenibili, obbligando l'uomo a spostarsi dalle fonti non rinnovabili verso quelle rinnovabili. Il problema è evidente, ed è quello che una alternativa completamente "pulita" ai combustibili fossili ancora non è stata trovata. Queste tre categorie di energia sono il fulcro dell'economia del mondo e messe a confronto, come ben sappiamo, presentano ognuna i propri pregi e i propri difetti delineando un panorama politico mondiale che è ancora alla ricerca di un punto di equilibrio tra rendimento e sostenibilità della fonte energetica.

1.1.2 Le popolazioni, i trasporti e l'ambiente

La popolazione mondiale è in rapida crescita come mostrato in 1.1 e si prevede che tale andamento proseguirà almeno sino al 2050. Risulta una chiara correlazione tra la crescita demografica e il numero di veicoli venduti in un anno.

¹per *mild hybrid* si intende "ibridazione leggera", allorché il modo di funzionamento puramente elettrico non è in grado di seguire per intero un ciclo di guida normalizzato

²per *full hybrid* si intende "ibridazione piena", allorché il sistema elettrico è in grado da solo di far avanzare il veicolo su un ciclo di guida normalizzato, pur prescindendo dall'autonomia delle batterie

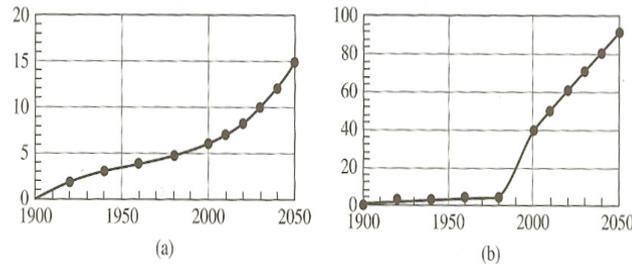


Figura 1.1: (a) Trend di crescita della popolazione degli USA in Miliardi (b) milioni di auto passeggeri vendute in un anno

L'Italia è la nazione con la maggior concentrazione al mondo di veicoli a motore rispetto al numero di abitanti. Le auto dunque continuano a crescere soprattutto nella nostra realtà. Nel 2000 circolavano 32,5 milioni di macchine, con una densità media di 56,5 auto ogni 100 abitanti; nel 2011 si stima la presenza di quasi 800 milioni di auto nel mondo. L'anidride Carbonica (CO_2) e il Monossido di Carbonio (CO) sono alla base dell'effetto serra e dell'aumento delle malattie respiratorie, allergie e patologie varie. La naturale presenza di questi gas è da anni profondamente alterata dalla combustione degli idrocarburi che, in varie forme e per vari usi (dal trasporto civile al riscaldamento domestico, passando per la produzione industriale), sono ormai divenuti la nostra fonte primaria di energia.

I trasporti costituiscono dunque una grande incognita per il futuro. In questo momento il mercato dell'auto dipende quasi esclusivamente dai combustibili fossili (il 98% dei trasporti terrestri dipende unicamente dai combustibili fossili) mentre si stima che il 67% della domanda finale di petrolio è richiesta dal settore dei trasporti. Gli accordi stipulati per la riduzione delle emissioni di gas inquinanti richiedono che anche il settore del trasporto turistico si adegui per cercare di ridurre l'inquinamento del pianeta.

Una soluzione che sta prendendo piede negli ultimi anni è quella del veicolo elettrico EV (Electric Vehicle) ovvero un'auto in grado di funzionare unicamente tramite l'energia fornita da degli accumulatori montati nel powertrain, e ricaricate mediante delle colonnine elettriche distribuite sulla superficie nazionale.

Purtroppo questa soluzione che potenzialmente potrebbe essere pulita al 100% è penalizzata per via del fatto che la maggior parte dell'elettricità distribuita nella rete nazionale è oggi prodotta con fonti fossili, e perciò comporta lo stesso problema delle emissioni rimandandolo solo alla centrale.

Inoltre un altro inconveniente che si presenta è quello degli accumulatori. Nonostante essi non presentino capacità energetiche paragonabili a quelle del combustibile fossile e quindi limitino la mobilità della vettura, gli accumulatori presentano l'ulteriore problema dello smaltimento al termine della loro vita. Come ben noto lo smaltimento comporta elevati costi per rendere inerte il litio, nonostante esso arrechi lo stesso dei danni all'ambiente.

L'invenzione dell'automobile ha dunque dato un grande contributo alla crescita della società, sin dal principio ha permesso lo spostamento di uomini e mezzi, consentendo lo sviluppo di un'economia sempre più internazionale e complessa. Il rapido sviluppo dell'industria

automobilistica ha consentito alla popolazione mondiale un altrettanto rapido ammodernamento sino agli evoluti mezzi di trasporto del giorno d'oggi, che purtroppo però hanno generato una forte dipendenza dai combustibili fossili da parte dei paesi industrializzati e contemporaneamente un grosso problema ambientale.

In pratica la direzione verso la quale dobbiamo muoverci, è quella della ricerca di modalità di trasporto e movimentazione di merci e persone che rispettino i principi dello sviluppo sostenibile: mantenere le entità inquinanti entro i limiti che il pianeta può assorbire; utilizzare il più possibile risorse rinnovabili cercando di ridurre al massimo lo sfruttamento di quelle non rinnovabili.

Le necessità spingono quindi nella direzione della mobilità sostenibile, cioè verso un sistema di trasporti organizzato, che offra mezzi e opportunità per soddisfare i bisogni economici, sociali e ambientali in maniera efficiente.

1.2 Cenni storici

La storia dell'auto ibrida è strettamente legata a quella del veicolo elettrico, gli studi su di esse sono cominciati naturalmente con l'affiorare delle innovazioni nel campo dell'elettronica. L'auto elettrica fu una tra i primi tipi di automobile ad essere inventata. Tra il 1832 ed il 1839, lo scozzese R. Anderson ideò la prima carrozza elettrica. Il professore Sibrandus Stratingh di Groningen, in Olanda, progettò una piccola auto elettrica, costruita insieme al suo assistente Christopher Becker nel 1835. Il miglioramento delle batterie, dovuto ai francesi Gaston Plante nel 1865 e Camille Faure nel 1881, consentì il fiorire dei veicoli elettrici. Francia e Gran Bretagna furono le prime nazioni testimoni dello sviluppo del mercato delle auto elettriche. Ferdinand Porsche nel 1898 costruì probabilmente la prima HEV della storia, utilizzando un motore termico per alimentare un generatore che forniva la coppia alle ruote. Solamente a partire dai primi del '900 la prima auto ibrida fu commercializzata, introdotta nel mercato da un costruttore Belga; la "Voiturette" fu la prima HEV in commercio della storia. Lo sviluppo della tecnologia ibrida, insieme a quella puramente elettrica declinò negli anni 30, surclassate dal mercato delle auto con motore a combustione che promettevano prestazioni notevolmente migliorate.

Solamente a partire dagli anni 90 la tecnologia ibrida è stata riconsiderata, quando i costi e le forniture del petrolio hanno finalmente cominciato a penalizzare l'utilizzo dei motori a benzina. Le case automobilistiche hanno finalmente investito in questo nuovo tipo di tecnologia, sino ai giorni nostri dove il mercato presenta un'ampia scelta di vetture, che sembra essere l'unica possibile soluzione al problema dell'oro nero nell'immediato futuro.

1.3 Lo stato dell'arte degli HEV

Negli ultimi 10 anni, molte case automobilistiche si sono indirizzate verso lo sviluppo della tecnologia ibrida. La figura 1.2 mostra l'andamento della vendita di HEV negli USA negli anni 2000 e risulta evidente che il numero è aumentato significativamente solo di recente.

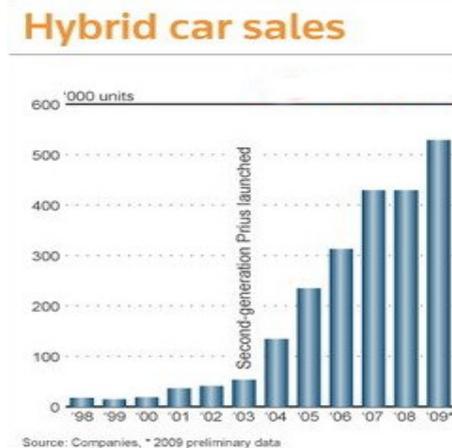


Figura 1.2: Trend del numero di HEV vendute negli USA

Un importante osservazione è che la maggior parte delle vendite delle attuali auto ibride in commercio appartiene al marchio Toyota che, con il lancio della Prius, ha dato un importante slancio a questo nuovo mercato, creando un vero e proprio modello di auto ad alimentazione mista. Un breve confronto va fatto anche per quanto riguarda il prezzo di mercato. Si stima che nel 2012 il prezzo dell'alimentazione ibrida è solamente il 20% in più rispetto al costo di produzione di una identica auto ad alimentazione convenzionale. I passi in avanti svolti da questa nuova tecnologia permettono però un efficace miglioramento per quanto riguarda i risparmi soprattutto nei cicli urbani.

Presentiamo brevemente qualche modello di auto ibrida presente nel mercato attuale. È già stata citata e rappresenta il modello in tutto il mondo di automobile ibrida la Toyota Prius, a cui il marchio Giapponese nel 2012 ha affiancato altri due modelli: la Auris e la Yaris. Altri modelli che possiamo citare sono ad esempio la Honda Civic che propone l'alimentazione ibrida con il solo obiettivo di aumentare le prestazioni del motore termico in termini di accelerazione e velocità di punta. Da ricordare molti altri produttori che incentivano questa tecnologia come Lexus, Ford, Peugeot ecc. Infine citiamo il nuovo progetto di casa Peugeot: la 4008 "Hybrid 4", la prima auto ibrida nel mercato ad alimentazione diesel.

1.4 Organizzazione della Tesi

La presente trattazione si pone l'obiettivo di studiare l'ottimizzazione di un'auto a tecnologia ibrida. In particolare l'obiettivo principale sarà quello di sviluppare un sistema di controllo in real time, volto a minimizzare gli istanti in cui il motore a combustione si trova in punti di bassa efficienza.

Verranno presentate nel capitolo 2 le varie tipologie con cui possiamo implementare un powertrain ibrido. Insieme verranno qui confrontate le prestazioni dell'alimentazione mista con quelle di un veicolo convenzionale.

Nel capitolo 3 saranno esposti i problemi relativi alla scelta delle caratteristiche dell'auto che si sono presentati nello studio del modello. Saranno effettuati degli studi analitici per ottimizzare tali scelte, fino alla decisione di prendere un generico veicolo di riferimento con le

stesse caratteristiche tecniche utilizzate nella Toyota Prius. Saranno poi presentati i cicli di guida omologati dall'UE per lo sviluppo e lo studio dei consumi nel settore dell'automotive.

Il capitolo 4 si occupa di creare il modello per il powertrain dell'auto, e studierà nel particolare tutti i componenti necessari a generare il moto di un generico powertrain. In particolare avremo bisogno del modello della dinamica longitudinale, ossia l'insieme delle relazioni fisiche agenti sulla vettura durante il suo moto, il modello del motore termico, il modello del motore elettrico, il modello delle batterie e infine un modello per tutti i componenti che si occupano di trasmettere la potenza alla gomma. Tutte queste descrizioni saranno indispensabili per andare a studiare precisamente come implementare una strategia di controllo.

Il capitolo 5 infine si occupa dello studio della vera e propria strategia sul controllo del powertrain. Saranno innanzitutto introdotte le principali modalità di controllo impiegate nelle auto in commercio, per poi concludere descrivendo la strategia oggetto della tesi, che verrà chiamata *Strategia del punto ottimo di funzionamento*. Con questa idea intendiamo rendere massima l'efficienza in ogni istante del ciclo di guida per cercare di ottenere le prestazioni ottime da parte dell'auto.

1.5 Simboli Impiegati

Riuniamo in una tabella la lista dei principali simboli a cui si farà riferimento nella tesi.

Simbolo	Descrizione
F_a	Forza attrito aerodinamico
F_r	Forza attrito volvente
F_g	Forza attrito gravità
F_n	Forza di dissipazioni inattese e della frenata
η_E	Efficienza termodinamica
\dot{m}_f	Flusso di combustibile nel cilindro
c_m	Mean piston speed
p_{me}	Mean effective pressure
P_{ICE}	Potenza meccanica motore termico
P_{EM}	Potenza meccanica motore elettrico/generatore
C_{WH}	Coppia delle ruote
ω_{WH}	Velocità angolare delle ruote
C_{GB}	Coppia dell'albero di trasmissione
ω_{GB}	Velocità angolare dell'albero di trasmissione
C_{TR}	Coppia totale generata dal sistema di propulsione
ω_{TR}	Velocità angolare totale generata dal sistema di propulsione
u_p	Rapporto di ripartizione della potenza
u_c	Ripartizione della coppia
R_e	Attività del motore termico

Capitolo 2

Il veicolo ibrido

2.1 Classificazione dei veicoli

Un veicolo ibrido *HEV*, più propriamente veicolo a propulsione ibrida, è un mezzo dotato di due sistemi di propulsione: il motore termico *ICE*(*Internal Combustion Engine*) ed una macchina elettrica *EM*(*Electric Machine*). Questo tipo di auto può quindi essere pensata come una combinazione tra una convenzionale vettura dotata di motore termico con un veicolo elettrico, cercando di riunire in un unico mezzo i pregi di entrambi.

In un veicolo ibrido il sistema di trazione (drive train) solitamente è costituito da due o più sistemi di potenza (power train) i quali interagiscono tra loro per mezzo di convertitori unidirezionali o bidirezionali. Mentre quindi in un veicolo tradizionale l'energia segue un percorso diretto sempre dal motore alle ruote, in un veicolo ibrido la bidirezionalità di alcuni dispositivi consente di gestire l'energia in modo più efficace sfruttando la possibilità di farle percorrere "strade" diverse.

2.1.1 I veicoli tradizionali

I veicoli tradizionali, ovvero quelli dotati di motore interno a combustione sono alimentati da un combustibile fossile; cioè il loro funzionamento si basa sullo sfruttamento di una risorsa non rinnovabile e come tutti ben sappiamo l'aspetto chiave è quello dell'inquinamento prodotto.

Nonostante siano stati effettuati evidenti miglioramenti in questo tipo di tecnologia come l'utilizzo di marmitte catalitiche, il de-potenziamento dei motori, lo sviluppo della tecnologia ad iniezione diretta common-rail e molte altre, essi rimangono ancora del tutto inefficienti come ben sappiamo per via dei bassi rendimenti caratteristici delle macchine termiche.

2.1.2 I veicoli elettrici

Negli ultimi anni si parla molto dell'impiego di veicoli puramente elettrici, che possono quindi muoversi utilizzando solamente l'energia elettrica pulita immagazzinata in delle batterie montate all'interno dell'auto. Questa direzione di sviluppo sembra essere quella con il maggiore potenziale per il futuro, perché vengono completamente eliminati i motori a

combustibile dalle auto, permettendo così il moto con emissioni inquinanti nulle. Un punto a sfavore di questi veicoli è costituita dalla capacità degli accumulatori, che spesso non è sufficiente a garantire lunghi viaggi e i tempi di ricarica sono ancora inaccettabili. C'è inoltre da dire che l'utilizzo di queste batterie di grosse dimensioni allo stato dell'arte è tutt'altro che eco-compatibile. Oltre a questo aspetto possiamo evidenziare che circa l'80% dell'energia elettrica in Italia viene prodotta attraverso fonti non rinnovabili e in particolare mediante l'impiego di combustibile fossile. Quindi l'eco sostenibilità di questi veicoli è solamente rimandata dal veicolo stesso, alla centrale elettrica.

2.1.3 I veicoli ibridi elettrici

I veicoli ibridi elettrici nascono con l'intento di conciliare i vantaggi del sistema elettrico, con la flessibilità e l'autonomia di un motore termico. Per definizione un veicolo ibrido è quindi un veicolo in cui l'energia necessaria alla propulsione è resa disponibile da due o più fonti energetiche che cooperano secondo le regole imposte da un sistema di controllo al fine di garantire una riduzione dei consumi globali di carburante e delle emissioni di gas inquinanti.

2.2 Ibrido serie ed ibrido parallelo

Da un punto di vista della gestione dei flussi di potenza, possiamo effettuare una prima suddivisione tra gli ibridi serie e gli ibridi parallelo. Quando l'ICE e il motore elettrico sono connessi in serie e solamente il motore elettrico fornisce la potenza alle ruote mentre il motore a combustione viene scollegato dalla trazione e viene impiegato esclusivamente come supporto alla macchina elettrica, questa modalità di funzionamento viene chiamata "ibrido serie". In un ibrido parallelo invece i motori sono organizzati in maniera tale che entrambi possano fornire il moto alla vettura, sia in maniera mutualmente esclusiva, sia in maniera congiunta.

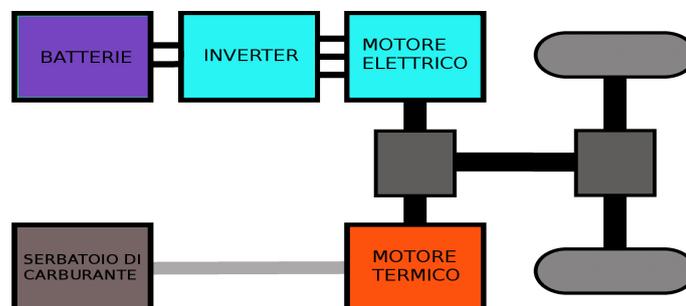


Figura 2.1: Disposizione dei motori in parallelo

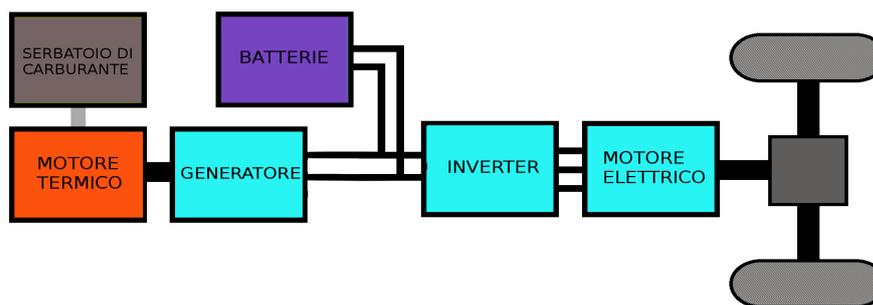


Figura 2.2: Disposizione in serie dei motori

In particolare negli *HEV* in generale, il carburante è ancora l'unica sorgente di energia, proprio come nelle vetture convenzionali, ma in questa nuova generazione della tecnologia vogliamo fare in modo di ottimizzare al massimo l'energia fornita dal motore termico, che rimane ancora il propulsore principale del mezzo, cercando di immagazzinare l'energia che altrimenti andrebbe dissipata e re-impiegandola nel momento del bisogno. L'impiego di un motore elettrico supplementare incrementa l'efficienza del sistema e riduce il consumo di carburante, recuperando l'energia cinetica che stiamo disperdendo durante la frenata, ma soprattutto ottimizza l'impiego dell'ICE evitando di imporgli regimi ad elevato consumo.

Un'evoluzione dei veicoli elettrici ibridi, forma la classe dei *PHEV* (*plug-in hybrid electric vehicle*) che prevede il montaggio di batterie con maggiore capacità con la possibilità di ricaricarle dalla rete di distribuzione. Sono quindi dei veri e propri EV, che possono funzionare anche in modalità ibrida.

2.2.1 HEV Serie

In una tecnologia HEV serie o SHEV, il sistema termico genera energia meccanica, che però non viene immediatamente impiegata per la propulsione, ma viene convertita sotto forma di tensione elettrica e momentaneamente immagazzinata nella batteria. In questo tipo di veicoli ibridi è il motore elettrico che quindi provvede a generare la coppia motrice per il movimento. Perciò nella configurazione serie i veicoli impiegano esclusivamente il motore elettrico per la propulsione; e l'energia per alimentare il motore elettrico viene prodotta da un generatore collegato al motore a combustione interna e viene temporaneamente immagazzinata in un banco di accumulatori. Ripercorrendo quindi il percorso dell'energia, essa viene prodotta trasformando il combustibile mediante il motore endotermico poi viene convertita in potenza elettrica attraverso un generatore elettrico che va a ricaricare le batterie; da queste infine l'energia viene prelevata dal motore elettrico, che genera la coppia da trasmettere alla ruota. Il motore a combustione viene impiegato a regime costante nel punto di massimo rendimento, consentendo una elevata efficienza e basse emissioni. Il dimensionamento del motore termico è determinato dalla potenza media richiesta al veicolo, in maniera da garantire un carica sufficiente alle batterie per poter soddisfare le esigenze di accelerazione. L'ibrido serie consente quindi l'installazione di un motore termico di cilindrata ridotta rispetto alla massima potenza effettiva erogabile dal mezzo.

Volendo schematizzare i pregi e i difetti di una configurazione serie: Pregi:

- il motore termico lavora sempre in condizioni di massima efficienza;
- il motore termico pilota un generatore elettrico che lavora anch'esso a rendimento massimo;
- il motore termico ha una potenza più bassa rispetto ad un veicolo convenzionale (generalmente non supera il 50 % della potenza totale).

Difetti:

- sono necessari tre componenti di propulsione: motore termico, generatore, motore elettrico (che introducono peso supplementare);
- richiede accumulatori più grandi e quindi più pesanti;
- vengono richieste tre conversioni di energia: da chimica a meccanica, da meccanica ad elettrica, da elettrica nuovamente a meccanica.

Il *power management* di un veicolo ibrido serie viene generalmente gestito tenendo conto delle sue modalità operative:

1. *startup/guida normale/accelerazione*: durante queste fasi sia il motore termico che le batterie forniscono energia al motore elettrico;
2. *basso carico*: nel caso in cui la carica delle batterie è critica, la potenza erogata dal motore endotermico può essere alzata per aumentare la carica degli accumulatori;
3. *decelerazione/frenata*: il motore elettrico funge da generatore e trasforma l'energia cinetica delle ruote in energia elettrica ricaricando le batterie;
4. *ricarica batterie da fermo*: se il veicolo non richiede propulsione, l'intera energia fornita dal motore termico viene impiegata per ricaricare le batterie.

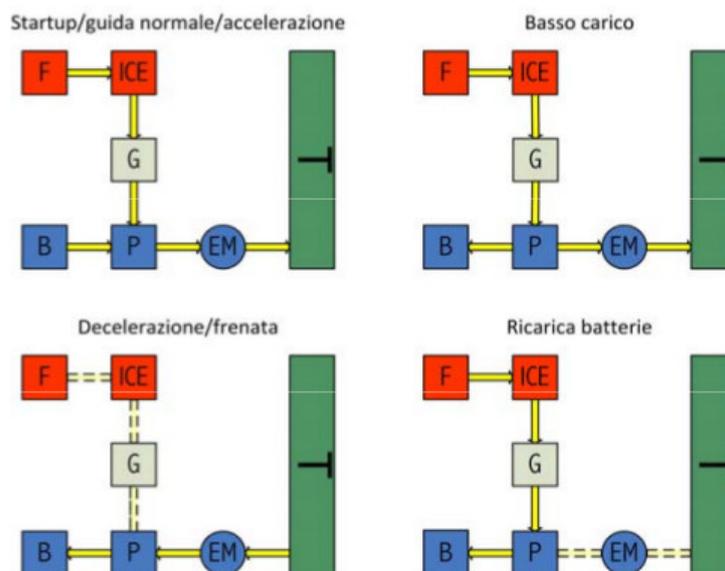


Figura 2.3: Modalità operative di un ibrido serie

2.2.2 HEV Parallelo

Nei veicoli ibridi in configurazione parallelo, i due motori termico ed elettrico sono entrambi accoppiati all'albero di trasmissione sommando così le potenze in gioco. Tale accoppiamento è garantito da un dispositivo meccanico chiamato *ripartitore di coppia* (o Power Split Device) che spesso è costituito da un *planetary gear* come schematizzato nella figura seguente, verrà descritto nel dettaglio nella rispettiva sezione del modello della trasmissione.

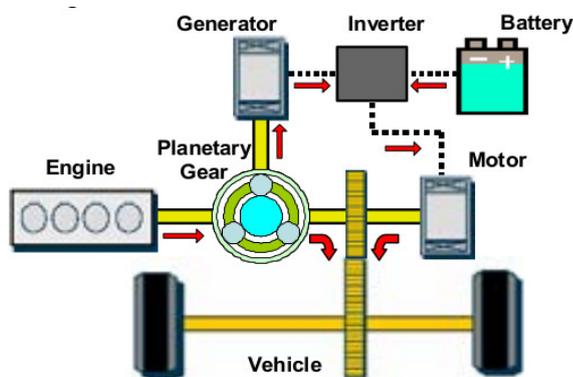


Figura 2.4: Ripartitore di coppia impiegato nella Toyota prius

Come risultato si hanno da una parte un più favorevole dimensionamento del motore elettrico, ma per contro una notevole complicazione del sistema di trasmissione e della logica del controllo. Viene inoltre meno il vantaggio di far lavorare il motore termico quasi esclusivamente nel suo punto di massima efficienza con conseguente aggravio dei consumi e quindi delle emissioni. Inoltre, in maniera simile a quanto accadeva nella configurazione serie, è

possibile far generare della potenza in più al motore termico rispetto a quella richiesta, che viene impiegata per ricaricare le batterie.

La forma più avanzata di veicolo ibrido parallelo è oggi il *full-hybrid* ovvero auto in cui il sistema elettrico è in grado da solo di far avanzare il veicolo tenendo completamente spento il motore termico. Naturalmente la distanza percorsa in questo frangente dipenderà dalla capacità delle batterie. Nonostante la limitata capacità degli accumulatori che vengono generalmente montati nelle auto ibride per una questione di peso, questo funzionamento risulta molto interessante e conveniente. La possibilità di far funzionare l'auto esclusivamente con il motore elettrico consente infatti di spegnere il motore termico nei tratti a bassa velocità di percorrenza, che sono spesso caratterizzati da ripetute frenate e ripartenze. Pensiamo ad esempio ad un tratto cittadino. In questo modo il motore a combustione rimane completamente spento, azzerando quindi del tutto consumi ed emissioni.

Da un punto di vista energetico la topologia parallelo risulta molto più vantaggiosa di quella serie, perché permette un minor numero di trasformazioni del flusso energetico e quindi un minor numero di dissipazioni. Inoltre un altro evidente vantaggio è dato dal ridotto peso dei dispositivi da installare nel powertrain, e soprattutto in un'auto come una utilitaria è un fatto di primaria importanza. Il motore elettrico può inoltre essere sottodimensionato, a parità di potenza massima di trazione, dato che esso non deve garantire il 100% della potenza sulle ruote, ma bensì è supportato dal motore termico. Volendo schematizzare pregi e difetti della configurazione

Pregi:

- a parità di prestazioni con un veicolo convenzionale, permette l'installazione di un motore termico più piccolo ed efficiente;
- il veicolo è in grado di fornire elevate prestazioni perché il motore termico e quello elettrico cooperano per generare la potenza complessiva;
- una buona parte dell'energia fornita dal motore termico viene direttamente fornita alle ruote, evitando due passi di conversione.

Difetti:

- maggiore complessità del sistema;
- il motore termico lavora in regime variabile, con conseguente peggioramento dell'efficienza.

Il *Power management* di un veicolo ibrido parallelo può essere riassunto elencando le sue modalità operative:

1. *Startup/accelerazione*: entrambi i motori forniscono potenza alle ruote;
2. *guida normale*: il solo motore termico fornisce potenza, mentre quello elettrico è completamente spento;

3. *decelerazione/frenata rigenerativa*: l'energia potenziale posseduta dal mezzo in movimento, viene recuperata dal motore elettrico, che in questo regime lavora in maniera inversa, fungendo da generatore;
4. *ricarica batterie in marcia*: grazie al lavoro del ripartitore di coppia, è possibile ricaricare le batterie durante la marcia aumentando la coppia generata dal motore termico e utilizzandola dal motore elettrico che funziona da generatore.

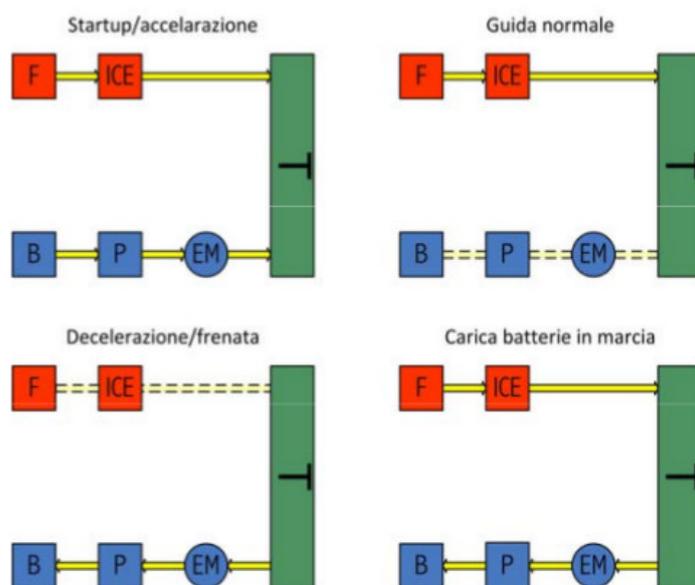


Figura 2.5: Modalità operative di un ibrido parallelo

Capitolo 3

Il veicolo di riferimento e le normative

In questo capitolo presenteremo come è stato scelto il veicolo a cui faremo riferimento nel resto della tesi. Cercheremo di ottimizzare la scelta sulla base di dimostrazioni rigorose di ottimalità. Nel resto del capitolo verranno descritti i cicli di guida normalizzati per il calcolo del consumo nelle simulazioni.

Incominciamo con presentare la tipologia dell'auto di riferimento. Per le considerazioni fatte sugli aspetti positivi e negativi di ibridi serie e parallelo nel capitolo precedente, è evidente che gli aspetti negativi della topologia serie sono inaccettabili da parte dei potenziali acquirenti di un'automobile. Infatti è inammissibile pensare di montare su di un'utilitaria un grosso generatore accompagnato da dei grossi banchi di accumulatori. Sia per un aspetto di prestazioni, sia per una questione di spazi.

Inoltre il fattore che penalizza soprattutto la topologia serie è quello che fa lavorare il motore termico sempre nello stesso punto di lavoro degrada il comfort dell'auto. Immaginiamo di essere fermi ad un semaforo, e dover sentire il frastuono del motore che sta ricaricando le batterie. I due aspetti appena presentati sono i fattori principali che hanno spinto allo sviluppo della tecnologia parallelo per le automobili di trasporto persone.

Veniamo ora a considerare il dimensionamento delle parti meccaniche. Il dimensionamento degli elementi del powertrain è un aspetto molto importante, dato che da essi dipenderanno sia le prestazioni dell'auto e quindi la tipologia di segmento di mercato a cui è rivolta, ma allo stesso tempo dal dimensionamento dei motori dipenderanno i consumi e quindi l'aspetto di primaria importanza di questa tesi. Nella trattazione che segue saranno ovviamente messe in secondo piano le prestazioni per osservare esclusivamente i consumi e le emissioni.

3.1 Dimensionamento del veicolo

Cercheremo di dimostrare in che modo è possibile scegliere in maniera ottima le prestazioni dei motori in maniera da sfruttare al meglio le caratteristiche dell'ibrido parallelo per poi descrivere quali grandezze saranno prese in considerazione nel resto della tesi.

Fattore di ibridizzazione Definiamo una grandezza molto importante che può essere utilizzata per effettuare il dimensionamento ottimo dei motori. Definiamo il *fattore di*

ibridizzazione HF (Hybridization Factor) il rapporto

$$HF = \frac{P_{EM}}{P_{EM} + P_{ICE}} = \frac{P_{EM}}{P_{TOT}} \quad (3.1)$$

dove le potenze indicano il valore nominale dei rispettivi motori.

Numericamente tale fattore assume valori nell'intervallo $[0, 1]$, esso vale 0 in un veicolo convenzionale, mentre vale 1 in un veicolo puramente elettrico. Naturalmente in un veicolo ibrido esso avrà un valore intermedio e più si avvicina a 1, maggiore saranno le potenzialità del powertrain.

Il fattore di ibridizzazione fornisce importanti indicazioni per dimensionare al meglio il veicolo dato che esso lega le potenze erogabili dai due motori ed è completamente indipendente dalle prestazioni stesse dei motori.

L'influenza che esercita il fattore di ibridizzazione sui consumi e sulle prestazioni di un ibrido parallelo è stata messa in evidenza nelle ricerche di M. Lukic e A.Emadi [3, 4].

Presentiamo il grafico che riporta l'andamento dei consumi (in miglia per gallone) in funzione del fattore HF per un veicolo ibrido parallelo:

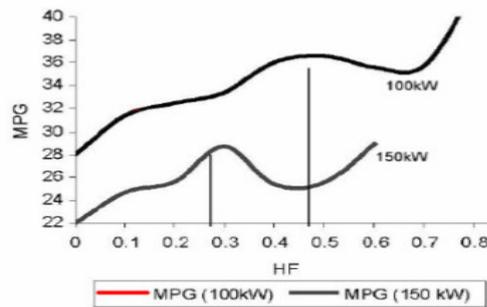


Figura 3.1: Influenza del fattore di ibridizzazione sui consumi

osserviamo che per una potenza totale installata di 100kW i consumi sono sempre inferiori rispetto a una potenza totale di 150kW installati, ed inoltre il consumo (in media) diminuisce al crescere di HF.

Possiamo poi analizzare l'andamento della potenza totale richiesta al motore termico e l'andamento dei consumi sempre in funzione del fattore HF.

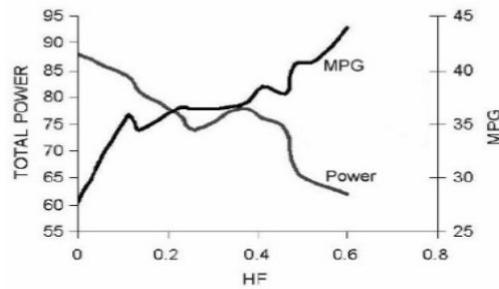


Figura 3.2: Influenza del fattore di ibridizzazione su potenza e consumi

Da questo grafico possiamo riscontrare che all'aumentare del fattore HF e quindi all'aumentare della potenza nominale del motore elettrico, la potenza totale richiesta ed il consumo specifico diminuiscono: ciò è giustificato dall'interpretazione che un motore elettrico più potente richiede uno sforzo minore da parte del propulsore termico grazie all'elevata coppia di spunto. Si può anche osservare che la potenza richiesta ed i consumi rimangono pressoché costanti per valori di HF compresi tra 0.2 e 0.4.

Di conseguenza per i veicoli con una potenza complessiva compresa tra 60 e 80kW un basso fattore HF può portare significativi benefici in termini di consumi globali. Tuttavia bisogna tenere conto del fatto che un tale veicolo non è in grado di mantenere elevate prestazioni per lunghi intervalli di tempo perché le batterie non sono in grado di immagazzinare sufficiente carica. È quindi evidente che un valore troppo elevato di HF porta a progettare un veicolo in cui l'autonomia delle batterie costituisce un grosso limite.

In definitiva, l'aumento della potenza del motore elettrico comporta un miglioramento di prestazioni e consumi fino ad un punto critico, oltre tale punto l'aumento del fattore HF non porta alcun miglioramento perché le prestazioni della carica delle batterie costituisce un limite all'efficienza.

Va inoltre ricordato che un motore elettrico in grado di erogare una elevata potenza, richiede una elevata potenza in ingresso e quindi oltre a dimensionare la capacità delle batterie, va dimensionata diversamente anche la loro tensione nominale. Ricordiamo infine che un motore elettrico molto potente ha costi maggiori di produzione che potrebbero abbattere la competitività dell'auto.

Possiamo, a titolo esemplificativo, riportare in una tabella le caratteristiche di alcuni dei veicoli attualmente in commercio.

Veicolo	Potenza del motore elettrico [kW]	Potenza del motore termico [kW]	Potenza totale [kW]	HF
Toyota Prius (2000)	33	52	85	0.388
Toyota Prius (2009)	60	73	133	0.451
Honda Insight (2009)	10	65	75	0.133
Honda Civic (2009)	15	70	85	0.176

Figura 3.3: Caratteristiche tecniche auto in commercio

È possibile dimostrare che per fattori di ibridizzazione superiori a 0,5 un'auto ibrida necessiterebbe (allo stato dell'arte attuale) un peso complessivo di batterie che andrebbe ad annullare la potenza supplementare introdotta dal generatore elettrico. Perciò è ragionevole (come descritto in [3]) assumere un fattore HF ottimo di 0,45 con una potenza nominale del motore elettrico $P_{EM} \approx 55kW$.

Ipotizziamo di progettare un'auto di media potenza solitamente si impiega un motore a combustione di circa 130kW. Quindi dimensionando il motore termico per l'automobile ibrida possiamo scegliere 80kW nominali per il motore a combustione. Queste grandezze sono proprio quelle assunte dagli ingegneri Toyota nel progetto della Prius 2009. Per questo motivo, nel seguito di questa trattazione risulterà una buona scelta assumere esattamente gli stessi dati tecnici presentati nel modello 2009 della Prius:

Dati	Modello				
	NHW10	NHW11	NHW20	ZVW30	
Carrozzeria	4 porte berlina	4 porte berlina	5 porte berlina	5 porte berlina	
Anno presentazione	1997	2000	2003	2009	
Batteria	Moduli	40	38	28	28
	Celle per modulo	6	6	6	6
	Totale celle	240	228	168	168
	Volt per cella	1,2	1,2	1,2	1,2
	Totale volt (nominali)	288	273,6	201,6	201,6
	Capacità (ampere orari)	6,0	6,5	6,5	6,5
	Capacità (watt orari)	1728	1778	1310	1310
Motore benzina	Peso (kg)	57	50	45	44
	Potenza (kW)	43	52	57	73
Motore elettrico	Max giri/min	4000	4500	5000	5200
	Tensione	288	273	500	650
In combinazione	Potenza (kW)	30	33	50	60
	Potenza (kW)	58	73	82	100

Figura 3.4: Caratteristiche tecniche Toyota Prius

In conclusione nel resto della tesi saranno presi come riferimento un motore termico con potenza nominale di 80kW, supportato da una macchina elettrica di 60kW. Perciò l'automobile avrà una potenza complessiva di 140kW e un fattore di ibridizzazione $HF \cong 0,43$.

3.2 Cicli normalizzati Europei

Le emissioni dei veicoli sono chiaramente influenzate dalla tipologia del percorso che questo sta percorrendo e soprattutto dalle condizioni del traffico. I Driving Cycles sono stati introdotti per fornire una maniera veloce ed unificata ai costruttori di automobili per il calcolo dei consumi. Essi sono stati progettati in modo da rappresentare i classici percorsi urbano, extraurbano e combinato. I Driving Cycles sono anche impiegati per poter simulare le condizioni di utilizzo di un veicolo in laboratorio, tramite la valutazione del consumo di carburante al fine di elaborare i coefficienti di emissioni e consumo.

Ci sono due principali categorie di driving cycles, *legislativi* e *non-legislativi*. Riguardo i driving cycles legislativi, essi impongono anche delle specifiche di emissioni che devono essere rispettate per poter ottenere la certificazione. Questi cicli sono ad esempio il FTP-75 impiegato negli USA, il NEDC utilizzato in Europa e il 10-15 in Giappone.

Diversamente quelli non-Legislativi trovano applicazione in ambito di ricerca, per la conservazione dell'energia e per valutazioni di consumo in fase di progettazione. Esempi di questi sono il Sydney Driving Cycle e il Athens driving cycle.

3.2.1 Analisi teorica

In questa analisi i drive cycles, sono delle rappresentazioni in forma grafica e numerica della velocità $v(t)$ al variare del tempo t . Possiamo suddividere i cicli di guida in due categorie: quelli *transitori* caratterizzati dalla variazione di molti parametri (velocità, accelerazione, angolo del piano su cui si muove il veicolo, ...) e quelli *modali* caratterizzati dal fatto che sono composti da brevi intervalli durante i quali l'accelerazione del veicolo è costante. Un'ulteriore distinzione a cui possiamo far fede, è quella che li raggruppa in base alle aree geografiche in cui devono essere impiegati per legge. A titolo esemplificativo:

- cicli di guida europei: ECE-15, EUDC, EUDCL, NEDC, HYZEM;
- cicli di guida americani: FTP-72, FTP-75, HFEDS, HD-UDDS; IM240, LA-92, NYCC;
- cicli di guida giapponesi: 10 mode, 11 mode, 15 mode, 10-15 mode.

Nel seguito saranno illustrati i principali cicli di guida utilizzati in Europa.

3.2.2 Drive cycles Europei

I cicli di guida europei appartengono alla categoria dei cicli di guida modalali e sono definiti dalle direttive comunitarie 91/441/CEE del Consiglio del 26 giugno 1991. Le velocità sono espresse in chilometri orari mentre il tempo viene espresso in secondi.

ECE-15 Cycle Conosciuto anche come ciclo UDC (Urban Driving Cycle) il ciclo ECE-15 è stato ideato per rappresentare le condizioni di guida di un veicolo in ambito cittadino. Tale ciclo è caratterizzato da una velocità massima di 50 km/h e da una durata di 195 s.

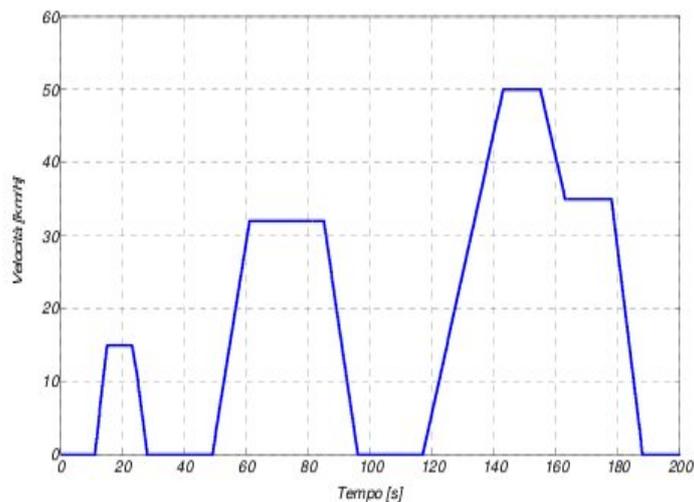


Figura 3.5: ECE-15 Drive Cycle

Ciclo EUDC Il ciclo EUDC (Extra Urban Driving Cycle) nasce dall'esigenza di descrivere il profilo di guida in un percorso extraurbano. Tale ciclo è caratterizzato da una velocità massima di 120 km/h e da una durata di 385 s. La velocità e l'accelerazione massima sono maggiori rispetto a quelle raggiunte nel ciclo ECE-15.

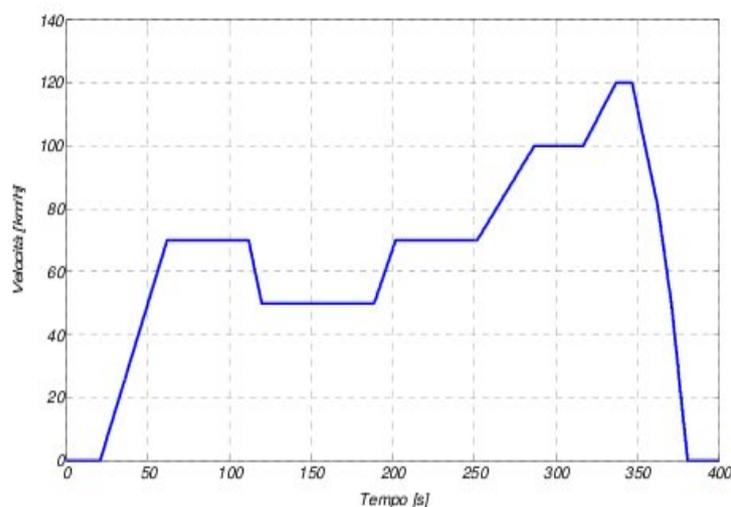


Figura 3.6: EUDC Drive Cycle

Ciclo EUDCL Il ciclo EUDCL (Extra Urban Driving Cycle Low), similmente al precedente, descrive un percorso extraurbano destinato però ai veicoli di bassa potenza. Si tratta di un ciclo di guida molto simile al ciclo EUDC ma la velocità massima raggiunta è di 90 km/h.

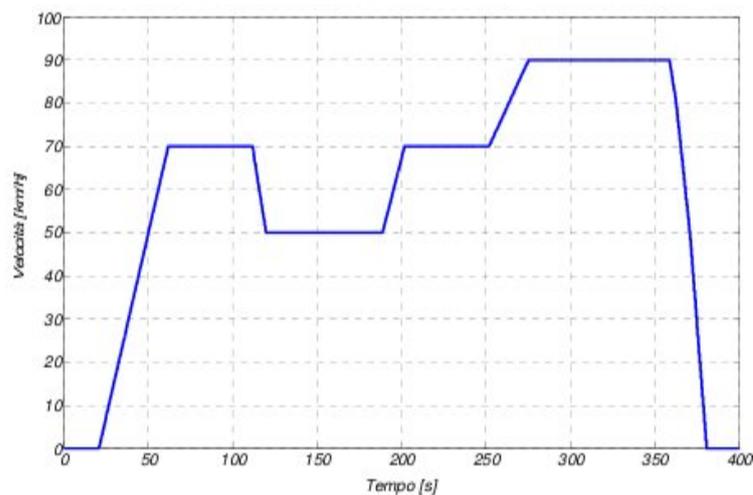


Figura 3.7: EUDCL Drive Cycle

Ciclo NEDC Il ciclo NEDC (New European Driving Cycle) è un ciclo combinato costituito dalla serie di quattro cicli ECE-15 seguiti da un ciclo EUDC o EUDCL. Assieme ai cicli ECE-15 ed EUDC rappresenta il ciclo principale con cui vengono stimati e dichiarati i consumi delle auto in Europa.

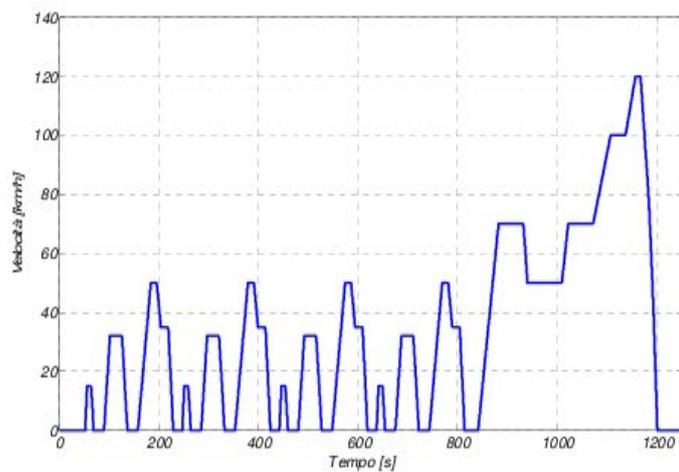


Figura 3.8: NEDC Drive Cycle

Capitolo 4

Modellizzazione del power-train

Nel presente capitolo introdurremo i modelli di tutti i dispositivi che compongono il power-train. Tutti i modelli seguenti saranno indispensabili non solo per precisare il funzionamento dell'automobile dal punto di vista matematico, ma anche in fase di simulazione essi devono rappresentare il comportamento reale dei dispositivi. La loro cooperazione andrà a definire le grandezze a cui siamo interessati, in particolare la potenza sui pneumatici e il consumo sul motore a combustione. Presenteremo nell'ordine: il modello per la dinamica longitudinale che si occupa di calcolare la forza necessaria per la trazione in presenza di tutti gli attriti del moto; il modello del motore termico per stimare il consumo; il modello della macchina elettrica che coopera alla propulsione; il modello della batteria per stimare la continuità nello stato di carica e l'efficienza della scelta del fattore di ibridizzazione. Infine il modello della trasmissione che comprende il ripartitore di coppia, indispensabile per implementare la tecnologia parallela, il cambio e infine il differenziale.

4.1 Dinamica longitudinale

Il sistema di propulsione produce energia meccanica che trasmessa alle ruote genera il moto del veicolo. Naturalmente al di fuori del caso ideale, bisognerà cercare di considerare tutti gli effetti di dissipazione che entrano in gioco in questa dinamica.

La quantità di energia dispersa nello spostamento da un veicolo generico principalmente dipende da tre effetti primari:

- Perdite dovute all'attrito aerodinamico F_a
- Attrito volvente dei pneumatici col suolo F_r
- Energia dissipata durante la frenata

Costruiamo l'equazione che regola il moto, a partire dalla seconda legge di Newton:

$$m_v \cdot \frac{d}{dt}v(t) = F_t(t) - (F_a(t) + F_r(t) + F_g(t) + F_n(t)) \quad (4.1)$$

dove per F_g si intende la forza dovuta alla gravità che agisce nella percorrenza di un tratto obliquo, e in F_n includiamo tutti gli effetti inattesi che si oppongono al moto in un veicolo

reale (nel corso delle simulazioni teoriche tale forza verrà assunta $F_n = 0$, mentre nel corso di simulazioni più avanzate essa può essere utilizzata per includere tutti gli errori del modello). F_n è stata introdotta per modellare la forza che si presenta sulle ruote durante la frenata. Perciò assumeremo in generale $F_n = 0$, mentre essa modellerà tutti gli effetti frenanti in un veicolo reale.

Con il simbolo F_t invece si intende la forza generata dal sistema di propulsione del veicolo. La figura seguente schematizza la dinamica del mezzo.

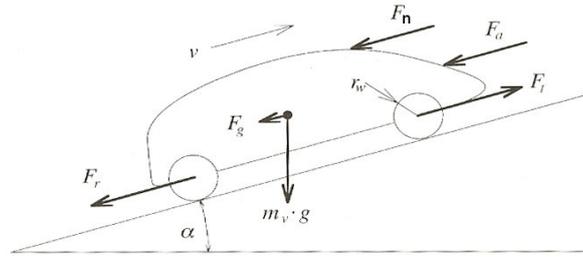


Figura 4.1: Dinamica Longitudinale del mezzo

4.1.1 Attrito aerodinamico

La resistenza aerodinamica F_a agisce durante lo spostamento del veicolo, ed in termini fisici si caratterizza come un attrito di tipo viscoso causato dall'aria che circonda il veicolo. In particolare possiamo dire che le dissipazioni di energia sono dovute alla differenza di pressione tra la sezione frontale e quella posteriore, causata dalla separazione del flusso d'aria. La valutazione precisa di questo tipo di parametri per una particolare sezione frontale del veicolo è possibile solamente mediante l'analisi dei flussi d'aria in galleria del vento. In genere però, il valore della forza di attrito viscoso è approssimabile semplificando il veicolo come un corpo rigido con un'area frontale A_f e mediante l'impiego di un coefficiente di trascinamento c_d che rappresenta l'effettivo contributo dell'attrito che l'aria esercita sul mezzo (quindi sarà $c_d = c_d(v, \dots)$) possiamo scrivere:

$$F_a = \frac{1}{2} \cdot \rho_a \cdot A_f \cdot c_d \cdot v^2 \quad (4.2)$$

avendo indicato con v la velocità del veicolo e con ρ_a la densità dell'aria.

Molto semplicemente possiamo assumere praticamente costanti tutti i parametri di questo modello per tutte le auto che vogliamo modellare, escluso il parametro A_f che varierà a seconda di che tipologia di veicolo stiamo prendendo in considerazione: ad esempio esso avrà un valore prossimo ai $4m^2$ per un autocarro, mentre per una utilitaria esso vale circa $1,5m^2$.

4.1.2 Attrito volvente

La forza di attrito viscoso è solitamente modellata come

$$F_r(t) = c_r \cdot m_v \cdot g \cdot \cos \alpha \quad (4.3)$$

in cui m_v indica la massa del veicolo e g indica l'accelerazione di gravità. Il termine $\cos \alpha$ modella l'influenza di un percorso non perfettamente orizzontale. Il coefficiente di attrito viscoso $c_r = c_r(v, p, \dots)$ è funzione di molte variabili come la velocità del veicolo v , la pressione dei pneumatici p e le condizioni della superficie stradale. In generale la stima del coefficiente c_r è molto complessa e presenta valori molto variabili anche durante l'utilizzo dell'auto. In molte applicazioni, in particolare quando la velocità del veicolo rimane moderata, il coefficiente c_r può essere assunto un valore costante.

4.1.3 Inerzia in salita

La forza indotta dalla gravità durante la guida in un piano non orizzontale è conservativa e influenza considerabilmente il comportamento del veicolo. Il modello derivante dalla fisica è descritto dalla relazione:

$$F_g(\alpha) = m_v \cdot g \cdot \sin \alpha, \quad (4.4)$$

che per valori piccoli di α espresso in radianti:

$$F_g(\alpha) = m_v \cdot g \cdot \alpha \quad (4.5)$$

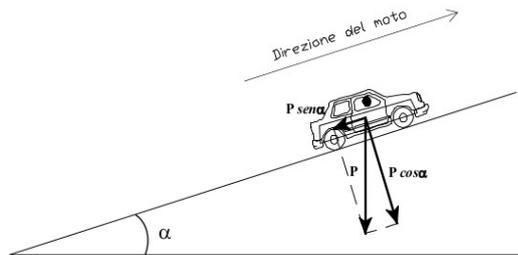


Figura 4.2: resistenza nel piano inclinato

Il modello completo

Essendo a questo punto note tutte le forze che agiscono sul veicolo, una volta note le caratteristiche del mezzo esse sono tutte determinabili. A partire dalla (4.1) è possibile quindi determinare la forza sviluppata dal sistema di propulsione $F_t(t)$ che, moltiplicata per il raggio delle ruote, consente di determinare la coppia $C_{WH}(t)$ sviluppata alle ruote, mentre la velocità dell'auto $v(t)$ è ottenuta moltiplicando la velocità angolare $\omega_{WH}(t)$ per il raggio del pneumatico r_{WH} . Riassumiamo le leggi della dinamica:

$$\begin{cases} F_t(t) = m_v \cdot \frac{d}{dt}v(t) + F_a(t) + F_r(t) + F_g(t) \\ C_{WH}(t) = r_{WH} \cdot F_t(t) \end{cases} \quad (4.6)$$

In definitiva la dinamica longitudinale può essere descritta in forma simbolica mediante un sistema la cui grandezza di ingresso è il profilo di velocità del ciclo di guida, mentre

quelle di uscita sono la coppia $C_{WH}(t)$ sviluppata alle ruote e la relativa velocità angolare del pneumatico $\omega_{WH}(t)$.

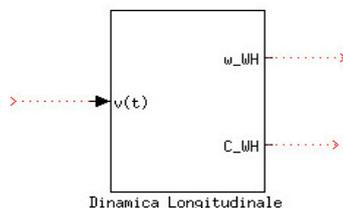


Figura 4.3: Box della dinamica longitudinale

4.2 Modello del motore a combustione

Prendiamo ora in esame il motore a combustione di cui è dotato il sistema, spesso questo è chiamato *ICE* (*Internal Combustion Engine*) o anche semplicemente *IC*. Esso è estremamente importante perché è l'oggetto dell'ottimizzazione dal momento che è la sua gestione a regolare sia i consumi di carburante, sia le emissioni. Dal nostro punto di vista un motore a combustione è un sistema che rende disponibile un lavoro meccanico (sotto forma di coppia motore) tramite la trasformazione chimica di un combustibile di alimentazione.

Definiamo l'efficienza termodinamica di un motore a combustione come

$$\eta_e = \frac{\omega \cdot C}{P_c} \quad (4.7)$$

in cui ω è la velocità angolare dell'albero, C è la coppia del motore e P_c è il flusso entalpico del motore, associato alla quantità di combustibile che viene immessa nel motore secondo la relazione:

$$\dot{m}_f = \frac{P_c}{H_l} \quad (4.8)$$

in cui H_l è il potere calorifero inferiore del carburante.

Riassumendo, l'efficienza di una generica "caldaia", come viene definita in termodinamica, è:

$$\eta_e = \frac{\omega \cdot C}{\dot{m}_f \cdot H_l} \quad (4.9)$$

il rapporto tra la potenza effettivamente erogata sotto forma di omega e coppia, rispetto al flusso di carburante moltiplicato per il suo potere calorifero.

L'efficienza termodinamica η_e di un motore IC quindi dipende unicamente dalla velocità e dalla coppia che sta erogando. Questo è il principale problema che degrada i consumi nei motori. Sfortunatamente però ω e C variano su dei range che dipendono dalle caratteristiche specifiche del motore preso in considerazione (cilindrata, geometrie ecc). Al fine di intrapren-

dere una caratterizzazione generale del motore IC introduciamo le corrispondenti grandezze normalizzate.

Modelli normalizzati

Ci proponiamo ora l'obiettivo di costruire le relazioni che caratterizzano le prestazioni dell'ICE utilizzando grandezze normalizzate rispetto alla cilindrata. Quando il motore è utilizzato in regime stazionario, nel senso che la potenza ad esso richiesta è costante, le seguenti variabili normalizzate descrivono il suo punto operativo.

La *mean piston speed* :

$$c_m = \frac{\omega_{ICE} \cdot S}{\pi} \quad (4.10)$$

e la *mean effective pressure*

$$p_{me} = \frac{N \cdot \pi C_{ICE}}{V_d} \quad (4.11)$$

dove indichiamo con ω_{ICE} la velocità del motore, C_{ICE} la coppia, V_d la cilindrata e con S la corsa dei pistoni. Il parametro N invece, dipende dal tipo di motore impiegato: esso è un coefficiente che vale: $N = 4$ per motori quattro tempi, $N = 2$ per motori due tempi.

Si intende per *mean piston speed*, la media delle velocità durante la corsa, calcolate su una rivoluzione intera del pistone. Valori tipici di c_m sono intorno ai 20 m/s.

Con p_{me} si intende il valore costante di pressione che deve agire sul pistone durante un espansione completa della corsa, ovvero la pressione necessaria a produrre una coppia C_{ICE} . Per motori aspirati il valore massimo di p_{me} è circa 10bar, invece per tecnologie turbocompresse questa pressione arriva a sfiorare i 20bar.

Il vantaggio principale nell'uso delle grandezze normalizzate c_m e p_{me} è che questi parametri sono approssimativamente identici per quasi tutti i motori, e non variano con la cilindrata. Abbiamo intrapreso questa trattazione con l'obiettivo di presentare il modello più generico possibile. Osserviamo che nella pratica i valori delle velocità angolari in generale mostrano una minor variabilità rispetto a c_m , per questo molto spesso troviamo n_e che indica il numero di giri dell'albero motore in rpm invece che il *mean piston speed*.

A questo punto possiamo stendere la relazione generale tra la potenza e i parametri sin qui definiti:

$$P_{ICE} = z \cdot \frac{\pi}{16} \cdot B^2 \cdot p_{me} \cdot c_m \quad (4.12)$$

che descrive come la potenza meccanica prodotta dal motore è in relazione con il numero di cilindri z e l'alesaggio B . Mediante la (4.12) è possibile ad esempio stimare qual'è la potenza massima effettiva che un motore è in grado di generare.

4.2.1 Motivazione al metodo quasi statico

Una volta introdotti i modelli che regolano le potenze erogate dall'ICE con la sua dinamica interna come la (4.12), è necessario ora metterla in relazione con il consumo specifico di carburante: il parametro che interesserà l'ottimizzazione. Gli approcci per ricavare questo tipo di relazione sono essenzialmente due: il *Punto Medio di Funzionamento* e il *Metodo Quasi Statico*.

Descriviamo per completezza in cosa consiste il metodo del punto medio di funzionamento, per poi passare nel dettaglio al metodo quasi statico, che verrà intrapreso d'ora in poi.

Il metodo del Punto Medio di Funzionamento

Il metodo del punto medio di funzionamento prevede di calcolare "una media" di tutti i parametri caratteristici del modello su un prefissato percorso; dunque assumere i valori trovati in media come rappresentativi dell'intero percorso.

Illustriamo un esempio di applicazione di tale metodo. Assunta una velocità media di 9.5km/h , utilizzando le equazioni ricavate durante l'analisi della dinamica longitudinale, e immaginando di far viaggiare il veicolo sul ciclo NEDC troviamo dalla dinamica longitudinale che la forza media di trazione risulta $\bar{F}_{trac} = 250\text{N}$, pertanto la potenza media sviluppata dal sistema di propulsione vale

$$\bar{P}_e = \frac{\bar{F}_{trac} \cdot \bar{v}}{t_{trac}} = \frac{250 \cdot 9.5}{0.6} \simeq 4\text{kW} \quad (4.13)$$

in cui il parametro t_{trac} denota la frazione di tempo in cui il veicolo è in fase di trazione, in questo caso 0.6s (vedi ciclo di guida NEDC). Considerando un rendimento medio del motore complessivo delle perdite al cambio e di trazione di $\eta_g = 0.24$, la potenza media di carburante consumata in un ciclo NEDC è approssimativamente:

$$\bar{P}_f = t_{trac} \cdot \frac{\bar{P}_e}{\eta_e} \simeq 0.6 \cdot \frac{4\text{kW}}{0.24} \approx 10\text{kW} \quad (4.14)$$

Il che corrisponde a un flusso di carburante

$$\bar{\dot{m}}_f = \frac{\bar{P}_f}{H_l \cdot \rho_f} \quad (4.15)$$

da cui, inserendo i corrispondenti valori numerici di $H_l = 43.5 \cdot 10^6 \text{J/kg}$ per il potere calorifero inferiore del combustibile e $\rho_f = 0.75\text{kg/l}$ per la sua densità otteniamo come risultato

$$\bar{\dot{m}}_f = \frac{10\text{kW}}{43.5 \cdot 10^6 \cdot 0.75} = 3.1 \cdot 10^4 \frac{\text{l}}{\text{s}} \approx 3.3 \frac{\text{l}}{100\text{km}}. \quad (4.16)$$

Come evidenziato con questo calcolo il metodo del punto medio di funzionamento si basa sul trovare dei valori per le grandezze descrittive del modello, che siano validi in media. Naturalmente questo procedimento è abbastanza grossolano, ma purtroppo è l'unico metodo praticabile analiticamente che promette di calcolare dei valori precisi data la complessità del modello.

Come si nota facilmente, il consumo di carburante è un parametro abbastanza complesso da calcolare con il metodo analitico del punto medio di funzionamento, inoltre esso prescinde da parecchie approssimazioni che rendono il risultato abbastanza incerto, perciò poco utile nella nostra analisi.

Metodo Quasi Statico

Nella valutazione del consumo del motore termico in un'auto a tecnologia ibrida, il metodo precedentemente esposto non risulta molto conveniente, soprattutto a causa dell'elevato numero di approssimazioni introdotte e al fatto che il motore termico non è sempre mantenuto al valore di rendimento richiesto dal pilota, ma nella strategia di controllo saranno utilizzati regimi di funzionamento non naturali con l'obiettivo di migliorare i consumi complessivi. Per questo motivo il metodo di valutazione dei consumi più naturale è rappresentato dall'approccio quasi statico.

Il metodo quasi statico assume che il moto del veicolo si sviluppi attraverso una successione finita di stati caratterizzati da velocità e potenze costanti. Il ciclo di guida viene perciò suddiviso in brevi intervalli durante i quali si assume che il sistema funzioni in condizioni statiche, ai quali viene applicato il metodo del punto medio di funzionamento.

Si consideri dunque come esempio il seguente profilo di velocità:

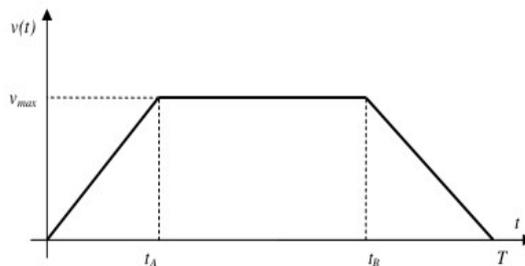


Figura 4.4: Tratto di ciclo di guida

Il profilo di velocità rappresentato in 4.4 può essere descritto analiticamente in funzione del tempo, ma una tale formulazione non si presta ad essere trattata numericamente al calcolatore. È necessario pertanto operare una discretizzazione dell'asse temporale: posto T la durata del ciclo e fissato un passo di campionamento h , restano individuati gli intervalli T/h e gli istanti che li separano.

È dunque possibile estrapolare dal profilo di velocità di 4.4 i valori che la velocità assume in corrispondenza degli istanti considerati. Ad ognuno dei precedenti intervalli viene quindi applicato il metodo del punto medio, si ottiene quindi un nuovo profilo di velocità definito dalla seguente relazione:

$$v_f(t) = \frac{(v(k \cdot h + h) + v(k \cdot h))}{2}, \forall t \in [k \cdot h, k \cdot h + h[\quad (4.17)$$

Il nuovo profilo di velocità ottenuto è rappresentato in 4.5.

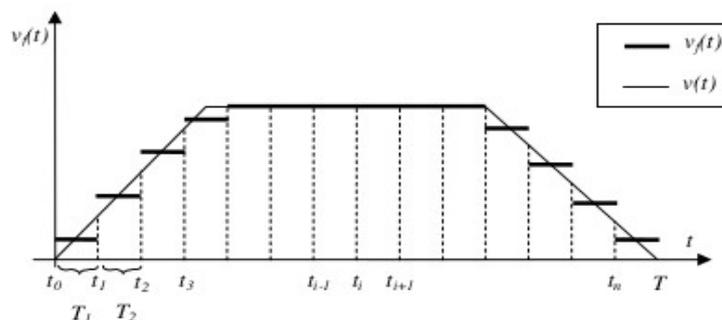


Figura 4.5: Ciclo di guida discretizzato

Il profilo di velocità così ottenuto costituisce un'evidente approssimazione della velocità effettiva del veicolo ma permette una importante semplificazione: le equazioni integro/differenziali che descrivono il moto del veicolo si riducono ad equazioni alle differenze finite, le quali possono essere agevolmente trattate in forma numerica al calcolatore. Similmente a quanto fatto per la velocità, mantenendo lo stesso formalismo possiamo discretizzare tutti gli intervalli di ogni altra grandezza derivante dal ciclo di guida come l'accelerazione o l'asse stesso dei tempi.

4.2.2 Rappresentazioni dell'efficienza

Il modello fisico sopra descritto si compone di tutte le leggi che caratterizzano il motore, cercando di rappresentarne il funzionamento nella maniera più precisa possibile. Tuttavia molto spesso un modello di questo tipo risulta molto impreciso a causa delle varie misure intermedie che vengono richieste e di cui in genere non si dispone, soprattutto in fase di simulazione.

Per questo motivo è preferibile impiegare delle descrizioni del propulsore con approccio a scatola nera: nel senso che piuttosto di ricavare il consumo a partire dalle relazioni termodinamiche, si sottopone il motore a delle simulazioni sul banco prova e se ne misurano i rispettivi consumi per ogni punto di funzionamento. Questa procedura è perfettamente in accordo con il metodo quasi statico adottato.

A partire dai valori misurati si possono costruire delle Mappe dell'efficienza che molto spesso vengono chiamate *Mappe del motore*, simili alla seguente:

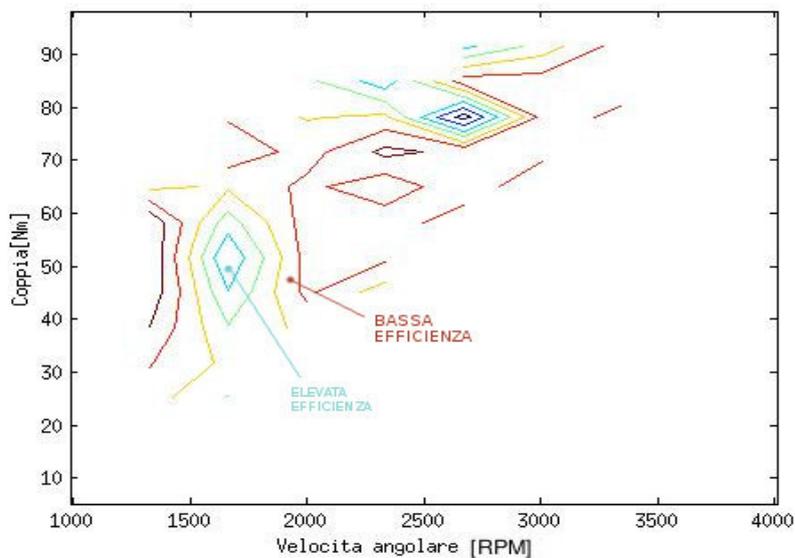


Figura 4.6: Mappa dell'efficienza

Nell'asse delle ascisse è riportata la velocità angolare a cui sta funzionando il motore, mentre nelle ordinate viene graficata la coppia C_{ICE} che sta erogando. Le linee di livello presenti descrivono i punti di funzionamento a efficienza (4.7) costante.

Si osserva che una zona ad elevato rendimento si ottiene per valori abbastanza elevati di coppia C con velocità angolari basse. Questo ovviamente è in accordo con il fatto che il motore contiene al massimo i consumi quando lo stiamo impiegando premendo poco l'acceleratore e invece abbassiamo la sua ω passando alla marcia superiore. Un'altra zona a rendimento elevato si presenta sopra i $2500RPM$ dove il motore è in grado di erogare il massimo valore di coppia.

Complementarmente a questa mappa dell'efficienza, possiamo costruire dai dati sperimentali anche una superficie che ci dia informazioni precise sul consumo specifico mettendo lungo l'asse z il valore in $\frac{Kg}{s}$ del consumo come in 4.7.

Spesso si utilizza l'acronimo *BSFC brake specific fuel consumption* o semplicemente *SFC* per indicare il valore del consumo di carburante in $\frac{Kg}{s}$ in un fissato istante.

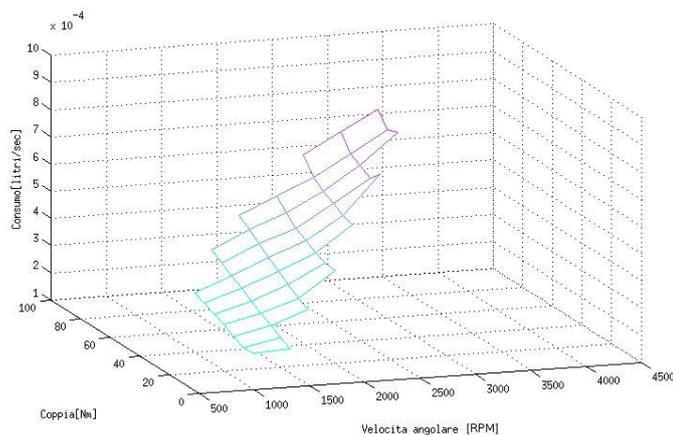


Figura 4.7: Mappa Motore termico

Da questa superficie è evidente che tanto maggiore è la coppia richiesta, tanto maggiore sarà il consumo specifico, soprattutto alle alte velocità (ω). Precisiamo che i due parametri: BSFC e η_e sono del tutto indipendenti tra loro: il primo indica il consumo in [litri/s] mentre il secondo tiene conto anche della potenza erogata, ovvero è il rapporto tra potenza effettivamente erogata e consumi.

Possiamo a questo punto riassumere la trattazione del modello del motore termico con approccio quasi statico descrivendolo con approccio a scatola nera utilizzando le *Mappe del motore*, dovremo quindi fornire a tale box la ω_{ICE} e la C_{ICE} che ci vengono richieste dalla dinamica longitudinale e ci verrà restituito il consumo specifico che tale punto di lavoro richiede.

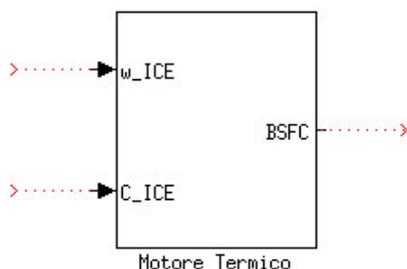


Figura 4.8: Modello a scatola nera motore ICE

Tale valore del consumo istantaneo andrà a sommarsi istante per istante in un tragitto dell'auto e la sua somma rappresenterà quindi la funzione da minimizzare nella strategia di controllo.

4.3 Modello della macchina elettrica

Nel seguito ci riferiremo con il termine di macchina elettrica *EM* (*Electric Machine*) perché tale dispositivo è impiegato sia da motore elettrico durante le fasi di propulsione, sia da generatore durante la fase di rigenerazione delle batterie. La funzione della macchina elettrica in un'auto di tipologia ibrida è estremamente importante e come già visto svolge una duplice funzione: quella di generare potenza per creare della coppia e quella di generatore convertendo l'inerzia dell'auto in energia elettrica per la ricarica degli accumulatori. La tipologia di motori elettrici impiegati nelle automobili ibride è generalmente denominata *sincroni a magneti permanenti* e in questa sezione procederemo con la costruzione di un modello che lo rappresenti.

Dal punto di vista elettronico alla macchina elettrica dobbiamo affiancare dei dispositivi di supporto che consentano di convertire le tensioni alternate prodotte dal generatore in correnti continue per le batterie. Nello specifico questi dispositivi sono chiamati raddrizzatore di corrente e inverter.

4.3.1 Descrizione

Consideriamo P_{EM} la potenza scambiata dalla macchina elettrica, essa dipenderà dal rendimento della stessa, η_{EM} , che però in generale non è possibile considerare costante al variare della velocità angolare, ma in maniera analoga a quanto avviene per il motore termico dipenderà dal punto di funzionamento a cui la macchina è imposta. È perciò ragionevole impiegare $\eta_{EM} = \eta_{EM}(\omega_{EM}, C_{EM})$.

Ricordiamo che per definizione il rendimento in potenza di un generatore è il rapporto adimensionale tra potenza erogata e potenza generata:

$$\eta_{EM} = \frac{P_{EM}}{P_g} \quad (4.18)$$

Durante il funzionamento da motore, sarà $\omega_{EM} > 0, C_{EM} > 0$, e la relazione che descrive il funzionamento è

$$P_{EM} = \omega_{EM} \cdot C_{EM} \cdot \frac{1}{\eta_{EM}(\omega_{EM}, C_{EM})} \quad (4.19)$$

Durante il funzionamento da generatore invece avremo $\omega_{EM} > 0, C_{EM} < 0$ Per cui:

$$P_{EM} = \omega_{EM} \cdot C_{EM} \cdot \eta_{EM}(\omega_{EM}, C_{EM}) \quad (4.20)$$

4.3.2 Mappa reale e modello

In maniera simile a ciò che avveniva per il motore termico, per l'analisi quasi statica che effettueremo è conveniente utilizzare il modello a scatola nera che risulta essere molto preciso, e ricorrere perciò a una mappa che classifica l'efficienza del motore in ogni suo punto di funzionamento.

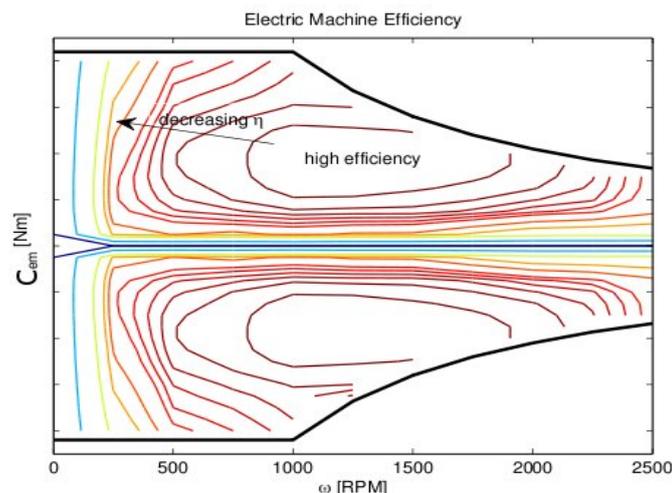


Figura 4.9: Mappa della macchina elettrica

In questo caso, il funzionamento del motore termico è caratterizzato esclusivamente dall'efficienza η_{EM} , indicato dalle curve di livello della mappa; impiegando questo valore nelle (4.19) e (4.20) è immediato calcolare la potenza erogata/immagazzinata. Osservando la Figura 4.9 si osserva prima di tutto che essa ha una caratteristica simmetrica rispetto all'asse delle ascisse, e questo è evidentemente dovuto al fatto che la macchina elettrica viene utilizzata sia da motore (e quindi eroga una coppia positiva) sia da generatore (e quindi funziona mediante una coppia negativa). Dopodiché è interessante notare che i punti ad elevata efficienza sono distribuiti principalmente nella zona che presenta elevate velocità angolari ω con una coppia meccanica abbastanza bassa. Queste semplici osservazioni, combinate con quelle fatte per l'ICE risulteranno fondamentali nell'implementazione della strategia di controllo.

Dunque il modello complessivo nell'ambito quasi statico della macchina elettrica è rappresentato da un sistema con ingressi C_{EM} e ω_{EM} velocità angolare dell'albero e che restituisce come uscita la potenza P_{EM} tramite la lettura dei valori del rendimento identificati nella mappa come raffigurato nella Figura ??.

$$P_{EM} = f(C_{EM}, \omega_{EM}) \quad (4.21)$$

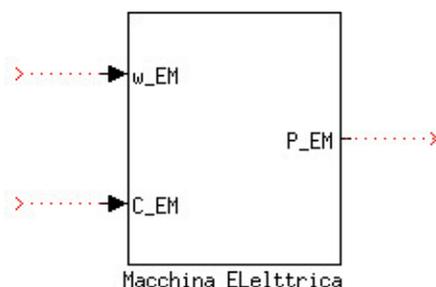


Figura 4.10: Modello a scatola nera motore elettrico

4.4 Modello delle batterie

Il funzionamento di un'automobile a tecnologia ibrida è strettamente legato agli accumulatori, rappresentano infatti l'unica riserva di energia che alimenta il motore elettrico. Nel progetto dell'auto sarà indispensabile trovare un compromesso tra costi, peso e capacità degli accumulatori. Un altro aspetto di fondamentale importanza è quello di riuscire a garantire tramite degli opportuni dispositivi di controllo, che a causa delle molteplici cariche e scariche che subiscono durante il funzionamento, le batterie non decadano troppo velocemente onde evitare che il cliente debba sostituirle.

Il controllo dello stato di carica *SoC* (*State Of Charge*) è indispensabile quindi, oltre che per la scelta delle politiche di gestione dell'energia, anche per assicurare un corretto utilizzo degli accumulatori.

In un veicolo ibrido le batterie sono connesse in serie al fine di poter disporre di una tensione sufficientemente elevata (fino a qualche centinaio di Volt è la tensione richiesta dal generatore). Il controllo dello stato di carica deve essere effettuato per ogni singola cella del pacco, infatti, inevitabili lievi differenze nelle prestazioni di ogni elemento potrebbero essere amplificate durante la vita, portare a scompensi notevoli nello stato di carica e condurre al deterioramento complessivo del sistema.

La soluzione migliore al problema consiste nel predisporre un sistema di equalizzazione dello stato di carica degli elementi che compongono il pacco batterie. L'equalizzazione ottima si ottiene controllando singolarmente ogni cella all'interno della stringa di accumulatori. In alcuni casi, specie se il numero di batterie da controllare è elevato, si può ricorrere ad una soluzione di compromesso che consiste nel lavorare su piccoli gruppi di elementi per limitare la complessità del circuito di controllo.

Esistono diverse tecniche per determinare lo stato di carica di una batteria, ciascuno ha pregi e difetti, ed è più adatto di conseguenza ad un particolare tipo di applicazione piuttosto che ad un altro. Tra i modelli più diffusi è possibile elencare il modello circuitale, che utilizza le tipiche rappresentazioni impiegate nell'elettrotecnica e il modello coulometrico, che verrà descritto tra breve. Il modello coulometrico risulta essere più che sufficiente per le simulazioni sull'ottimizzazione perché descrive bene lo stato della carica e perciò verrà adottato nel seguito di questa trattazione.

4.4.1 Modello coulometrico

Con questo nome si identificano tutte quelle metodologie per la determinazione del SoC che si basano sulla valutazione della carica estratta dalla batteria durante il processo di scarica. Dalle relazioni note dalla fisica si definisce la quantità di carica immagazzinata nella batteria come

$$Q = \int_0^T i(t) dt \quad (4.22)$$

dove $i(t)$ è la corrente che fluisce nell'unità di tempo:

$$\begin{cases} i(t) > 0 & \text{durante la scarica} \\ i(t) < 0 & \text{durante la carica} \end{cases} \quad (4.23)$$

La corrente di scarica media I_{med} si può ricavare come rapporto tra la carica estratta Q ed il tempo T .

Sulla base di questi parametri si può allora stimare lo stato di carica con diversi approcci, ad esempio, nella maniera più semplice e approssimata, come rapporto fra gli ampère-ora estratti e un fissato valore della capacità dell'accumulatore alla corrente di scarica media I_{med} .

Questo risultato non è tuttavia soddisfacente, a causa delle capacità parassite che dipendono in maniera diretta dall'intensità di corrente di scarica.

Al fine di migliorare la stima è perciò conveniente utilizzare un fattore correttivo in funzione della corrente erogata che tenga conto dei problemi legati alle capacità parassite, riscriviamo a questo punto

$$Q = \int_0^T k(i) \cdot i(t) dt \quad (4.24)$$

Ad esempio, se una particolare batteria si scarica completamente in 10h ad una corrente di 20A (capacità nominale 20Ah), e a 30A impiega invece 5h (anziché 6,7h): il coefficiente $k(i)$, unitario per $i = 20A$, vale $k(i) = (20 \cdot 10)/(5 \cdot 30) = 1,33$, per $i = 30A$.

Questo approccio in realtà non trova un grande impiego pratico, a causa del fatto che il calcolo di $k(i)$ risulta abbastanza complesso e necessita di svariate determinazioni sperimentali; inoltre il metodo è abbastanza soggetto ad errori poiché non si tiene conto della dipendenza della capacità dalla temperatura. Supponendo tuttavia di aver calcolato la carica estratta Q con questo metodo, oppure con modelli più accurati, lo stato di carica è calcolabile con

$$SoC = \frac{Q_{TOT} - Q}{Q_{TOT}} \quad [\%] \quad (4.25)$$

dove Q_{TOT} è la capacità complessiva immagazzinabile dalla batteria.

L'equazione (4.25) anche se molto semplice, descrive tutto ciò che ci servirà sapere durante il funzionamento, per quanto riguarda il sistema di accumulatori.

4.4.2 L'equalizzazione

L'equalizzazione dello stato di carica delle batterie è particolarmente importante in tutte quelle applicazioni che producono elevati gradienti di corrente di carica/scarica. Un veicolo ibrido ovviamente ricade in questa categoria, in quanto per far fronte ad elevate richieste di coppia assorbe elevatissime correnti, e nel momento di una intensa frenata (con recupero dell'energia cinetica), inietta nelle batterie elevate quantità di carica.

Soprattutto quest'ultimo caso è problematico per le batterie perché la corrente generata in fase di frenata è incontrollabile e può causare un rapido aumento di tensione fino a livelli potenzialmente pericolosi per la cella. Infatti sia per le batterie al piombo acido, sia per quelle al litio e sia per quelle al nichel-metallo idruro, è importante che la carica avvenga a tensione inferiore ad un valore di sicurezza che danneggerebbe irreparabilmente l'accumulatore.

La tecnica più semplice per eliminare il problema consiste nell'arrestare la carica appena la prima delle celle raggiunge la completa carica, tuttavia così facendo il processo si interromperebbe con alcune batterie non ancora completamente cariche, perdipiù nei successivi cicli la differenza tenderebbe a peggiorare. Una tecnica di equalizzazione efficace deve invece permettere a tutti gli elementi di raggiungere la tensione di carica finale inibendo la carica alle celle già completamente cariche; solo al raggiungimento della completa carica di tutte le celle si potrà interrompere il processo (per approfondimenti rimandiamo a [4]).

In questa sezione sono stati presentati brevemente i principali problemi che si presentano nella gestione delle stringhe di batterie. Tuttavia nel resto di questa tesi non verranno ulteriormente presi in considerazione problemi di questo tipo, rimandando alla bibliografia per approfondimenti e ipotizzando che tutti i problemi relativi vengano risolti da un opportuno sistema di controllo degli accumulatori.

4.4.3 Il modello

In definitiva il modello delle batterie che si adatta nel modo migliore al nostro caso di ottimizzazione è composto dalla semplice relazione (4.25) che descrive cioè gli accumulatori in maniera molto semplice prendendo come ingresso la potenza P_{batt} che stiamo prelevando o che stiamo inviando alle batterie e dando come uscita lo stato di carica istantaneo.

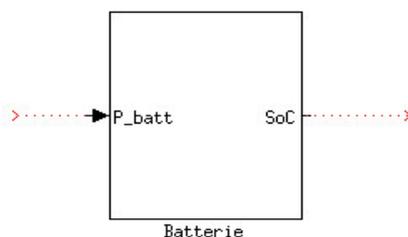


Figura 4.11: Modello batterie

4.5 Modello della trasmissione

Con l'obiettivo di trasmettere la coppia erogata dai due motori termico ed elettrico alle gomme, è necessario modellare tre sistemi che cooperano tra loro per inoltrare la potenza a disposizione:

- il differenziale;
- il cambio;
- il ripartitore di coppia.

4.5.1 Il differenziale

Il differenziale è un dispositivo in grado di ripartire il momento angolare posseduto dall'albero tra le due ruote quando queste stanno ruotando con velocità diverse.

Considerando il moto longitudinale del veicolo, il differenziale viene modellato come un riduttore di velocità caratterizzato da un rapporto finale γ_D e da un rendimento η_D assunto costante. Il comportamento del differenziale in forma quasi statica è quindi descritto dalle relazioni:

$$\begin{cases} \omega_{WH} = \frac{\omega_{GB}}{\gamma_D} \\ C_{WH} = C_{GB} \cdot \gamma_D \cdot \eta_D \end{cases} \quad (4.26)$$

che esprimono le relazioni tra le coppie (C_{WH}, ω_{WH}) delle ruote con (C_{GB}, ω_{GB}) che descrivono il movimento dell'albero di trasmissione.

4.5.2 Il cambio

Il cambio è un dispositivo che che trasforma la potenza meccanica della sorgente in questo caso ω_{TR} e C_{TR} in una potenza meccanica con una velocità diversa ω_{GB} e quindi anche una coppia diversa C_{GB} .

Definiamo il coefficiente di rendimento η_{GB} che ipotizziamo costante al variare dei giri del motore, indichiamo con n la marcia inserita e con $\gamma(n)$ il rapporto di trasmissione (coefficiente di riduzione della velocità di rotazione); il modello quasi statico del cambio è quindi descritto da:

$$\begin{cases} \omega_{TR} = \gamma(n) \cdot \omega_{GB} \\ C_{TR} = \frac{C_{GB}}{\gamma(n) \cdot \eta_{GB}} \end{cases} \quad (4.27)$$

In questo modello è stato impiegato n , che rappresenta la marcia alla quale stiamo viaggiando. Tuttavia per non introdurre ulteriori semplificazioni in seguito, e data la completa generalità del cambio che garantisce una traduzione senza dissipazioni nel modello ideale, possiamo completamente svincolarci dalla marcia n che stiamo utilizzando e quindi il ruolo del cambio è solo quello di un riduttore di velocità.

4.5.3 Il ripartitore di coppia

L'ultimo dei dispositivi che si interpone tra motore e ruote, è il sistema più importante in un architettura ibrida parallela perché garantisce che l'ICE e la EM cooperino per fornire la coppia alle ruote.

I ripartitori di coppia o *PSD (Power Split Device)* sono impiegati per combinare diverse sorgenti di energia (in questo caso due) in un unico carico meccanico. Il core della maggior parte dei PSD è un planetary gear set, il quale è un dispositivo composto di tre principali parti rotanti.

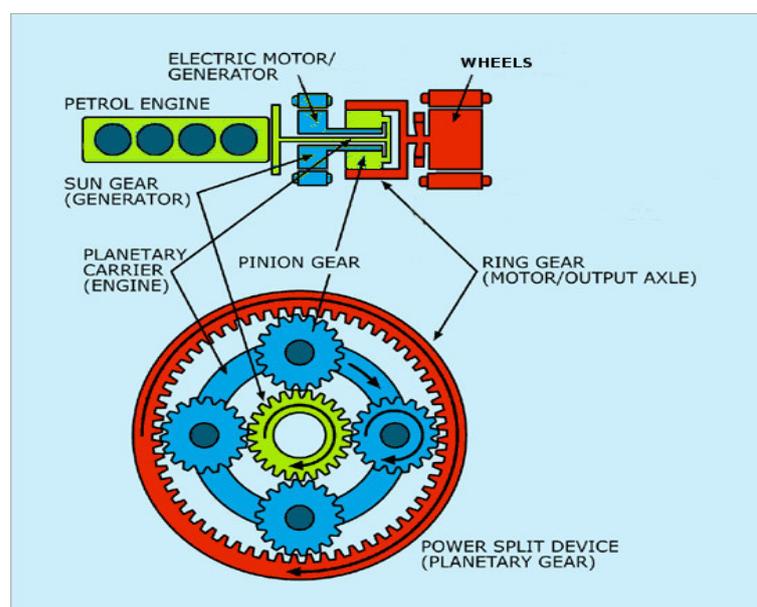


Figura 4.12: Sezione del "planetary gear"

La parte più interna viene chiamata *sun gear* e sarà la ruota meccanica a cui verrà collegato il motore termico. La parte più esterna viene chiamata *ring gear* e rappresenta l'interfaccia meccanica a cui sarà collegato l'albero di trasmissione delle ruote. La parte compresa tra i due anelli è invece chiamata *planetary carrier* ed è composta di (solitamente) quattro ruote dentate che scorrendo all'interno della ruota esterna permettono che il motore elettrico apporti la propria potenza meccanica alle ruote. Ovviamente nella fase inversa, cioè quella in cui la macchina elettrica verrà impiegata da generatore, il funzionamento è identico a meno del fatto che le ruote dentate del carrier applicheranno una coppia negativa.

La Figura 4.13 mostra come viene montato un ripartitore di coppia in un generico powertrain.

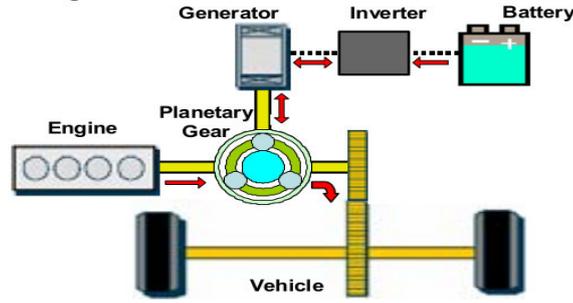


Figura 4.13: Montaggio del ripartitore di coppia

Il funzionamento di questo dispositivo sarà caratterizzato dai rapporti delle ruote dentate, vediamo come costruirne il modello: definiamo il rapporto tra le velocità delle ruote dentate come

$$z = \frac{n_s}{n_r} \quad (4.28)$$

in cui n_s è il numero di denti nella ruota sun, e n_r è il numero di denti presenti nella ring. Un tipico valore di z , ad esempio nella Toyota prius è $z = 0.385$.

A partire dalle equazioni della meccanica delle ruote dentate, è possibile scrivere

$$\omega_{WH}(t) = \frac{\omega_{EM}(t) + z \cdot \omega_{ICE}(t)}{1 + z} \quad (4.29)$$

la quale evidenzia una semplice relazione lineare tra le velocità angolari dei tre alberi. Dopodiché non ci resta che applicare l'uguaglianza dei momenti, da cui discende l'equazione del bilanciamento della coppia.

$$C_{WH}(t) = C_{ICE}(t) + C_{EM}(t) \quad (4.30)$$

Per approfondimenti si rimanda a [1].

Le due equazioni (4.29) (4.30) permettono di modellare un dispositivo meccanico molto complesso come il ripartitore di coppia con delle semplici equazioni lineari. A questo punto abbiamo a disposizione le relazioni tra le grandezze ω e coppia che caratterizzano i tre dispositivi che dovremo interfacciare in fase di ottimizzazione: motore termico, macchina elettrica e ruote.

Possiamo allora schematizzare il blocco che rappresenta il ripartitore di coppia nel modo seguente:

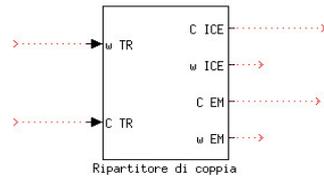


Figura 4.14: Blocco del ripartitore di coppia

Le coppie e le velocità angolari di motore termico e di quello elettrico, si combinano per imprimere la potenza richiesta sull'albero delle ruote.

Dunque in accordo con l'approccio quasi statico, tutto il sistema che si interpone tra i motori e le ruote può essere modellato attraverso le equazioni descritte in questo paragrafo e possiamo schematizzarlo come segue.

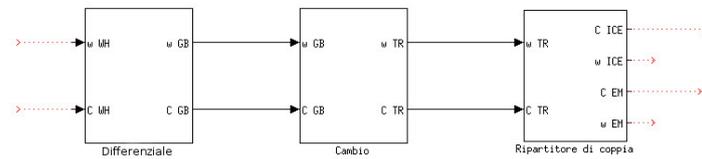


Figura 4.15: Blocco della trasmissione

Capitolo 5

Le strategie di controllo e l'ottimizzazione

Parallelamente allo sviluppo tecnologico dei veicoli ibridi, nasce l'esigenza di determinare una procedura che coordini l'iterazione tra i due motori, perché è proprio grazie a questa opportunità di scelta che i veicoli in questione riescono ad abbattere i consumi. Queste procedure sono comunemente denominate *strategie di controllo* e obiettivo di questo capitolo sarà riuscire a determinare procedure per l'ottimizzazione dei consumi.

Nella pratica le strategie di controllo saranno implementate da dei dispositivi montati nell'auto denominati IEMA *Intelligent Energy Management Agent*, responsabili di dare le corrette istruzioni alle varie centraline al fine di realizzare quanto pianificato. Accenniamo in questa sezione che in realtà le strategie di controllo di un veicolo ad alimentazione ibrida, agiscono su più livelli al fine di garantire una continuità di prestazioni e al contempo una gestione energetica economica. A tal proposito si identificano un controllore SDC (*Supervisory Drive-train Controller*) responsabile del compito di sincronizzare le sorgenti di energia, con l'effettiva potenza richiesta dal guidatore; mentre al livello più basso agiscono dei controllori ECU (*Electronic Control Unit*) responsabili del controllo di ogni singolo dispositivo elettronico trasformando le istruzioni provenienti dal SDC in segnali di controllo.

5.0.4 Obiettivo

L'obiettivo principale di tutte le strategie di controllo è di minimizzare il consumo rispetto ai veicoli convenzionali, senza abbassare troppo le performance. La linea di principio è quella di far lavorare l'ICE solamente nei punti operativi ad elevata efficienza. Il motore termico raggiunge la massima efficienza in termini di consumo quando è richiesta una elevata coppia con medio-basse velocità di rotazione. Per questo motivo una buona scelta da effettuare è utilizzare un motore termico il più piccolo possibile, in modo da impiegarlo ad elevati regimi per la maggior parte del suo utilizzo.

Dunque l'obiettivo che ci poniamo sin dall'inizio è quello di migliorare lo sfruttamento del motore dell'automobile non solo recuperando l'energia altrimenti persa in frenata, ma anche evitando di obbligarlo a funzionare in maniera sub-ottima.

5.1 Le strategie di controllo per l'architettura parallelo

Con la topologia parallelo, descritta in precedenza, la ripartizione della potenza tra ICE e EM ad ogni istante può essere effettuata, in teoria, in infiniti modi. Come vedremo però ci saranno delle limitazioni fisiche che andranno a restringere i gradi di libertà a disposizione, come le caratteristiche del ripartitore di coppia e la potenza nominale della macchina elettrica. Le scelte di progettazione che si rileveranno più importanti, saranno quelle sulle dimensioni dei motori e sulle velocità critiche che delineano quando cambiare la ripartizione della potenza.

Definiamo innanzitutto dei parametri di fondamentale importanza nello studio della strategia:

- Il parametro u_p così definito:

$$u_p = \frac{P_{EM}}{P_{EM} + P_{ICE}} \quad (5.1)$$

che indica il *rapporto di ripartizione della potenza* ossia quanta potenza sta erogando la EM rispetto alla potenza complessiva richiesta. Cioè

- $u_p = 1$ se solamente il motore termico è in funzione
- $u_p = 0$ se solamente il motore elettrico è in funzione
- $u_p \in [0, 1]$ durante la modalità ibrida
- $u_p < 0$ durante la ricarica.

Notiamo che il parametro u_p nelle condizioni di potenza massima richiesta può valere al massimo $u_p = 0,45$ per la scelta sul dimensionamento del motore elettrico. Mentre se la potenza richiesta è inferiore alla massima potenza disponibile dal veicolo, u_p può assumere (in modulo) valori ben superiori a 0,45.

- il parametro u_c

$$u_c = \frac{C_{ICE}}{C_{req}} \quad (5.2)$$

che indica il rapporto tra la Coppia erogata dal motore termico, rispetto a quella richiesta dal conducente; C_{req} chiamato *rapporto di ripartizione della coppia* ossia:

- $u_c = 0$: il veicolo è completamente sostenuto dalla EM
- $u_c = 1$: la trazione è completamente fornita dall' ICE
- $u_c > 1$: le batterie sono in fase di ricarica.

- R_e : numero intero che descrive se il motore termico è in funzione, in particolare:

- $R_e = 1$ se solamente il motore termico è in funzione
- $R_e = 0$ se solamente il motore elettrico è in funzione
- $R_e = 1$ durante la modalità ibrida

5.1.1 Tipi di strategie di controllo

È facile intuire dal discorso precedente che le strategie di controllo definiranno il comportamento del power-train sulla base della scelta dei valori assegnati a R_e , u_p e u_c . Un altro aspetto che caratterizza le strategie è la conoscenza della situazione futura di guida.

Possiamo immaginare di progettare due diversi tipi di strategia di controllo basandosi sulla quantità di informazioni che abbiamo a priori:

1. *Strategie basate su regole*: le quali sono strutturate su semplici relazioni che hanno origine diversa (esperienza umana, dati sperimentali) e risultano particolarmente efficaci nella gestione del veicolo in tempo reale;
2. *Strategie basate sull'ottimizzazione*: il loro obiettivo è quello di rendere ottima la scelta del punto di lavoro. Purtroppo molto spesso la loro validità rimane puramente teorica perché richiedono dati a priori che un percorso automobilistico non fornisce in anticipo.

Naturalmente possiamo dire sin da subito che il secondo tipo di strategia darà risultati migliori, ma ovviamente richiede dati troppo precisi sul percorso, sull'entità del traffico, sullo stato di carica delle batterie e così via che nella pratica non sono noti a priori.

Questi tre tipi elencati saranno esaminati in dettaglio nelle sezioni di questo capitolo.

5.2 Strategie basate su regole

Le strategie di controllo basate su regole sono strutturate sulla base di semplici relazioni e risultano particolarmente efficaci nella gestione del veicolo in tempo reale dal momento che non necessitano di alcuna conoscenza preventiva di dati del profilo di guida.

L'idea di fondo per questo tipo di strategie è basata sul concetto di load-leveling: una strategia load-leveling si pone come obiettivo lo spostamento del punto di funzionamento del motore termico il più vicino possibile al punto ottimale di efficienza. Generalmente il punto di funzionamento viene spostato in corrispondenza di valori di coppia e velocità più bassi rispetto al punto ottimale e ciò comporta una riduzione del consumo di carburante solamente grazie all'energia recuperata in frenata. La differenza tra la potenza richiesta dal guidatore e la potenza sviluppata dal motore termico viene poi compensata per mezzo del motore elettrico che può operare anche come generatore per mantenere lo stato di carica delle batterie sopra la soglia minima. Le strategie basate su regole fondamentalmente possono essere di due tipi: si possono distinguere strategie di tipo deterministico e strategie che fanno uso della logica fuzzy, queste ultime in particolare hanno riscosso un interesse sempre crescente negli ultimi anni.

5.2.1 Strategie di controllo basate su regole deterministiche

Presentiamo in questa sezione alcuni aspetti generali delle strategie che utilizzano regole di tipo euristico per l'attuazione del controllo. Questo tipo di controllo in realtà, sebbene sembri molto grossolano, si rivela essere molto efficiente quando si hanno poche informazioni

a priori sul ciclo di guida da seguire e nonostante tutto sono quelle più utilizzate nei modelli presenti sul mercato.

Presentiamo di seguito alcuni degli esempi più rilevanti.

Strategie di tipo Esclusivo

Il metodo di controllo più semplice che possiamo immaginare è quello di utilizzare in maniera disgiunta i due motori, in particolare si possono distinguere due strategie:

Criterio velocità La scelta più banale che possiamo immaginare è quella che vede impiegata da sola la macchina elettrica alle basse velocità, e solamente il motore ICE alle velocità più elevate.

Questa strategia porta il vantaggio che l'ICE rimane spento durante ripetute frenate che si effettuano ad esempio in un percorso cittadino ed inoltre rimane spento per tutta la permanenza della fermata. Il problema del controllo si restringe dunque alla scelta della velocità a cui avverrà lo switch. Possiamo ad esempio effettuare la scelta

$$v_{switch} = 30 \text{ Km/h} \quad (5.3)$$

tipica scelta impiegata nelle auto attualmente in commercio. Naturalmente lo SoC delle batterie diminuisce durante la guida con EM, mentre si rigenera durante i periodi in ICE.

È importante notare che le prestazioni di questa strategia non sono principalmente influenzate dalla scelta di v_{switch} ma bensì dalla durata degli accumulatori che drasticamente rovinano i risultati non appena la durata totale del ciclo di guida aumenta.

Questo tipo di strategia, sebbene sembri poco accurata e furba, dimostra comunque una evidente economia del carburante rispetto alle auto ordinarie, perché qualunque decelerazione da una velocità superiore a v_{switch} a un valore inferiore, ha una duplice funzione di risparmio: lo spegnimento del motore ICE, il recupero dell'inerzia della frenata e la rimessa in funzione tramite EM.

Le ultime considerazioni da fare su questo tipo di approccio, riguardano la scelta ottimale di v_{switch} . Naturalmente questa scelta sarà strettamente legata al ciclo di guida che stiamo effettuando, e possiamo immaginare un'auto che effettui questa scelta sulla base dei dati raccolti nell'ultimo periodo di guida. Questa scelta sarà perciò fatta tenendo conto dell'attuale livello di carica della batteria, della durata media delle parti di percorso ad alta velocità, e della durata di quelle percorse a bassa velocità ovviamente rispettando la massima velocità che la EM sia in grado di consentire.

Criterio Carica In maniera analoga possiamo pensare a una strategia in cui lo switch tra i due power train avviene a dei determinati stati di carica SoC della batteria. Possiamo infatti assumere che il controllore proceda ad impiegare la EM senza alcuna restrizione, fintantoché la carica della batteria lo permette; in seguito comandi l'accensione del motore termico, impiegato a regimi ottimali al fine di provvedere al movimento dell'auto e inoltre alla carica degli accumulatori.

Possiamo immaginare che questi due tipi di strategie siano abbastanza lontane dall'ottimalità in quanto non tengono affatto conto del percorso che stiamo effettuando e delle tipologie di richiesta di potenza da parte del conducente.

Strategia Mista

Al fine di ottimizzare la cooperazione tra i due power train, possiamo pensare di far generare al propulsore elettrico i picchi di potenza, mentre il ICE continua a essere impiegato in zone ad elevata efficienza. Questa idea, per ora del tutto generale ci permette di pensare sin da subito di poter impiegare un motore termico di dimensioni ridotte, che facilmente siamo in grado di far funzionare nelle zone ad elevata efficienza, mentre la potenza supplementare richiesta dal guidatore viene fornita dal motore elettrico.

Un'altra questione che dobbiamo porci è se l'ICE dovrebbe essere spento, oppure lasciato in condizioni di regime minimo quando esso non è utilizzato. Se il motore termico venisse spento quando è in funzione solo quello elettrico, sicuramente il consumo in questo intervallo sarebbe pari a zero. Il problema però si presenta quando l'ICE verrà riacceso: infatti la perdita di temperatura durante l'inattività farà aumentare i consumi alla successiva riaccensione. La scelta più accurata può essere fatta solamente sulla base dei dati a priori che si hanno e sul risultato di simulazioni. Scegliamo a titolo esemplificativo di spegnere l'ICE durante l'inattività: possiamo allora abbozzare un algoritmo di controllo di questo tipo:

- se $v < v_{switch}$ & $Soc > SoC_{CRITICA} \implies u_p = 0$ & $R_e = 0$;
- se $v < v_{switch}$ & $Soc < SoC_{CRITICA} \implies u_p < 0$ & $R_e = 1$;
- se la potenza richiesta dal guidatore sta avendo un picco $\implies u_p \in [0, 1]$ & $R_e = 1$;
- le batterie vengono ricaricate tramite frenata rigenerativa.

Per impartire queste regole al sistema elettronico di controllo, possiamo pensare di suddividere l'insieme dei punti di funzionamento del motore termico in sottoinsiemi come nella Figura 5.1.

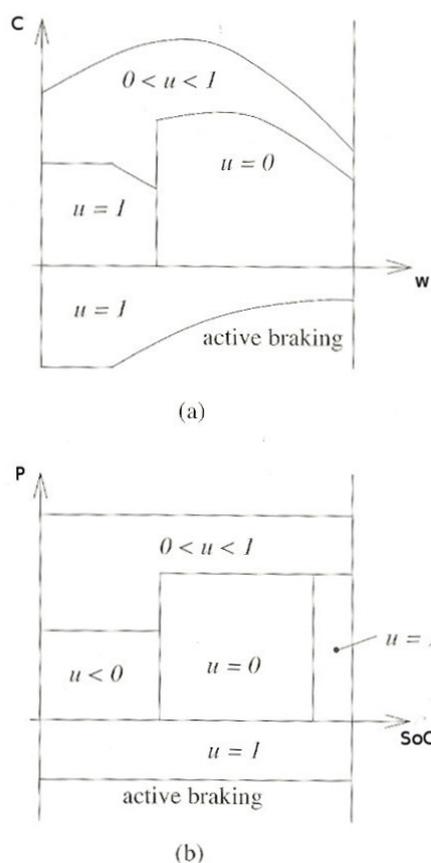


Figura 5.1: Controllo euristico in termini di coppia e velocità(a) , o in termini di potenza e SoC in (b)

Questa figura rappresenta una maniera semplice ed efficiente per programmare la strategia studiata.

Questa parte ha presentato in maniera molto breve come vengono implementate le strategie di controllo basate su regole euristiche anche allo stato dell'arte. Naturalmente questa trattazione ha poco di ingegneristico perché non racchiude nessun risultato di ottimizzazione. Lo studio approfondito di come si possono analizzare e progettare dei controlli ottimi verrà presentato tra breve.

5.2.2 Cenno alla logica fuzzy

La logica fuzzy, conosciuta anche come logica sfocata, è una logica non binaria per mezzo della quale si può attribuire a ciascuna proposizione un grado di verità compreso tra 0 e 1, si tratta quindi di una logica polivalente che costituisce un'estensione della logica booleana. Già intuiteda Cartesio, Bertrand Russell, Albert Einstein, Werner Karl Heisenberg, Jan Łukasiewicz e Max Black, venne concretizzata da Lotfi Zadehche, che la propose nel 1965 in un articolo intitolato Information and control. [7]

Una delle applicazioni di maggiore successo della logica fuzzy è rappresentata dallo sviluppo di sistemi di controllo "esperti", sistemi cioè capaci di gestire diversi ingressi (provenienti ad esempio da sensori) ed intraprendere azioni di risposta sulla base di regole descritte mediante un linguaggio naturale. Con riferimento ad un veicolo ibrido ad esempio, è possibile considerare come ingresso lo stato di carica delle batterie (che potrà essere quindi abbastanza alto o basso) ed implementare nel relativo controllore la seguente regola: SE lo stato di carica è basso ALLORA ricarica le batterie. Il risultato di tutto il processo viene infine defuzzificato, viene cioè restituito un nuovo valore adatto al controllo e all'attuazione. Nel caso precedente il risultato del processo potrebbe essere rappresentato dal comando da inviare al sistema per abilitare la modalità ricarica. Per approfondimenti rimandiamo a [1].

5.3 Strategie basate sull'ottimizzazione

Il principale obiettivo degli *energy-management controller* è quello di minimizzare il consumo globale lungo un intero percorso.

Per itinerario in questo caso intendiamo un singolo, oppure una ripetizione dei drive-cycle. Nella realtà esso sarà costituito da un classico percorso effettuato in auto. Naturalmente l'algoritmo di controllo sarà tanto migliore quante più informazioni avrà riguardo il percorso da effettuare; questo tipo di informazioni saranno fornite al controllore da parte del conducente (in un ipotetico caso) o in mancanza di queste, dovranno essere riconosciute dall'algoritmo stesso.

Possiamo immaginare che il veicolo oggetto di studio sia dotato di un dispositivo di navigazione ad esempio un GPS, tramite il quale sia possibile ricavare informazioni sull'itinerario che andremo a percorrere. L'ideale sarebbe avere tutte le informazioni che caratterizzano la scelta ottima: limiti di velocità, topografia del territorio, caratteristiche del manto stradale, situazione del traffico; allora una control-unit sarebbe in grado di elaborare un piano energetico ottimale. In particolare queste informazioni molto dettagliate sui prossimi passi del veicolo ci potranno consentire di effettuare scelte particolari, che altrimenti non ci saremmo potuti permettere, che riusciranno a migliorare sensibilmente l'economia dell'energia nell'auto. Possiamo infatti pensare a un impiego ottimo del motore termico che saremo in grado di far funzionare per lunghi periodi all'efficienza massima, senza dovergli richiedere picchi di potenza perché eventuali richieste di questo tipo possono essere soddisfatte dalla EM. Generalmente però tutte queste condizioni ideali non si verificheranno, ad esempio perché il navigatore impiegato non ha abbastanza informazioni sul percorso, oppure la strada è stata perturbata da eventi inaspettati.

Il problema è ulteriormente complicato dal fatto che il controller dovrà seguire dei vincoli, più o meno rigidi: ad esempio possiamo pretendere che il SoC della batteria non scenda mai al di sotto di un livello di carica critico durante la guida puramente elettrica, perché ad esempio questo potrebbe comportare l'arresto inaspettato del veicolo.

5.3.1 Ottimizzazione con funzionale di costo

Consideriamo ora l'ottimizzazione fatta dal solo punto di vista delle grandezze e delle relazioni matematiche che costituiscono il modello. Da un punto di vista esclusivamente

del modello matematico l'obiettivo dell'ottimizzazione sarà quello di minimizzare una certa funzione J che spesso viene denominata *indice di performance* o anche *funzionale di costo*.

In questa analisi l'obiettivo da raggiungere, come descritto sin dall'inizio, sarà quello di ridurre al minimo il consumo di carburante, quindi utilizzeremo il funzionale:

$$J = m_f(t_f) \quad (5.4)$$

cioè la massa di combustibile consumata su un percorso dell'auto di durata t_f secondi. Che possiamo riscrivere nel seguente modo (si veda il modello del motore termico),

$$J = \int_0^{t_f} \dot{m}_f(t, u(t)) dt. \quad (5.5)$$

Oltre al problema dei consumi, ci possiamo proporre di inserire nell'ottimizzazione anche l'indice delle emissioni, che quindi porta a una nuova espressione

$$j = \int_0^{t_f} L(t, u(t)) dt, \quad (5.6)$$

dove $L(t, u(t))$ è il nuovo funzionale di costo dipendente da consumi ed emissioni.

Sulla base del modello è dunque possibile cercare di costruire una funzione matematica che al meglio rappresenti le grandezze del consumo e del funzionamento dell'auto. Questa funzione viene denominata funzionale di costo, tramite le conoscenze matematiche possiamo andare a cercare il minimo di questa funzione.

Non c'è da sorprendersi dal fatto che questo metodo risulta molto complesso e evidentemente non è implementabile in un caso pratico perchè ha bisogno, come ingresso, del ciclo di guida: sconosciuto a priori.

Sono stati condotti vari studi su questo metodo e sono stati presentati svariati funzionali di costo. Dobbiamo però prendere atto del fatto che questo è solamente una guida di aspetto matematico per andare ad implementare una vera e propria strategia di controllo; perchè di fatto è irrealizzabile nella pratica.

5.3.2 Strategie di ottimizzazione in real-time

Quando le informazioni a priori sul tragitto sono troppo limitative (come nella maggior parte dei casi pratici), l'unico modo per implementare una strategia ottima è quello di andare ad ottimizzare in ogni istante il consumo di carburante. Questa scelta è per definizione ottima perché, se immaginiamo di consumare il minimo possibile "ad ogni istante", allora al termine di un percorso avremo consumato la minima quantità di carburante possibile sulla base delle conoscenze che avevamo a disposizione ad ogni istante.

Questo tipo di controllo è ancora del tutto inutilizzato nelle automobili nel mercato a causa del fatto che richiede un'elevata capacità computazionale dell'unità di controllo, ma soprattutto perché richiede un'approfondita progettazione dell'auto. Fattore che purtroppo

vista la nicchia di mercato a cui sono rivolte le automobili ibride, non ha ancora permesso gli investimenti necessari.

5.4 Strategia del punto ottimo di funzionamento

La strategia oggetto di questa tesi si vuole differenziare dalle logiche sopra descritte per riuscire ad implementare facilmente il controllo sulla base di una "manipolazione" della mappa del motore termico. Chiamerò questa strategia di controllo "Strategia del punto ottimo di funzionamento" perché l'obiettivo è quello di modificare il punto di lavoro in un punto ottimizzato al meglio. Nelle automobili attualmente in commercio vengono utilizzate principalmente strategie basate su regole deterministiche, come descritto fin'ora si è cercato di ottimizzare i consumi impiegando degli approcci di tipo empirico; infatti si cercava di utilizzare nella maniera migliore la carica delle batterie ripartendo la potenza richiesta tra i due motori in base alle sensazioni sul consumo come ad esempio la velocità o lo stato di carica delle batterie. Nella pratica dopo aver simulato il funzionamento sfruttando le regole deterministiche, si affianca un metodo ottimo calcolando matematicamente i consumi minimi sfruttando i funzionali di costo come descritto, per capire quanto differisce un metodo basato su regole deterministiche rispetto all'ottimalità.

Evidentemente con questi approcci non si possono ottenere in nessun modo dei risultati prestanti al massimo, perché da una parte la teoria matematica cerca di dirci il limite a cui possiamo spingerci su un fissato percorso, mentre si contrappone il fatto che tale punto ottimo non si raggiungerà mai nella pratica, dato che non si hanno abbastanza informazioni a priori. Ciò ci obbliga a utilizzare strategie ancora molto rudi, che però non riescono ad avvicinarsi al punto ottimo e che rischiano di far sfumare le aspettative da un'auto ibrida.

A partire da questi presupposti e riflettendo sulle descrizioni fatte riguardo le strategie, ci rendiamo conto che non è facile sfruttare in maniera potente le caratteristiche di un'automobile ibrida: da un lato dobbiamo utilizzare al massimo le batterie facendole lavorare per tenere il motore termico lontano da regimi a bassa efficienza; dall'altro avere degli accumulatori troppo grandi montati su un'auto, in particolare di piccole dimensioni, penalizzano troppo il peso della vettura. Da un lato un motore termico troppo potente penalizza molto i consumi, mentre dall'altro un motore termico sottodimensionato, oltre a essere insoddisfacente per la clientela, non garantisce la carica delle batterie. E ancora una macchina elettrica piccola conviene sul piano del peso, ma penalizza molto l'auto sia in prestazioni, sia nel recupero dell'energia.

Dopo avere riassunto i principali problemi che sono stati riscontrati nello studio di un tale mezzo, viene ora proposta una strategia completamente innovativa nell'ambito del controllo della ripartizione della potenza.

5.4.1 Descrizione

La strategia progettata in questa tesi si basa sul concetto di *load-leveling*. Ovvero si pone l'obiettivo di spostare il punto funzionamento del motore termico per aumentare la sua efficienza. Non solo. L'obiettivo sarà quello di individuare il punto ad efficienza ottimale nell'intorno scelto.

Il mezzo è in ogni caso completamente controllato dal guidatore in qualsiasi regime di funzionamento; supponiamo perciò che esso richieda attraverso l'azione sul pedale dell'acceleratore, una certa accelerazione che andrà a modificare la velocità di percorrenza del mezzo. Tutto ciò si traduce nel modello matematico da noi costruito nell'avere come dati di input una certa $\omega_{WH,req}$ e una certa coppia $C_{WH,req}$ richieste sulle ruote come potenza da erogare.

Impiegando ora i modelli descritti nel Capitolo 4, tramite le relazioni fisiche siamo immediatamente in grado di calcolare quale velocità angolare e quale coppia dovranno generare, in maniera combinata, i motori elettrico e termico. Riassumiamo in uno schema come vengono combinati i vari modelli.

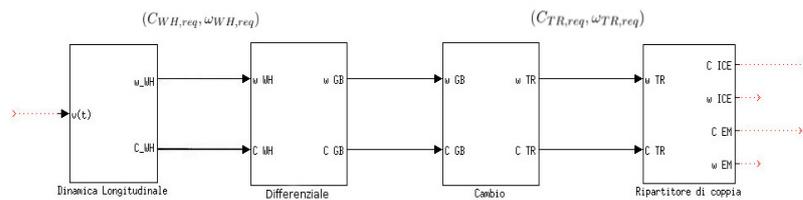


Figura 5.2: Cascata dei modelli

A questo punto abbiamo a disposizione la coppia $(C_{TR,req}, \omega_{TR,req})$ di valori che il ripartitore deve fornire, facendo cooperare i due motori, al fine di soddisfare la richiesta del conducente. Naturalmente l'apporto di tale potenza può essere fatto in infiniti modi sfruttando le combinazioni dei due motori.

Vediamo con quale soluzione è stato risolto il problema di individuare la ripartizione ottima.

5.4.2 Ripartizione della coppia

Per sfruttare al meglio le caratteristiche di una topologia parallelo, dovremo fare in modo che il motore termico si trovi ad ogni istante in punti di funzionamento che minimizzano i consumi; nel fare questo dobbiamo in ogni caso garantire che la combinazione delle due potenze soddisfi le richieste del guidatore. La strategia si basa allora nell'ottimizzare istante per istante l'efficienza termodinamica istantanea del motore termico; utilizzando gli accumulatori come "serbatoio" di energia, in grado di immagazzinare energia se la potenza è in eccesso, o di fornire energia se la potenza è in difetto.

Possiamo fare questo andando ad analizzare le mappe dei motori: dalla coppia $(C_{TR,req}, \omega_{TR,req})$ che conosciamo, andiamo subito ad individuare uno ed un solo punto di lavoro per il motore termico che garantisce queste quantità: supponiamo, a titolo esemplificativo, che ci vengano richieste $(40Nm, 1500rpm)$, allora in un auto convenzionale il motore termico individuerrebbe il punto di lavoro:

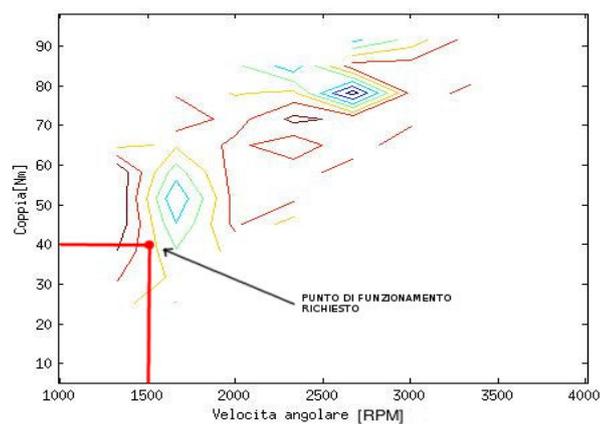


Figura 5.3: Punto di lavoro di un'auto convenzionale

evidentemente lontano dal punto di efficienza massima.

L'idea è allora di spostare il punto di lavoro del motore termico in un suo opportuno intorno ad elevata efficienza, ribilanciando l'energia in eccesso o in difetto per mezzo della macchina elettrica. E cioè

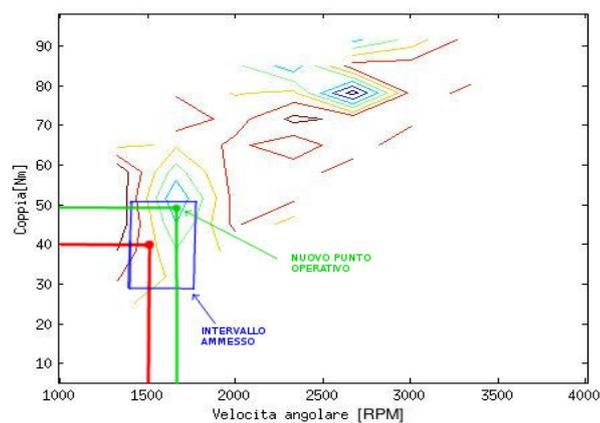


Figura 5.4: Scelta di un nuovo punto ad elevata efficienza

Numericamente possiamo chiarire il passaggio: la coppia di grandezze richiesta è

$$\begin{cases} C_{TR,req} = 40 Nm \\ \omega_{TR,req} = 1500 rpm \end{cases} \quad (5.7)$$

mentre noi spostiamo il punto di lavoro in:

$$\begin{cases} C_{ICE,eff} = 49 Nm \\ \omega_{ICE,eff} = 1690 rpm \end{cases} \quad (5.8)$$

utilizzando i pedici *req* per i valori richiesti dal ciclo di guida, *eff* per indicare i valori imposti dal controllo.

Adesso il punto di funzionamento della macchina elettrica è "imposto", nel senso che non abbiamo altri gradi di libertà per posizionare il suo punto operativo perché utilizzando le equazioni del ripartitore di coppia

$$\begin{cases} C_{TR}(t) = C_{ICE}(t) + C_{EM}(t) \\ \omega_{TR}(t) = \frac{\omega_{EM}(t) + z \cdot \omega_{ICE}(t)}{1+z} \end{cases} \quad (5.9)$$

è evidente che ω_{EM} e C_{EM} possono assumere uno ed un solo valore.

Dobbiamo allora sfruttare le equazioni (5.9) per ricavare quale omega e coppia sono imposte al motore elettrico.

Utilizzando un valore di $z = 0.385$ otteniamo:

$$\begin{cases} C_{EM,eff} = C_{TR,req}(t) - C_{ICE,eff} = -9Nm \\ \omega_{EM,eff} = (1+z) \cdot \omega_{TR,req} - z \cdot \omega_{ICE,eff} \cong 1426rpm \end{cases} \quad (5.10)$$

In questo caso esemplificativo il motore a combustione sta lavorando a un numero di giri superiore a quelli richiesti, erogando anche una coppia di 9Nm superiore a quella necessaria.

La macchina elettrica in questo caso starà funzionando da generatore di corrente, nel punto di lavoro indicato da (5.10) e individuato nella figura 5.4.

È importante notare che spostando il punto di lavoro sulla base del valore dell'efficienza NON significa che in ogni caso il motore nel nuovo punto di lavoro consumerà meno, ma bensì che il suo *rendimento termodinamico* sarà migliore. Questo in generale può significare sia che il motore termico eroghi potenza in difetto, richiedendo al motore elettrico di compensarne la differenza, sia che il motore termico eroghi potenza in eccesso; richiedendo in questo caso che la macchina elettrica lavori da generatore e immagazzini la potenza in più nelle batterie.

5.4.3 Soluzione al problema con Matlab

A partire dalle idee appena descritte dobbiamo ora utilizzare gli strumenti software a disposizione per elaborare i dati disponibili e definire numericamente i nuovi punti di lavoro del motore calcolandone i rispettivi consumi.

A partire dal veicolo di riferimento, è possibile procurarsi i valori numerici delle grandezze che ci interessano, in particolare siamo interessati soprattutto all'velocità angolare ω , al relativo valore della coppia C che individuano il punto operativo del motore; e naturalmente al consumo specifico e all'efficienza termodinamica legata a ogni punto di lavoro. Ovviamente i valori numerici si riferiscono alle mappe dei consumi presentati nel capitolo dei modelli dei componenti.

L'ottimizzazione si basa allora sulla costruzione di un nuovo insieme di punti di lavoro del motore termico che descriveranno il funzionamento di tale motore quando sarà montato

nell'auto di natura ibrida. Descriviamo per passi come procedere per trovare il nuovo insieme di punti di lavoro ottimizzati:

1. *Scelta dei range entro cui possono variare coppia e ω* : La scelta dell'ampiezza dei range di ω e coppia entro cui si può spostare il punto operativo devono essere scelti sulla base delle caratteristiche del motore elettrico e del ripartitore di coppia. Infatti il motore elettrico non può garantire ad esempio più di 210Nm; mentre le velocità angolari ammesse devono essere in grado di rispettare (5.9). Infatti se ammettessimo che il punto di lavoro si potesse spostare senza limitazioni all'interno di tutti i possibili valori che può assumere, risulta ovvio che il nuovo punto operativo ottimizzato si troverebbe in ogni istante nel punto ad efficienza massima; perciò tutto il sistema funzionerebbe come un ibrido serie. Ciò equivale a un funzionamento degenero che deve essere evitato.

È dunque necessario definire un intervallo massimo entro cui si possono muovere la ω e la C del punto di lavoro. Utilizziamo per semplicità degli intervalli simmetrici sarà poi sufficiente definire ω_{var} e C_{var} che faranno in modo che la velocità angolare si possa muovere nell'intervallo:

$$[\omega_{TR,req} - \omega_{var}; \omega_{TR,req} + \omega_{var}]$$

quindi la coppia possa variare su:

$$[C_{TR,req} - C_{var}; C_{TR,req} + C_{var}]$$

Per le simulazioni svolte in questa trattazione sceglieremo dei range di variazione fissi, in particolare $\omega_{var} = 500rpm$ e $C_{var} = 10Nm$. Discuteremo tra breve le motivazioni a questa scelta.

2. *Suddivisione in intervalli*: Procediamo ora, in base all'ampiezza dell'intervallo scelto, a far variare la velocità angolare entro l'intervallo consentito. In questo modo è possibile suddividere l'asse delle velocità angolari in intervalli, ciascuno corrispondente a una fissata ω .

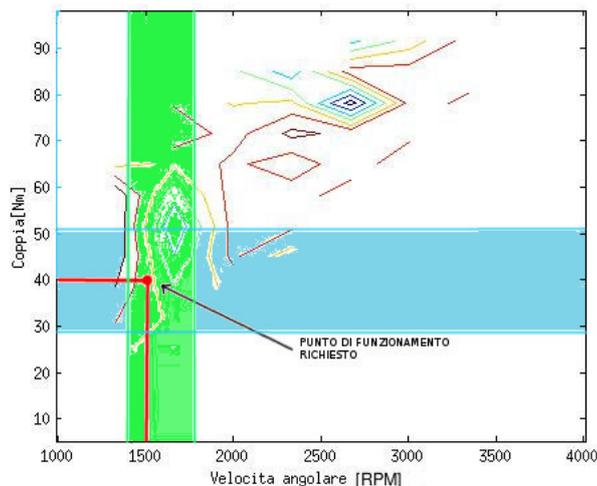


Figura 5.5: Intervallo ammesso per $\omega = 1500RPM$

3. *Massimizzare il rendimento termico*: Fissata allora una velocità angolare, dobbiamo ora massimizzare il valore dell'efficienza nel rispettivo intervallo trovato nel punto precedente. L'unico grado di libertà rimane la coppia: è evidente che fissata una ω , il problema diventa quello di massimizzare l'efficienza in funzione di una sola variabile: la coppia. Una volta trovato il punto di efficienza massima per ogni velocità nell'intervallo, il problema si riduce semplicemente a massimizzare questo valore al variare della velocità angolare, nel suo intervallo.

Con i passaggi appena descritti per ogni coppia ($C_{TR,req}, \omega_{TR,req}$) di grandezze richieste, andiamo a calcolare una nuova coppia ($C_{ICE,eff}, \omega_{ICE,eff}$) che rappresenta il nuovo punto operativo del motore. Dunque il nuovo punto di lavoro sarà ottimo dal punto di vista dell'efficienza nell'intorno scelto.

E infatti i passi sopra elencati ripercorrono proprio l'algoritmo con cui è stata sviluppata in Matlab (riportato in Appendice A) la nuova mappa del motore qui proposta:

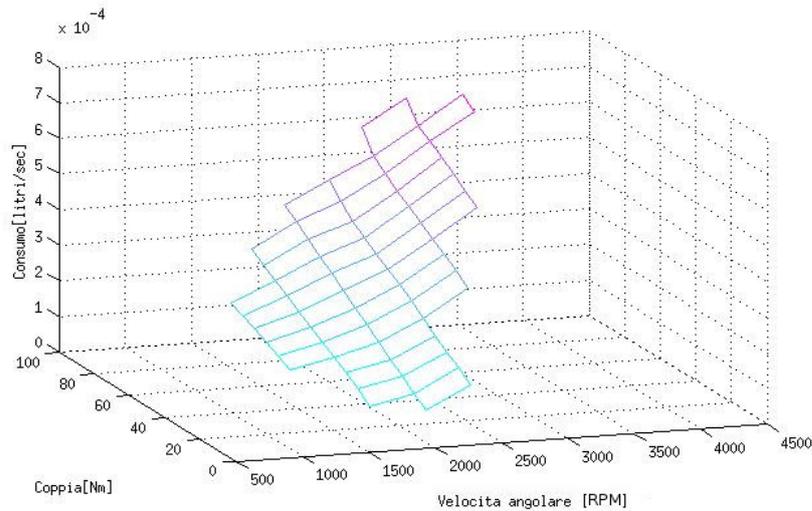


Figura 5.6: Mappa del motore che indica il consumo specifico relativo al nuovo punto di lavoro ottimizzato, in corrispondenza dei vecchi punti di lavoro

Confrontando questa nuova mappa ottimizzata con quella precedente, si nota subito che i picchi ad elevato consumo sono stati eliminati rispetto alla mappa originale. Questo è in accordo con il fatto che utilizzando il motore solamente nei punti ad efficienza massima, di sicuro il consumo non sta avendo un massimo relativo.

Inoltre come avevamo introdotto in precedenza, alle basse velocità di un ciclo cittadino il motore termico è molto poco efficiente, questa osservazione è ora motivata dall'eliminazione dei punti operativi in corrispondenza delle basse velocità angolari. Questo aspetto rispecchia anche il fatto che nelle strategie basate su regole, come abbiamo visto, quando la velocità scende al di sotto di una certa soglia il motore termico viene spento. Infine l'osservazione più importante è che nella nuova superficie, i punti a consumo massimo assumono valori sempre inferiori rispetto ai punti a consumo massimo della mappa originale. Questa osservazione è sufficiente a dimostrare che in ogni caso con la nuova caratteristica del motore riusciamo a fare meglio rispetto alla mappa originale.

Possiamo ulteriormente analizzare il funzionamento di questa strategia costruendo il grafico dell'andamento del *Rapporto di ripartizione della potenza* u_p definito in (5.1). È interessante evidenziare il suo andamento in funzione della potenza totale richiesta all'autoveicolo, in questo caso $P_{EM} + P_{ICE}$:

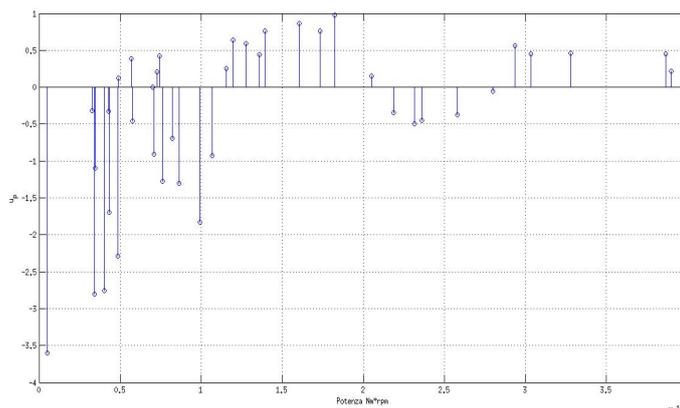


Figura 5.7: Andamento del rapporto di ripartizione della potenza

notiamo che alle basse potenze u_p è quasi esclusivamente negativo; mentre man mano che la potenza richiesta dal guidatore aumenta u_p diventa positivo e assume valori anche superiori a 0.45. Ciò significa che quando la potenza richiesta è molto bassa, viene generata coppia in surplus da parte del motore elettrico che va a ricaricare le batterie; mentre quando la potenza richiesta aumenta, invece il u_p diventando positivo fa sì che il motore elettrico supporti quello termico per la propulsione. Si evince che dalla parte centrale che u_p torna ad essere negativo. Ciò è facilmente motivato se osserviamo le curve di livello dell'efficienza, qui riproposte:

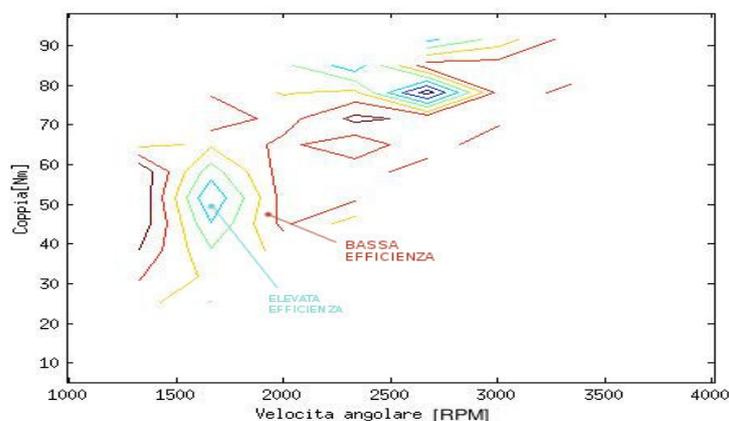


Figura 5.8: curve di livello rendimento ICE

evidenziando il fatto che nella parte a medio-alta potenza il motore termico ritorna ad essere molto efficiente; quindi risulta conveniente spostare il suo punto di lavoro per ricaricare gli accumulatori. Questa funzionalità è molto conveniente, dato che permette continuità di ricarica degli accumulatori anche quando la macchina sta effettuando cicli ad alte velocità, come ad esempio la percorrenza in autostrada.

Infine nella parte finale, ossia a elevate potenze il coefficiente converge al valore 0,45 (ricordiamo che $\frac{P_{EM}}{P_{ICE}} \cong 0,45$ per le scelte effettuate nel Capitolo 3) e ciò indica che stiamo sfruttando al massimo la potenza elettrica per avere il massimo delle prestazioni. Ciò implica che quando viene richiesta ad esempio una elevata accelerazione, il motore elettrico coopera alla propulsione, erogando la sua massima potenza nominale, e contribuendo a fornire circa il 50% della potenza totale.

Il funzionamento imposto da $u_p \approx 0.45$ permette di aumentare la potenza nominale del veicolo, consentendogli di erogare come potenza massima la somma di $P_{EM} + P_{ICE}$ che risulta un evidente vantaggio di prestazioni. Questo aspetto infine motiva le descrizioni fatte in precedenza, consentendo ai progettisti di dimensionare un motore termico di cilindrata minima e quindi molto efficiente, senza penalizzare le prestazioni che saranno comunque soddisfacenti per gli acquirenti della vettura.

Scelta dell'intervallo ottimo In queste simulazioni per chiarezza è stato scelto un intervallo di ampiezza costante. Appare evidente che la scelta dell'ampiezza dell'intorno rettangolare entro cui facciamo muovere il punto di lavoro influenzerà notevolmente il consumo medio in un tratto.

Naturalmente le restrizioni principali a cui siamo soggetti saranno di tipo meccanico, dato che il ripartitore di coppia non essendo ideale non sarà ovviamente in grado di supportare tutte le possibili combinazioni degli ingessi. C'è inoltre da ricordare il discorso del dimensionamento del motore elettrico che, nel nostro caso, è dimensionato in modo che la sua potenza nominale non copra il 100% della potenza nominale dell'auto, quindi non può sviluppare una qualsiasi potenza in difetto rispetto a quella richiesta.

A parte queste restrizioni di tipo meccanico, è fondamentale riuscire a scegliere un intorno che allo stesso tempo garantisca consumi ottimali e permetta continuità nella rigenerazione delle batterie.

A fronte di questa osservazione bisognerà cercare di trovare una soluzione ottima che implementi la scelta dell'ampiezza dell'intorno sulla base dell'andamento della funzione stato di carica $SoC(t)$. Lasciamo questa trattazione negli sviluppi futuri di questo lavoro.

5.5 Conclusioni

Sono stati presentati i principali problemi legati all'utilizzo dei carburanti fossili, ponendo particolare attenzione a quello dell'inquinamento atmosferico e ai costi di approvvigionamento. Allo stato dell'arte purtroppo la tecnologia elettrica e lo stato dello sviluppo degli EV non sono ancora adatti ad un passaggio radicale verso questa tecnologia. La soluzione temporanea verso cui quasi tutte le case automobilistiche si stanno muovendo è quella dell'automobile a tecnologia ibrida. Abbiamo evidenziato i pregi e i difetti delle varie configurazioni, focalizzandosi in definitiva verso la tecnologia full-hybrid parallelo. Essa presenta il vantaggio di far funzionare motore a combustione e macchina elettrica in maniera congiunta, in modo da sommare il contributo delle due potenze generate P_{EM} e P_{ICE} . Il vantaggio principale del full-hybrid è che consente di spegnere completamente il motore termico quando esso lavorerebbe a rendimenti troppo bassi, consentendo il moto della vettura sospinta solamente dal

motore elettrico(in questo caso la potenza della vettura è limitata perché il motore elettrico è dimensionato circa il 20-30% più piccolo rispetto al motore termico).

È stato necessario costruire i modelli:

- della dinamica longitudinale: al fine di calcolare la potenza dell'albero di trasmissione a partire dalle informazioni sul ciclo di guida;
- del motore a combustione: con approccio a "black-box" descrive il funzionamento del motore indicandone efficienza termodinamica e consumo istantaneo;
- della macchina elettrica: ancora con approccio a "black-box" permette di calcolare il rendimento del generatore e del motore elettrico;
- delle batterie: consente di descrivere lo stato di carica degli accumulatori durante un percorso di guida;
- della trasmissione: che include il modello del differenziale, quello del cambio e il ripartitore di coppia. Nel complesso descrive come la potenza generata dai due motori viene combinata insieme e trasmessa alle ruote per la propulsione.

I modelli descritti saranno necessari in una simulazione dell'intero powertrain, per analizzare il suo funzionamento complessivo.

Il funzionamento di un automobile ibrida è permesso ed è sincronizzato per mezzo di un dispositivo IEMA, responsabile del controllo dei flussi di energia nel powertrain. Il dispositivo, solitamente mediante delle regole, si occupa di controllare la potenza erogata dai due motori in modo da garantire che l'auto eroghi la potenza effettivamente richiesta dal guidatore.

Per il controllo si possono progettare strategie basate su regole deterministiche, composte da regole di controllo provenienti da risultati simulati o da esiti sperimentali: queste sono le più popolari nelle automobili attualmente in commercio. In alternativa si possono derivare delle strategie di controllo che sono ottimali, consentono cioè il consumo minimo per il prefissato percorso che si andrà ad effettuare. Purtroppo però questo tipo di controllo è irrealizzabile nella pratica perché non si hanno sufficienti informazioni a priori.

Per introdurre un controllo di tipo ottimale si è ricorsi a un'ottimizzazione in real time. Abbiamo chiamato questa strategia *Strategia del punto ottimo di funzionamento*. L'osservazione chiave che è stata fatta è che il consumo del motore termico non è proporzionale alla potenza erogata, ma bensì l'efficienza di questo motore assume valori diversi a seconda della coppia e della velocità angolare richiesta. Quindi i consumi di un automobile convenzionale dipendono esclusivamente dal punto operativo richiesto in quel momento. Abbinando questa osservazione con le potenzialità della tecnologia ibrida di immagazzinare nella batterie la potenza in eccesso, è stato sviluppato un nuovo schema per il controllo.

Esso prevede che il punto di lavoro richiesto al motore termico di un'auto convenzionale venga ora spostato in punto ad efficienza massima in un opportuno intorno di tolleranza. Questa idea, a meno dei limiti imposti dalla dimensione dell'intorno consentito, permette un impiego ottimo del motore termico minimizzando quindi i consumi in rapporto alla potenza effettivamente erogata.

Di conseguenza, se il motore termico eroga potenza in eccesso, essa viene immagazzinata nelle batterie tramite il funzionamento da generatore della macchina elettrica. Se invece il motore a combustione eroga potenza in difetto, essa viene compensata dal motore elettrico che attinge l'energia dalle stesse batterie.

Sulla base di queste osservazioni è stata implementata la strategia del punto ottimo di funzionamento con Matlab, e dopo aver trovato tutti i nuovi punti operativi del motore termico è stata disegnata la nuova mappa del motore.

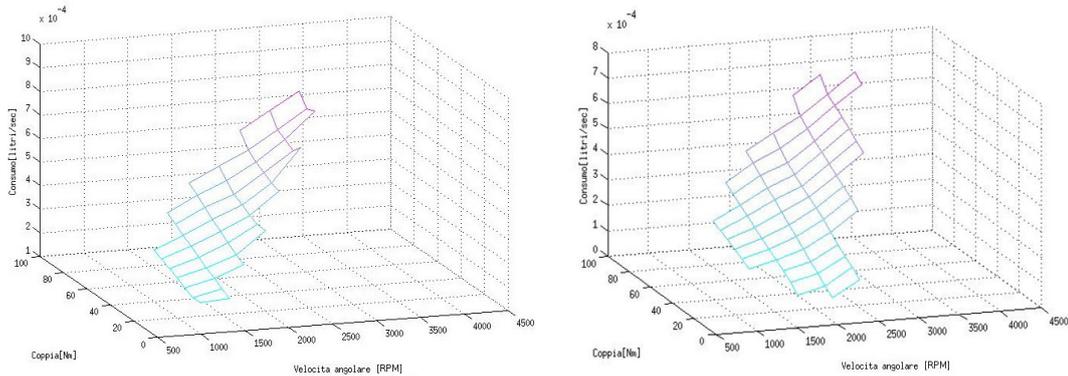


Figura 5.9: Confronto mappa del motore(sinistra) con la nuova mappa ottimizzata(destra)

Dal confronto è evidente che i punti di lavoro in corrispondenza di picchi di consumo sono stati del tutto eliminati. Infatti utilizzando il motore solamente nei punti ad efficienza massima, di sicuro il consumo non sta avendo un massimo relativo e quindi di sicuro abbiamo migliorato la sua efficienza in termini di consumo.

Inoltre appare evidente che i punti operativi a bassa potenza richiesta, ovvero quando coppia e velocità angolare sono abbastanza piccole, sono stati del tutto eliminati spostandoli a potenze maggiori. Questa osservazione ha due conseguenze principali: si deduce che nei tratti cittadini un'auto convenzionale consuma molto come ci si aspettava; ma a fronte della stessa osservazione si può anche dire che nel perfezionamento di questa strategia di controllo se lo stato di carica delle batterie lo consente, in un tratto cittadino il motore termico può venire spento completamente. Infine l'osservazione più importante è che nella nuova superficie, i punti a consumo massimo assumono valori sempre inferiori rispetto ai punti a consumo massimo della mappa originale. Questo è evidente soprattutto dal fatto che nella nuova mappa il consumo non super mai il valore $7 \cdot 10^{-4} l/sec$, valore nettamente inferiore a prima.

Queste osservazioni sono sufficienti a dimostrare che in ogni caso con la nuova caratteristica del motore riusciamo a fare meglio rispetto alla mappa originale in termini di consumi e dunque di emissioni.

L'ultimo aspetto che possiamo valutare per l'analisi del nuovo funzionamento del motore è l'andamento del *Rapporto di ripartizione della potenza* u_p . Osservando il suo andamento:

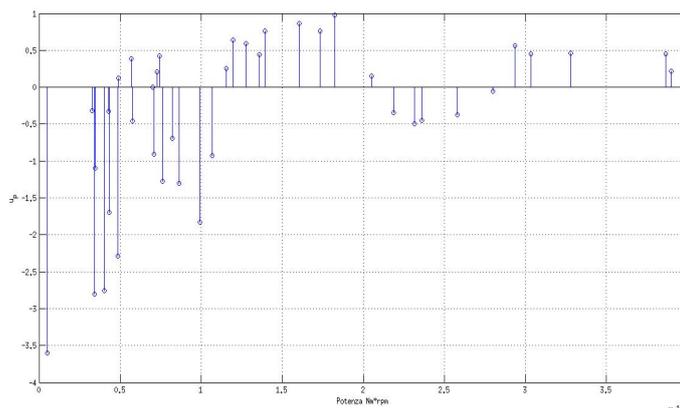


Figura 5.10: Andamento del rapporto di ripartizione della potenza

si può evidenziare il fatto che alle basse potenze richieste, esso è quasi esclusivamente negativo. Ciò significa che alle basse potenze P_{EM} è negativa, ovvero la macchina elettrica sta funzionando da generatore in accordo con quanto appena detto nei cicli cittadini. Man mano che la potenza richiesta dal guidatore aumenta esso diventa positivo e cresce sino a un valore circa uguale a 1. Nella parte a potenze medio-alte, u_p ritorna ad essere negativo, questo è in accordo con l'interpretazione che in quella zona l'efficienza torna ad avere un massimo e quindi il punto operativo viene spostato preferibilmente in questa zona facendo lavorare la macchina elettrica da generatore.

Infine è evidente che u_p converge al valore di circa 0,45 (ricordiamo che $\frac{P_{EM}}{P_{ICE}} \cong 0,45$); ciò significa che quando la potenza richiesta è elevata, cioè quando viene richiesta ad esempio una elevata accelerazione, il motore elettrico coopera alla propulsione erogando la sua massima propulsione e contribuendo a fornire circa il 50% della potenza totale.

Concludiamo ribadendo il fatto che il consumo dell'automobile e quindi le emissioni inquinanti sono senz'altro diminuite, mentre la potenza totale disponibile al conducente è aumentata. Il motore elettrico accompagnato da degli accumulatori è quindi in grado di aumentare l'efficienza del mezzo. Questi aspetti sono sicuramente ciò che rende la tecnologia ibrida la più avanzata nel settore dell'automotive al giorno d'oggi. Proponendosi come alternativa a breve termine per le vetture convenzionali a carburante fossile, introduce evidenti passi in avanti che possono temporaneamente sanare le problematiche di costo, approvvigionamento ed emissioni legate all'uso delle energie non rinnovabili.

Appendice A

Appendice - Codice Matlab

A.1 Codice Matlab che disegna la mappa dei consumi del motore termico

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%  
%% Costruzione della mappa del motore termico ICE%%  
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
%valori della velocita angolare omega (ascisse) rpm  
w=[ 1209.7      1577.3   1852.7   1210.7   1210.3   1292.7  
    1210.0   1210.0   2199.0   2388.7   1216.7   1211.3  
    1211.0   1718.7   3115.0   3206.0   2714.0   1647.3  
    1255.3   3397.0   2763.3   1730.3   1434.7   1211.7  
    1751.0   1753.0   2370.7   3938.3   1293.0   1456.3  
    1429.7   1817.0   986.7    1211.3   2079.7   2503.0  
    3005.0   3503.0   4009.0   ];
```

```
%valori della coppia (ordinate) in Nm  
c=[58.01      75.89    86.63    40.43    26.88    26.86  
   35.33    61.49    82.88    91.58    33.24    46.93  
   60.14    79.04    94.21    87.34    85.38    77.53  
   56.56    96.59    85.47    66.76    57.39    40.25  
   24.81    49.37    73.12    98.19    44.61    73.25  
   53.34    76.73    5.23     28.39    47.63    81.99  
   85.89    86.65    97.23   ];
```

```
%valori del consumo in litri/sec  
cons= [0.000187 0.00030 0.00041 0.00014 0.00011 0.00012  
       0.00013 0.00019 0.00044 0.00054 0.00013 0.00016  
       0.00019 0.00033 0.00073 0.00068 0.00055 0.00032  
       0.00019 0.00081 0.00056 0.00029 0.00021 0.00014
```

```

0.00015 0.00023 0.00042 0.00097 0.00017 0.00027
0.00021 0.00035 0.00035 0.00011 0.00027 0.00050
0.00062 0.00074 0.00098 ];

```

```

% Calcolo il massimo e il minimo valore di ascissa e ordinata:

```

```

wmin = min(w); cmin = min(c);
wmax = max(w); cmax = max(c);

```

```

% Definiamo la risoluzione della griglia:

```

```

wres=10;
cres=15;

```

```

% Definiamo il range e la spaziatura delle ascisse

```

```

%e delle ordinate, e memorizziamole in X e Y

```

```

xv = linspace(wmin, wmax, wres);
yv = linspace(cmin, cmax, cres);
[Xinterp, Yinterp] = meshgrid(xv, yv);

```

```

% Calcoliamo Z, interpolando X e Y

```

```

%(X e Y rappresentano una griglia equispaziata)

```

```

Zinterp = griddata(w, c, cons, Xinterp, Yinterp);

```

```

% Generiamo la superficie con il comando mesh

```

```

mesh(Xinterp, Yinterp, Zinterp)
colormap(cool(8))
xlabel 'Velocita angolare [RPM]';
ylabel 'Coppia [Nm]';
zlabel 'Consumo [litri/sec]';

```

A.2 Codice Matlab che disegna la mappa del rendimento del motore termico

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Costruzione della mappa del rendimento termico ICE%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

```

```

clc

```

```

%valori della velocita angolare omega (ascisse) rpm

```

A.2. CODICE MATLAB CHE DISEGNA LA MAPPA DEL RENDIMENTO DEL MOTORE TERMICO

```
w=[ 1209.7      1577.3  1852.7  1210.7  1210.3  1292.7
      1210.0  1210.0  2199.0  2388.7  1216.7  1211.3
      1211.0  1718.7  3115.0  3206.0  2714.0  1647.3
      1255.3  3397.0  2763.3  1730.3  1434.7  1211.7
      1751.0  1753.0  2370.7  3938.3  1293.0  1456.3
      1429.7  1817.0  986.7   1211.3  2079.7  2503.0
      3005.0  3503.0  4009.0  ];
```

%valori della coppia (ordinate) in Nm

```
c=[58.01      75.89  86.63  40.43  26.88  26.86
      35.33  61.49  82.88  91.58  33.24  46.93
      60.14  79.04  94.21  87.34  85.38  77.53
      56.56  96.59  85.47  66.76  57.39  40.25
      24.81  49.37  73.12  98.19  44.61  73.25
      53.34  76.73  5.23   28.39  47.63  81.99
      85.89  86.65  97.23  ];
```

%valori dell'efficienza termodinamica

```
eff=[0.3260  0.2861  0.3357  0.2579  0.2993  0.3357  0.3150  0.2616
      0.3030  0.2801  0.3312  0.2577  0.3030  0.3214  0.3364  0.3396  0.3455
      0.3519  0.3554  0.3486  0.2530  0.3241  0.3498  0.3372  0.3153  0.3616
      0.3576  0.3527  0.3594  0.3636  0.3642  0.3589  0.3513  0.3604  0.3509
      0.3545  0.3458  0.3442  0.3443];
```

% Calcolo il massimo e il minimo valore di ascissa e ordinata:

```
wmin = min(w); cmin = min(c);
wmax = max(w); cmax = max(c);
```

% Definiamo la risoluzione della griglia:

```
wres=10;
cres=15;
```

% Definiamo il range e la spaziatura delle ascisse

% e delle ordinate, e memorizziamole in X e Y

```
xv = linspace(wmin, wmax, wres);
yv = linspace(cmin, cmax, cres);
[Xinterp, Yinterp] = meshgrid(xv, yv);
```

% Calcoliamo Z, interpolando X e Y

```
Zinterp = griddata(w, c, eff, Xinterp, Yinterp);
```

```
% Generiamo il grafico di linee di livello con il comando contour
contour(Xinterp ,Yinterp ,Zinterp)
```

```
xlabel 'Velocita angolare [RPM]';
ylabel 'Coppia [Nm]';
zlabel 'Consumo [litri/sec]';
```

A.3 Codice Matlab che calcola i nuovi punti di lavoro

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% Costruzione della mappa del controllo %
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

clear all
clc
%valori della velocita angolare omega (ascisse) rpm
w=[ 1209.7      1577.3   1852.7   1210.7   1210.3   1292.7
    1210.0   1210.0   2199.0   2388.7   1216.7   1211.3
    1211.0   1718.7   3115.0   3206.0   2714.0   1647.3
    1255.3   3397.0   2763.3   1730.3   1434.7   1211.7
    1751.0   1753.0   2370.7   3938.3   1293.0   1456.3
    1429.7   1817.0   986.7    1211.3   2079.7   2503.0
    3005.0   3503.0   4009.0   ];

%valori della coppia (ordinate) in Nm
C=[58.01      75.89   86.63   40.43   26.88   26.86
   35.33   61.49   82.88   91.58   33.24   46.93
   60.14   79.04   94.21   87.34   85.38   77.53
   56.56   96.59   85.47   66.76   57.39   40.25
   24.81   49.37   73.12   98.19   44.61   73.25
   53.34   76.73   5.23    28.39   47.63   81.99
   85.89   86.65   97.23   ];

%valori del consumo in litri/sec
cons= [0.000187 0.00030 0.00041 0.00014 0.00011 0.00012
       0.00013 0.00019 0.00044 0.00054 0.00013 0.00016
       0.00019 0.00033 0.00073 0.00068 0.00055 0.00032
       0.00019 0.00081 0.00056 0.00029 0.00021 0.00014
       0.00015 0.00023 0.00042 0.00097 0.00017 0.00027
       0.00021 0.00035 0.00035 0.00011 0.00027 0.00050
       0.00062 0.00074 0.00098 ];
```

```
%Definiamo ora l'intorno di variazione della omega e della coppia
%entro il quale possiamo spostare il punto di lavoro

wvar= 500;
Cvar=10;
indici=zeros(39,2);

%creiamo la nuova mappa del motore minimizzando il consumo
% nell'intervallo di variazione della omega e della coppia definiti.

for i=1:length(w)

    %per ogni w,devo ricercare all'interno del suo possibil
    %e intervallo di variazione il corrispondente valore
    %della coppia che minimizza il consumo e inserisco gli
    %indici dei vettori in un nuovo vettore

    %scandisco il vettore della w in avanti
    j=1;
    n=1;
    indici(i,1)= i;
    indici(i,2)= i;
    while n>0
        k=i+j;

        if k > length(w)
            k=length(w);
            n=0;
        end

        soglia = w(i)+wvar;

        if soglia > w(39)
            soglia=w(39);
        end

        if w(k) < soglia
            indici(i,2)= k;

        else
```

```
        n=0;

    end
    j=j+1;
    k=i+j;

end

    %scandisco il vettore della w in indietro
    j=-1;
    n=1;
    while n>0

        k=i+j;
        soglia = w(i)-wvar;

        if k <= 0
            k=i;
            n=0;
        end

        if soglia < w(1)
            soglia=w(1);
        end

        if w(k) > soglia
            indici(i,1)= i+j;

        else
            n=0;

        end
        j=j-1;
        k=i+j;
    end

end

indici
```

```

%%%% A questo punto la matrice indici contiene
%%%% i range di valori delle omega su cui possiamo
%%%% far variare la coppia per minimizzare il consumo

%Adesso facciamo variare la coppia all'interno
%del suo range di variazione ammesso ed estraiamo
%l'indice del punto ottimo

%matrice degli indici che si riferiscono al punto ottimo
%in prima colonna c'è l'indice del minimo, in
%seconda colonna c'è il rispettivo consumo
minimi=zeros(39,2);

for i=1:length(w)
    for k=indici(i,1):indici(i,2)

        if k==indici(i,1)
            minimi(i,1)=indici(i,1);
            minimi(i,2)=cons(i);
        end

        if cons(k)<minimi(i,2)

            %controllo che la coppia sia nel range
            if C(i)-Cvar < C(k) <C(i)+Cvar

                minimi(i,1)=k;
                minimi(i,2)=cons(k);
            end

        end

    end

end

end

minimi

```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%Disegniamo ora la superficie relativa alla nuova mappa del motore

cont=0;

for i=2:length(w)

    if (minimi(i,1)~=minimi(i-1,1))
        cont = cont+1;
    end

end

wa=zeros(cont);
Ca=zeros(cont);
consa=zeros(cont);

for i=2:length(w)

    if (minimi(i,1)~=minimi(i-1,1))
        w(i)=w(minimi(i,1));
        C(i)=C(minimi(i,1));
        cons(i)=cons(minimi(i,1));
    end
end

% Calcolo il massimo e il minimo valore di ascissa e ordinata:
wmin = min(w); cmin = min(c);
wmax = max(w); cmax = max(c);

% Definiamo la risoluzione della griglia:
wres=10;
cres=15;

% Definiamo il range e la spaziatura delle ascisse
% e delle ordinate, e memorizziamole in X e Y
xv = linspace(wmin, wmax, wres);
yv = linspace(cmin, cmax, cres);
[Xinterp, Yinterp] = meshgrid(xv, yv);

```

```
% Calcoliamo Z, interpolando X e Y
% (X e Y rappresentano una griglia equispaziata)
Zinterp = griddata(w,c,cons,Xinterp,Yinterp);
```

```
% Generiamo la superficie con il comando mesh
mesh(Xinterp,Yinterp,Zinterp)
colormap(cool(8))
xlabel 'Velocita angolare [RPM]';
ylabel 'Coppia [Nm]';
zlabel 'Consumo [litri/sec]';
```

A.4 Codice Matlab che calcola il coefficiente di controllo u_p

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%% Calcolo del coefficiente di controllo u_p%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```
clc
load risultati
```

```
%valori della velocita angolare omega (ascisse) rpm
w=[ 1209.7      1577.3   1852.7   1210.7   1210.3   1292.7
    1210.0   1210.0   2199.0   2388.7   1216.7   1211.3
    1211.0   1718.7   3115.0   3206.0   2714.0   1647.3
    1255.3   3397.0   2763.3   1730.3   1434.7   1211.7
    1751.0   1753.0   2370.7   3938.3   1293.0   1456.3
    1429.7   1817.0   986.7    1211.3   2079.7   2503.0
    3005.0   3503.0   4009.0   ];
```

```
%valori della coppia (ordinate) in Nm
c=[58.01      75.89    86.63    40.43    26.88    26.86
   35.33     61.49    82.88    91.58    33.24    46.93
   60.14     79.04    94.21    87.34    85.38    77.53
   56.56     96.59    85.47    66.76    57.39    40.25
   24.81     49.37    73.12    98.19    44.61    73.25
   53.34     76.73     5.23    28.39    47.63    81.99
   85.89     86.65    97.23   ];
```

```
%valori del consumo in litri/sec
cons= [0.000187 0.00030 0.00041 0.00014 0.00011 0.00012
```

```

0.00013 0.00019 0.00044 0.00054 0.00013 0.00016
0.00019 0.00033 0.00073 0.00068 0.00055 0.00032
0.00019 0.00081 0.00056 0.00029 0.00021 0.00014
0.00015 0.00023 0.00042 0.00097 0.00017 0.00027
0.00021 0.00035 0.00035 0.00011 0.00027 0.00050
0.00062 0.00074 0.00098 ];

```

```

% Calcolo del coefficiente u_p=P_EM/(P_EM+P_ICE)
%NOTA: w_req*C_req=P_req e' la potenza totale richiesta ,
%P_re=P_tot=P_EM+P_ICE
% w*C=P_eff e' la potenza effettivamente erogata dal
%motore termico

u_p=zeros(39,1);

for i=1:39
    u_p(i)= (w_req(i)*C_req(i)-w(i)*C(i))/(w_req(i)*C_req(i));
end

%disegniamo un grafico dell'andamento del coefficiente u_p in
%funzione della potenza richiesta al mezzo

pot=zeros(39,1);
for i=1:39
    pot(i)=w_req(i)*C_req(i);
end

stem(pot , u_p)
%plot(pot , u_p , 'o')
xlabel('Potenza Nm*rpm')
ylabel('u_p')
grid on

```

Bibliografia

- [1] L.Guzzella A.Sciarretta, *Vehicle Propulsion Systems second edition*, Springer, Giugno2007.
- [2] Lijun Gao, Shengyi Liu, R. A. Dougal, *Dynamic lithium-ion battery model for system simulation*,IEEE Technologies vol. 25, issue 3,sept 2002.
- [3] S. Barsali, M. Ceraolo, *Dynamical models of mead-acid batteries: implementation issues*, IEEE Transaction on Energy Conversion vol. 17, jan 2008.
- [4] N. H. Kutkut, H. L. N. Wiegman, D. M. Divan, D. W. Novotny, *Charge equalization for an electric vehicle battery system*, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 34, issue 1, march 2002.
- [5] Chris Mi, M. Abul Masrur and David Wenzhong gao, *Hybrid Electric Vehicles*, Wiley, march 2011.
- [6] J.oon-II, J.Sung-Tae, P.Yeong-II, J.M.Lee, *Multi-mode driving control of a parallel hybrid electric vehicle*, IEE Colloquium on Machines and Drives for Electric and Hybrid Vehicles vol.124 n.1, pp.141-149, ottobre 2003.
- [7] Amir Poursamad, Morteza Montazeri, *Design of genetic-fuzzy control strategy for parallel hybrid electric vehicles*, Control Engineering Practice, October2007
- [8] C. Holder, J. Gover, *Optimizing the hybridization factor for a parallel hybrid electric small car*, IEEE Vehicle Power and Propulsion (VPPC) Conference, sept 2006.
- [9] A. E. Corbett, C. Mellors, *Hybrid electric machines*, IEEE Colloquium on Machines and Drives, jun 1996.
- [10] M. Ehsani, K. M. Rahman, H. A. Toliyat, *Propulsion system design of electric and hybrid vehicles*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, feb 1997.
- [11] J. M. Miller, *Power electronics in hybrid electric vehicle applications*, PEC 2003, IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition, 2003.
- [12] M. Zeraoulia, M. E. H. Benbouzid, D. Diallo, *Electric motor drive selection issues for HEV propulsion systems: a comparative study*, IEEE Transaction on Vehicular Technology, nov 2006.

- [13] J.Larminie, J.Lowry, *Electric vehicle technology explained*, Wiley, 2003.
- [14] S.Delprat, T.M.Guerra, G.Paganelli, J.Lauber, M.Delhom, *Control strategy optimization for an hybrid parallel powertrain*, American Control Conference, maggio 2011.
- [15] G.Paganelli, T.Guerra, S.Delprat, M.Delhom, E.Combes, *Simulation and Assessment of Power Control Strategies for a Parallel Hybrid Car*, Journal of Automobile Engineering, ottobre 2000.
- [16] John Miller, *Propulsion system for hybrid vehicles*, Edison, 2009.
- [17] S.Delprat, J.Lauber, T.M.Guerra, J.Rimoux, *Control of a parallel hybrid powertrain: optimal control*, IEEE Transaction on Vehicular Technology, maggio 2010.
- [18] S.Delprat, T.M.Guerra, J.Rimoux, *Optimal control of a parallel powertrain: from global optimization to real time control strategy*, Vehicular Technology Conference, 2011.
- [19] C.Grelle, L.Ippolito, V.Loia, P.Siano, *Agent-based architecture for designing hybrid control systems*, Vehicular Information Sciences, vol. 176, n.8, pp.1103-1130, 2010.

Webgrafia

- [20] http://it.wikipedia.org/wiki/Veicolo_ibrido
- [21] http://it.wikipedia.org/wiki/Auto_elettrica
- [22] http://www.toyota.it/cars/new_cars/prius
- [23] http://it.wikipedia.org/wiki/Auto_ibrida_elettrica_plug-in
- [24] http://www.bsim.it/prodotti_3.html
- [25] http://www.trasporto.europa.it/index.php?option=com_content&view=article&id=2344&catid=9:autotrasporto
- [26] <http://www.hybrid-synergy.eu/>
- [27] http://ec.europa.eu/transport/strategies/facts-and-figures/all-themes/index_it.htm
- [28] http://it.wikipedia.org/wiki/Trasporti_negli_Stati_Uniti_d'America

- [29] <http://www.dot.gov/>
- [30] <http://udini.proquest.com/view/modeling-and-optimal-control-of-goid:762384010/>
- [31] <http://web.missouri.edu/~suppesg/Technology.htm>
- [32] http://www.ehow.com/info_8759241_differences-between-series-parallel-hevs.html
- [33] <http://www.atzonline.com/index.php;do=show/site=a4e/sid=113011788350098a2283744026681251/alloc=3/id=7992>